

NUEJ

NARESUAN

UNIVERSITY ENGINEERING JOURNAL

July – December 2018 Vol.13 No.2
ISSN 2651-1568



กองบรรณาธิการวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	แย้มเม่น	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ศรินทร์ทิพย์	แทนธานี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.อุรุยา	วีสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนมขวัญ	ริยะมงคล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
-------------------------------	----------	-------------------------------------

รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์	เจริญสุวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ธณิกานต์	ธงชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ดร.จิรวดี	ผลประเสริฐ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.สุรพล	นาตเนียล เจริญสุข	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	มุณีสว่าง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ศาสตราจารย์ ดร.จันทพร	ผลากรกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประดิษฐ์	เทอดทูล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.วินดา	จินศาสตร์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.วริทธิ์	อิงภากรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์	บุญอำนวยวิทยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.วัฒนวงศ์	รัตนวราห์	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์	ฤทธิเดช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ	จักรใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.อนินันท์	ธนะยานนท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.อิสระชัย	งามหุ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
Professor Christian	Hicks	Newcastle University United Kingdom
รองศาสตราจารย์ ดร.กำชัย	นัยนิติกุล	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.กุลยา	กนกजारูจิตตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมราช	วันทวิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงพล	กาญจนชูชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์	ธีรอำพน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ	ชุ่มฤทธิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท	เจริญใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.พวงรัตน์	ขจิตวิษยานุกูล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.มัทนี	สงวนเสริมศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ยศชนัน	วงศ์สวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร	วุฒิสถิธิกุลกิจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์	โพธิ์เงิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วัสสนัย	วรรณจรรย์ยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิระสิทธิ์	อิมถวิล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สงวน	ปัทมธรรมกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร	โกคา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ	ชื่นชูกลิ่น	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สมร	หิรัญประดิษฐกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	แย้มเม่น	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์	กิระวิทยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย	ฤตวิรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
Assoc.Prof.Dr. Vo Ngoc	Dieu	Ho Chi Minh City University of Technology Vietnam
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แก้กัณยา	สุดประเสริฐ	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เมธี	บุญพิเชษฐวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

NUEJ

Naresuan University
Engineering Journal

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉันทดา	พรรณเชษฐ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปจรรย์	ทองสนิท	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนัส	นัถฤทธิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์	พงษ์เจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวรรณ	พลพิทักษ์ชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์	วรรณฤมล กิเยลาโรว่า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.สสิกรณณ์	เหลื่องวิซขเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.พิสุทธิ์	อภิขยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
Dr. Sasidharan	Sreedharan	University of Hawaii USA
Dr. Ivan	Lee	School of Information Technology and Mathematical Sciences University of South Australia

สารบัญ

Research Articles

The Effect of Ammonium Sulphate on Fire Retardancy and Thermal Decomposition Mechanism of Rubberwood by LOI and TGA/DTG A. Chanpirak.....	1
Probabilistic Deterioration Prediction of Prestressed Concrete Bridge Girder in a Chloride Environment K. Sukprasit, P. Sancharoen and S. Tangtermsirikul.....	10
CFD Analysis of the Slippage Effects on Elastohydrodynamic Lubrication in Line Contact Problem S. Srirattayawong and R. Aungkurabrut.....	19
Effects of Stack and Heat Exchanger Configurations on Thermal Performance of a Thermoacoustic Refrigerator W. Kamsanam, R. Aungkurabrut and F. Jinuntuya.....	26
การปรับพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง Single Phase Transformer Parameter Modification by Central Composite Design Method เดือนแรม พ่างเกี้ยว และ สมพร เรืองสินชัยวานิช D. Phaengkiao and S. Ruangsinchaiwanich.....	35
การตรวจจับและจำแนกความผิดปกติของตัวนำโรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยฟัซซีลอจิกและโครงข่ายประสาทเทียม Detection and Classification of Rotor broken bar Faults in Induction Motor Using Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks เกรียงศักดิ์ ไกรกิจราษฎร์ และ สมพร เรืองสินชัยวานิช K. Kraikitrat and S. Ruangsinchaiwanich.....	44
เกณฑ์การคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมในการก่อสร้างสถานีขนส่งสินค้าในประเทศไทย โดยใช้วิธี Analytic Hierarchy Process (AHP) The Determination Criteria of Appropriate Location for The Construction of Truck Terminal in Thailand By using Analytic Hierarchy Process (AHP) ดุชนันท์ สติระเศรษฐทวี, รัชสรรค์ สุวรรณห้อย, ทรงยศ กิจธรรมเกษร และ สติกรณณ์ เหลืองวิชชเจริญ D. Satirasetthavee, R. Suwannahoi, S. Kitthamkesorn and S. Leungvichcharoen.....	54

สารบัญ

Research Articles

การจดจำวัตถุจากการสัมผัสของหุ่นยนต์เสมือนมนุษย์ด้วยวิธีการประมวลผลภาพจากการสัมผัสร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม Object Recognition for Humanoid Robot using Tactile image processing and Artificial Neural Network สมชาย เปาะทองคำ และ จักรี ศรีนนท์ฉัตร S. Pohtongkam and J. Srinonchat.....	66
การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ Engineering Economic Value Analysis of Interlocking Block Pilot Plant Using Mae Moh Power Plant Bottom Ash สุวิทย์ สายสุนทราวิชญ์ และ นิวิธ เจริญใจ S. Saisuthanawit and N. Charoenchai.....	80
การพัฒนากระบวนการหาจุดเริ่มวิบัติในการวิเคราะห์รอยแตกในมวลหินด้วยวิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กิน Development of Crack Initiation Algorithm in Crack Analysis of Rock Mass by Element Free-Galerkin Method เอกราช ศิลำบำเพ็ญ, พรเกษม จงประดิษฐ์, อภิวิชญ์ ทองรักษา และ จักรารุณ ต้นสกุล E. Silabampen, P. Jongpradist, A. Thongraksa and J. Tunsakul.....	99
การศึกษาการจำแนกประเภทและการหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่จากความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพานโดยใช้ แบบจำลองย่อส่วน A Study of Classification and Weight Determination of Moving Truck from Dynamic Bridge Strain by Using Scaled Model” ศุภชัย เชื้อเกตุ และ พัทธพงษ์ อาสนจินดา.....	111
การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสด ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก The Assessment of Life Cycle Greenhouse Gas Emissions for the Fresh Rice Noodles in Amphoe Muang Phitsanulok Province สุชาติา อยู่แก้ว และ เมธิณี บุญสูง S. Ukaew and M. Bunsung.....	131

สารบัญ

Research Articles

การกระจายของรากพืชในพื้นที่ดินถล่ม ลุ่มน้ำแม่พ่อง-แม่พูล บ้านผามูบ อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ Root Distribution in Landslide Area, Mae Phrong-Mae Phun Watershed, Uttaradit Province มรรษมนต์ เอกจิต, วรากร ไหมเรียง, บรรพต กุลสุวรรณ และ มณฑล แผนสทาน M.Akejit, W.Mairaing, B.Kulsuwan and M.Pansatan.....	156
การศึกษาผลของมวลรวมหยาบชนิดต่างๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต A study on the effect of different types of coarse aggregates on the shrinkage behavior of concrete ชำนาญ น้อยพิทักษ์, สรัณกร เหมะวิบูลย์, สนธยา ทองอรุณศรี และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล C. Noipitak, S. Hemavibool, S. Tongaroonsri and S. Tangtermsirikul.....	168

วัตถุประสงค์

วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร เป็นวารสารที่มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดสรรผลงานวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทรรศน์ที่มีคุณภาพโดยผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสาร และทำการเผยแพร่เพื่อนำเสนอแนวคิด นวัตกรรม และผลงานวิจัยใหม่ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีเนื้อหาครอบคลุม เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในสาขาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สาขาวิศวกรรมวัสดุ และสาขาวิศวกรรมเคมี อีกทั้งยังรวมถึงงานวิจัยที่มีการบูรณาการศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีในสาขาอื่นๆ เช่น สาขามechatronics เทคโนโลยีพลังงาน เทคโนโลยีการออกแบบและการผลิต การจัดการด้านอุตสาหกรรม และวิศวกรรมทางการแพทย์ เป็นต้น ทั้งนี้วิศวกรรมสารรับตีพิมพ์ต้นฉบับผลงานทั้งในรูปแบบภาษาอังกฤษและภาษาไทย

นโยบาย

วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร เป็นวารสารที่มีกระบวนการพิจารณาบทความประเภท Double-blind peer review จากผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน เพื่อคัดสรรบทความที่มีคุณภาพลงตีพิมพ์ในวารสาร โดยมีกำหนดการออกเผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน และฉบับ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม สำหรับเงื่อนไขในการพิจารณาบทความ ทางกองบรรณาธิการของวารสารฯ จะพิจารณาเฉพาะผลงานที่ไม่เคยเสนอหรือกำลังเสนอเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการใดมาก่อน หากงานวิจัยใดมีความเกี่ยวข้องกับมนุษย์หรือสัตว์ทดลอง วารสารฯ จะรับพิจารณาเฉพาะบทความที่มีหลักฐานยืนยันว่าโครงการวิจัยดังกล่าวได้ผ่านการรับรองเชิงจริยธรรมจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลองแล้วเท่านั้น สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ เจ้าของผลงานนิพนธ์ต้องแสดงให้เห็นว่าผู้เข้าร่วมการทดลองได้รับทราบข้อมูลและตัดสินใจเข้าร่วมการทดลองด้วยความสมัครใจ

ทั้งนี้การอนุมัติให้ลงตีพิมพ์ขึ้นอยู่กับผลการพิจารณาจากกองบรรณาธิการวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งถือเป็นขั้นสุดท้าย

การส่งบทความ ผู้เขียนบทความจะต้องสมัครสมาชิกในระบบและส่งบทความในรูปแบบ Microsoft Word, PDF หรือ Latex
มายัง URL: <https://www.tci-thaijo.org/index.php/nuej>

พร้อมด้วยส่ง NUEJ Form ซึ่งประกอบไปด้วย

1. แบบฟอร์มการจดลิขสิทธิ์ (NUEJ Copyright Form)
2. แบบฟอร์มการส่งบทความ (NUEJ Submission Form)
3. แม่แบบวิศวกรรมสาร (NUEJ Template)

ที่อยู่กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000

โทร. 055-963951 โทรสาร. 055-964000

E-mail : nuej@nu.ac.th

บทบรรณาธิการ

วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร ภายใต้การสนับสนุนของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร มีความมุ่งมั่นที่จะเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการอย่างต่อเนื่องและมีคุณภาพ และจะยกระดับวารสารให้เป็นที่ยอมรับในระดับสากลต่อไป เพื่อให้เกิดโอกาสการนำบทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในวารสารไปใช้ประโยชน์มากขึ้น

กองบรรณาธิการขอขอบคุณ คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ช่วยกลั่นกรองผลงาน และขอขอบคุณทีมงานที่ทำให้วารสารฉบับนี้มีความสมบูรณ์พร้อมเผยแพร่ มา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนมขวัญ ริยะมงคล

บรรณาธิการ

วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร

The Effect of Ammonium Sulphate on Fire Retardancy and Thermal Decomposition Mechanism of Rubberwood by LOI and TGA/DTG

Arphaphon Chanpirak

Division of Chemical Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University
E-mail: arphaphonc@nu.ac.th

(Received: June 12, 2017, Revised: December 18, 2017, Accepted: September 17, 2018)

Abstract

The objective of this research was to investigate the effect of ammonium sulphate (AS) contents having concentration of 0-30 % wt impregnated on rubberwood. For this purpose, thermal degradation mechanism of samples was characterized by thermogravimetric analysis under air whereas the flammability test was applied using limiting oxygen index (LOI) and, reachability was carried out according to JIS K 1571. From TGA/DTG, the impregnation of rubberwood with AS was able to shift the decomposition temperature to the lower side temperature (215 °C) and reduced the degradation rate from 11.48 to 5.45 % °C⁻¹, and the decomposition range of modified wood was wider than unmodified wood. The concentration levels of AS fire-retardant agent affect to change the degradation reaction of wood as a positive effect in term of a high residual weight, a low weight loss, a low initial temperature. The weight residue at 600 °C are found to increase from 0.82 to 3.23 % . Especially, The LOI values of all impregnated samples with AS are classified as self-extinguishing rubberwood, and LOI increased from 26 to 42. This is indicated that the AS impregnation improves the fire retardant property of rubberwood. In addition, the leaching of AS from samples was in range 3-4 % indicated that the good fixation of AS in wood structure. Consequently, rubberwood impregnated with AS can be used as a material where fire retardancy is required.

Keywords: Rubber wood material, leachability, fire retardancy, ammonium sulphate, LOI, TGA/DTG

1. INTRODUCTION

The rubberwood (*Hevea brasiliensis*) is an economically important product of Asia. More than 80 % of total rubber plantation areas are in Asia and accounts for about 30 % of all timber product exports in Malaysia and 60 % in Thailand [1]. Especially, the rubberwood is expected to maintain a high share of wood product exports together with wood from other forest plantations. In addition, it is beautiful and uniform color (white to pale yellow tint), good machining properties, acceptable durability, pleasant appearance and ease in finishing. Furthermore, the physical and mechanical properties of rubberwood are almost comparable with the other commercial timber density 640 kg/m³ and side hardness 4320 such as Dark Red Meranti (*Shorea platyclados*), Sepetir, Nyatoh and Ramin [2]. Although rubberwood is a material with many advantages for residential and non-residential construction, there are still treasures the disadvantages. One of the limitations of wood is the flammable material which be destroyed under the right conditions by heat enough [3]. When heating wood, the wood burning cycle start to hydrolyze, oxidize, dehydrate, and pyrolysis forming a mixture of volatiles (flammable

gases/non-flammable gases), tarry compounds, char and heat releases, and heat must be transferred back to the system until the raw material runs out. Certainly, this situation would cause injuries and accidents. Therefore, the development for fire-retardant wood should drive for safety material. A number of scientists have investigated the reduction of fire performance of wood as ignitability, heat release and the spread of flames with chemical [4, 5].

To reduce the flammability of the wood, chemical agents are loaded into wood structure can lead to modifies the reaction mechanism and pyrolysis product during burning to delay or even extinguish the combustion [6]. Therefore, the investigation on the pyrolysis process of wood treated with fire retardants can help to understand the mechanism of fire retardant efficiency. This above-mentioned chemical is defined as fire retardant. Furthermore, the effective in producing flame retardancy (FR) of treated woods will depend on the type of chemicals, the weight percent gain of chemical, the species of the wood and the impregnated processes. There are researchers previously have been studied various chemical agent to improve the flame retardancy of wood such as inorganic salts, borax, boric acid, monoammonium

phosphate, diammonium phosphate, zinc chloride, ammonium sulphate [7, 8].

Ammonium sulphate (AS) is one of the most effective fire retardants. Mostashari *et al.* [9] investigated the effect of AS treated cotton fabric on the thermal degradation by TGA. They found that the incorporation of AS influenced the decrease of flammable volatiles by shifting first decomposition temperature and more char formation during a heating process which occurred in accordance with gas dilution theory and chemical action theory. The char may act as a thermal barrier, reducing heat transfer to the interior of the material and, thereby, inhibiting the rate of decomposition. It was reported in the literature that the effect of AS on flame retardant of rayon fiber from bamboo wood [10], fir wood [11], sugar-cane bagasse [12], cellulose [13], *Pinus halepensis* needles and their main components (cellulose, lignin and extractives) [14]. Maoshen Chen *et al.* [15] studied the thermal behavior of reconstituted tobacco sheet treated with ammonium salts. Moreover, Statheropoulos and Kyriakou [16] presented that AS release sulfuric acid and NH_3 upon heating at about 284 °C, and sulfuric acid act as a catalyst for the dehydration reaction and promotion of charring and NH_3 act that inhibits gas phase combustion. José Pérez *et al.* [17] has concluded that AS is widely used as a fertilizer or as a fertilizer component. This is the principal components of the powder material utilized in multipurpose of fire extinguishers [18]. The toxicity and eco-toxicity safety data for AS show the chemical agent to be harmless with an acute toxicity: $\text{LD}_{50} > 2800 \text{ mg/kg (rat)}$ [19]. However, the effects of AS impregnated rubberwood on the thermal degradation during pyrolysis have not yet been extensively investigated to use in wood construction. Therefore, the main compound in the FR agent used in this study is AS. Finally, one limitation of use for AS impregnated wood is unstable in contact with water or humidity during using terms [20]. For these reasons, it is necessary to report results of leachability concerning the effects of such treatments on AS fixation in rubberwood in this study.

For evaluating the effectiveness of wood and wood based materials on the fire performance and thermal properties, there are various method with bench-scale test and large-scale test for research purposes and fire safety classifications for end-utilizations [21]; such as TGA [22], cone calorimetric [23], fire tube test, lateral ignition, tunnel flame-spread tests, LOI tests [24], smoke production tests, flame spread test (LIFT), the single burning item test. Especially, TGA provides a good method for screening the fire retarding effectiveness of several chemicals [25]. LOI measurement has been developed to determine of the relative flammability of wood and the low oxygen index level means that highly flammable materials [26]. A number of scientists have confirmed a suitable and precise indicator of the relative flammability of wood by using LOI value [6, 8, 24, 27].

Both TGA and LOI require a small size that is a simple, convenient and fast method for research purposes [24].

In this research is directed towards investigating the effect of ammonium sulphate with various concentrations of impregnated rubberwood samples on the thermal degradation mechanisms from thermogravimetric analysis and differential thermal analysis techniques. The next stage of investigation uses a LOI value to determine the flammability properties of rubberwood impregnated with AS as well as the leachability of AS was studied.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Materials

The rubberwood lumbers were obtained for this experiment from commercially produced flat sawn lumber supplied by a local sawmill in Thailand. Samples were carefully chosen for having the same annual ring. The rubberwood timbers were kiln dried at 60 °C and thereafter conditioned to stable moisture content (MC) and then it was machined into samples with the dimensions of 100 (longitudinal) x 10 (tangential) x 7 (radial) mm which were selected by the criteria of similar weight ($\pm 0.0001 \text{ g}$). The rubberwood specimens in this study average density 0.7428 kg/m^3 . Before impregnation, the wood samples were dried in oven at temperature of 105 °C for 24 h, and then keep into desiccator for two weeks and weighted. Ammonium sulphate ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ($\geq 98 \%$ purity)) was purchased from Ajax Finerchem. Various concentrations (%wt) of AS powder (1, 5, 10, 20, 25 and 30 %) were prepared using diluted water before use.

2.2 Impregnation of rubberwood samples

Wood samples were immersed by vacuum-pressure method according to the principals of ASTM D 1413-07 (2007) with the aqueous solutions at 600 mm/Hg for 60 min by vacuum pump [28, 29]. Afterwards, wood samples were removed from the chamber and shake off lightly to make sure the excess solution left on the surface of woods. After the treatment, all the wood specimens were dried until unchangeable weight at 60 °C. Weight percentage gain (WPG) of each condition shown in Table 1 was measured according to Equation (1) as previously mentioned in other studies [30]:

$$\text{WPG}(\%) = (W_2 - W_1) / W_1 \times 100 \quad (1)$$

where W_1 is oven-dried weight of wood sample before impregnation (g), W_2 is oven-dried weight of wood sample after impregnation (g).

2.3 Leaching of treated wood specimens

Procedure Leaching test was conducted according to o Japanese Industrial Standard (JIS) K 1571 (JIS, 2004) and Chinese National Standard 6717 (2000) [31, 32]. The procedure involves immersing the five specimens per run in a 1,000 ml beaker containing 400 ml distilled water

added in a ratio of 10 volumes of water to 1 volume of wood, stirring with a shaker follower (400–450 rpm) at 27 °C for 8 h, followed by drying for 16 h and then the specimens were stored in desiccator. The percentages of leaching the AS impregnated samples (%L) were calculated from the oven-dried weight of impregnated wood before and after leaching according to the following equation:

$$\%L = (W_2 - W_3) / W_2 \times 100 \quad (2)$$

where W_2 is oven-dried weight of wood sample after impregnation (before leaching) (g) and W_3 is the oven-dried weight of impregnated wood after leaching (g).

2.4 Limited oxygen index (LOI) measurements

The LOI value was defined fire performance of wood samples as the minimum percentage of oxygen for retaining flaming combustion of each sample under test conditions. LOI measurements of samples were carried out by using a Stanton Red Croft instrument, which is vertical burning test. It was applied for evaluation of LOI in accordance with ASTM D2863-10 [33]. The sample is placed with the holder in a gas mixture of oxygen/nitrogen and adjusting the amount of oxygen until flaming combustion of the sample for 2 inches or 3 minutes after the removal ignition source. The five replicate measurements were observed for each value, with relative standard deviation (RSD) lower than 1 %.

2.5 Thermogravimetric analysis

Thermogravimetric analysis (TGA) was carried out on a thermogravimetric analyzer (TGA-50, Shimadzu). The temperature ranged from room temperature to 600 °C at a heating rate of 10 °C/min with a flow of air atmosphere at 20 mL/min. The sample weight was tested about 10 mg [34-36].

TGA is a common technique in which is monitored continuously the weight change of studied samples with temperature change [26]. The components of the sample decomposed with increasing temperature. TGA is used in determining thermal performance, degradation temperature, moisture content of materials, the levels of compounds in material and amount of residue [26, 36]. This leads to characterize materials containing additives at different levels and evaluate the effectiveness of additives (flame retardant). TGA could be observe the effect of degradation during the process in both inert and oxidative conditions [12, 34-38]. In this study, the air was chosen for purge gas in run for two reasons. The first reason is that to study the decomposition behavior of our materials and to evaluate the effectiveness of flame retardant in

improving the fire performance in the functional environment [37]. Secondly, due to the degradation of fire retardants containing material in oxidative shows more difference than in inert condition of weight loss during a heat change as previous research [34, 37].

3. RESULTS

3.1 Weight percentage gain (WPG)

Weight percentage gains are used widely for calculation to evaluate the amount of chemical substance impregnated in the wood structure after treatment [39]. This value has to be considered fixed solid in the wood matrix with monitor before and after weight of wood in treatment process [30]. The WPG were consorted with what claimed for modified wood with chemical. The WPG for each concentration of wood impregnation at ambient temperature are reported in Table 1. The WPG in wood samples increase linearly with the increment of AS concentration. The highest increment of WPG depending on the concentrations was observed on AS treated wood samples as follows the WPG was founded 9.62 at 30 % concentrations. This indicates that the impregnated AS was fixed in the wood matrix. The amount of chemical interrupts thermal degradation of material, thus this increase is a measure of fire retardant [40]. However, At the AS concentration of 1 %, the retained WPG is -0.21 that may be due to diffuse some water-soluble wood extractives and degraded wood components during impregnation process. Therefore, in this study was exposed 5-30 % AS concentration to focus the influence of the AS agents into the wood.

3.2 Leachability

Table 1 shows the percentages of leaching the AS impregnated rubberwood samples (%L) along with standard deviations. %L of all treated samples after leaching test was found in the range 3-4 %, which means there is the mass loss inside wood sample during test due to the AS flame retardants are water-soluble salt [41]. Amount of leachant increased slightly in treated samples as the loading of AS fire-retardant inside wood increased, likely as a result of better AS fixation when the wood was treated with higher concentrations of fire-retardants. A possible explanation might be that the mass loss of treated wood could be related to removal of excess AS fire-retardant or temporary fixed AS fire-retardant. However, it can be observed from Table 1 that the among of AS almost were able to be fixed into wood structure which

confirmed that AS was an effective flame retardant for wood samples under humidity condition.

Table 1 Weight percentage gain, leachability and LOI of non-impregnated and impregnated wood samples with AS

Code samples	Concentration of (NH ₄) ₂ SO ₄ (% wt)	Weight percent gain ^a (%)	L ^a (%)	LOI (%)
RB0	0	-	-	22.8
RBAS1	1	-0.21 (0.35)	-	-
RBAS5	5	2.15 (0.56)	2.88 (0.50)	27.8
RBAS10	10	5.39 (0.70)	3.08 (0.22)	30.0
RBAS20	20	8.12 (1.79)	3.60 (0.96)	33.0
RBAS25	25	8.37 (1.33)	3.51 (0.75)	37.0
RBAS30	30	9.62 (0.66)	4.37 (1.26)	41.7

a: Each value is an average of 10 specimens and the values in the parentheses are standard deviations.

3.3 Thermal decomposition mechanism

Thermo-oxidative decomposition of tested wood was characterized employing thermal analysis. The results of thermogravimetric analysis for rubberwood samples before and after impregnated with AS 10-30 %wt were carried out in air atmosphere from ambient temperature to 600 °C, are presented by TGA curves and their first derivatives (DTG) in Fig. 1 and 2, respectively, and are summarized in Table 2.

Thermal analysis curves of the untreated rubberwood (Fig. 1 and 2) shows three stages of thermal degradation. It was in agreement with the results reported in the literature for degradation of wood [37, 42]. At below 100 °C, the mass loss of the untreated rubberwood in the evaporating stage is resulted from evaporation of moisture. The thermal decomposition of rubberwood mainly occurs in the range 215-512 °C with two distinguishable weight loss zones and the final residue is 0.82%, which is due to the ash content [35]. The main decomposition starts at around 215 °C with a low conversion rate. Then the decomposition rate increases rapidly from around 250 °C to the devolatilization peaks (11.8 % °C⁻¹) at 323 °C from which the rate decreases quickly, down to 1.9 % °C⁻¹ at around 360 °C. This marks the end of the devolatilization and the beginning of the char combustion, which has much lower rates than the devolatilization. This stage is related the thermal decomposition as the combustion and char transformation overlap in the ranges where the volatiles are released. The known decomposition temperature range is approximately 200–375 °C for hemicellulose and

cellulose, which are the two major wood compounds [43]. Furthermore, there is a clear shoulder in the devolatilization stage of the untreated rubberwood. This can be due to the fact that hardwood (rubberwood) have the high hemicelluloses content that usually contains more xylan than softwood. It is the most reactive compound in this temperature range [44]. In the second peak (the char combustion stage) may be attributed to the degradation of lignin and occurs continuously char oxidation [45]. The peak at 450 °C between 375 and 500 °C and the char combustion rate peak (-3.8 % °C⁻¹) are due to oxidation of carbonaceous residues within inorganic solid particles (without volatiles) [44]. The temperature range was in agreement with previous literature [43].

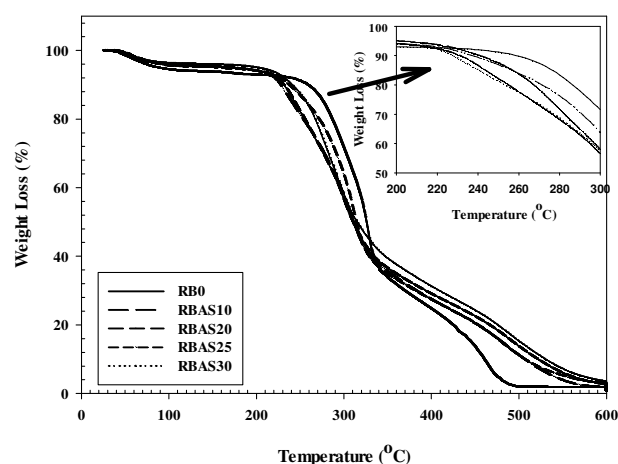


Figure 1 TG curves of the non-impregnated and impregnated rubberwood samples with AS in air atmosphere

Comparison of TGA results for rubberwood and flame-retarded rubberwood (10-30 %AS) presented in Fig. 1 and 2. There were significant difference trend for thermal decomposition behavior of wood impregnated with AS, comparing to the untreated wood. It became clear that AS disturbs the combustion of rubberwood. The mass loss phenomenon was divided into three stages (evaporating stage, devolatilization stage and char combustion stage). The first stage is evaporating stage. One of the most obvious differences between untreated and AS-treated wood in the devolatilization stage (second stage) was the decrease of initial decomposition temperature. It was observed that AS-treated wood started a rapid decomposition after higher concentration treatment that is a lower initial temperature than the untreated wood (225 °C) about 25 %. This is due to the action of AS catalyzes the decomposition of minor consist of wood (volatile and hemicellulose) and produces partial volatile gases

(according to reactions (3) and (4)), before ignition temperature is reached [16, 24]. The volatile gases is mainly NH_3 (non-combustible gases), causing to dilute oxygen concentration in thermal degradation oxidation process [16]. For the reasons above, AS is significant in producing effective flame retardant properties.

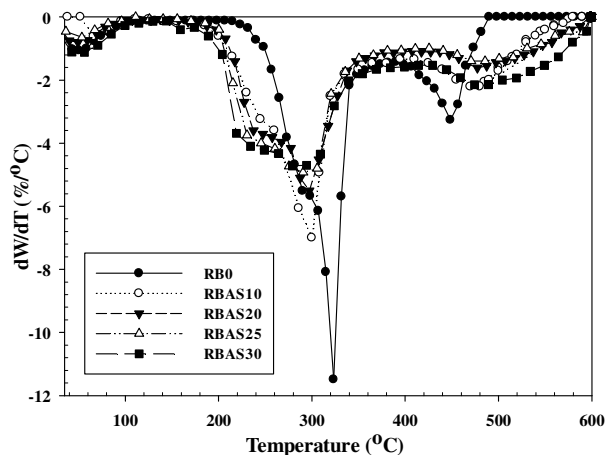


Figure 2 DTG curves of the non-impregnated and impregnated rubberwood samples with AS in air atmosphere

Additionally, there is a shoulder curve in the devolatilization stage of the treated rubberwood wider than the untreated rubberwood and the decomposition rate of AS-treated wood decreased almost three times $4.2\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (compare with the untreated wood ones) $11.8\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. This indicates that the maximum reaction rate of untreated wood occurs at lower temperatures than for AS-treated wood. A possible explanation could be that the more residue released after decomposition acted both as a thermal insulation barrier and as a barrier for oxygen and flammable volatile products with a higher temperature [9, 12]. The last point in this stage, the temperature of maximum mass loss rate (T_{peak}) of the 30 %AS-treated wood is $234\text{ } ^\circ\text{C}$, which is less than $323\text{ } ^\circ\text{C}$ of the untreated wood. The temperature of maximum mass loss rate

decreases from 300 to $234\text{ } ^\circ\text{C}$ with the increase of AS concentration)10-30 % AS(. This indicated that AS mainly attributes disturbance of the rubberwood combustion due to the above reasons.

At above $400\text{ } ^\circ\text{C}$ is mainly the third stage, which is supposed to be the decomposition of the char (the char combustion stage). The AS-treated wood results in decreased char combustion rate (47% decreased) and in increased the combustion temperature range compared to results of control samples. The decomposition process is slower with the increasing of AS. This result could be related to the decomposition mechanism is getting more complex when retardants are applied on rubberwood according to reactions (5) [9, 12]. Finally, the measured weight residue at $600\text{ } ^\circ\text{C}$ for the untreated rubberwood was 0.82% , whereas for the 10 % AS-treated wood was 2.25% . Furthermore, when the mass concentration increased from 10 to 30 %, the weight residue value increases from 2.25 to 3.23% that 42.56% were increased. This is indicated that concentration level of fire retardant agent affect to change the char combustion mechanism, contributing to the increasing of the amount of the residue [22]. According to the above analysis, it was noted that the incorporation of ammonium salt into wood could retard the thermal decomposition and combustion of the major components of wood [12, 22].

The effect of AS on fire retardancy can be explained possibly by their thermal decomposition with two steps by Statheropoulos et al. [16] . It has been shown that ammonium sulphate decomposes in the first step about at $284.3\text{ } ^\circ\text{C}$ to produce NH_3 and sulphate acid according to the reactions (3) and (4) . The second step proceeds through the reaction (5) at $383\text{ } ^\circ\text{C}$ leading to the formation of SO_3 and water in gases phase.

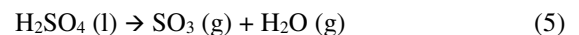
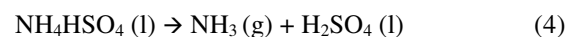
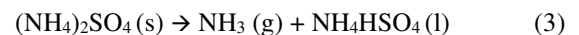


Table 2 Analytical data of the non-impregnated and impregnated rubberwood samples

Sample code	Evaporating			Devolatilization			Combustion			Residue (% , w/w)
	T_{min} ($^\circ\text{C}$)	Weight Loss (%)	T_{peak} ($^\circ\text{C}$)	T_{min} ($^\circ\text{C}$)	Weight Loss (%)	T_{peak} ($^\circ\text{C}$)	T_{min} ($^\circ\text{C}$)	Weight Loss (%)	T_{peak} ($^\circ\text{C}$)	
Control	32	8.8	66	214	66.75	323	390	24.45	450	0.82
RBAS10	35	7.15	66	170	70.15	300	419	22.70	468	2.25
RBAS20	31	7.89	59	168	70.73	297	437	21.38	477	2.30
RBAS25	36	8.26	53	167	68.12	289	441	23.62	478	2.96
RBAS30	30	9.24	56	159	65.64	234	429	25.12	489	3.23

T_{min} is the initial decomposition temperature in each stage.

T_{peak} is the temperature of maximum mass loss rate in each stage.

3.4 Flame Retardant Performance

The fire performance of AS-impregnated wood sample was evaluated base on limiting oxygen index measurements [27, 40]. As shown in Table 1 and Fig. 3, the LOI value of untreated rubberwood specimens was found to be 22.8 % that can be categorized as slow burning in air with the classification of material according to ISO 4589 in Table 3 [46-48]. With the adding of AS in the range of 5, 10, 20, 25 and 30 %wt, the LOI values were increased to 27.8, 30, 33, 37 and 41 %, respectively. These LOI values trended to be raised with increasing WPG of AS in wood sample, and all treated samples showed higher LOI levels than controls. This suggests that the combustibility of the wood treated with chemicals decreases and flame retardancy increases.

Table 3 Classification based on LOI values according to ISO 4589 [47]

LOI (%)	Classification of fire
LOI < 20.95	Flammable
LOI = 20.95	Marginally stable
21 < LOI < 28	Slow burning
28 < LOI < 100	Self-extinguishing
100 < LOI	Intrinsically non-flammable

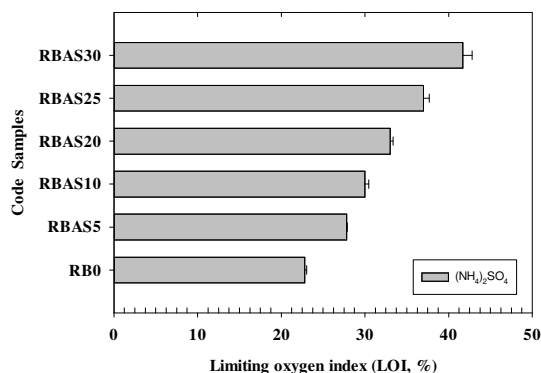


Figure 3 LOI of the impregnated rubberwood samples

It was indicated that the higher the LOI value can increase the flame retardancy of the impregnated woods [8]. The weight percent gain of fire-retardant wood can reach to 9.5 %, while the LOI value could be up to 42 %. Especially, all treated rubberwood samples are classified as self-extinguishing that mean the wood samples will stop combustion after the removal ignition source. This is appropriate to play a role to achieve this goal. As a result, AS treated rubberwood can be considered as suitable flame retardants for wood-based materials, such as interior structures and furniture for buildings. Experiments conducted by TGA/DTG and LOI measurement present that ammonium sulphate impregnated into rubberwood significantly improved the fire performance.

4. CONCLUSION

The present work presents the impregnation of flame retardant ammonium sulphate improved significantly the properties of rubberwood targeting high quality utilization. With vacuum-pressure method, the WPG in wood increase linearly with the increment of AS concentration. The WPG could reach to 9.5 %, while the LOI value could be up to 41.7 %, and LOI still increased from 27.8% to 41.7% than untreated wood)22.8% (. This value can be classified to be a self-extinguishable wood, which indicated AS can improve the fire retardancy of rubberwood for potential as a construction material. The leachability test indicated that AS still be fixed into wood structure after test which confirmed that AS can be used under humidity condition. TGA in an oxidation atmosphere results showed that the addition of AS changed the initial decomposition temperature (about 25 %), shifted the main decomposition temperature from 323 to 279 °C, increased the temperature range of decomposition, accelerated main decomposition and improved the residue.

5. ACKNOWLEDGMENT

The author is also grateful to Department of Industrial Engineering, Naresuan University to support in the place of the sample preparing. The author is especially thankful to the Wadbotkamai Factory for providing rubberwood sample.

6. REFERENCES

- [1] Shigematsu, A., Mizoue, N., Kajisa, T., & Yoshida, S. (2011). Importance of rubberwood in wood export of Malaysia and Thailand. *New Forests*, 41(2), 179–189.
- [2] Ratnasingam, J., Ioras, F., & Wenming, L. (2011). Sustainability of the rubberwood sector in Malaysia. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 39(2), 305–311.
- [3] Lee, H. L., Chen, G. C., & Rowell, R. M. (2004). Thermal properties of wood reacted with a phosphorus Pentoxide–Amine system. *Journal of Applied Polymer Science*, 91, 2465–2481.
- [4] Liodakis, S., Tsapara, V., Agiovlatis, I. P., & Vorisis, D. (2013). Thermal analysis of *Pinus sylvestris* L. wood samples treated with a new gel-mineral mixture of short- and long-term fire retardants. *Thermochimica Acta*, 568, 156–160.
- [5] Hagen, M., Hereid, J., Delichatsios, M. A., Zhang, J., & Bakirtzis, D. (2009). Flammability assessment of fire-retarded Nordic Spruce wood using thermogravimetric analyses and cone calorimetry. *Fire Safety Journal*, 44(8), 1053–1066.
- [6] Fernandes, V. J., Fernandes, N. S., Fonseca, V. M., Araujo, A. S., & Silva, D. R. (2002). Kinetic evaluation of

- decabromodiphenil oxide as a flame retardant for unsaturated polyester. *Thermochimica Acta*, 388(1–2), 283–288.
- [7] Hakki Uner, I., Deveci, I., Baysal, E., Turkoglu, T., Toker, H., & Peker, H. (2016). Thermal analysis of oriental beech wood treated with some borates as fire retardants. *Maderas. Ciencia Y Tecnologia*, 18(2), 293–304.
- [8] Donmez Cavdar, A. (2014). Effect of various wood preservatives on limiting oxygen index levels of fir wood. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 50(1), 279–284.
- [9] Mostashari, S. M., & Mostashari, S. Z. (2008). Combustion pathway of cotton fabrics treated by ammonium sulfate as a flame-retardant studied by TG. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 91(2), 437–441.
- [10] Cheng, D., Gu, J., Xu, B., & Li, Y. (2015). Properties of Rayon Fiber from Bamboo. *BioResources*, 10(4), 8352–8363.
- [11] Di Blasi, C., Branca, C., & Galgano, A. (2008). Thermal and catalytic decomposition of wood impregnated with sulfur- and phosphorus-containing ammonium salts. *Polymer Degradation and Stability*, 93(2), 335–346.
- [12] Griffin, G. J. (2011). The effect of fire retardants on combustion and pyrolysis of sugar-cane bagasse. *Bioresource Technology*, 102(17), 8199–8204.
- [13] Statheropoulos, M., & Kyriakou, S. A. (2000). Quantitative thermogravimetric-mass spectrometric analysis for monitoring the effects of fire retardants on cellulose pyrolysis. *Analytica Chimica Acta*, 409(1–2), 203–214.
- [14] Pappa, A., Mikedi, K., Tzamtzis, N., & Statheropoulos, M. (2006). TG-MS analysis for studying the effects of fire retardant on the pyrolysis of Pine-needles and their components. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 84(3), 655–661.
- [15] Chen, M., Xu, L., Tian, H., Yin, C., Zhou, Z., Li, Y., Zhong, F. (2014). Effects of common ammonium salt on the thermal behavior of reconstituted tobacco sheet. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 118(3), 1747–1753.
- [16] Statheropoulos, M., & Kyriakou, S. A. (2000). Quantitative thermogravimetric-mass spectrometric analysis for monitoring the effects of fire retardants on cellulose pyrolysis. *Analytica Chimica Acta*, 409(1–2), 203–214.
- [17] Pérez, J., Pérez, E., del Vas, B., García, L., & Serrano, J. L. (2006). Analysis of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4/(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4$ mixtures by thermogravimetry and X-ray diffraction. *Thermochimica Acta*, 443, 231–234.
- [18] Schmidt, C. G., & Furlong, E. B. (2012). Effect of particle size and ammonium sulfate concentration on rice bran fermentation with the fungus *Rhizopus oryzae*. *Bioresource Technology*, 123, 36–41.
- [19] MSDS material safety data sheet, Mallinckrodt baker incorporation, Canada, ammonium sulfate Available: http://www.atmos.umd.edu/~russ/MSDS/ammonium_sulfate.htm (January 1, 2018).
- [20] Wu, G., Lang, Q., Chen, H., & Pu, J. (2012). Physical and chemical performance of eucalyptus wood with impregnated chemicals. *BioResources*, 7(1), 816–826.
- [21] Lowden, L., & Hull, T. (2013). Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews*, 2(1), 2–4.
- [22] Liodakis, S., Bakirtzis, D., & Vorissis, D. (2003). Autoignition and thermogravimetry on forest species treated with fire retardants. *Thermochimica Acta*, 399, 31–42.
- [23] Grexa, O., & Lübke, H. (2001). Flammability parameters of wood tested on a cone calorimeter. *Polymer Degradation and Stability*, 74(3), 427–432.
- [24] Liodakis, S., Kakardakis, T., Tzortzakou, S., & Tsapara, V. (2008). How to measure the particle ignitability of forest species by TG and LOI. *Thermochimica Acta*, 477(1–2), 16–20.
- [25] Kercher, A. K., & Nagle, D. C. (2001). TGA modeling of the thermal decomposition of CCA treated lumber waste. *Wood Science and Technology*, 35(4), 325–341.
- [26] Mouritz, A. P., & Gibson, A. G. (2006). *Fire properties of polymer composite materials*. Dordrecht, Netherlands: Springer.
- [27] Tomak, E. D., & Cavdar, A. D. (2013). Limited oxygen index levels of impregnated Scots pine wood. *Thermochimica Acta*, 573, 181–185.
- [28] ASTM-D 1413-76 (2007) Standard test method of testing wood preservatives by laboratory soil-block cultures, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- [29] Bardak, S., Bardak, T., Morkan, B., Tan, H., & Peker, H. (2017). Impregnation in wood of pyrite (FeS_2) material and compressive strength. *International Journal of Ecosystems and Ecology Sciences*, 7(3), 603–606.
- [30] Mattos, B., Serrano, L., Gatto, D., Magalhães, W. L. E., & Labidi, J. (2014). Thermochemical and hygroscopicity properties of pinewood treated by in situ copolymerisation with methacrylate monomers. *Thermochimica Acta*, 596, 70–78.
- [31] Kartal, S. N., Yoshimura, T., & Imamura, Y. (2009). Modification of wood with Si compounds to limit boron leaching from treated wood and to increase termite and decay resistance. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 63(2), 187–190.
- [32] Lin, L. D., Chen, Y. F., Wang, S. Y., & Tsai, M. J. (2009). Leachability, metal corrosion, and termite resistance of wood treated with copper-based preservative. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 63(4), 533–538.
- [33] ASTM D2863-10 (2000). Standard test method for measuring the minimum oxygen concentration to support candle-like combustion of plastics (oxygen index), ASTM International, West Conshohocken, USA.

- [34] Chang, S. C., Condon, B., Graves, E., Uchimiya, M., Fortier, C., Easson, M., & Wakelyn, P. (2011). Flame retardant properties of triazine phosphonates derivative with cotton fabric. *Fibers and Polymers*, 12(3), 334–339.
- [35] Fateh, T., Richard, F., Zaida, J., Rogaume, T., & Joseph, P. (2016). Multi-scale experimental investigations of the thermal degradation of pine needles. *Fire and Materials*, 41, 654–674.
- [36] Sliwa, F., El Bounia, N. E., Marin, G., Charrier, F., & Malet, F. (2012). A new generation of wood polymer composite with improved thermal stability. *Polymer Degradation and Stability*, 97(4), 496–503.
- [37] Šimkovic, I. (2012). TG/DTG/DTA evaluation of flame retarded cotton fabrics and comparison to cone calorimeter data. *Carbohydrate Polymers*, 90(2), 976–981.
- [38] Šnajdárek, L., Pospíšil, J. I. Ř. Í., & Ik, J. Á. N. P. Č. (2017). Particle size distribution during thermal decomposition of the wood sample in oxidizing and inert atmosphere. *International Journal of Environmental Science*, 2, 329–334.
- [39] Venås, T. M., & Rinnan, Å. (2008). Determination of weight percent gain in solid wood modified with in situ cured furfuryl alcohol by near-infrared reflectance spectroscopy. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 92(2), 125–130.
- [40] Tomak, E. D., Baysal, E., & Peker, H. (2012). The effect of some wood preservatives on the thermal degradation of Scots pine. *Thermochimica Acta*, 547, 76–82.
- [41] Wu, Z. J., Nowak, A., Poulain, L., Herrmann, H., & Wiedensohler, A. (2011). Hygroscopic behavior of atmospherically relevant water-soluble carboxylic salts and their influence on the water uptake of ammonium sulfate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(24), 12617–12626.
- [42] Yorulmaz, S. Y., & Atimtay, A. T. (2009). Investigation of combustion kinetics of treated and untreated waste wood samples with thermogravimetric analysis. *Fuel Processing Technology*, 90(7–8), 939–946.
- [43] Moreno, A. I., Font, R., & Conesa, J. A. (2017). Combustion of furniture wood waste and solid wood: Kinetic study and evolution of pollutants. *Fuel*, 192, 169–177.
- [44] Hashim, R., Lamaming, J., Sharudin, N. H., Hashim, R., & Sulaiman, O. (2016). Characterization of Cellulose Microfibers Isolated from Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) Characterization of Cellulose Microfibers Isolated from Rubberwood (*Hevea brasiliensis*). *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 6(April), 170–174.
- [45] Skreiberg, A., Skreiberg, Ø., Sandquist, J., & Sørum, L. (2011). TGA and macro-TGA characterisation of biomass fuels and fuel mixtures. *Fuel*, 90(6), 2182–2197.
- [46] Younis, A. A. (2016). Evaluation of the flammability and thermal properties of a new flame retardant coating applied on polyester fabric. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(2), 161–169.
- [47] ISO 4589, *Plastics – Determination of Burning Behavior by Oxygen Index*, ISO, New York, 1996.
- [48] Mercemik, H. (2010). Effect of Chemicals and Binders on the Durability of Flame Retardant Treated Cotton Nonwovens (Master thesis).

7. BIOGRAPHIES



Arphaphon Chanpirak is a lecturer in Chemical Engineering Program, Faculty of Engineering at Naresuan University, Thailand.

Probabilistic Deterioration Prediction of Prestressed Concrete Bridge Girder in a Chloride Environment

K. Sukprasit¹, P. Sancharoen^{2*}, and S. Tangtermsirikul¹

¹School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University

²Construction and Maintenance Technology Research Center, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University

E-mail : krit_sukprasit@hotmail.com , somnuk@siit.tu.ac.th

*Corresponding author E-mail : pakawat@siit.tu.ac.th

(Received: January 18, 2018, Revised: November 7, 2018, Accepted: November 15, 2018)

Abstract

In recent years, aging of infrastructure has become a serious concern in Thailand. The performance of structure shows signs of deterioration that need for maintenance in order to ensure safety and serviceability of structure. Especially, prestressed concrete bridge girder that have widely used in Thailand and its need specific techniques for repairing. Bridge Management Systems (BMSs) have been developed to manage the maintenance of the bridges under required performance of structure and limitation of budget. Consequently, the purpose of this paper was to study deterioration prediction of prestressed concrete bridge girder that is one part of Bridge Management Systems (BMSs). Deterioration prediction model of performance of prestressed concrete is conducted in time dependent analysis. Due to corrosion of reinforcing steel by chloride attack is more severe than others, this study intends to introduce BMSs for chloride attack firstly. Criteria can be classified into three limit states, durability, serviceability and ultimate limit states. A reliability of structure was computed based on Monte Carlo simulation. The results demonstrate effect of parameters such as surface chloride content, chloride diffusion, corrosion rate and covering depth of concrete on performance of structure. Furthermore, deterioration prediction of prestressed concrete bridge girder can be used for the maintenance planning to reduce maintenance cost and extend the service life of structure.

Keywords: Bridge Management Systems, Prestressed concrete, Deterioration Prediction, Monte Carlo Simulation, Maintenance planning

1. INTRODUCTION

In recent years, deterioration of infrastructure has become a serious problem in Thailand. In order to ensure safety and serviceability of structures, maintenance of the structures is required. Additionally, Thailand is still progressing new infrastructure construction to carry on its economic capability with the world, which means Thailand may have to manage both of aging structure and new construction at the same time. Especially, prestressed concrete girder which is a major component part of road and elevated bridges structure in Thailand. As the prestressed concrete girders have become aging structure, maintenance of this structural is required and techniques are different from reinforced concrete. It have been reported that the prestressed concrete girders is possible but repair of unique method is required [1].

Deterioration of prestressed concrete can be occurred due to several causes. For example, impact by vehicle, environmental distress, extreme events etc. One of a global problem for concrete structure is corrosion of metal in concrete structure due to chloride attack. In addition, Thailand has more than 2600 km of coast line that some part of prestressed concrete bridges or future projects are located close to the sea. So, structure will be deteriorated faster due to chloride attack. Sancharoen.P

et al. [2] have been reported deterioration of bridges that located near the coastline. It was found that chloride attack is a major cause of damages observed on structure nearby the sea.

In case of prestressed concrete structure, prestressing strand is more serious than reinforcing steel, because failure can lead to collapse of structure suddenly. Also stress in prestressing strand can exceed the limitation of allowable stress due to corrosion (about 55% to 65% of its ultimate tensile strength). It not only breakdown on yielding of prestressing steel, other types of deterioration mechanisms in prestressing steel may have occurred by high stress level of prestressing steel and corrosion in anchorage also[3].

Similarly, the Lowe's walkway bridge across to motor speedway in North Carolina which is prestressed concrete structure was collapsed due to corrosion of prestressing steel as shown in Fig 1. According to inspection, corrosion product around the prestressing strand in the bridge was a cause of bridge structure failure. Calcium chloride which cause a corrosion was founded in grout around prestressing steel. The disaster of bridge structure was caused by 11 prestressing steel in concrete were cut by corrosion. Also, because bridge is a private

structure which was lacked of inspection to check the possibility of any damage from the government office. The sign of corrosion deterioration of bridge may have been observed, if the bridge had been carefully investigated [4].

Repair methods need to be considered for effectively utilizing the budget with the condition such as structural performance, safety to user, social or commercial, environment and limited budget. Bridge Management Systems (BMSs) are intended to operate the maintenance of bridges under the limitation of budget and degradation of structural performance. Many agencies have been developed the BMSs products to support this maintenance planning well known the BRIDGIT and Pontis system in The United States of America. The BMSs has classified into three parts that comprise in assessing bridge condition, the deterioration prediction and decision to the maintenance of bridges [5, 6].



Figure 1 Bridge structure collapse due to corrosion failure [4]

The deterioration prediction is one of most important part of BMSs for maintenance planning, many degradation prediction have been evaluated by a score in visual investigation of structure soundness and mostly in reinforced concrete structure. Prestressed concrete bridges structure, popular in Thailand, a few studies have been developed in actual inspection results for evaluation and prediction of prestressed concrete bridges. Moreover, prestressed concrete behavior is different from reinforced concrete such as high stress level of materials and loss of prestress.

Investigation of structure to evaluate the performance of actual structure, accuracy of deterioration prediction can be improved [7]. So, probabilistic approach is appropriately improved in the deterioration prediction [8]. In addition, There are some of researches [9, 10] reported that the Monte Carlo simulation is more traditional probabilistic technique and very useful tool for engineers for estimating reliability or probability of failure of involved engineering systems. In order to ensure safety and serviceability of prestressed concrete girder, maintenance planning must be considered. Therefore, this study focuses on probabilistic deterioration prediction of prestressed concrete bridge girder due to chloride attack is a part of maintenance planning.

2. METHODOLOGY

There are three main stages of probability of failure consisting of input the parameters for simulation, computed the structural performance with different criteria and summarized the probability of failure as shown in Fig 2. Equations used in this study are mainly from design standards such as AASHTO, ACI, JSCE and DPT. Actual condition of structure are considered by inspected parameters to improve the accuracy of the model.

In this study, probability of failure of prestressed concrete bridge girder was considered according to three limit states durability, serviceability and ultimate limit states.

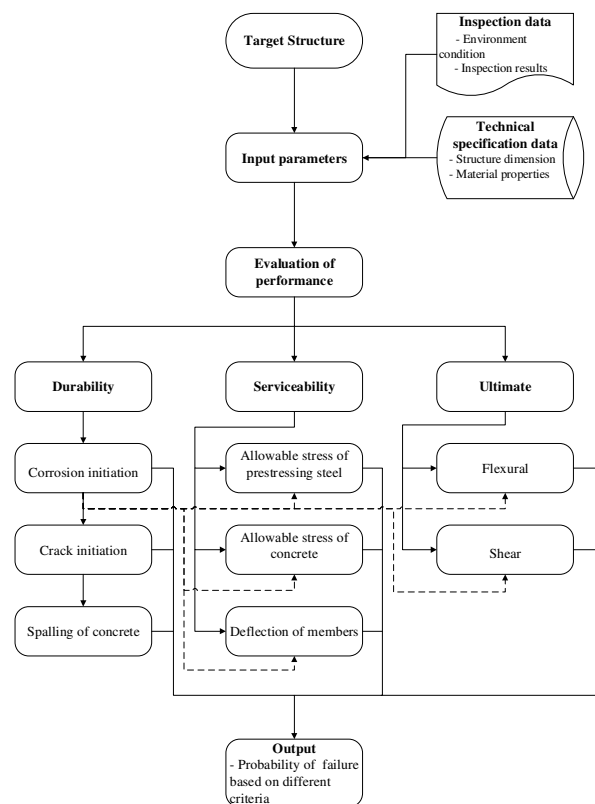


Figure 2 Conceptual framework

2.1 Performance criteria

2.1.1 Durability limit states

The durability criteria of concrete for service life of structure are depending on their environment. The processes of corrosion are classified to stages as corrosion initiation, corrosion inducing concrete to crack and spalling respectively.

- Corrosion initiation

The ingress of chloride ions (Cl^-) diffused into the surface concrete. Corrosion is initiated when Cl^- concentration exceeds critical chloride content (Cl_{lim}) as 0.4% by weight of binder as shown in Equation (1) [11].

Chloride content at steel surface could be calculated from Equation (2). [11]

$$Cl_d < Cl_{lim} \quad (1)$$

in which

$$Cl_d = \frac{Cl_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1C}{2\sqrt{D_a \times t_r}} \right) \right]}{B} \quad (2)$$

where Cl_d is chloride concentration (weight of binder), Cl_s is chloride concentration at surface of concrete (kg/m^3), C is covering depth (mm), B is weight of binder (kg/m^3), D_a is chloride Diffusion (cm^2/year) and t_r is remaining time (year).

- Steel corrosion mass loss

Many researches [12-15] have used Faraday's law to calculate the weight loss of steel from corrosion, and its ability to predict the actual loss of steel. It can be calculated using the following expression based on Faraday's law as shown in Equation (3).

$$M_{loss} = \frac{MIT}{ZF} \quad (3)$$

where T is the time (s), M_{loss} is the mass of steel lost in time (g) to form rust, I is the current (A), F is Faraday's constant (96,500 A s), z is the ionic charge (2 For Fe), and M is the atomic mass of the metal (56 g for Fe).

Hence, the relationship between the time, T , and the mass of steel consumed to form rust, M_{loss} is given by

$$T = \frac{24125 (M_{loss} / a_s)}{7i} \quad (4)$$

where i is the current density (A/cm^2), and a_s is the surface area of the steel reinforcing bar. The ratio (M_{loss} / a_s) can be expressed as follows:

$$\frac{M_{loss}}{a_s} = \frac{(m_1)(\frac{\pi D^2}{4})\rho_s}{100(\pi D)} = \frac{m_1 D \rho_s}{400} \quad (5)$$

where m_1 is the percentage steel mass loss, and ρ_s is the mass density of steel (7.85 g/cm^3).

Combination Equation (4) and (5) to determine the relationship between the percentage steel mass loss, m_1 and time, it has been summarized the formula that can be expressed as Equation (6). [13]

$$m_1 = \frac{T i_{corr}}{78.3D} \quad (6)$$

where T is the time (days), m_1 is the percentage of steel mass loss, D is diameter of the steel reinforcing bar (mm) and i_{corr} is the current density in ($\frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$).

- Corrosion induced concrete cracking

The time to first cracking, t_{cr} estimated using empirical model [16] which is relating to the amount of corrosion product, $W'_{steel,cr}$ and corrosion current density in steel, i_{corr} was estimated based on Faraday's law by using Equation (7).

$$t_{cr} = \frac{W'_{steel,cr}}{0.009113 i_{corr}} \quad (7)$$

where, t_{cr} is time of corrosion induced concrete cracking in (year), $W'_{steel,cr}$ is the critical mass loss of steel that equal to 0.01 g/cm^2 [7] and i_{corr} is the current density in ($\frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$).

- Corrosion induced spalling of concrete cover

Cracks often propagate to the surface resulting in concrete spalling or loss of bond. Time to spalling of

concrete cover (t_{sp}) determined by using empirical models [17, 18] as shown in Equation (8).

$$t_{sp} = [0.84 (t_{ser} + t_{cr} + 0.2)]^{1.4} \quad (8)$$

where t_{sp} is time of corrosion induced concrete spalling in (year), t_{ser} is time to severe cracking in (year) and t_{cr} is time to initiation cracking from Equation (7).

in which

$$t_{ser} = [A \times 10^{-3} \times (wc / C)^{-B}] \times \frac{100}{i_{corr}} \quad (9)$$

where wc is water to cement ratio, C is covering depth (mm) and A is 6.5 and B is 0.57 for a limit crack width of 0.5mm

2.1.2 Serviceability limit states

Serviceability limit state shall be stress limitations for concrete and prestressing steel and allowable deflection.

- Stress limitations for prestressing steel

As a result of reduction in prestressing steel sectional area due to corrosion has effected to increasing of stress. Consequently, the allowable stress of steel form steel section loss shall not exceed AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [19].

- Stress limitations for concrete

Allowable stress of concrete are expressed as functions of compressive strength at that time whereas and shall not exceed AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [19].

- Deflection

The deflection of a flexural member is calculated to satisfy a limit state of serviceability. The total deflection is a resultant of the upward deflection due to prestressing force, downward deflection due to the gravity loads which including self-weight and live load.

Determining prestressed loss, affect directly to deflection of prestressing force is conforming to refined estimates of time-dependent losses of AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [19]. Excepting of shrinkage strain is conformed to DPT 1332 which are suitable for environmental condition in Thailand [11]. The deflection limitation shall be considered for concrete construction which the general vehicle load limited to span/800 according to AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [19].

2.1.3 Ultimate limit states

Both of flexural and shear capacity was calculated from section and material properties, and considering strength reduction factor. The nominal both of flexural and shear capacity with strength reduction factor shall exceed to ultimate moment and shear respectively which can be determined from structural analysis according to AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [19].

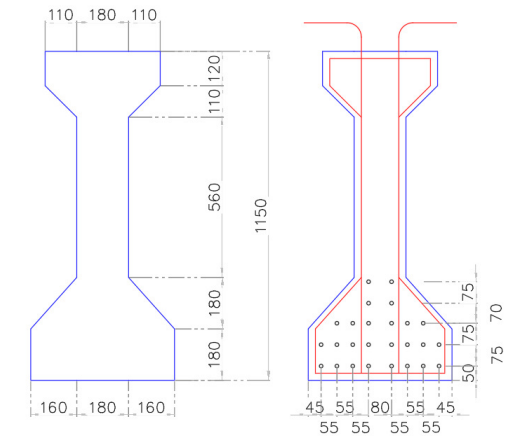


Figure 3 Dimension of prestressed concrete girder (mm.)

2.2 Monte Carlo simulation and case studies

Monte Carlo simulation can be expressed as a statistical analysis, which generating samples of random numbers in interval of [0, 1] are activated to perform the simulation. The process is simulated by use of three limit states for evaluating the performance of structure such as durability, serviceability and ultimate states. The simulation technique is used for computing the probability of failure on each criterion. The probability of failure (p_f) can be estimated by Equation (10).

$$p_f = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N I [g(X_j)] \quad (10)$$

where N is the number of simulation, $I [g(X_j)]$ is the indicator function and X_j is the j th sample drawn according to the probability density function $f_X(x)$.

The prestressed concrete girder considered in this case study is a properly seven girders of a simple span prestressed concrete bridge in Bangkok (constructed in 1981) which has span length of 20 m, 0.18 m effective slab thickness, 1.975 m effective width and dimension of girder as shown in Fig 3. The girder was designed according to the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. The primary live load was calculated based on vehicle of Highway Load 1993 (HL-93).

The design concrete strength (f'_c) is 40 MPa at 28 days. All prestressing strands are uncoated 7-wire stress relieved strands (12.4 mm) grade 250 which conform to ASTM A416-68 and have the ultimate tensile strength of the prestressing strand is 1725 MPa. Clear cover of reinforcement is 25 mm. Reinforcing steel conforms to the requirement of AASHTO M31, Grade 40 that the diameter is 12 mm. The bridges design assumes to concern only dead load and live load. Table 1 show the parameters which can get from inspection and assumption. The analysis considers the variability and uncertainty of covering of concrete, yield strength of prestressing steel, chloride diffusion and corrosion rate.

Table 1 Parameters of prediction

Parameter	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	Reference
Thickness of concrete cover (mm)	25	25	25	20	15	25	25	[20]
COV	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	
f_{py} , Yield strength (MPa)	1725	1725	1725	1725	1725	1725	1725	[20]
COV	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	
Surface chloride content (% of binder)	2.95	2.95	2.95	2.95	2.95	2.95	2.95	[21]
COV	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Chloride diffusion (cm^2/years)	0.3	0.4	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	[21]
COV	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
i_{corr} , Corrosion rate ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	1	2	3	1	1	1	1	[21]
COV	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
Number of tendon	26	26	26	26	26	24	22	

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Probability of failure based on corrosion initiation, crack and spalling of concrete criteria

3.1.1 Effect of chloride diffusion and corrosion rate

Corrosion initiation, crack and spalling of concrete results can be seen in Fig 4 and 5 which show that aggressive chloride diffusion and corrosion rate tends to have higher probability of failure. For corrosion initiation, increase chloride diffusion from 0.3 to 0.5 (cm^2/years) can lead to reduction of service life from about 2.5 to 5 years. For crack and spalling of concrete are related to corrosion rate which increase corrosion rate from 1 to 3 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), it can lead to decrease the service life about 2.5 to 5 years for cracking but for spalling can lead to reduce the performance about 20 to 25 years.

3.1.2 Effect of concrete cover

Fig 6 and 7 show results of probability of failure due to durability. It shows that less of concrete cover tends to have higher probability of failure. For corrosion initiation, reduce covering of concrete from 25 to 15 (mm) results in increase of probability of failure sharply to 5 - 7.5 years. For crack and spalling of concrete have the same tendency on time dependent probability of failure of prestressed concrete bridge girder that probability of failure if the covering of concrete reduces. The results of probability of failure in cracking increase from about 2.5 to 5 years. Similarly results of spalling of concrete that rise to 15 - 20 years.

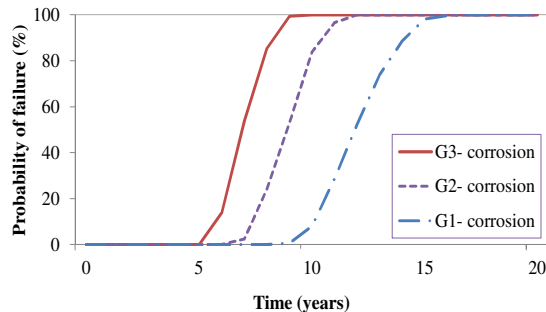


Figure 4 Effect of chloride diffusion on corrosion initiation criteria

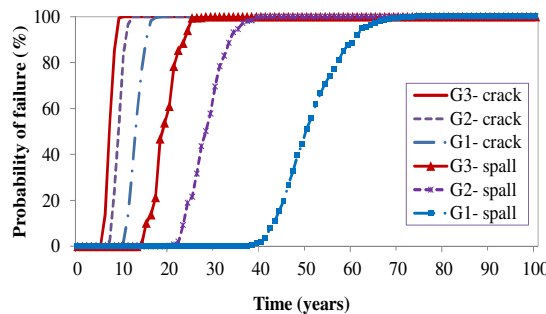


Figure 5 Effect of chloride diffusion and corrosion rate on crack and spalling of concrete criteria

3.2 Probability of failure based on allowable stress of concrete and prestressing steel criteria

3.2.1 Effect of chloride diffusion and corrosion rate

Fig 8 presented probability of failure due to serviceability limit states. It was found that G3 is severe damage in case of allowable stress in concrete because of violent of chloride diffusion as well as in case of allowable stress in prestressing steel. So, it can be conclude that aggressive environment tends to have higher probability of failure.

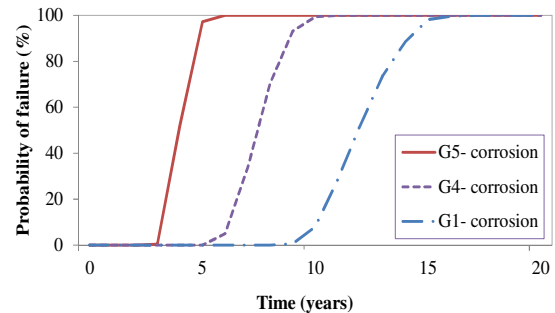


Figure 6 Effect of concrete cover on corrosion initiation criteria

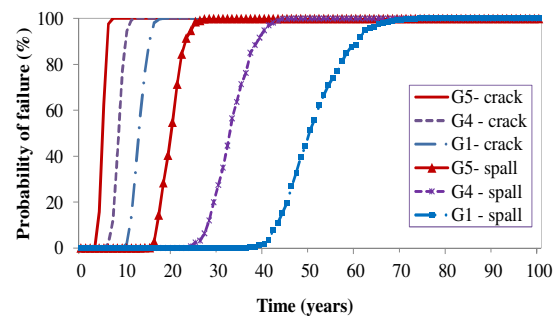


Figure 7 Effect of concrete cover on crack and spalling of concrete criteria

3.2.2 Effect of concrete cover

The results of probability of failure due to allowable stress of concrete and prestressing steel are discussed in Fig 9. It can be seen that probability of failure, both of allowable stress in concrete and prestressing steels are increase to 10 years due to reduction of 5 mm of covering of concrete Especially, G5 is the most concerned because thickness of concrete cover is smaller than other.

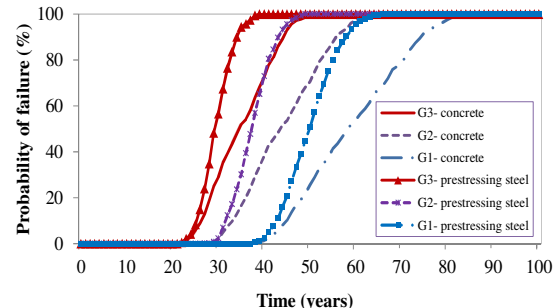


Figure 8 Effect of chloride diffusion and corrosion rate on allowable of concrete and prestressing tendon criteria

3.3 Probability of failure based on flexural and shear strength criteria

3.3.1 Effect of chloride diffusion and corrosion rate

Fig 10 presented G3 is the most considered of both of flexural and shear strength because it was indicated that violent environment inclines to have higher probability of failure. However, shear strength is more serious than flexural strength because of different covering of concrete. In addition, probability of failure due to shear seems like severe damage than service states because corrosion rate in assumption is very strong for loss of steel section.

3.3.2 Effect of concrete cover

The results of probability of failure due to ultimate limit states are discussed in Fig 11. G5 is serious consideration due to covering of concrete are smallest both of flexural and shear strength. Moreover, it can be seen that time to failure, increasing of time to failure about 10 years for flexural strength and 5 years for shear strength from different concrete cover.

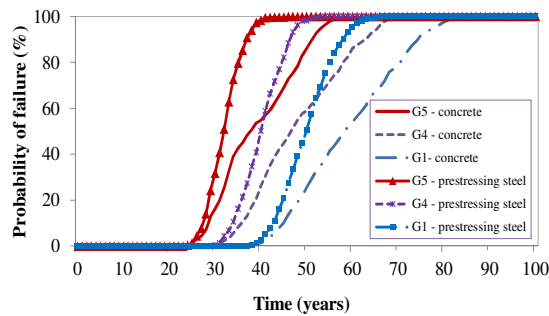


Figure 9 Effect of concrete cover on allowable of concrete and prestressing tendon criteria

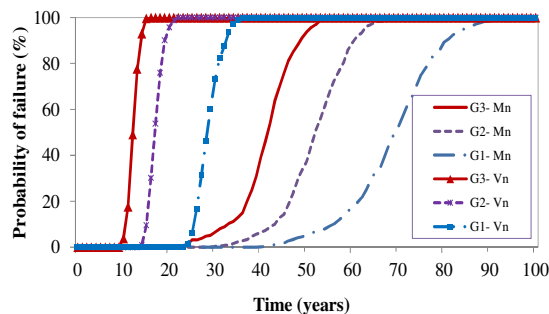


Figure 10 Effect of environment on flexural and shear strength criteria

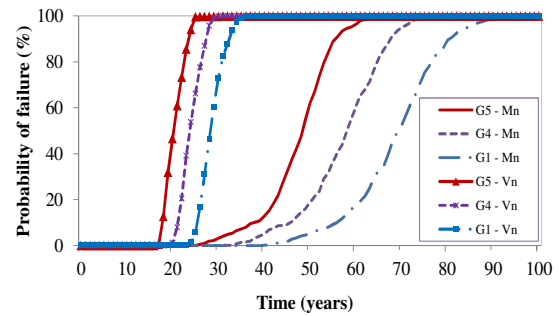


Figure 11 Effect of concrete cover on flexural and shear strength criteria

3.3.3 Effect of number of strand failure

Fig 12 presented the effect of different number of strand on time dependent probability of failure of prestressed concrete bridge girder, by comparing number of strand. Not surprisingly, this results show that number of strand is one of the primary variables that will directly affect the probability of failure for prestressing failure only. As can be seen the graph, the probability of failure reduce from 60 years to 50 years if the number of strands decrease by 2 strands.

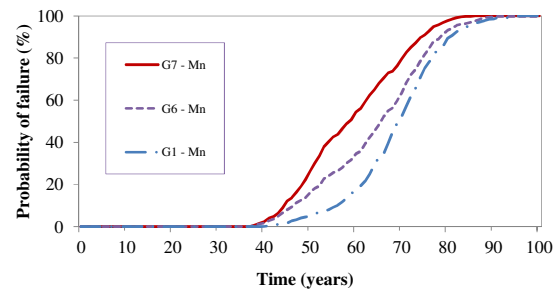


Figure 12 Effect of number of strand failure on flexural strength criteria

3.4 Priority of maintenance decision

Due to the different parameters of seven girders, there are different failure probabilities of these three criteria. The first, maintenance decision on durability limit states such as reinforcement corrosion, concrete cracking and spalling of concrete are considered. Fig 13 and 14 shows the priority of maintenance most to corrosion initiation and crack that G5 is the severe damage because the covering depth of prestressed concrete and the covering depth of stirrup are the smallest than other girders. The second severe girder is G3 because it has very high corrosion rate and chloride diffusion. In case of the ranking of failure due to spalling of concrete as shows in Fig 15, the results that G3 and G5 are the most concern because its failure increased very fast.

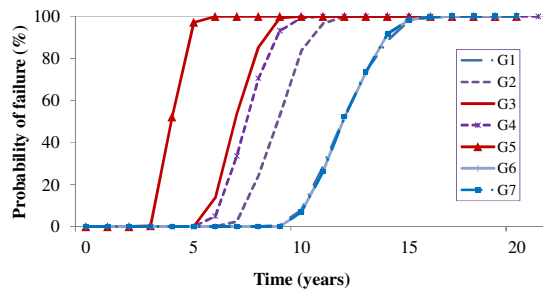


Figure 13 Ranking of failure due to corrosion initiation

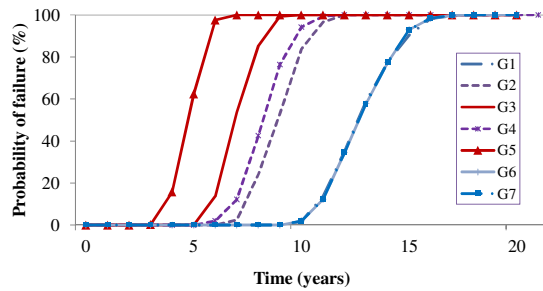


Figure 14 Ranking of failure due to crack initiation

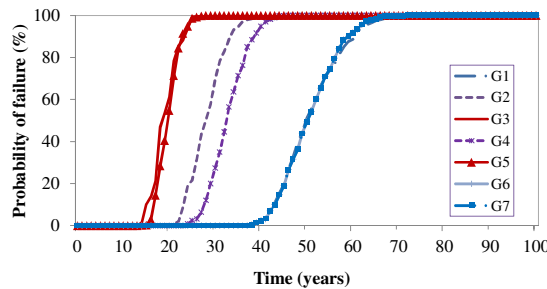


Figure 15 Ranking of failure due to spalling of concrete

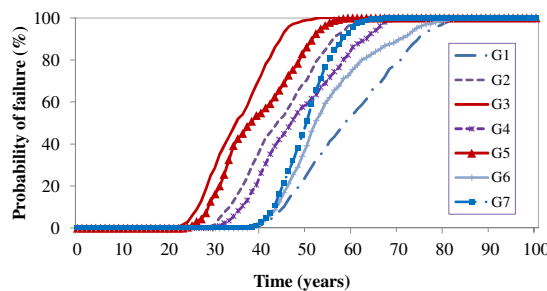


Figure 16 Ranking of failure due to allowable stress in concrete

The second, the tendency of failure due to serviceability limit states results on allowable stress of prestressing steel and concrete and indicated that the allowable stress of prestressing steel is more concerned than allowable stress of concrete as shown in Fig 16 and 17. G3 and G5 are still severe failure according to violets of corrosion and less of covering depth of concrete respectively.

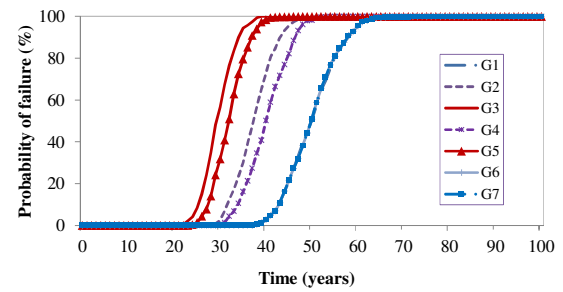


Figure 17 Ranking of failure due to allowable stress in prestressing tendons

Third, the priority of maintenance due to ultimate limit states had shown the arrangement of failure to shear strength and flexural moment strength. In case of shear strength the results shown that effect of environmental condition is the most severe damage followed by covering depth of concrete as shown in Fig 18. However, flexural strength criteria is indicated the tendency that effect of environmental condition is the most considered followed by covering depth of concrete and number of strands respectively as shown in Fig 19.

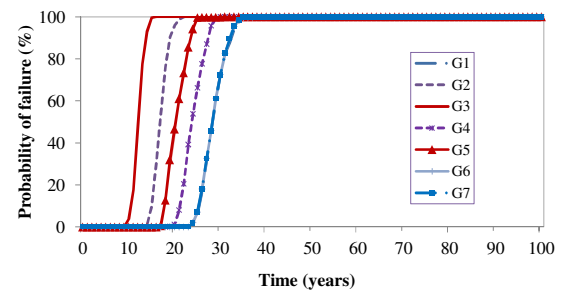


Figure 18 Ranking of failure due to shear strength

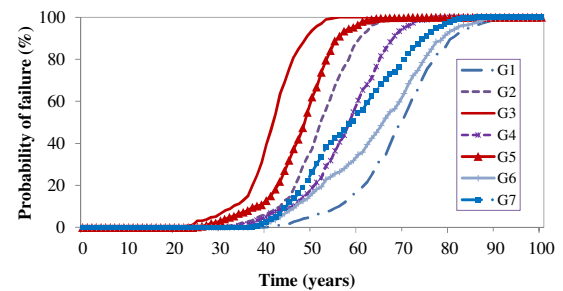


Figure 19 Ranking of failure due to flexural strength

4. CONCLUSIONS

The result of this study is performance of structure predicted based on the probability and variation of inspection results of prestressed concrete bridge girder. Mainly chloride attack is considered in this study, it can be concluded that:

- From the prediction, performance of prestressed concrete girder are significantly affected by chloride attack.

- The aggressive environment condition and covering depth of concrete show a significant effect on probability of failure for prestressed concrete bridge girder.
- Serviceability and safety of prestressed concrete girders are significantly affect by corrosion of steel. Large covering depth and low w/b concrete should be considered in the design stage.
- Based on predicted probability of failure, maintenance cost and expected failure cost can be calculated. Finally, maintenance planning and optimization can be conducted.

5. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to appreciate the Center of Excellence in Material Science, Construction and Maintenance Technology Research Center, Thammasat University, for their financial and scholarship support.

6. REFERENCES

- [1] L. Kasan. (2009). Structural repair of prestressed concrete bridge girder, master thesis, department of civil and environmental engineering, university of Pittsburgh, United State of America
- [2] Sancharoen, P., Sahamitmongkol, R., Kato, Y., and Uomoto, T. (2007). Utilization of Inspection Result of RC Structure in Thailand to Plan Maintenance for Chloride Attack, JCI Annual Conference, Vol. 29, No.30, pp. 1687-1692
- [3] ACI American Concrete Institute (2001). Corrosion of Prestressing steels. Detroit, MI
- [4] GOINS. D. (2000). Motor speedway bridge collapse caused by corrosion, *Materials Performance*, 36 (7), 18-19.
- [5] Ayaho Miyamoto et al. (2001). Development of bridge management system for existing bridges, *Advances in engineering software*. 3, 821-833.
- [6] Hatem Elbehair. (2007). Bridge management system with integrated life cycle cost optimization, thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada
- [7] JSCE Japan Society of civil engineers. (2007). Standard specification for concrete structure Maintenance. Japan
- [8] Sanjeev K V. et al. (2014). Probabilistic Evaluation of Service Life for Reinforced Concrete Structures. *Chinese Journal of Engineering* Volume 2014, Article ID 648438, 8 p
- [9] S. Tesfamariam and B. Mart'ın-P'erez.(2008). Bayesian belief network to assess carbonation-induced corrosion in reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 20, no. 11, pp. 707-71.
- [10] Rui Miguel Ferreira. (2004). Probality based durability analysis of concrete structure in marine environment, Ph.D. dissertation. Department of Civil Engineering, School of Engineering, University of Minho, Portugal
- [11] DPT Department of Public Works and Town & Country Planning, Ministry of Interior. (2007). Standard of concrete according to durability and service life. Thailand
- [12] El Maaddawy T, Soudki K.(2003). Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete. *ASCE J Mater Civ Eng*;15 (1):41-7.
- [13] El Maaddawy et al. (2007). A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking. *Cement & Concrete Composites* 29 168-175
- [14] Mohamed K. Et al. (2010). Detecting Corrosion of Steel Prestressing Strands Using Acoustic Emission. Annual Conference of the Prognostics and Health
- [15] Chunhua Lu, Weiliang Jin, Ronggui Liu. (2011) Reinforcement corrosion-induced cover cracking and its time prediction for reinforced concrete structures, *Corrosion Science* 53 1337-1347
- [16] Leon C. and Dimitri V. (2011). Prediction of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials* 25, 1854-1869
- [17] KAT Vu and MG Stewart. (2002). Service Life Prediction of Reinforced Concrete Structures Exposed to Aggressive Environments. 9DBMC- 2002 Paper 119, pp.1-10.
- [18] P. Thoft-Christensen. (2010). Modeling of the Deterioration of Reinforced Concrete Structures. *Proceedings IFIP WG 7.5 Conference on "Reliability and Optimization of Structural Systems"*, Ann Arbor, USA, September 25-27, pp. 15-26.
- [19] AASHTO American Association of State Highway and Transportation Official (2007). Bridge Design Specification, AASHTO WASHINGTON D.C.
- [20] Mojtaba Mahmoodian. (2012). Failure assessment of a pre-stressed concrete bridge using time dependent system reliability method 29th International Bridge Conference, At Pittsburgh, PA, United State of America
- [21] M. S. Darmawan and M. G. Stewart. (2007). Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders, *Structural Safety* 29, 16-31.

7. BIOGRAPHIES



Prof. Dr. Somnuk Tangtermsirikul,
School of Civil Engineering and
Technology, Sirindhorn International
Institute of Technology, Thammasat
University



Dr. Pakawat Sancharoen, Construction and Maintenance Technology Research Center, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University.



Mr. Krit Sukprasit, School of Civil Engineering, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University.

CFD Analysis of the Slippage Effects on Elastohydrodynamic Lubrication in Line Contact Problem

S. Srirattayawong*, R. Aungkurabrut

School of Engineering, University of Phayao

*Corresponding author E-mail : Sutthinan.sr@up.ac.th

(Received: October 19, 2017, Revised: September 14, 2018 ,Accepted: October 24, 2018)

Abstract

In this paper, the effects of a slippage on an elastohydrodynamic lubrication (EHL) in line contact problem using an advanced computational fluid dynamics (CFD) model are presented. A cylindrical roller is assumed to be infinitely long and rotates on a plate under an applied load. In addition, the no-slip and slip boundary conditions were defined between lubricant and solid walls. The Navier-Stokes and the elasticity equations were solved simultaneously. The Ree-Eyring model was used to calculate the viscosity of lubricant. The developed CFD model had been applied to the series of cases of lubricated slippage effect with the applied loads $L=1.5$ kN and 2.5 kN, slide-to-roll ratios: $SRR=0, 1$ and 2 under the thermal condition. The flow characteristics in the CFD model such as the pressure distribution, the fluid film thickness, the velocity of fluid flow, the viscosity and the temperature distribution were investigated. To illustrate, the developed CFD model is successively to simulate the EHL line contact problem, and can deal with the slippage problem. The simulation results show that the slippage effect is significant to the EHL problem, especially in the case of pure sliding.

Keywords: EHL, slippage, lubrication, CFD, Non-Newtonian.

1. NOMENCLATURE

E	[Pa]	Reduced modulus of elasticity
f	[-]	Volume fraction
h_o	[m]	The minimum film thickness
h_i	[m]	Film thickness
L	[Nm ⁻¹]	Applied load per unit width
p	[Pa]	Pressure
p_{sat}	[Pa]	Liquid saturation vapor pressure
R	[m]	Reduced radii of curvature
$R(i)$	[m]	Surface roughness term
SRR	[-]	Slide to roll ratio = $2[u_p - R_c w_c]/(u_p + R_c w_c)$
T	[K]	Temperature
Δt	[s]	Time step
u	[m/s]	Velocity
V_{ch}	[-]	A characteristic velocity
x_i	[m]	Cartesian axis in i direction
z	[-]	Viscosity index
Special character		
α_i		Volume fraction of phase
ρ	[kg/m ³]	Density
τ	[Pa]	Viscous stress tensor
β	[1/K]	Thermal expansivity of lubricant
η	[Pa·s]	Viscosity of Newtonian fluid
η_o	[Pa·s]	Viscosity at ambient pressure
ψ	[m]	Slippage length
Subscripts		
c		Cylinder
p		Plate
in		At the inlet position
out		At the outlet position
o		Ambient or reference
l		Liquid phase
v		Vapor phase
m		Mixture phase
sat		Saturation vapor pressure

2. INTRODUCTION

The lubrication system plays an important role in machines as it can help reduce friction force, as well as prevent and reduce the wear that can occur to all contacting and moving parts. Thus, lubricants have received much interest over the years as it is the lifeblood of all mechanical machines, especially in sliding and rolling elements under heavy loads.

Many researchers have developed different methods, simple or complex for solving lubrication problems. All studies in fluid film lubrication were start up from the 1880s, when a combination of experiments was followed by a unifying mathematical theory. Osborne Reynolds [1] presented the differential equation that is used to state the relationship between the motion and viscosity of the lubricant. The Reynolds equation has been used to describe laminar flows for Newtonian fluids in hydrodynamics lubrication problems for example a thin film in gear [2, 3]. Later, some models were suggested for improving the Reynold equation such as elastic deformations due to the contact pressures [4], a pressure–viscosity effect [5]. After that time, the development and understanding of elastohydrodynamic lubrication (EHL) have been presented. Petrusevich [6] solved the elastohydrodynamic lubrication problem (EHL) for the line contact problem and got the full numerical solution. The result indicated that the pressure profile increased gradually at the lubricant inlet region of contact and reaches maximum pressure forming a pressure spike at the minimum film thickness. This character is known as the ‘Petrusevich Pressure Spike’. Later, outstanding contributions have been accomplished by numerous investigators. Many numerical techniques were proposed to the EHL problems [7-12]. An analytical method derived from the combination of lubricant properties

(density and viscosity) and the classic Reynolds equation were presented [13]. It is well known as the 'generalized Reynolds equation'. Earlier, the isothermal theories have been achieved [14]. Then, the Reynolds equation was improved to be more realistic by considering thermal effect [15-18], non-Newtonian fluid [18-22], transient effect [23, 24] and surface roughness [25-29]. Recently, a CFD technique has been used to simulate an EHL line contact problem instead of the Reynolds equation [30-35].

It can be seen from the above literature reviews that the study of the thin film lubrication problem has been continually developed. The intent of this paper is an endeavour to establish a framework for understanding the slippage effects on to the EHL in line contact problem using the CFD technique.

3. METHOD

In order to explore and analysis the characteristic of EHL problem, it is necessary to design a CFD model such as geometry, boundary conditions and physical properties. In this paper, the 2D CFD model is created for the proposed EHL in line contact problem. The cylindrical roller is assumed to be infinitely long and rotates on the plate, thus the pressure distribution of the z direction can be considered to be uniform. Therefore, only the pressure distribution of the front plane is investigated and presented. The boundary conditions and geometry model are maintained the same in all study cases. To identify the slippage effects, the slip boundary condition is applied at the plate to compare with a no-slip boundary condition.

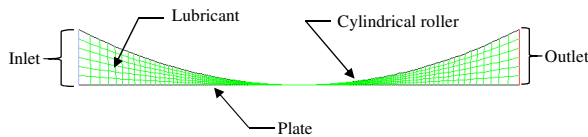


Figure 1 Schematic of the CFD model

In this research, the ICEMCFD software is used to create the CFD model of the EHL problem, as shown in Figure 1. Then meshes are generated in the geometry. The proposed CFD model is examined by completing the mesh dependent test to ensure that the resolution is adequate. The spacing of the mesh in the CFD model is refined from 0.5 μm to 0.25 μm and 0.167 μm . It is found that the predicted pressure distributions with the mesh spacing of 0.50 μm , 0.25 μm and 0.167 μm are the same. Then, the maximum mesh size of 0.25 μm was chosen and applied to the contact zone of the CFD model in this study.

Table 1: The common data using in the CFD model

Parameters	Value	Unit
Input data		
- An applied load, W	1.0, 1.5, 2.5	kN/m
- Average velocity, U_a	2.5	m/s
- Slide to roll ratio (SRR)	0, 1, 2	-
Solid properties (Cylindrical roller and plate)		
- Elastic modulus of solids, E_1, E_2	2.1×10^{11}	Pa
- Poisson's ratio of solids, ν_1, ν_2	0.30	-
- Specific heat of solids, C_{p1}, C_{p2}	460	J/Kg-K
- Density of solids, ρ_1, ρ_2	7,850	kg/m ³
- Thermal conductivity, k_1, k_2	47	W/m-K
- Radii of curvature (Cylindrical roller)	0.01	m
Lubricant properties		
- Inlet viscosity of lubricant, η_0	0.01	Pa-s
- Vapour dynamic viscosity, μ_v	8.97×10^{-6}	Pa-s
- Liquid density, ρ_l	846.0	kg/m ³
- Vapour density, ρ_v	0.028	kg/m ³
- Thermal conductivity of lubricant, k	0.14	W/m-K
- Temperature-viscosity coefficient of lubricant, γ	0.0476	1/K
- Specific heat of lubricant, C_p	2,000	J/Kg-K
- Thermal expansivity of lubricant, β	6.5×10^{-4}	1/K
- Pressure-viscosity coefficient, z	0.689	-

The minimum gap between the cylindrical roller and the plate is 0.1 mm. The quad-mesh type is employed to generate meshes for the CFD model. There are 20,517 nodes in total. Then the CFD model is solved using the commercial software ANSYS Fluent 12.

4. THEORY

In the analysis of thin fluid film lubrication, the CFD approach is used to calculate the velocity and pressure in fluid flow at the narrow gap between the top cylindrical roller and the plate instead of the Reynolds equation. The fluid solver and solid solver are employed. It is a coupling between the fluid flow (lubricant) and the deformation of the solid part.

The characteristics of fluid flow can be explained by the conservation form of the fluid flow. This combines the continuity equation and momentum equation which can be written in the general form:

Conservation of mass:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

Conservation of momentum:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

$$\text{where} \quad \tau = -\eta (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \frac{2}{3} \eta \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (3)$$

Conservation of energy:

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_T \quad (4)$$

$$\text{where} \quad S_T = Q_{shear} + Q_{compress} \quad (5)$$

$$Q_{shear} = \eta \left(\nabla \mathbf{u} : \nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u} \cdot (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right) \quad (6)$$

$$Q_{compress} = -\frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) (\mathbf{u} \cdot \nabla p) \quad (7)$$

The density of lubricant (ρ) is a pressure dependent. It is well known that the generated pressure in the contact zone is very high. For that reason, this effect cannot be neglected. As Dawson and Higginson presented, there was a linear variation on pressure and density [11]. The relation between pressure and density can be stated as follows:

$$\rho_i = \rho_o \left(1 + \frac{0.59 \times 10^{-9} p_i}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p_i} \right) [1 - \beta(T - T_o)] \quad (8)$$

where β is thermal expansivity of lubricant.

The viscosity of lubricant also depends on the pressure as well as the density. The increasing of the viscosity with pressure can be calculated as proposed by Roelands and Houpert [12].

$$\eta_{Houpert} = \eta_o \exp \left\{ \left[\ln \eta_o + 9.61 \right] \left[-1 + \left(1 + 5.1 \times 10^{-9} p_i \right)^c \right] \left(\frac{T - 138}{T_o - 138} \right) - c(T - T_o) \right\} \quad (9)$$

where

$$c = (\ln \eta_o + 9.61) \left(1 + 5.1 \times 10^{-9} p_i \right)^c \left(\frac{S_o}{T_o - 138} \right) \quad (10)$$

$$S_o = \gamma \left(\frac{T_o - 138}{\ln \eta_o + 9.61} \right) \quad (11)$$

and

$$\eta_{Eyring} = \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}_{eq}} \sinh^{-1} \left(\frac{\eta_o \dot{\gamma}_{eq}}{\tau_o} \right) \quad (12)$$

The Ree-Eyring model can be used to present the viscosity in each cell. It depends on the equivalent shear rate as the following conditions;

$$\eta_i = \begin{cases} \eta_{Houpert} & , \dot{\gamma}_{eq} < 10^{-5} \\ \eta_{Eyring} & , \dot{\gamma}_{eq} \geq 10^{-5} \end{cases} \quad (13)$$

The cavitation effect [39] is not modelled by the Reynolds equation. However, the occurred negative pressure in conjunction zone can be solved by applying a cavitation model to the CFD model for the EHL problem. The full cavitation model [13] has been employed in this research is:

$$\frac{\partial(\rho_m f)}{\partial t} + \nabla(\rho_m \bar{v} \cdot f) = \nabla(\gamma \nabla f) + A - B \quad (14)$$

where A and B are given by

$$A = 0.02 \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{3\rho_l}} (1 - f) \quad (16)$$

$$B = 0.01 \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p - p_{sat})}{3\rho_l}} (f) \quad (17)$$

The density of a lubricant for a liquid phase is a function of pressure as defined in equation (8). Thus the density of the vapor phase should be calculated from the fraction equation. Therefore the density of a mixture phase can be written as:

$$\rho = \alpha_l \rho_l + \alpha_g \rho_g + (1 - \alpha_l - \alpha_g) \rho_i \quad (18)$$

The local lubricant film thickness or the gap at the contact zoned can be calculated by a geometric equation. The geometry of the contacting elastic solids is defined as shown in Figure 1. The full-film lubrication is assumed in this study. Then the lubricant film thickness is depended on the physical geometry of the cylindrical roller and the elastic deformation term [36] which is governed by the pressure distribution of the contact [37].

$$h_i = h_o + \frac{x^2}{2R} + R(i) - \frac{2}{\pi E} \int_{-\infty}^{x_i} p(\xi) \ln(x - \xi)^2 d\xi \quad (19)$$

The gap between the cylindrical roller and the bottom plate must be corrected in each iteration and updated until the generated pressure is equal to the applied load. Then, the constant h_o can be solved using a force balance equation [38].

$$h_o^{new} = h_o^{old} + defect \quad (20)$$

where

$$defect = L - \int_{-\infty}^{\infty} p_i dx$$

As the cylindrical roller and plate surfaces are defined to be moving with different velocity. Especially, in case of high SRR , the shear strain is very high. Then the lubricant can be slipped along a solid-liquid interface. This phenomenon can be calculated by:

$$u_f = \psi \left. \frac{\partial u_s}{\partial z} \right|_{wall} \quad (21)$$

where u_s indicates the streamwise slippage velocity at the hydrophobic surface.

5. NUMERICAL METHOD

The finite-volume method is used in this study. The integral form of the transport equations (1) and (2) has to be applied to a discretized equation. The geometry domain is subdivided into a finite number of subdomain as shown in Figure 1.

The pressure and velocity variables in the domain are calculated by using the PISO algorithm. In addition, the spatial discretization methods are applied to the CFD model such as least square cell base, second order, second order upwind, and quick for calculating the gradient, pressure, density and momentum, respectively. Then the transport equation in a general form can be used to solve iteratively for all cells in the domain, as demonstrated below:

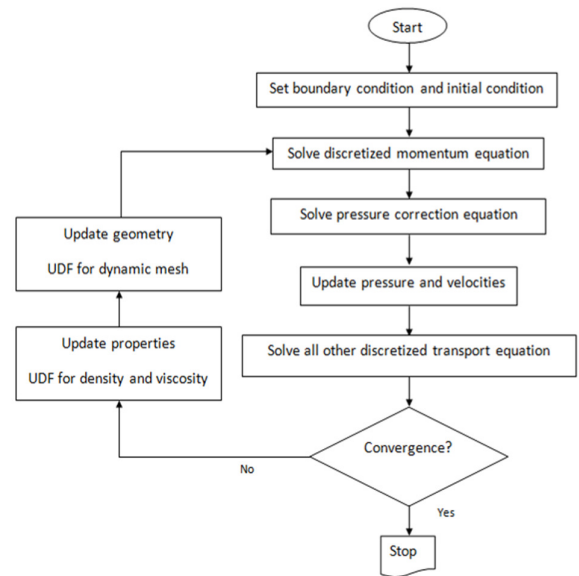


Figure 2 The flow chart for solving the EHL problem of the CFD model

At the beginning of the iteration process, the velocity and pressure fields are approximated. Then these parameters are used to solve the momentum equation and the pressure correction equation. These values will be corrected in each iteration, until the acceptable convergence of pressure and velocity is achieved as shown in Figure 2.

6. RESULTS AND DISCUSSION

The results of the proposed CFD model were compared with that from the Reynolds equation presented by Chu et al [40]. Figure 3 depicts that the pressure distribution and the film thickness of both methods are in good agreement [41]. It can be clearly seen that the characteristics of EHL problem can be simulated by using the CFD technique very well.

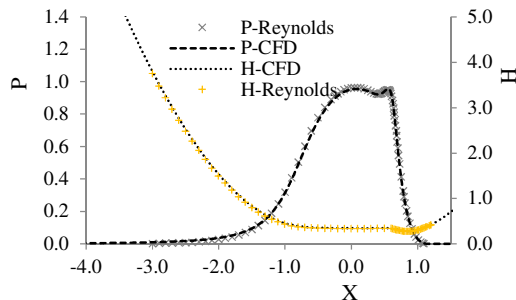


Figure 3 Comparison of dimensionless film thickness (H) versus pressure distribution (P) between the CFD model and the Reynolds equation

The simulation results of two parameters varied are presented in this paper. The first case shows the effect of slippage with the ratio of the different velocity between the cylinder and the plate (SRR) varied. Then the second case presents the slippage influences with the applied load varied.

Figures 4, 5 and 6 show the effects of slippage on the pressure distribution and the fluid film thickness at the contact zone when $SRR=0$, 1 and 2, respectively. It is found that the slippage condition is significantly to the characteristics of the EHL problem. The effect of slippage is increased when the SRR between the plate and the cylinder was increased. The pressure distribution of the slippage case of $SRR=1$ and 2 is clearly higher than the no slippage case. This is due to the fact that the film thickness of the slippage case is thinner than the no slippage case as shown in Figure 6.

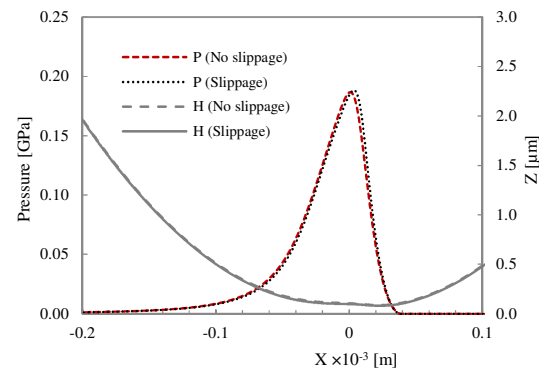


Figure 4 Comparison of pressure distributions and film thicknesses between no slippage and slippage when $SRR=0$ and $L=1$ kN/m

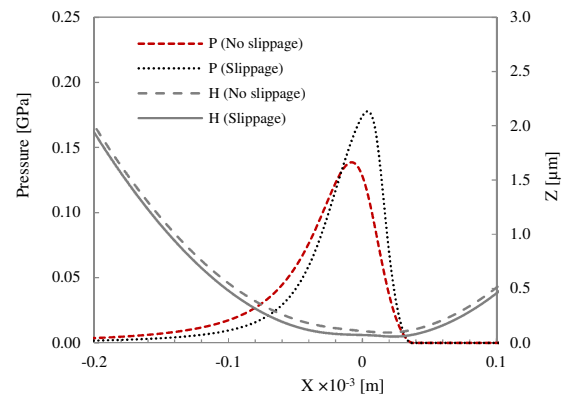


Figure 5 Comparison of pressure distributions and film thicknesses between no slippage and slippage when $SRR=1$ and $L=1$ kN/m

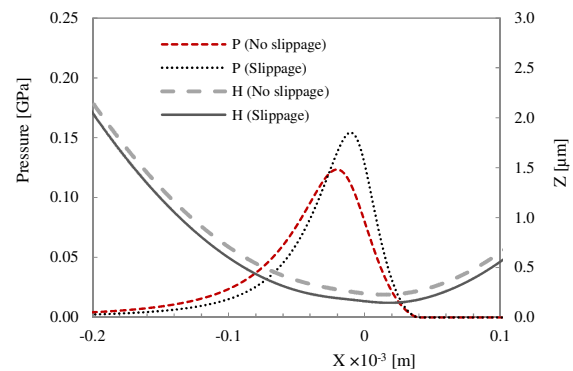


Figure 6 Comparison of pressure distributions and film thicknesses between no slippage and slippage when $SRR=2$ and $L=1$ kN/m

Some results illustrate that the effect of slippage on the EHL problem is very small when the applied load was increased for the $SRR = 0$ (no slide between both solid surfaces). Figure 7 shows the comparison of the pressure distributions and the fluid film thickness profiles between no slippage and slippage applied for the plate when $L=1.5$ kN/m and 2.5 kN/m. It is found that the pressure distribution and the fluid film thickness are quite similarly in either case. However, the comparison of

pressure distribution is different when the *SRR* increased as presented in Figure 7. It can be clearly seen that the slide to roll ratio is significant on the slipped wall condition.

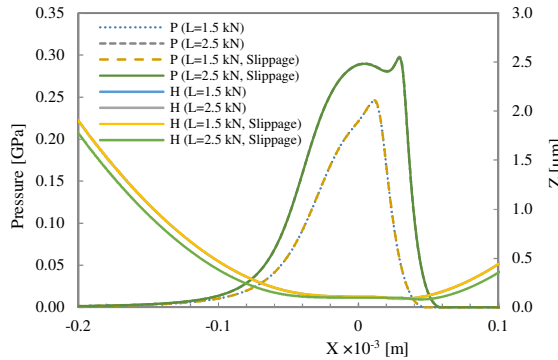


Figure 7 Comparison of pressure distributions and film thickness profiles between no-slippage and slippage when $L=1.5 \text{ kN/m}$, 2.5 kN/m and $SRR=0$

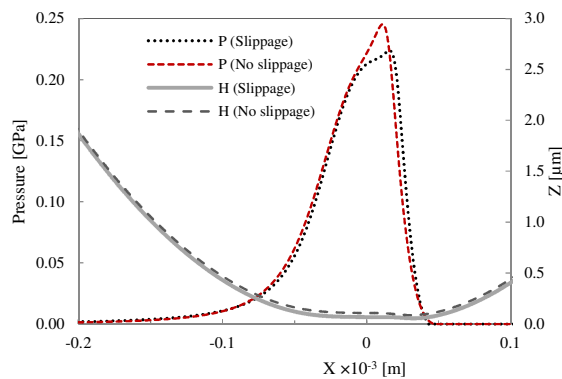


Figure 8 Comparison of pressure distributions and film thickness profiles between no-slippage and slippage when $L=1.5 \text{ kN/m}$, and $SRR=1$

Figures 9-13 reveals the behaviour of thin fluid film lubrication when the slippage effect considered. The cylindrical roller was rotated around 125 rad/s . while the plate was moved with $v=3.75 \text{ m/s}$. It explores that the cylinder is more influent on lubricant velocity than the plate as shown in Figure 9. This is because the lubricant was slipped from the solid wall (Plate). Therefore, in this case, the velocity of lubricant is dominated by the velocity of the cylindrical roller.

Figure 10 shows the contour of the pressure distribution of the lubricant at the conjunction zone. The maximum pressure is about 1.6 MPa . The pressure very high because the fluid film is very thin. The shear stress and shear rate of the layer of fluid film near the cylinder are higher than the plate where the slip wall condition was applied as shown in Figures 11 and 12.

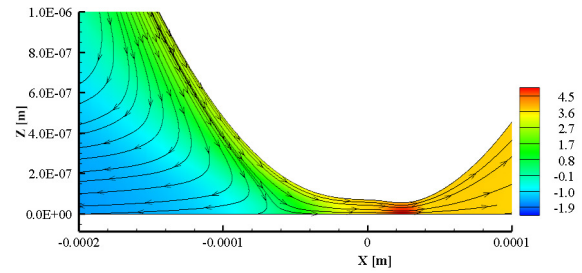


Figure 9 The contours of lubricant velocity [m/s]

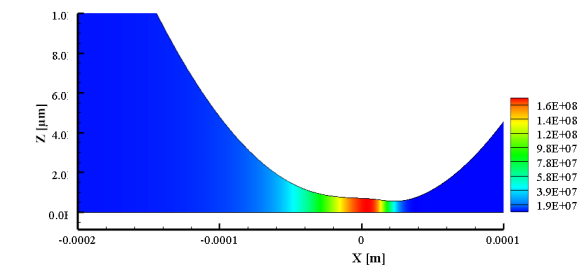


Figure 10 The contours of static pressure [Pa]

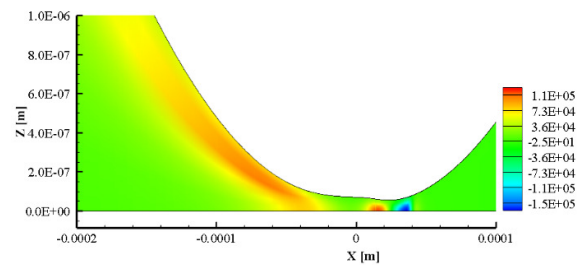


Figure 11 The contours of velocity gradient, $du/dx \text{ [s}^{-1}\text{]}$

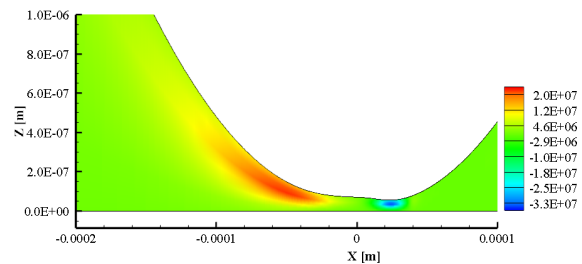


Figure 12 The contours of velocity gradient, $du/dz \text{ [s}^{-1}\text{]}$

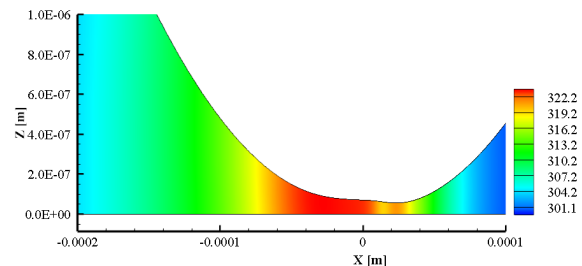


Figure 13 The contours of temperature [K]

Figure 13 presents the temperature contour at the contact zone. The temperature rises because the heat sources were generated by the Q_{shear} and Q_{compress} terms as presented in equations (6) and (7).

7. CONCLUSION

An advanced 2D CFD model has been successfully developed for simulating the characteristics of the EHL line contact problem, with a focus on the effects of slippage condition. The CFD model has been used successively to simulate the pressure distribution, the generated temperature, and the velocity of lubricant under the varied slide to roll conditions. The results show that the CFD model can be a useful tool for the EHL line contact problem, and can deal with the slippage problem. The main findings are summarized below:

- The slippage condition is a very important factor that affects the shear strain, especially for the case of pure sliding ($SRR=2$).
- The fluid film thickness is thinner than the no slippage case.

8. ACKNOWLEDGMENT

The author gratefully acknowledge the financial support on the project from the Ministry of Science and Technology of Thailand and the University of Phayao.

9. REFERENCES

- [1] O. Reynolds, (1886), "On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil", Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 177, pp. 157-234.
- [2] H. Martin, (1916), "Lubrication of gear teeth," Engineering, London, vol. 102.
- [3] L. Gümbel, (1916), "Über Geschmierte Arbeitsräder (On the Lubrication of Gears)", Zeitschrift für das Gesamte Turbinenwesen, vol. 13.
- [4] A. Meldahl, (1914), "Contribution to the Theory of the Lubrication of Gears and of the Stressing of the Lubricated Flanks of Gear Teeth", Brown Boveri Review, vol. 28, pp. 374-382.
- [5] A. von Mohrenstein-Ertel, (1949), "Die Berechnung der Hydrodynamischen Schmierung Gekrümmter Oberflächen unter Hoher Belastung und Relativbewegung", Fortschrittsberichte VDI, vol. Ser. 1, No. 115.
- [6] A. I. Petrusevich, (1951), "Fundamental conclusions from the contact-hydrodynamic theory of lubrication", Izv. Akad. Nauk. SSSR (OTN), vol. 2, p. 14.
- [7] D. Dowson and G. R. Higginson, (1959), "A numerical solution to the elasto-hydrodynamic problem", Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 1, pp. 6-15.
- [8] M. E. Muller, (1958), "An inverse method for the generation of random normal deviates on large-scale computers", Mathematics of Computation, vol. 12, pp. 167-174.
- [9] H. S. Cheng and B. Sternlicht, (1965), "A Numerical Solution for the Pressure, Temperature, and Film Thickness Between Two Infinitely Long, Lubricated Rolling and Sliding Cylinders, Under Heavy Loads", Journal of Basic Engineering.
- [10] C. H. Venner, (1991), "Multilevel Solution of the EHL Line and Point Contact Problems", PhD, University of Twente, Enschede, Netherlands.
- [11] A. A. Lubrecht, (1987), "Numerical solution of the EHL line and point contact problem using multigrid techniques", Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, Netherlands.
- [12] H. Okamura, (1983), "A contribution to the numerical analysis of isothermal elastohydrodynamic lubrication", Proc. 9th Leeds-Lyon Symp. on Tribology, pp. 313-320.
- [13] D. Dowson, (1962), "A generalized Reynolds equation for fluid-film lubrication", International Journal of Mechanical Sciences, vol. 4, pp. 159-170.
- [14] D. Dowson, G. Higginson, and A. Whitaker, (1962), "Elasto-hydrodynamic lubrication: a survey of isothermal solutions", Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 4, pp. 121-126.
- [15] L. Houpert, (1985) "New results of traction force calculations in ehd contacts", Trans. ASME, J. Lub. Tech., vol. 107, p. 8.
- [16] C. J. A. Roelands, (1966), "Correlational Aspect of Viscosity-Temperature-Pressure Relationships of Lubricating Oils", PhD Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
- [17] B. Sternlicht, P. Lewis, and P. Flynn, (1961), "Theory of lubrication and failure of rolling contacts", Journal of Basic Engineering, vol. 83, p. 213.
- [18] P. C. Sui and F. Sadeghi, (1990), "Thermal Elastohydrodynamic Lubrication of Rolling/Sliding Contacts", Trans. ASME, Jour. Trib., vol. 112, p. 6.
- [19] K. L. Johnson and J. L. Tevaarwerk, (1977), "The shear behaviour of elastohydrodynamic oil films", Proc. R. Soc. London, vol. A. 356, pp. 215-236.
- [20] Y. Peiran and W. Shizhu, (1990), "A generalized Reynolds equation for non-Newtonian thermal elastohydrodynamic lubrication", Journal of tribology, vol. 112, pp. 631-636.
- [21] S. H. Wang, D. Y. Hua, and H. H. Zhang, (1988), "Full numerical EHL solution for line contacts under pure rolling condition with a non-Newtonian rheological model", Journal of Tribology, vol. 110, pp. 583-586.
- [22] S. P. C. and F. Sadeghi, (1991), "Non-Newtonian Thermal Elastohydrodynamic Lubrication", Trans. ASME, Jour. Trib., vol. 113, p. 6.
- [23] S. Bair, J. a. Jarzynski, and W. O. Winer, (2001), "The temperature, pressure and time dependence of lubricant viscosity", Tribology International, vol. 34, pp. 461-486.
- [24] K. F. Osborn and F. Sadeghi, (1992), "Time Dependent Line EHD Lubrication Using the Multigrid/Multilevel Technique," ASME. Journal of Tribology, vol. 114, pp. 68-74.
- [25] X. Ai and H. S. Cheng, (1994), "A Transient EHL Analysis for Line Contacts With Measured Surface Roughness Using Multigrid Technique", Journal of Tribology, vol. 116, pp. 549-556.
- [26] A. Almqvist, (2004), "Rough Surface Elastohydrodynamic lubrication and Contact Mechanics", PhD, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Lulea University of Technology.

- [27] D. Zhu and Y. Hu, (2001), "Effects of Rough Surface Topography and Orientation on the Characteristics of EHD and Mixed Lubrication in Both Circular and Elliptical Contacts", Tribology Transactions, vol. 4, p. 7.
- [28] N. Patir and H. S. Cheng, (1978), "An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication", ASME Journal of Lubrication Technology, vol. 100, pp. 12-17.
- [29] C. H. Venner and W. E. Ten Napel, (1992), "Surface Roughness Effects in an EHL Line Contact", ASME Journal of Tribology, vol. 114, pp. 616-622.
- [30] T. Almqvist and R. Larsson, (2002), "The Navier-Stokes approach for thermal EHL line contact solutions", Tribology International, vol. 35, pp. 163-170.
- [31] T. Almqvist, A. Almqvist, and R. Larsson, (2004), "A comparison between computational fluid dynamic and Reynolds approaches for simulating transient EHL line contacts", Tribology International, vol. 37, pp. 61-69.
- [32] M. Hartinger, D. Gosman, S. Ioannides, and H. Spikes, (2005), "CFD modelling of elastohydrodynamic lubrication", Washington, D.C., pp. 531-532.
- [33] M. Hartinger, M. L. Dumont, S. Ioannides, D. Gosman, and H. Spikes, (2008), "CFD modeling of a thermal and shear-thinning elastohydrodynamic line contact", Journal of Tribology, vol. 130, pp. 179-180.
- [34] V. Bruyere, N. Fillot, G. E. Morales-Espejel, and P. Vergne, (2012), "Computational fluid dynamics and full elasticity model for sliding line thermal elastohydrodynamic contacts", Tribology International, vol. 46, pp. 3-13.
- [35] S. Srirattayawong and S. Gao, (2012), "A CFD Study of the EHL Line Contact Problem with Consideration of the Surface Roughness under Varied Loads", presented at the 9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Malta.
- [36] H. Hertz, (1881), "The contact of solid elastic bodies [Über die Berührung fester elastischer Körper]", Journal für die reine und angewandte Mathematik, vol. 92, pp. 156-171.
- [37] K. L. Johnson, (1985), Contact mechanics, Cambridge: Cambridge University Press.
- [38] Y. H. Wijnant, (2005), "Contact Dynamics in the Field of Elastohydrodynamic Lubrication", Ph.D. Thesis, , University of Twente, The Netherlands.
- [39] G. Gasni, M. K. Wan Ibrahim, and R. S. Dwyer-Joyce, (2011), "Measurements of lubricant film thickness in the iso-viscous elastohydrodynamic regime", Tribology International, vol. 44, p. 11.
- [40] L.-M. Chu, H.-C. Hsu, J.-R. Lin, and Y.-P. Chang, (2009), "Inverse approach for calculating temperature in EHL of line contacts", Tribology International, vol. 42, pp. 1154-1162.
- [41] S. Srirattayawong and S. Gao, (2013) "A computational fluid dynamics study of elastohydrodynamic lubrication line contact problem with consideration of surface roughness", Computational Thermal Sciences, vol. 5, pp. 195-213.

10. BIOGRAPHIES

Dr. Sutthinan Srirattayawong received his PhD in Mechanical Engineering (2013) from the University of Leicester, United Kingdom. Currently he is a lecturer at the University of Phayao. His research interest includes CFD analysis of the real surface roughness effects on the thermal-elastohydrodynamic lubrication and grain drying under vacuum pressure.



Dr. Rachaneewan Aungkurabrut received her PhD in Mechanical Engineering (2012) from The University of Texas at Arlington, USA. Currently she is a lecturer at the University of Phayao. Her research interest includes thermal conductivity improvement for mortar using water yacynth and a full-scale biodiesel microreactor.



Effects of Stack and Heat Exchanger Configurations on Thermal Performance of a Thermoacoustic Refrigerator

W. Kamsanam^{1*}, R. Aungkurabrut¹ and F. Jinuntuya¹

¹Department of Mechanical Engineering, University of Phayao

*Corresponding author E-mail : tao_wasan@hotmail.com

(Received: January 15, 2018, Revised: June 18, 2018, Accepted: October 24, 2018)

Abstract

This paper discusses the influences of relevant parameters on thermal performance of a standing wave thermoacoustic refrigerator. The effects of the parameters, such as oscillating frequency, stack and heat exchanger configurations were investigated. The thermoacoustic refrigerator built for the current study comprised of a PVC resonator pipe of 1.05 metre in length and 2 inches of nominal diameter. A loudspeaker was installed at one end of the resonator pipe to oscillate the air, which was used as the working gas. Electrical power supplied to the loudspeaker was fixed at 42 W for the whole experiment. There were three set of stacks selected in this experiment; paralleled PVC sheet stacks of 3.5 cm and 10 cm long and aluminium wire mesh screen stack with a total length of 10 cm. Three heat exchangers were used; 2.0 cm and 22 cm long galvanized steel sheet heat exchanger and 2.0 cm long copper finned heat exchanger were included in the test. In the current study, the thermal performance of the refrigerator was represented in terms of air temperature at the cold end and hot end stack, room temperature and their differences. The results revealed that the resonant frequency was found at around 80 Hz. The system with aluminium wire mesh screen stack provided the best thermal performance comparing to paralleled plate stacks. The optimum stack position was at 70 cm measurement from the front of the loudspeaker. The lowest air temperature at the cold end stack was 7°C below the room temperature, which could contribute to the installation of the copper finned heat exchanger.

Keywords: thermoacoustic refrigerator, stack, heat exchanger.

1. NOMENCLATURE

B	blockage ratio
B _T	limit of error
b _T	systematic uncertainty
c _p	isobaric specific heat (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
D	gap spacing (m)
f	oscillating frequency (Hz)
K	specific heat ratio
k	thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)
L	resonator length (m)
L _s	Stack length (cm)
l	half of plate thickness (m)
N	number of samples
R	gas constant (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
S	stack position (cm)
S _T	standard deviation
s _T	precision or random uncertainty
T	temperature (°C or K)
T _C	air temperature at cold end stack (°C)
T _H	air temperature at hot end stack (°C)
T _R	room temperature (°C)
U _T	overall uncertainty
v	speed of sound in gas (m s ⁻¹)
y _o	half of plate spacing (m)
δ _k	thermal penetration depth (m)
δ _v	viscous penetration depth (m)
λ	wave length (m)
μ	dynamic viscosity (N s m ⁻²)
ρ	density (kg m ⁻³)
ω	angular frequency (rad s ⁻¹)

2. INTRODUCTION

Nowadays, the global environmental problem has become an important issue to be considered. Greenhouse effect is one of the major concerns among the scientists. Refrigerants such as Chlorofluorocarbons (CFCs) and Hydrofluorocarbons (HCFCs and HFCs) are the examples of greenhouse gases. These gases significantly destroy the stratospheric ozone, and subsequently, enhance the greenhouse effect. Solutions for this situation may include producing alternative refrigerant gases such as Hydrofluoroolefin (HFO), CO₂, R290, R600 and R32 as well as developing new cooling process which is harmless to the environment. Thermoacoustic refrigeration is a state-of-the-art cooling system. It uses noble gases, for instance, Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon, air or their mixtures as the working fluid instead of the destructive refrigerants [1]. Such noble gases have low chemical reactivity and are transparent to the wavelengths of light which is responsible for trapping heat. Thus, these gases do not contribute to the greenhouse effects. It could be claimed that thermoacoustic devices are environment-friendly technology. In addition, the thermoacoustic refrigerator has less moving components compared to the vapor compression refrigerator. This is one of the main advantages in terms of reducing the maintenance cost. Thus, the thermoacoustic refrigeration could be a competitor of the traditional vapor compression system.

The main components of the thermoacoustic refrigerator are a resonator pipe, a linear driver or

loudspeaker which is used to generate acoustic waves, a stack and two heat exchangers. Once the gas parcels in the resonator pipe are oscillated because of the excitation from the driver, they experience compression and expansion causing a transport of heat from the lower to the higher temperature region. Besides the linear driver or loudspeaker, the thermoacoustic refrigerator can be driven by its reversed process device called thermoacoustic heat engine. Such refrigeration system would benefit communities in remote and rural areas of the developing countries. Saechan et al. [2] developed a thermoacoustic refrigerator driven by a combustion powered thermoacoustic engine. The refrigerator achieved the lowest temperature of -3.6°C at the maximum coefficient of performance (COP) of 1.42 which was enough for cooling storage of crucial medicines. A similar apparatus was constructed by Jaworski & Mao [3]. The later setup provided better performance with the lowest temperature of -20.0°C and the maximum achieved cooling load was 133W at the COP of 2.06. Apart from the biomass combustion, the waste heat from the exhaust gas of an internal combustion engine with high temperature of 700°C could also be used as thermal input for thermoacoustic engine and refrigerator combination. This exploration had been revealed by Gardner & Howard [4]. According to their simulation results, the refrigerator would provide 135W cooling power and the temperature at cold heat exchanger would be -45°C at its optimum operation. Nevertheless, the experimental data were not presented in the report. The comparison on COP of thermoacoustic refrigerator and vapor compression system was also modelled by Starr et al. [5]. They found that thermoacoustic refrigerator was suitable for low heat load application such as electronic devices cooling. However, for large heat loads, the COP of thermoacoustic refrigerator was less than the conventional vapor compression system.

There are many parameters that have significant influence on the performance of thermoacoustic devices. Tijani et al. [6] applied numerical approach for the optimization of different parts of thermoacoustic refrigerator. Tijani et al. [7] also performed an experimental investigation on the effects of gap spacing between parallel-plate stacks. The optimal spacing of about three times the thermal penetration depth was suggested. However, other geometries, such as length and position of stack were not mentioned in the report. The suitable design criteria for stack length, stack position and the gap spacing of stack and heat exchanger length established from computational method have been presented by Piccolo [8] and Nouh et al. [9]. Experimental studies related to the thermoacoustic refrigerator have also been done by other research groups. Assawamartbunlue & Kanjanawadee [10] presented experimental results of parameters such as stack position, plate spacing, stack length and thermal conductivity of stack which influenced the temperature profile on the stack. Actually, there was no heat exchanger installed at the stack extremities. A year later, Supperm et al. [11] added heat exchangers in a thermoacoustic refrigerator to

observe thermoacoustic phenomenon. However, the effect of stack geometry on the refrigerator performance was not investigated. The effects of both stack parameters and heat exchanger were determined by Dhuchakallaya & Saechan [12]. The optimum geometry of stack was suggested. Nevertheless, it was found that the heat exchanger installed at hot end stack did not contribute to the temperature reduction on the cold end stack.

As the heat transfer process plays an important role on the overall performance of thermoacoustic devices, the fabrication technique for the heat exchanger in oscillatory flow condition was presented by Garrett et al. [13]. The convective heat transfer coefficient for oscillatory flow was predicted, but the influence of heat exchanger parameters on thermoacoustic refrigerator performance was not depicted. Basically, the heat transfer process in the oscillatory flow is quite complex. As pointed out by Nsofor et al. [14], the straight flow heat transfer correlation is not applicable for analyses of the thermoacoustic system. Thus, the design of the heat exchanger for the thermoacoustic device needs to be further investigated.

As reviewed earlier, the effects of stack configurations have been numerically examined in [6] and [8]. Considering the experimental works, stacks made from thin plastic sheet rolled into spiral pores were tested as mentioned in [10] and [12]. To satisfy the experimental requirements, the effects of stacks with different configurations are needed to be investigated. In [11] and [12], the setup of thermoacoustic refrigerators were equipped with heat exchangers. The enhancement of cooling performance because of the heat exchangers was not reported in [11]. In [12], there was no evidence to exhibit the advantage of hot heat exchanger on thermoacoustic refrigerator performance which differs from that stated in [13]. Thus, the investigation regarding this parameter is required to be performed.

In this study, the influence of oscillating frequency was carried out and the resonance frequency for the developed apparatus was determined. For the effects of stack configurations, parallel sheets stacks and an aluminium wire mesh screen stack were chosen for the current experiment. The optimum length and position of stack were also examined. As the hot heat exchanger might have impact on the thermoacoustic refrigerator operation, heat exchangers of different configurations were selected and their influences were observed.

3. EXPERIMENTAL APPARATUS AND PROCEDURES

The thermoacoustic refrigerator developed for this experiment is of standing wave type. It composes of main components such as a resonator pipe, a stack, a hot heat exchanger and a loudspeaker within the enclosed box (Fig. 1). One heat exchanger is situated on the hot side of the stack. This heat exchanger is responsible for ejecting heat from the system. On the cold side of the stack, it is a vacant space to simulate no-heating load situation. Although the overall performance of thermoacoustic

device is influenced by the working gas [15, 16], this parameter is beyond the scope of the current study. Thus, the air at the atmospheric pressure is used as the working fluid for simplicity.

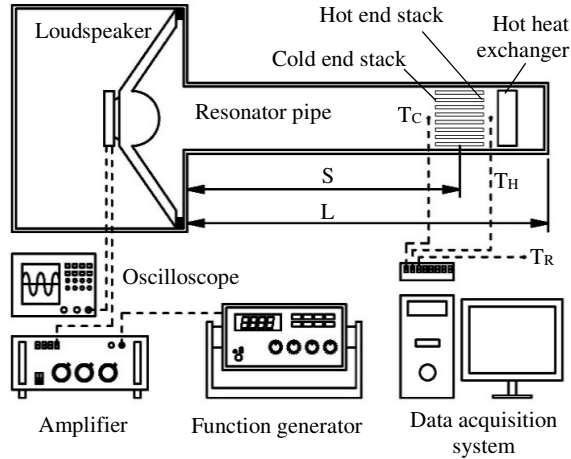


Figure 1 A schematic diagram of the standing wave thermoacoustic refrigerator in the current study.

The resonator is an essential component with other parts attached to it. For this reason, it must be strong enough and have rigid surface for the sake of acoustic wave reflection. The PVC pipe is selected such that it can withstand the mean and dynamic pressure generated from the loudspeaker. Regarding thermal property, PVC pipe has a low thermal conductivity (0.17 W/m·K) [17]. Therefore, the heat leakage through the pipe surface is low. Since a heat exchanger will be installed at the hot end stack, small pipe diameter may cause difficulty for the heat exchanger fabrication and installation. As mentioned in [15], the loss of the acoustic power is proportional to surface area of the resonator, thus a compact resonator pipe has less acoustic power dissipation. Hence, a PVC pipe of 2 inches diameter is suitable for this study. According to the specification of loudspeaker used in this study, its resonant frequency, which characterizes the highest excursion, is about 69 Hz. Referring to Equations (1) and (2) [18], a 1.05 m long resonator pipe is a compromise in this case considering that the length of the pipe (L) is twice the acoustic wave length (λ). In addition, this resonator length is applicable to install all the necessary components and is able to vary stack position for the investigation.

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

$$v = \sqrt{KRT} \quad (2)$$

Another crucial component is stack. Basically, the stack in a standing wave thermoacoustic device is a pack of well-spaced thin solid sheets. Material of high heat capacity and low thermal conductivity is preferable. It is suggested that space between each plate of stack should be 2-4 times the thermal penetration depth (δ_k). The definition of δ_k can be seen in Equation (3) [19].

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2k}{\rho c_p \omega}} \quad (3)$$

The thermal penetration depth is an important length scale in thermoacoustics. It represents a rough distance normal to the stack plate that the heat can diffuse through in a time interval of $1/\pi f$ [20]. If the stack is too dense, loss of the acoustic power because of the viscous effects will be prominent. Thus, viscous penetration depth (δ_v) as defined in Equation (4) [19] is another length scale in consideration.

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho \omega}} \quad (4)$$

According to this experimental setup, the viscous penetration depth and thermal penetration depth is obtained at about 0.25 and 0.29 mm, respectively. Paralleled sheets stacks in this study are fabricated with gap spacing (D) of 1.0 mm corresponding to the recommended value; $2\delta_k < D < 4\delta_k$ (0.58 mm < D < 1.16 mm). Porosity or blockage ratio of stacks defined by Equation (5) is 0.77.

$$B = \frac{y_o}{y_o + l} \quad (5)$$

The length and the position of stack also have great influences. Three set of stacks, as detailed in Table 1, are included in the test. Stack No.1 and No.2 consist of parallel plates which is made from Polyvinylchloride (PVC) sheet. Stack No. 3 comprises of many pieces of aluminium mesh screen packed together to achieve a total length of 10 cm. Drawing of all stacks are depicted in Fig. 2.

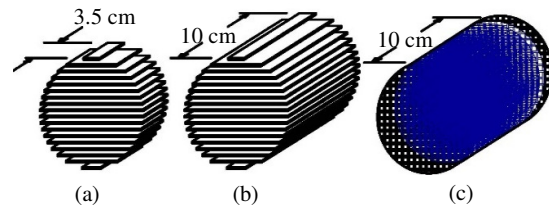


Figure 2 Illustration of stacks. (a) Stack No.1: 3.5 cm long paralleled sheets, (b) stack No.2: 10 cm long paralleled sheets and (c)stack No.3: 10 cm long wire mesh stack

Thermal interaction between the working gas and the solid surfaces is crucial for the performance of the thermoacoustic devices. It is assumed that the capability of heat removing from the system may determine the overall performance of the thermoacoustic devices. Thus, three heat exchangers of various configurations, as presented in Table 1, were developed to perform as a hot heat exchanger. HEX-1 and HEX-2 are of air cooling type. They are made of galvanized steel sheet curled into a hollow cylinder of the same diameter as the resonator pipe. HEX-3 is a copper finned type with water cooling. The fin length measured in gas flow direction was 2 cm while the fin thickness and gap spacing were 0.3 and 1.0

mm, respectively. The cooling water flows in a cavity on the housing circumference. Water at room temperature was used as a cooling medium and the flow rate was kept at 0.2 LPM. There is a small gap of about 5 mm between the hot end stack and HEX-3 in order to minimize the heat flowing back to the stack. Drawing of all heat exchangers is illustrated in Fig. 3.

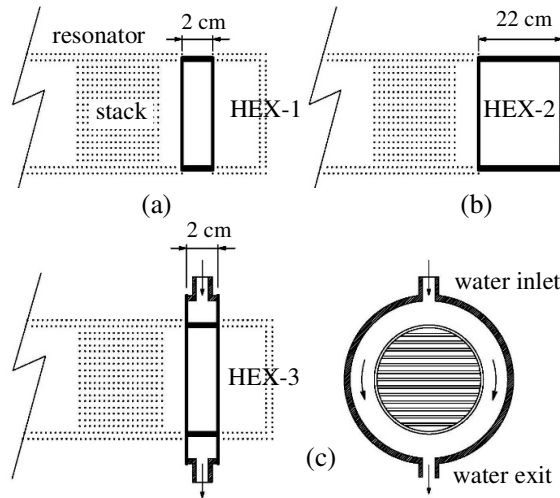


Figure 3 Illustration of HEX-1 (a), HEX-2 (b) and HEX-3 (c).

Table 1 Components of the thermoacoustic refrigerator

Components			
Resonator			
Material	PVC pipe		
Diameter	2” Nominal diameter		
Length	1.05 m		
Stacks	No. 1	No. 2	No. 3
Material	Paralleled PVC sheets	Paralleled PVC sheets	Aluminium wire mesh
k	0.19 W/m·K	0.19 W/m·K	222 W/m·K
c _p	1,470 J/kg·K	1,470 J/kg·K	940 J/kg·K
Length	3.5 cm	10 cm	10 cm
Gap spacing	1 mm	1 mm	-
Thickness	0.3 mm	0.3 mm	0.3 mm
Porosity	0.77	0.77	0.79
Hot Heat Exchanger (HEX)			
	HEX-1	HEX-2	HEX-3
Material	Galvanized steel sheet curled into a hollow cylinder		Copper fins
Length	2 cm	22 cm	2 cm
Cooling liquid	Air	Air	Water

The oscillation of the working gas was induced by an 8 inches loudspeaker. Sine wave signal from a function generator (YOKOGAWA-FC39) was provided through an audio amplifier to drive the loudspeaker at selected frequencies. Electrical power was fixed at 42 W which was less than a half of the loudspeaker rated power. At this level, displacement amplitude of the loudspeaker diaphragm will not exceed its maximum linear excursion of ± 3.1 mm. This can avoid the damage of loudspeaker.

In addition, operating at the mentioned level can minimize the drop of force factor which could result in the loss of the acoustic power and the dynamic pressure. However, to fully understand the influences of audio loudspeaker characteristic, a series of experiments are need to be further conducted. Regarding the measurement, temperature data was acquired by means of type T thermocouple probes and data acquisition system. The air temperature at the cold end stack (T_C), the hot end stack (T_H) and the room temperature (T_R) were collected. The thermocouple probes for measuring T_H and T_C are located at around 2 mm away from the stack extremities (Fig. 1). This location was selected to avoid direct thermal contact of the probes and stack surface. Additionally, the probes are also situated within travelling distance of gas parcels during the oscillation.

At first, the thermoacoustic phenomenon was observed. This was done on the experimental setup with stack No.1 situated at position $S = 50$ cm and no heat exchanger installed. The effect of oscillating frequency was examined by varying the driving frequency from the function generator. Once the system was in steady condition, thermoacoustic effect was noticed through the variation of T_C and T_H . Regarding the influences of position, the stack was moved to various positions: $S = 20, 30, 70$ and 90 cm. The optimum location was determined by the largest temperature difference between the room temperature and the cold side temperature ($T_R - T_C$). Thereafter, stack No.2 and No.3 was tested with the same procedure. When the optimal stack configuration was determined, each of HEX-1, 2 and 3 was installed consecutively to find the most suitable one. From the experiment, it was expected that a suitable stack and heat exchanger would be determined. Furthermore, it was assumed that the installation of the hot heat exchanger could result in the decrease of T_C .

Since the results in this study will be represented by T_R, T_C, T_H and their differences, the source of uncertainty mainly arises from temperature measurement. Basically, the uncertainty can be categorized into two groups: precision or random uncertainty (s_T) and systematic or fixed uncertainty (b_T) [21]. Precision uncertainty for the temperature measurement (s_T) can be calculated from Equation (6) [22]. According to a preliminary temperature measurement, the estimation of precision uncertainty for the temperature measurement (s_T) is $\pm 0.17^\circ\text{C}$.

$$s_T = S_T / \sqrt{N} \quad (6)$$

Regarding the systematic uncertainty of the temperature measurement (b_T), it cannot be directly determined by any statistical technique. However, it is obtained from the equipment specifications given by manufacturers and, then, estimated according to Equation (7) [23]. In the current experiment, temperature measurement was acquired by type T thermocouple (class 1 tolerance) which has limit of error (B_T) at 1.0°C . Hence, the systematic uncertainty of the temperature measurement (b_T) is $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

$$b_T = B_T/2 \quad (7)$$

The overall uncertainty of the temperature measurement (U_T) can be estimated from Equation (8). Referring to the values of s_T and b_T obtained from Equations (6) and (7), the overall uncertainty evaluated at 95% confidence level was $\pm 0.53^\circ\text{C}$.

$$U_T = \sqrt{s_T^2 + b_T^2} \quad (8)$$

4. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

In this study, the thermal performance of standing wave thermoacoustic refrigerator is represented by air temperature at the hot end (T_H) and the cold end (T_C) of the stack comparing with the room temperature (T_R). The temperature information was selected to present here rather than the cooling capacity or the COP to minimize the uncertainty in the measurement. In a small cooling capacity system, if the temperatures are converted to COP, the uncertainty imbedded in the temperature measurement will propagate into the final results. Interpretation of the influences of the interested parameters on thermoacoustic refrigerator performance can be misleading. In addition, a basic setup of the test rig is designed in order to avoid any interference from additional components and measurement devices. Hence, at this stage, temperature data could be employed as a guideline in thermoacoustic refrigerator design procedure.

4.1 Thermoacoustic phenomenon with time evolution

In Fig. 4, air temperature T_H , T_R , T_C and $T_R - T_C$ are illustrated. Temperature profiles were obtained from the setup with stack No.2 and $S = 50$ cm without the heat exchanger while the oscillating frequency was kept at 70 Hz. The temperature measurement from all probes were validated with a calibrated sensor. Prior to run the loud speaker, the temperature data were acquired for several minutes in order to ascertain that all thermocouple probes provided comparable temperature values in the same environment. This can be seen from the temperature readings for the first five minutes in Fig. 4, which shows the values for the three probes are at about 22.5°C . Once the loudspeaker was excited at $5\frac{1}{2}$ minutes, the air started to oscillate and thermoacoustic effect was observed when T_H increased and T_C decreased. The hot area of stack is located adjacent to the closed end of resonator pipe as the air experiences a compression at the pressure antinode during the oscillating cycle. This phenomenon is consistent with the experimental results reported in [11] and [12].

Temperature difference $T_R - T_C$ is presented by the bottom line shown in Fig. 4. It is noticed that $T_R - T_C$ continuously increases from around 0°C (at $5\frac{1}{2}$ minutes) to 5°C (at 9 minutes) and keeps constant until 18 minutes. After that, $T_R - T_C$ shows a slight fall of about 0.5 – 1.0°C . Considering T_H , it kept rising since the loudspeaker was

on. This occurrence might be because of the fact that the heat dissipation to the surrounding room was lower than that amount of heat being pumped from the cold end stack. This occurrence resulted in heat accumulation around the hot end stack. In such case, the thermal performance of the thermoacoustic refrigerator may get worse because air temperature at the cold end stack rises gradually after running the system for a certain time duration. According to this observation, it is supposed that if heat accumulation at the hot end stack could be diminished, the thermoacoustic refrigerator performance would be improved. For this reason, the significance of the hot heat exchanger installed next to the hot end stack has been taken into account and discussed thereafter

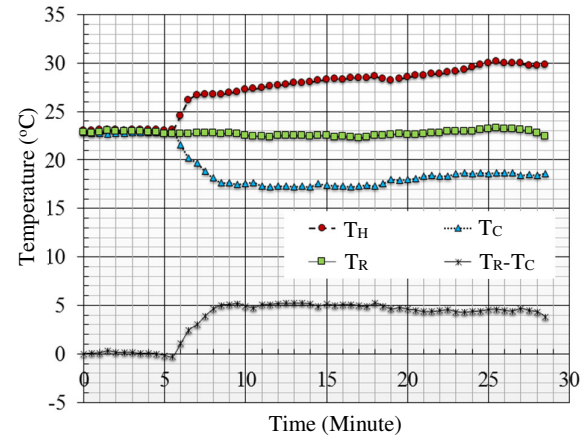


Figure 4 Temperature profiles from the setup with stack No.2, $S = 50$ cm and operating at 70 Hz with no heat exchanger.

4.2 Oscillating Frequency

In Fig. 5, the oscillating frequency is varied from 30 Hz to 120 Hz with the increment of 1.0 Hz for every step. $T_R - T_C$ represents how cold is the air at the cold end stack comparing with the room temperature. $T_R - T_C$ profile shows upward trend from the oscillating frequency of 30 Hz and reaches the peak of about 4.6°C at 77 Hz, after which the drop has appeared. When oscillating frequency was adjusted closer to the resonant frequency, more intense compression applied on the gas parcels as they were traveling toward the pressure antinode. This situation caused the gas parcels to be hotter until achieving the highest temperature at the resonant frequency. According to Fig. 5, the air temperature at the hot end stack (T_H) as well as the difference of hot end and cold end temperature ($T_H - T_C$) reach the peak at 80 Hz. This point is considered as the resonant frequency of the current system. For frequencies beyond the resonance, both T_H and $T_H - T_C$ steadily decreased until the upper frequency limit in this experiment was attained.

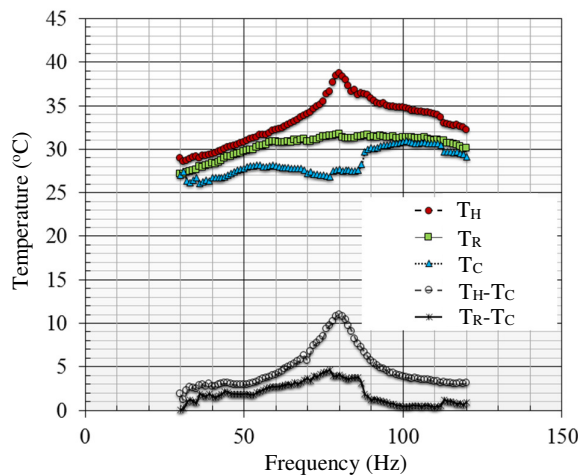


Figure 5 Air temperature vs. oscillating frequency of the setup with stack No.2 and $S=50$ cm with no heat exchanger.

4.3 Stack Configurations

The temperature profiles of $T_R - T_C$ for the setup with different stacks are presented in Fig. 6. It can be observed that at the frequency below 55 Hz and most frequency above 88 Hz, stack No.1 gives higher $T_R - T_C$ than that of stack No.2. However, the frequencies in those regions are quite far from the system resonance thus the cooling effect is small. Considering the temperature at or nearby the resonant frequency, $T_R - T_C$ for stack No.2 is higher than that of stack No.1. Basically, the stack functions as a medium for temporarily storing the heat while it is transported from the cold end to the hot end of it. The short stack like the stack No.1 may not be able to hold temperature gradient along the surface. In addition, the acoustic power dissipation because of the friction is another crucial parameter for a long stack. However, the tests for stacks longer than 10 cm were not performed in this study. This can be an essential issue for further investigation.

Regarding the material, the stack that has low thermal conductivity is preferable because heat conduction from the hot end to the cold end will deteriorate the cooling capacity of thermoacoustic refrigerator. Furthermore, material with high heat capacity is required in order to maintain the temperature gradient along the stack and to keep the local temperature on solid surface to be steady. As depicted in Fig. 6, stack No.3 which is made from aluminium wire mesh screen, shows the higher peak of $T_R - T_C$ than that of stack No.1 and No.2 made from paralleled PVC sheet. Once the thermal properties of the PVC sheet and the aluminium wire mesh screen are considered as detailed in Table 1, a substantially high thermal conductivity of the aluminium stack should have negative effect on $T_R - T_C$. This consequence could be because of the heat-transfer-resistant air layers between each piece of the mesh. Thus, heat conduction through the aluminium wire mesh screen stack would be diminished.

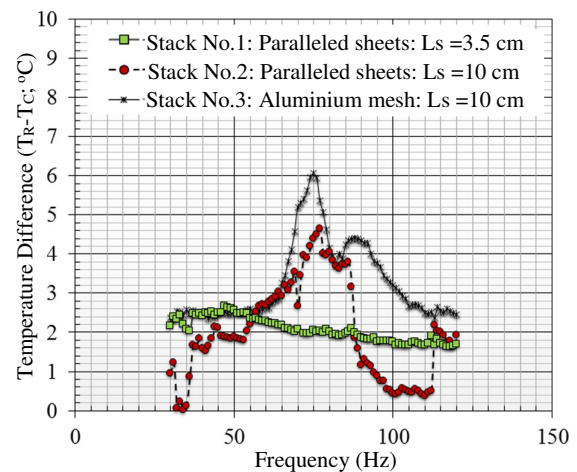


Figure 6 The influences of stack configurations on $T_R - T_C$ for the setup at stack location $S=70$ cm with no heat exchanger.

Stack position in the thermoacoustic refrigerator is also a key parameter having a great impact on the overall performance. In Fig. 7, the influences of stack position on $T_R - T_C$ for the setup of stack No.3 with no heat exchanger is presented. It can be observed that the stack which is located close to the loudspeaker ($S=20$ cm) and the one which is placed nearby the close end of the resonator ($S=90$ cm) do not reveal the peak of $T_R - T_C$. For the positions of stack at 50 and 70 cm, the peak of $T_R - T_C$ are about 5 and 6°C, respectively. Thus, it can be determined that the optimum position of the stack for this test rig is at $S=70$ cm.

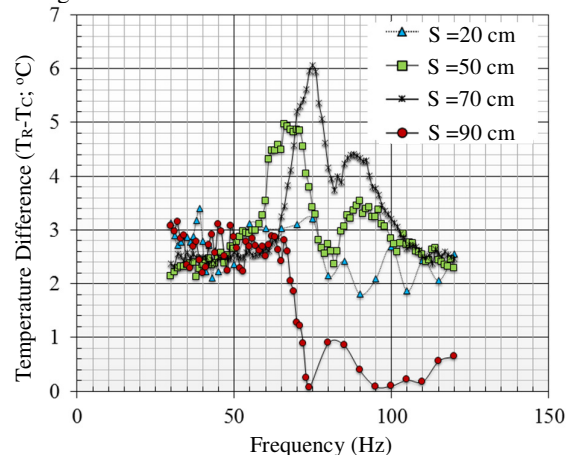


Figure 7 The influences of stack position on $T_R - T_C$ for the setup of stack No.3 with no heat exchanger.

According to Fig. 7, the higher the S , the closer is the stack to the closed end of resonator which is a velocity node. The gas velocity amplitude will be lower at the position closer to this end. Since the viscous dissipation loss is proportional to the square of the gas velocity amplitude, the decreasing of velocity amplitude will result in a reduction of the losses. Thus, the peak of $T_R - T_C$ for $S=70$ cm is better than those for $S=20$ and 50 cm. Nevertheless, the acoustic power proportions to the

imaginary part of the product of the pressure amplitude and the gas velocity amplitude. This implies that acoustic power will drop if stack is installed too close to the velocity node. This could be the explanation that the stack situated at $S = 90$ cm provides the worst $T_R - T_C$. Thus, a compromise on the stack positioning is also required.

4.4 Impact of the hot heat exchanger

To determine the influence of the heat transfer capability at the hot side of stack on the thermal performance of the thermoacoustic refrigerator, three types of heat exchangers were tested and compared with the original arrangement, i.e. without the heat exchanger. Fig. 8 shows that $T_R - T_C$ for HEX-1 and HEX-2 are similar and lower than that of the original setup. Basically, the resonator should be chosen from a rigid material so that it can effectively reflect the acoustic wave. In case of HEX-1 and HEX-2, which was made from the galvanized steel sheet, might not be strong enough for the working gas as a rigid boundary. As a result, $T_R - T_C$ got worse comparing with the original setup. For HEX-03, the peak of $T_R - T_C$ was higher than that of the original resonator pipe of about 1°C . However, it was found in [12] that T_C could not be further reduced by adding a hot heat exchanger. Their results might not be consistent with that obtained in this study; the discrepancy might be because of the difference in the heat exchangers' configuration. In [12], two heat exchangers were built for the test. They were made from spiral copper tube: one was a bare tube and another one was a bare tube attached by copper scourer to increase the heat transfer area. These two heat exchangers might have caused high pressure drop because of the blockage from the spiral tube, while HEX-3, in the current study, had less flow obstruction. Fig. 9 shows, the difference in $T_H - T_R$ is approximately 3°C between the peak of the original resonator (higher peak) and that of the setup with HEX-03 (lower peak). This indicates the impact of the heat exchanger in thermoacoustic devices.

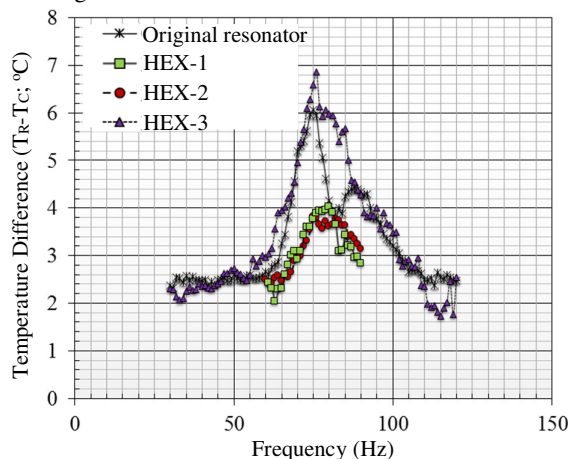


Figure 8 The influence of the hot heat exchanger on $T_R - T_C$ for the setup with stack No.3 at location $S = 70$ cm.

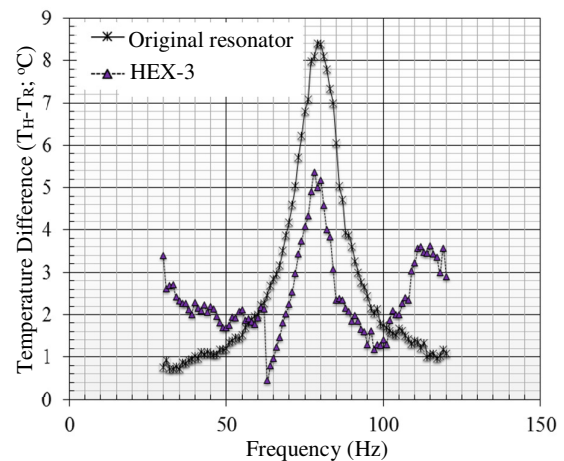


Figure 9 The influence of the hot heat exchanger on $T_H - T_R$ for the setup with stack No.3 at location $S = 70$ cm.

5. CONCLUSION

In the near future, thermoacoustic refrigeration could be a potential competitor to vapor compression system because it has less moving parts and uses noble gas as the working fluid. However, the investigation on the effects of various parameters on the performance is required. In this study, the resonant frequency is found at around 80 Hz from the experimental setup. Regarding the stack configuration, the optimum position is at $S = 70$ cm. The stack material is also a crucial matter. Generally, a stack of high heat capacity and low thermal conductivity is required. It is found that stack No.3, which made from aluminium wire mesh screen, provides the largest $T_R - T_C$. This could be because of the heat-transfer-resistant air layers between each mesh screen. Since heat from the cold end stack will be transported and accumulated at the hot end stack, a hot heat exchanger could benefit the refrigerator performance. The suitable heat exchanger in this experiment is HEX-3, which is a water cooled copper finned heat exchanger. According to the results, the lowest air temperature measured at the cold end stack is obtained at around 7°C below the room temperature.

This study focuses on the thermal performance in terms of air temperature at the cold end and hot end stack comparing with room temperature. The results could be used as a guideline for designing thermoacoustic refrigerator. However, a system filled with compressed noble gas to achieve higher cooling capacity would be required for further investigation. Then, the experimental results could be presented in terms of COP or other quantities. Moreover, additional parameters in accordance with finned heat exchanger configuration, such as fin spacing, fin length, resonator pipe parameters and input acoustic wave should be taken into account.

6. ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge the contributions of Mr. Piyachat Anusornhirunkarn, Mr. Sutakorn Phosing, Mr. Arthit Deemee, Mr. Supawich Khemkhan

and Miss Rapeepun Tojing for their help in setting up a part of the experimental apparatus and a preliminary testing on the system capability. The authors also appreciate the useful comments and contributions of the reviewers and the editors.

7. REFERENCES

- [1] Belcher, J. R., Slaton, W. V., Raspet, R., Bass, H. E., & Lightfoot, J. (1990). Working gases in thermoacoustic engines. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105(5), 2677-2684.
- [2] Saechan, P., Kang, H., Mao, X., & Jaworski, A. J. (2013). Thermoacoustic refrigerator driven by a combustion-powered thermoacoustic engine-demonstrator of device for rural areas of developing countries. In *Lecture Notes in Engineering and Computer Science, World Congress on Engineering*, London, UK, 3 - 5 July 2013, 2097-2102.
- [3] Jaworski, A. J., & Mao, X. (2013). Development of thermoacoustic devices for power generation and refrigeration. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 227(7), 762-782.
- [4] Gardner, D. L., & Howard, C. Q. (2009). Waste-heat-driven thermoacoustic engine and refrigerator. In *Proceedings of Acoustics 2009, Adelaide, Australia*, 23-25 November 2009,
- [5] Starr, R., Bansal, P. K., Jones, R. W., & Mace, B. R. (1996). The reality of a small household thermoacoustic refrigerator. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Indianapolis, United States, 323-328.
- [6] Tijani, M. E. H., Zeegers, J. C. H., & De Waele, A. T. A. M. (2002). Design of thermoacoustic refrigerators. *Cryogenics*, 42, 49-57.
- [7] Tijani, M. E. H., Zeegers, J. C. H., & De Waele, A. T. A. M. (2002). The optimal stack spacing for thermoacoustic refrigeration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(1), 128-133.
- [8] Piccolo, A. (2013). Optimization of thermoacoustic refrigerators using second law analysis. *Applied Energy*, 103, 358-367.
- [9] Nouh, M. A., Arafa, N. M., & Abdel-Rahman, E. (2014). Stack parameters effect on the performance of anharmonic resonator thermoacoustic heat engine. *Archive of Mechanical Engineering*, 61(1), 115-127.
- [10] Assawamartbunlue, K., & Kanjanawadee, P. (2009). Experimental demonstration of thermoacoustic cooling. *Journal of Research in Engineering and Technology*, 6(1), 1-24.
- [11] Supperm, S., Jangsawang, W., & Mingmuang, N. (2010). Study of sound wave cooling. *Srinakharinwirot University Journal of Science and Technology*, 2, 106-114.
- [12] Dhuchakallaya, I., & Saechan, P. (2015). Numerical and experimental study on the stack geometry affecting on the cooling performance of the thermoacoustic refrigerator. *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 25(3), 381-392.
- [13] Garrett, S. L., Perkins, D. K., & Gopinath, A. (1994). Thermoacoustic refrigerator heat exchangers: Design, analysis and fabrication. In *Proceedings of the 10th International Heat Transfer Conference*, Brighton, United Kingdom, 375-380.
- [14] Nsofor, E. C., Celik, S., & Wang X. (2007). Experimental study on the heat transfer at the heat exchanger of the thermoacoustic refrigerating system. *Applied Thermal Engineering*, 27, 2435-2442.
- [15] Swift, G.W. (1988). Thermoacoustic engines. *Journal of the Acoustical Society of America*, 84(4), 1145-1180.
- [16] Tijani, M. E. H., Zeegers, J. C. H., & De Waele, A. T. A. M. (2002). Prandtl number and thermoacoustic refrigerators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(1), 134-143.
- [17] Sekisui Chemical (2008). *ESLON SCH80 PVC & CPVC Piping Systems Specifications & Engineering Manual* (1st ed., 112). Tokyo, Japan: Sekisui Chemical.
- [18] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2007). *Thermodynamics: An engineering approach* (6th ed., pp. 855) Singapore: McGraw-Hill.
- [19] Wheatley, J., Hofler, T., Swift, G. W., & Migliori, A. (1983). An intrinsically irreversible thermoacoustic heat engine. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 74(1), 153-170.
- [20] Swift, G.W. (1995). Thermoacoustic engines and refrigerators. *Physics Today*, 48(7), 22-28.
- [21] Kim, J. H., Simon, T. W., & Viskanta, R. (1993). Journal of heat transfer policy on reporting uncertainties in experimental measurements and results. *Journal of Heat Transfer*, 115(1), 5-6.
- [22] Miller, V. R. (2002). Recommended guide for determining and reporting uncertainties for balances and scales. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.
- [23] Dieck, R. H., Steele, W. G., & Osolsope, G. (2005). *Test Uncertainty*. ASME PTC 19.1-2005. New York: American Society of Mechanical Engineers.

8. BIOGRAPHIES



Dr. Wasan Kamsanam received his PhD in Mechanical Engineering (2014) from the University of Leicester, UK. Currently he is a lecturer at the University of Phayao, Thailand. His research interest includes heat transfer phenomena in oscillatory flow and thermoacoustic technology.



Dr. Rachaneewan Aungkurabrut received her PhD in Aerospace and Mechanical Engineering (2011) from University Of Texas at Arlington, USA. She is currently a lecturer at the University of Phayao, Thailand. Her research interest includes Micro and capillary reactor technology; biodiesel; Fischer-Tropsch process.



Dr. Fontip Jinuntuya received her PhD in Aeronautical and Automotive Engineering (2015) from Loughborough University, UK. She is currently a lecturer at the University of Phayao, Thailand. Her research interest includes proton exchange membrane fuel cell and lattice Boltzmann modelling.

การปรับพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง Single Phase Transformer Parameter Modification by Central Composite Design Method

เดือนแรม พ่างเกี้ยว* และ สมพร เรืองสินชัยวานิช

D. Phaengkiao and S. Ruangsinchaiwanich

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Department of Electrical & Computer Engineering Faculty of Engineering Naresuan University

E-mail: sompornru@yahoo.co.uk

*Corresponding author E-mail: duanraemp@gmail.com

(Received: March 27, 2018, Revised: April 7, 2018, Accepted: July 23, 2018)

บทคัดย่อ

แม้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถพัฒนาได้หลากหลายวิธีด้วยแนวทางใหม่ๆ วิธีการทางเลือกอื่นๆ สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้ายังคงถูกนำเสนอโดยนักวิจัยอย่างต่อเนื่อง หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องใช้ไฟฟ้าจำนวนมาก เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าในเครื่องใช้ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นย่อมส่งผลให้เครื่องใช้ไฟฟ้าใช้พลังงานลดลงด้วย บทความวิจัยนี้นำเสนอการปรับพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการใช้วิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design Method) สำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าทางเทคนิคพารามิเตอร์ด้านโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น ความหนาแกนเหล็ก จำนวนรอบขดลวดตัวนำและพื้นที่หน้าตัดขดลวดตัวนำ ถูกวิเคราะห์และปรับเปลี่ยนตามวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง วิธีการที่นำเสนอนี้มีผลที่น่าพอใจสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อแปลงแบบหนึ่งเฟส โดยหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่มีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 3.7% และสามารถลดต้นทุนของค่าวัสดุในหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่ได้ถึง 4.09% เมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

คำสำคัญ: การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า วิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Although an electrical transformer can be developed efficiency by many novel approaches, the alternative methods for the transformer efficiency improvement have been proposed by researcher frequently. An electrical transformer is one of main components for many electric appliances. While the transformer of the electric appliance has high efficiency, thus the electric appliance will consume lower power energy. This paper proposes for modifying transformer parameters by using central composite design (CCD) method to improve the efficiency of transformer. Technically, the transformer structural parameters such as core thickness, winding turn number and conductor area are analyzed and modified by the central composite design. Consequently, the proposed method is positive for improving the efficiency of single phase transformer. The efficiency of the innovative transformer is higher 3.7% comparing with the prototype transformer. Also the cost of the innovative transformer can be reduced as 4.09% comparing with the prototype transformer.

Keywords: Transformer Design, Central Composite Design Method, Finite Element Method

1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้า (Electrical Transformer) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสำคัญของเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม พบว่า การจำหน่ายเครื่องใช้ไฟฟ้าในประเทศไทยของไตรมาสที่หนึ่งปี 2561 เมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปี 2560 มีการปรับตัวเพิ่มขึ้นของเครื่องใช้ไฟฟ้าประเภท คอมเพรสเซอร์ เครื่องซักผ้า อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ตู้เย็น และโทรทัศน์ [1] จากข้อมูลดังกล่าวก่อให้เกิดการแข่งขันทางการตลาด ด้วยวิธีลดราคาของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ส่งผลให้ส่วนประกอบภายในของอุปกรณ์มุ่งเน้นประสิทธิภาพลดต้นทุน (การแข่งขันทางการตลาด) ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์บางอย่างต่ำลงด้วย โดยทั่วไปการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะกำหนดคุณลักษณะการใช้งานที่ต้องการหรือปรับคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ให้เปลี่ยนไป เช่น วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) วิธีการนี้อาจทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายบางส่วนและอาจได้รับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบมีคุณลักษณะไม่ตรงตามความต้องการ

ในปัจจุบันวิธีการออกแบบการทดลอง (Experimental Design or Design of Experiments, DOE) ถูกนำมาประยุกต์เพื่อใช้ในการออกแบบด้านวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย อาทิ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบมอเตอร์แม่เหล็กถาวรสำหรับอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ เพื่อลดการเกิดการต้านแรงบิดขณะเริ่มหมุน วิธีพื้นผิวสะท้อน นำเสนอโดย Li และคณะ [2] ต่อมาในปี 2007 Chiang [3] พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิงค์ระบายความร้อนแบบคู่ขนาน โดยออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ค่าความเหมาะสมด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design Method) และวิธีพื้นผิวสะท้อน (Response Surface Methodology) และในปี 2014 Li [4] ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ด้วยวิธีทางสถิติและออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนผสมกลาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้า นอกจากนี้ในปี 2016 Aniket [5] ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางและวิธีพื้นผิวสะท้อนสำหรับการออกแบบโครงของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Tank) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดน้ำหนักโครงของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งสามารถลดน้ำหนักได้ถึง 15% และยังคงเสถียรภาพการทำงานเช่นเดิม เนื่องจากการวิเคราะห์สภาพภายในของอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนจึงมีการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite

Element Method) เพื่อช่วยวิเคราะห์สภาพภายในดังกล่าว เนื่องจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยลดเวลาการทดสอบและมีความถูกต้องแม่นยำ [6]- [8]

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น พบว่า วิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลางมีความเหมาะสมสำหรับการศึกษาในลักษณะของโพลิโนเมียลดีกรี 2 (Second –order) [9], [10] และมีความยืดหยุ่นในการใช้งานเนื่องจากสามารถเลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นการทดลองแพคทอเรียลเต็มรูปและการทดลองแพคทอเรียลบางส่วนและมีประสิทธิภาพมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองอื่นโดยเฉพาะปัจจัยเชิงปริมาณ [11] ดังนั้นจึงทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ด้านโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

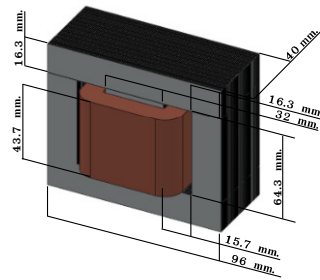
งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางสำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส และใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์สภาพภายในของหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนั้นมีการใช้วิธีการทางสถิติสำหรับวิเคราะห์ค่าความเหมาะสมของสมการต้นแบบที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางและเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบโดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.1 หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบในงานวิจัยนี้ คือ หม้อแปลงไฟฟ้าเชิงพานิชย์ชนิด 1 เฟส แบบเชลล์ (Shell Type) พิกัดกำลังไฟฟ้า 165 โวลต์แอมป์ แรงดันไฟฟ้าพิกัด 220/12 โวลต์ กระแสไฟฟ้าพิกัด 1.25 แอมแปร์ ความถี่ไฟฟ้า 50 เฮิร์ต ซึ่งเป็นการเลือกสุ่มจากท้องตลาดทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) รูปหม้อแปลงจริง และรูปที่ 1(ข)ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ



(ก) ลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ



(ข) ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ
รูปที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย

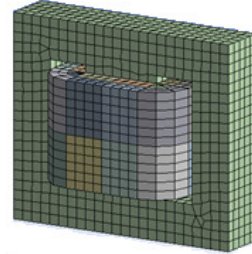
การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) แบบสามมิติ (3D) โดยกำหนดให้ขนาดและพารามิเตอร์ที่สำคัญเหมือนหรือใกล้เคียงกับหม้อแปลงไฟฟ้าจริง โดยมีคุณลักษณะเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าจริง ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ แกนเหล็ก ขดลวดตัวนำ และกำหนดสภาพอากาศให้กับแบบจำลอง ซึ่งรายละเอียดการกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของแบบจำลอง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าจำเพาะของพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

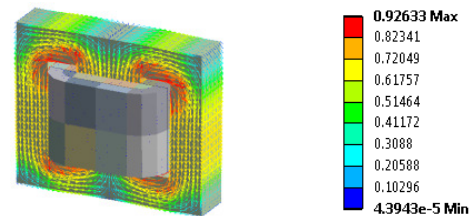
พารามิเตอร์	คุณลักษณะเฉพาะของพารามิเตอร์
แกนเหล็ก (วัสดุ: เหล็ก)	ค่าความหนาแน่น: 7817 kg/m ³
	ค่าการนำความร้อน: 20 W/m. °C
	ค่าความร้อนจำเพาะ: 446 J/kg. °C
	ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์: 7000
ขดลวดตัวนำ (วัสดุ: ทองแดง)	ค่าความหนาแน่น: 8300 kg/m ³
	ค่าการนำความร้อน: 386 W/m. °C
	ค่าความร้อนจำเพาะ: 385 J/kg. °C
	ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์: 1
อากาศ	สภาพต้านทานไฟฟ้า: 1.724e-008 Ω
	ค่าความหนาแน่น: 1.205 kg/m ³
	ค่าการนำความร้อน: 0.0257 W/m. °C
	ค่าความร้อนจำเพาะ: 1005 J/kg. °C
	ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์: 1

จากนั้นสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ตามพิกัดของหม้อแปลงต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 2 และพิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์สภาพการทำงาน ได้แก่ ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดและค่าความร้อนที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3

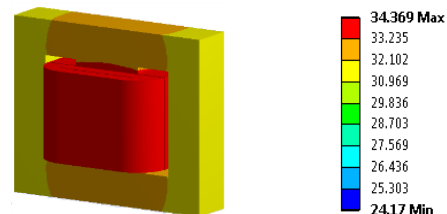
และแสดงผลการเปรียบเทียบการทดสอบระหว่างการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการและการจำลองการทำงาน ของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังตารางที่ 2



รูปที่ 2 การกระจายเมชสำหรับแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า



(ก) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า



(ข) ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 3 ผลการจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

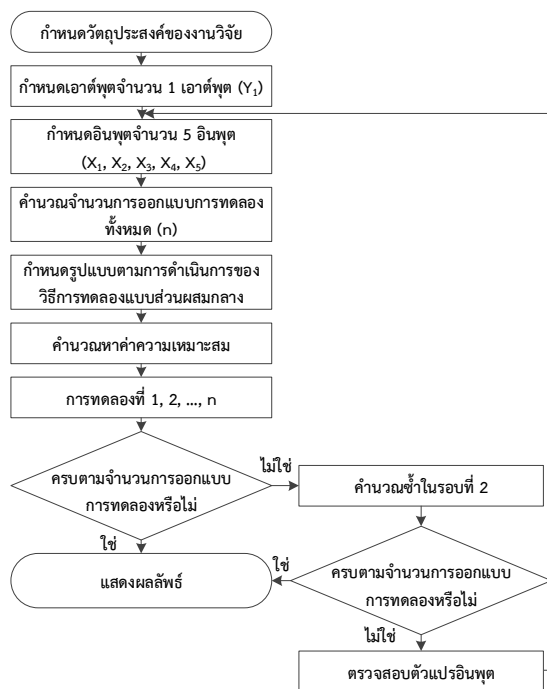
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการและการจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พารามิเตอร์	ผลการทดสอบ	
	ห้องปฏิบัติการ	FEM
ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (P_c)	4.30 W	4.52 W
ค่าความสูญเสียในขดลวดตัวนำ (P_{cu})	72.10 W	74.25 W
ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (B_{max})	0.92 T	0.92 T
ค่าความร้อนสูงสุด (T_{max})	32.50 °C	34.36 °C
ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า (% η)	54.90 %	52.53 %

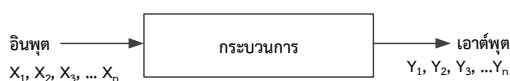
จากผลการเปรียบเทียบการทดลองในตารางที่ 2 พบว่า ผลการจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการจึงนำแบบจำลองดังกล่าวใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและค่าความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อช่วยลดเวลาในการทดสอบ

2.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

วิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลางเป็นวิธีหนึ่งในการออกแบบการทดลอง ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบของการออกแบบที่มีประสิทธิภาพ แสดงขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการออกแบบด้วยวิธีการออกแบบการทดลองดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 แผนภาพการไหลของวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการออกแบบ

โดยเริ่มจากกำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการหาค่าต่ำสุดของค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นกำหนดเอาต์พุต ได้แก่ ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุด (B_{max}) และอินพุต ได้แก่ ความหนาแน่น

เหล็ก จำนวนรอบขดลวดตัวนำและพื้นที่หน้าตัดขดลวดตัวนำ เมื่อระบบรับข้อมูลอินพุต จากนั้นคำนวณจำนวนการออกแบบการทดลองทั้งหมด และระบบทำการคำนวณค่าอินพุตใหม่ ตามรูปแบบการดำเนินการของวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง โดยคำนวณหาค่าอินพุตจนครบตามจำนวนการทดลอง จากนั้นระบบจะแสดงผลลัพธ์ทั้งหมดและสิ้นสุดการทำงาน ซึ่งงานวิจัยนี้พิจารณาอินพุตสำหรับการออกแบบ 5 อินพุต แสดงค่าดังตารางที่ 3 และพิจารณาเอาต์พุต (B) คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุด

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์อินพุตของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

พารามิเตอร์อินพุต	ขนาด (หน่วย)
X_1 คือ ความหนาแน่นเหล็ก	40 mm.
X_2 คือ พื้นที่หน้าตัดขดลวดด้านปฐมภูมิ	$4.56 \times 10^{-7} \text{ m}^2$
X_3 คือ จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ	950 รอบ
X_4 คือ จำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ	80 รอบ
X_5 คือ พื้นที่หน้าตัดขดลวดด้านทุติยภูมิ	$1.102 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

การออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลางเป็นการทดลองที่ 3 ระดับ แทนด้วยสัญลักษณ์ -, 0, + โดยปรับตัวแปรที่ต้องการศึกษาไปตัวแปรละ 3 ค่า เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ Axial Portion (A) เป็นการปรับค่าตัวแปรหนึ่งในขณะที่ให้ค่าตัวแปรอื่นอยู่ที่ค่าเริ่มต้น, Factorial Portion (F) เป็นการนำ 2-Level Full Factorial มาเป็นส่วนหนึ่งของการทดลอง, และจุดศูนย์กลาง (Center Point) เป็นการปรับค่าของทุกตัวแปรที่ค่าเริ่มต้น [11] มีสมการทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

Axial portion สามารถคำนวณจำนวนการทดลองจาก

$$A = 2 \times N \quad (1)$$

Factorial Portion สามารถคำนวณจำนวนการทดลองจาก

$$F = 2^{(N-p)} \quad (2)$$

และจุดศูนย์กลางหนึ่งจุด

เมื่อ N คือ จำนวนพารามิเตอร์ และ p คือ ค่าแฟกทอเรียล

จากสมการที่ (1) และสมการที่ (2) สามารถคำนวณจำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ประกอบด้วยจุดศูนย์กลางจำนวน 1 จุด, Axial Portions จำนวน 10 จุด และ Factorial Portions จำนวน 16 จุด

2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

การทดสอบค่าความเหมาะสมของสมการต้นแบบที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางใช้วิธีการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ซึ่งค่า R^2 มาก หมายถึง สมการมีความเหมาะสมมาก โดยสามารถแสดงรูปแบบตารางการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ดังตารางที่ 4 เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูล p คือ จำนวนพจน์ตัวแปรอิสระในสมการ [12]

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแยกเป็น 3 ส่วน คือ ความแปรปรวนรวม (Sum Square Total, SST) ส่วนที่อธิบายได้ด้วยสมการถดถอย (Sum Squares Regression, SSR) และส่วนที่อธิบายไม่ได้ด้วยสมการถดถอย (Sum Squares Error, SSE) ดังแสดงในสมการ (3)-(7) [12], [13]

$$SST = SSR + SSE \quad (3)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (4)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (5)$$

เมื่อ $\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2$ คือ ผลบวกของผลต่างกำลังสองของ Y จากค่าเฉลี่ยซึ่งค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่าง SSR กับ SSE หาได้จาก

$$F = \frac{\text{Mean Square Regression}}{\text{Mean Square Residual}} = \frac{SSR / (p - 1)}{SSE / (N - p)} \quad (6)$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) หาได้จาก

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (7)$$

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA)

Source of Variation	Degree of Freedom (DF)	Sum of Squares (SS)	Mean Square (MS)
Regression	p-1	SSR	SSR/(p-1)
Residual (Error)	N-p	SSE	SSE/(N-p)
Total	N-1	SST	

3. ผลการศึกษา

3.1 ผลการออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

ผลการออกแบบการทดลองพิจารณาได้จากตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

CCD	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	B
1	0	0	0	0	0	0.926328
2	$-\alpha$	0	0	0	0	0.916525
3	α	0	0	0	0	2.155538
4	0	$-\alpha$	0	0	0	1.032934
5	0	α	0	0	0	0.839101
6	0	0	$-\alpha$	0	0	0.830378
7	0	0	α	0	0	1.022274
8	0	0	0	$-\alpha$	0	0.929641
9	0	0	0	α	0	0.923011
10	0	0	0	0	$-\alpha$	0.922642
11	0	0	0	0	α	0.929340
12	-	-	-	-	+	0.918331
13	+	-	-	-	-	1.168876
14	-	-	-	-	-	0.863537
15	+	-	-	-	+	1.089719
16	-	-	+	-	-	0.972008
17	+	-	+	-	+	1.245022
18	-	+	+	-	+	0.911588
19	+	+	+	-	-	1.169110
20	-	-	-	+	-	0.913007
21	+	-	-	+	+	1.153128
22	-	+	-	+	+	0.862547
23	+	+	-	+	-	1.085190
24	-	-	+	+	+	0.970464
25	+	-	+	+	-	1.243596
26	-	+	+	+	-	0.913184
27	+	+	+	+	+	1.153340

ด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง พิจารณาอินพุต 5 อินพุต และ 1 เอาต์พุต ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง โดยที่ -, 0, + แสดงระดับของข้อมูลในแต่ละส่วน และสามารถค่า Y ได้ดังนี้)

$$Y = 11 - 5X_1 + 48898067X_2 + 18559654X_5 - 766178(X_1X_2) - 98369(X_1X_5) - 5630(X_2X_3) + 9224(X_2X_4) - 5.26442 \times 10^{11}(X_2X_5) - 820(X_3X_5) - 6091(X_4X_5) - 3.36357 \times 10^{13}(X_2^2) - 6.85337E \times 10^{12}(X_5^2) \quad (8)$$

3.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

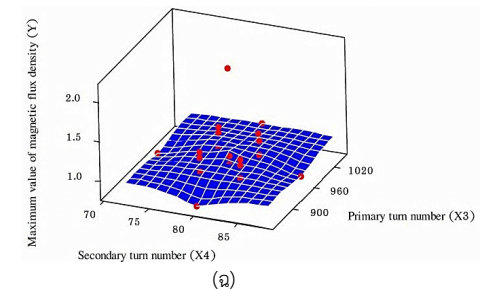
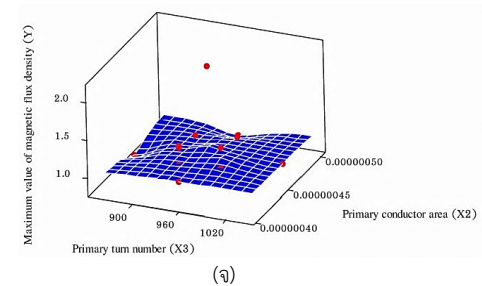
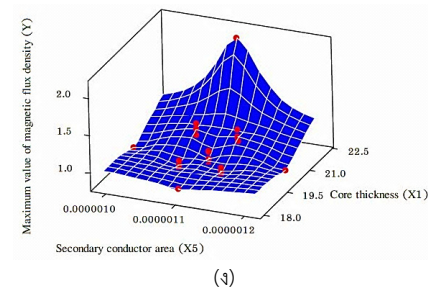
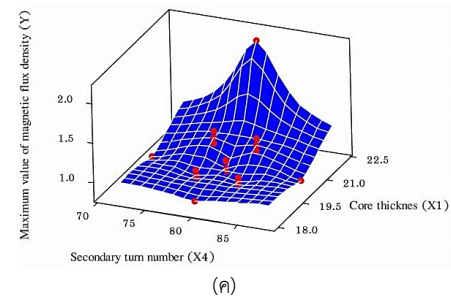
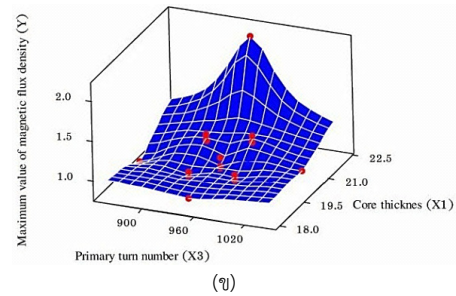
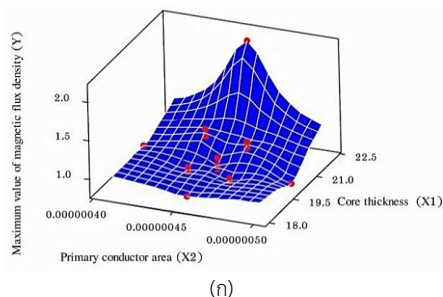
จากผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการทดลองแบบ ส่วนผสมกลาง เมื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ด้วยการ ทดสอบค่าความเหมาะสมของสมการต้นแบบด้วยค่า R^2 จากผล การทดสอบ พบว่า สมการต้นแบบมีค่า R^2 เท่ากับ 90.83% และมีค่า P-value (ค่าความน่าจะเป็น) เท่ากับ 0.001 แสดงผล การวิเคราะห์ด้วย ANOVA ดังตารางที่ 6 จากการศึกษาเอกสาร วิชาการและวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้อง พบว่า การออกแบบการ ทดลองที่ดีควรมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ $R^2 > 70\%$ และค่า P- Value < 0.05 (α) แสดงว่าแบบจำลองนี้มีความเพียงพอ ในการพิชิตข้อมูลและถือว่าเป็นข้อมูลที่ดี สามารถนำไปสร้าง สมการทำนายเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด [14]

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	1.05928	0.21186	7.04	0.001
Residual Error	21	0.63236	0.03011		
Total	26	1.69164			

3.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของปัจจัย (Analysis of each factor interaction)

จากผลการออกแบบในตารางที่ 6 เมื่อนำมาวิเคราะห์ พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก สูงสุด พบว่า ค่าความหนาแน่นแม่เหล็ก จำนวนรอบขดลวดตัวนำ และพื้นที่หน้าตัดขดลวดตัวนำ ส่งผลโดยตรงต่อค่าความ หนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด โดยค่าความหนาแน่น แม่เหล็กส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นเส้นแรง แม่เหล็กมากที่สุด ดังแสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่อค่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดในรูปที่ 6(ก)-(ง) หาก ไม่พิจารณาพารามิเตอร์ความหนาแน่นแม่เหล็ก พบว่า ค่าความ หนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก นักดังแสดงในรูปที่ 6(จ)-(ฉ)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของ เส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด

3.4 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ทางไฟฟ้า

จากผลการออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง ในตารางที่ 7 สามารถนำมาคำนวณหาค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและค่าความสูญเสียในขดลวดตัวนำ ดังสมการที่ (9) – (11) และคำนวณหา ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ดังสมการที่ (12) [15]

$$P_c = Vol \times f \times ((ch \times B^{1.6}) + (ce \times B^2 \times f)) \quad (9)$$

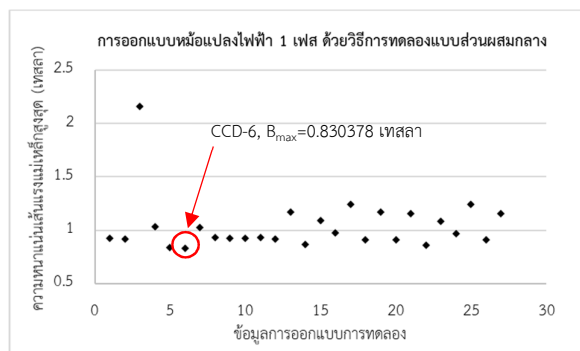
$$P_{CU} = I^2 \times R_s \quad (10)$$

$$P_{loss} = P_c \times P_{CU} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad (12)$$

เมื่อ P_c คือ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (W), P_{CU} คือ ค่าความสูญเสียในขดลวดตัวนำ (W), P_{loss} คือ ค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า (W), Vol คือ ปริมาตรของแกนเหล็ก (m^3), f คือ ค่าความถี่ทางไฟฟ้า (Hz), B คือ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (T) และ η คือ ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า (%)

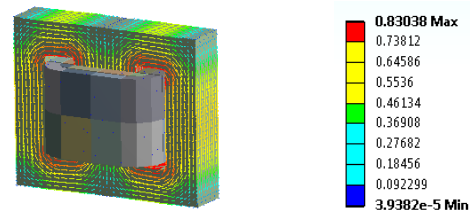
จากผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง ในตารางที่ 5 เมื่อพิจารณา ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่มีค่าน้อยที่สุด ดังรูปที่ 7 พบว่า แบบจำลองที่ 6 (CCD-6) ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 7 จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบแทนกลับในแบบจำลองของไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า แบบจำลองที่ 6 (CCD-6) มีค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.830378 เทสลา มีค่าความร้อนเท่ากับ 30.811 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 8



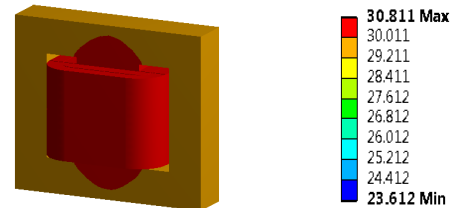
รูปที่ 7 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดจากการออกแบบการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง

ตารางที่ 7 ผลการทดลองที่ดีที่สุดจากการออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

พารามิเตอร์อินพุต	ขนาด (หน่วย)
X_1 คือ ความหนาของแกนเหล็ก	40 mm.
X_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านปฐมภูมิ	$4.56 \times 10^{-7} m^2$
X_3 คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ	855 รอบ
X_4 คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ	80 รอบ
X_5 คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านทุติยภูมิ	$1.102 \times 10^{-6} m^2$



(ก) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

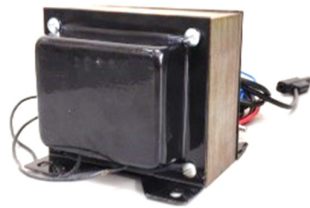


(ข) ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 8 ผลการจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส จากผลการออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

3.5 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลางในห้องปฏิบัติการ

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลางมาสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าจริง แสดงลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูปที่ 9(ก) และนำหม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าวไปทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยการทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test) และการทดสอบแบบลัดวงจร (Short Circuit Test) ซึ่งใช้พิกัดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 9(ข) พบว่า ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กเท่ากับ 3.0 วัตต์ ค่าความสูญเสียในขดลวดตัวนำเท่ากับ 65.3 วัตต์ ค่าความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าเท่ากับ 29.1 องศาเซลเซียส



(ก) หม้อแปลงไฟฟ้าจริง



(ข) การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 9 หม้อแปลงไฟฟ้าจริงและการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

4. อภิปรายผลการศึกษา

จากผลการออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง เมื่อนำค่าพารามิเตอร์มาออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจริงและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ พบว่า การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง มีค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง 8.1 วัตต์ คิดเป็น 10.60 เปอร์เซ็นต์ ค่าความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง 3.4 องศาเซลเซียส คิดเป็น 10.46 เปอร์เซ็นต์ ต้นทุนวัสดุของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง 9 บาท คิดเป็น 4.09 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 3.70 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นผลมาจากค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจากผลการทดลองในตารางที่ 6 ค่าจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิลดลงจึงส่งผลต่อค่าความต้านทานของขดลวดและทำให้ค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

พารามิเตอร์	ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส		
	ต้นแบบ	CCD	ผลต่าง
P_{loss} (W)	76.40	68.30	8.1 (10.60%)
T_{max} ($^{\circ}$ C)	32.50	29.10	3.4 (10.46%)
Cost (Baht)	220.00	211.00	9.0 (4.09%)
η (%)	54.91	58.60	3.70%

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการปรับพารามิเตอร์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design) และวิเคราะห์พารามิเตอร์สำหรับการออกแบบด้วยวิธีการทางสถิติ จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลางมีแนวโน้มที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ด้านโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณการสนับสนุนทางด้านการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยนเรศวร ปี 2558 โครงการพัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์ ขอขอบคุณการสนับสนุนทางด้านวัสดุ อุปกรณ์การวิจัย จากหน่วยวิจัยด้านการวิเคราะห์และพัฒนาระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า (Analysis and Development of Electric Drives System) และขอขอบคุณทุนโครงการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาเอก ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ปีการศึกษา 2556 ที่มอบให้แก่ นางสาวเดือนแรม แผงเกี้ยว

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] The Office of Industrial Economics Ministry of Industry. (2561). Economic Trends Report 4th quarter of 2017 and Trend of 1st quarter of 2018. Retrieved from http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/industry_overview/r_octdec60.pdf.
- [2] Li, J. T., Liu, Z. J., Jabbar, M. A. and Gao, X. K. (2004). Design Optimization for Cogging Torque Minimization Using Response Surface Methodology. Transactions on Magnetics, 40, 1176-1179.

- [3] Chiang, K. T. (2007). Modeling and optimization of designing parameters for a parallel-plain fin heat sink with confined impinging jet using the response surface methodology. *Applied Thermal Engineering*, 27, 2473-2482.
- [4] Li, Z., Zhang, L., Lun, Q. and Jin, H. (2014). Optimal Design of Multi- DOF Deflection Type PM Motor by Response Surface Methodology. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 10, 965-970.
- [5] Aniket, R., Rajkumar, E. and Sunil, G. (2016). Transformer Tank Optimization using Design of Experiments. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(34), 1-7.
- [6] Phaengkieo, D., Wannarumon, S. and Ruangsinchaiwanich, S. (2012). A model design of transformer by using finite element method (FEM), *Naresuan University Engineering Journal (NUEJ)*. 7(1), 23-28.
- [7] Cros, J., Viarouge, P. and Kakhki, M.T. (2011), Design and Optimization of Soft Magnetic Composite Machines with Finite Element Methods. *IEEE Transaction on Magneti*, 47(10). 4384-4390.
- [8] Al-Momani E., and Rawabdeh, I. (2008). An Application of Finite Element Method and Design of Experiments in the Optimization of Sheet Metal Blanking Process. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering (JJMIE)*, 2(10), 53-63.
- [9] Uy, M., Telford, J. K. (2009). Optimization by Design of Experiment Techniques. *Aerospace Conference*, Mar, 1-10.
- [10] Box, G. E. P., and Draper, N. R. (1987). *Wiley series in probability and mathematical statistics. Empirical model-building and response surfaces*. Oxford, England: John Wiley and Sons.
- [11] Montgomery, D. C. (2013). *Design and Analysis of Experiment*. 8th ed. New York: John Wiley and Sons.
- [12] Sudasna-na-ayudhya, P. and Luangpaiboon, P. (2008). *Design and Analysis of Experiment*. Bangkok: Top Publishing.co.,Ltd.
- [13] Silpcharu, T. (2007). *Research and Statistical Data Analysis by SPSS and AMOS*. Bangkok: VNT Interprint.co.,Ltd
- [14] Haaland, P. D. (1989). *Experimental design in biotechnology*. New York, NY: Marcel Dekker, INC.
- [15] Sarma, M. S. and Pathak, M. K., (2010). *Electric Machines*, Singapore: Cengage learning.

การตรวจจับและจำแนกความผิดปกติของตัวนำโรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้ฟuzzy logic และ
โครงข่ายประสาทเทียม

Detection and Classification of Rotor broken bar Faults in Induction Motor Using
Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks

เกรียงศักดิ์ ไกรกิจราษฎร์ และ สมพร เรืองสินชัยวานิช

K. Kraikitrat and S. Ruangsinchaiwanich

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

E-mail: sompornru@yahoo.co.uk

*Corresponding author E-mail : kreangsuk_k@hotmail.com

(Received: April 18, 2018, Revised: July 3, 2018, Accepted: November 5, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการตรวจจับและจำแนกความผิดปกติของตัวนำโรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการประยุกต์ใช้ฟuzzy logic และโครงข่ายประสาทเทียม ข้อมูลสำหรับอินพุตนำมาจากสเปคตรัมที่เกิดขึ้นบริเวณรอบความถี่มูลฐานที่อยู่ในเทอมขององค์ประกอบแบนด์ข้างต่ำและองค์ประกอบแบนด์ข้างสูงของสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ในรูปแบบโดเมนความถี่ ผลการประยุกต์ใช้ฟuzzy logic และโครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้น สามารถวิเคราะห์ได้จากค่าความถูกต้องและความผิดพลาดจากการทดสอบ พบว่าฟuzzy logic (ความถูกต้อง 99.84 %) มีความเหมาะสมต่อการตรวจจับความผิดปกติของตัวนำโรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำมากกว่าโครงข่ายประสาทเทียม (ความถูกต้อง 93.54 %)

คำสำคัญ: การวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์เหนี่ยวนำ ฟuzzy logic โครงข่ายประสาทเทียม

Abstract

In this paper, the detection and classification of broken rotor bar fault of induction motor using fuzzy logic and artificial neural networks is presented. Input data has been utilized to obtained data collection of the one phase stator current. Furthermore, fast fourier transform (FFT) is employed for converting original stator current waveform, which is time domain, to stator current signal, which is frequency domain, that is labeled as motor current signature analysis for collecting essential data in order for sending into artificial neural networks and fuzzy logic later. Consequently, the fuzzy logic can perform very well for the detection and classification of broken rotor bar fault in term of lowest MSE and best accuracy that comparing with other data test (FLS: 99.84 %) (ANN: 93.54 %).

Keywords: Fast Fourier Transform, Induction Motor, Fuzzy Logic, Artificial Neural Networks

1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) นิยมใช้ขับภาระทางกลในโรงงานอุตสาหกรรมเพราะว่าแข็งแรงทนทาน ราคาถูก ความเร็วค่อนข้างคงที่ สะดวกในการบำรุงรักษาเพราะโครงสร้างไม่ยุ่งยากซับซ้อน อย่างไรก็ตามมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลชนิดหนึ่ง ย่อมมีความผิดปกติเกิดขึ้นได้ สาเหตุอาจเกิดจากกระบวนการผลิตมอเตอร์หรือเกิดจากสภาวะการทำงานที่ผิดปกติ ความผิดปกติที่เกิดขึ้น อาจเกิดขึ้นได้หลายส่วน อาทิ เช่น ความผิดปกติที่ร่อนส์ (Bearing Faults), สเตเตอร์ (Stator Faults) และตัวนำโรเตอร์ (Rotor Faults) เป็นต้น

ความผิดปกติในมอเตอร์เหนี่ยวนำแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ [1] ประกอบด้วยความผิดปกติที่เกิดในระบบไฟฟ้าของมอเตอร์ (Electrical Faults) และความผิดปกติที่เกิดในระบบกลไกของมอเตอร์ (Mechanical Faults) จากงานวิจัย [2] ได้แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดปกติของมอเตอร์ที่เกิดขึ้น พบว่าความเสียหายส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากความเสียหายของร่อนส์ เนื่องจากส่วนประกอบนี้ได้รับการเสียดสีตลอดเวลาเมื่อถูกใช้งาน ร่อนส์มาเป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ และโรเตอร์ตามลำดับ

การตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์นั้นในปัจจุบันทำได้ 2 วิธีคือ การตรวจสอบโดยหยุดการทำงานของมอเตอร์ เช่น ตรวจสอบการแตกหักของแท่งตัวนำโรเตอร์ การเสื่อมสภาพของร่อนส์และการลัดวงจรของขดลวด ซึ่งวิธีนี้มีข้อเสียคือจะต้องหยุดกระบวนการผลิต จากข้อเสียดังกล่าวจึงมีการตรวจสอบอีกวิธีหนึ่งโดยไม่ต้องหยุดการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งช่วยให้ทราบถึงความผิดปกติของมอเตอร์ที่กำลังจะเกิดขึ้นได้ก่อนที่จะทำให้เกิดความเสียหายรุนแรงได้ ได้มีการนำเสนอเทคนิคการตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์หลายแบบ โดยการประยุกต์ใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เช่น

ในงานวิจัย [3-5] ได้นำวิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์ (Motor Current Signature Analysis: MCSA) มาประเภทความผิดปกติของมอเตอร์ โดยการวิเคราะห์สเปกตรัมกระแสสเตเตอร์ วิธีการตรวจสอบแบบนี้จะใช้ตัวจับกระแส (Current Sensor) เพื่อนำสัญญาณกระแสมอเตอร์ออกมาวิเคราะห์ ระบบ MCSA ที่ใช้วิเคราะห์สภาวะของมอเตอร์

เหนี่ยวนำจะประกอบด้วย Signal Conditioning และ Data Acquisition เพื่อส่งข้อมูลที่ให้กับคอมพิวเตอร์นำไปวิเคราะห์

ในงานวิจัย [6-12] ได้ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks : ANN) ซึ่งเป็นต้นแบบทางคณิตศาสตร์ที่จำลองการทำงานของสมองมนุษย์ในการเรียนรู้ และจดจำด้วยการทำงานแบบเชื่อมต่อ (Connectionist) ในการตรวจจับและจำแนกความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับโรเตอร์และสเตเตอร์ของมอเตอร์ โดยการนำข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้า การสั่นสะเทือน และความร้อนที่เกิดขึ้น เป็นอินพุตสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อใช้ในกระบวนการเรียนรู้ (Learning Process) และวิเคราะห์หาเอาต์พุตของโครงข่าย เพื่อการวิเคราะห์แยกแยะหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์

ในงานวิจัย [13-16] ได้ประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกหรือตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic System: FLS) เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความคลุมเครือ ไม่ชัดเจนคล้ายกับตรรกะทางความคิดของมนุษย์ โดยอาศัยการสร้างกฎฟัซซีด้วยผู้เชี่ยวชาญและใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความคลุมเครือ ตรวจจับและจำแนกความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับโรเตอร์และสเตเตอร์ของมอเตอร์ โดยการนำข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้า การสั่นสะเทือน และความร้อนที่เกิดขึ้น นำไปกำหนดและสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในวิธีการของฟัซซีลอจิก เพื่อการวิเคราะห์แยกแยะหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์

ในงานวิจัย [17] นำเสนอการเปรียบเทียบการประยุกต์ใช้ระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมกับฟัซซีลอจิกในการทำนายแรงอัดของคอนกรีต จากการผสมส่วนประกอบ 4 พารามิเตอร์ และในงานวิจัย [18] นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมและฟัซซีลอจิกในการพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าระยะสั้นที่เกิดขึ้น โดยใช้ข้อมูลของความต้องการไฟฟ้าและอุณหภูมิเป็นพารามิเตอร์ตั้งต้นสำหรับปัญญาประดิษฐ์ทั้งสอง

วิธีต่างๆทางคณิตศาสตร์ต่างก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ไม่มีวิธีใดที่จะดีกว่าวิธีอื่นในทุกๆด้าน ยกตัวอย่างเช่น โครงข่ายประสาทเทียม มีข้อดีตรงที่มีความสามารถในการเรียนรู้และจดจำรูปแบบต่างๆได้ แต่มีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถอธิบายเหตุผลของการตัดสินใจได้ ในขณะที่ฟัซซีลอจิกมีจุดเด่นตรงที่มีการใช้เหตุผลในเชิงตรรกะเหมือนความคิดของมนุษย์ สามารถอธิบายการตัดสินใจได้จากกฎฟัซซีและสามารถใช้กับข้อมูลที่คลุมเครือได้ แต่ข้อเสียของฟัซซีลอจิก อยู่ตรงที่ไม่สามารถเรียนรู้และ

ปรับแต่งกฎต่างๆด้วยตัวเอง ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญหรือผู้มีความรู้ มากำหนดโครงสร้างและกฎให้ ด้วยเหตุนี้คณะวิจัยจึงสนใจที่จะ นำวิธีการวิเคราะห์ของปัญญาประดิษฐ์ทั้ง 2 รูปแบบ มาวิเคราะห์ หาความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับตัวนำโรเตอร์ เพื่อหารูปแบบของ ปัญญาประดิษฐ์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความผิดปกตินี้

ในงานวิจัยนี้นำเสนอการตรวจจับและจำแนกความผิดปกติที่เกิดขึ้นจากความเสียหายของตัวนำโรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแบบกรงกระรอก โดยใช้ฟิซซีลอจิก และโครงข่ายประสาทเทียม ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตสำหรับการตั้งค่าสมาชิกในฟิซซีลอจิก และสำหรับการเรียนรู้ในโครงข่ายประสาทเทียมให้เหมือนและสอดคล้องกัน ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบ วิธีที่เหมาะสมกับการตรวจจับและจำแนกความผิดปกติที่เกิดขึ้น

กระบวนการทำงานของระบบตรวจจับและจำแนกความผิดปกติของตัวนำโรเตอร์โดยการประยุกต์วิธีฟิซซีลอจิก และโครงข่ายประสาทเทียม เริ่มต้นที่จำลองสภาวะการแตกหักของ แท่งตัวนำโรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำออกเป็น 5 กรณี ได้แก่ 1. โรเตอร์ปกติ 2. แท่งตัวนำโรเตอร์เสียหาย 1 แท่งตัวนำ 3. แท่งตัวนำโรเตอร์เสียหาย 3 แท่งตัวนำ 4. แท่งตัวนำโรเตอร์เสียหาย 5 แท่งตัวนำ และ 5. แท่งตัวนำโรเตอร์เสียหาย 7 แท่งตัวนำ สัญญาณกระแสสเตเตอร์ที่มอเตอร์ทำงานในสภาวะต่างๆจากการ จำลอง จะถูกนำไปวิเคราะห์และเปลี่ยนค่าสัญญาณจากโดเมน ของเวลาไปเป็นสัญญาณในรูปแบบโดเมนของความถี่ (Fast Fourier Transform : FFT) ได้ออกมาเป็นสัญญาณที่มีรูปแบบ ขององค์ประกอบแบนด์ข้างต่ำ (Lower Side Band : LSB) และ องค์ประกอบแบนด์ข้างสูง (Upper Side Band : USB) จากนั้น นำพารามิเตอร์ขององค์ประกอบแบนด์ข้างต่ำและองค์ประกอบ แบนด์ข้างสูงที่ได้ ไปวิเคราะห์ด้วยฟิซซีลอจิก และโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อทำการตรวจจับและจำแนกความผิดปกติที่เกิดขึ้น

2. การวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์

2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในงานวิจัยนี้ ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแบบกรงกระรอก ขนาด 1/4 แรงม้า พิกัดแรงดัน 220 โวลต์ กระแส 1.4 แอมป์ ความเร็วรอบ 1450 รอบต่อนาที และมีแท่งตัวนำโรเตอร์ 44 แท่งตัวนำ และจำลองสภาวะการแตกหักของแท่งตัวนำโรเตอร์

ในมอเตอร์เหนี่ยวนำออกเป็น 5 กรณี ได้แก่ 1. โรเตอร์ปกติ 2. แท่งตัวนำโรเตอร์เสียหาย 1 แท่งตัวนำที่ตำแหน่ง(1) 3. แท่งตัวนำโรเตอร์เสียหาย 3 แท่งตัวนำตำแหน่ง(1-2-3) 4. แท่งตัวนำโรเตอร์เสียหาย 5 แท่งตัวนำตำแหน่ง(1-2-3-4-5) และ 5. แท่งตัวนำโรเตอร์เสียหาย 7 แท่งตัวนำตำแหน่ง(1-2-3-4-5-6-7) ดังรูปที่ 1



สเตเตอร์

โรเตอร์

รูปที่ 1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

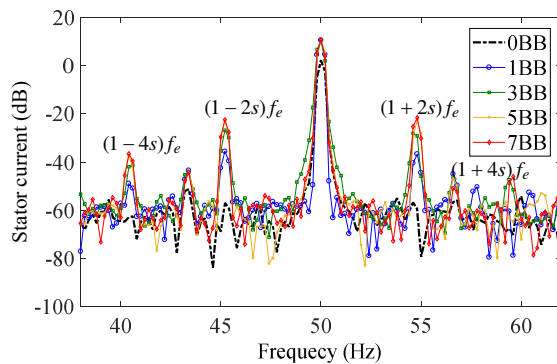
2.2 การวิเคราะห์สัญญาณกระแส

เมื่อเกิดกรณีแท่งตัวนำผิดปกติหรือแตกหักเกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสสเตเตอร์ ที่ความถี่ตามสมการที่ (1) ซึ่งสเปกตรัมที่เกิดขึ้นนี้จะปรากฏบริเวณรอบความถี่มูลฐานจะอยู่ในเทอมขององค์ประกอบแบนด์ข้างต่ำ และแบนด์ข้างสูงแสดงดังรูปที่ 2

$$f_{sb} = (1 \pm 2ks)f_e \quad (1)$$

โดย f_{sb} คือ ความถี่ที่เกิดจากแท่งตัวนำเสียหาย
 f_e คือ ความถี่ของแหล่งจ่าย
 s คือ ค่าสลิปของมอเตอร์
 k คือ ค่าสลิป

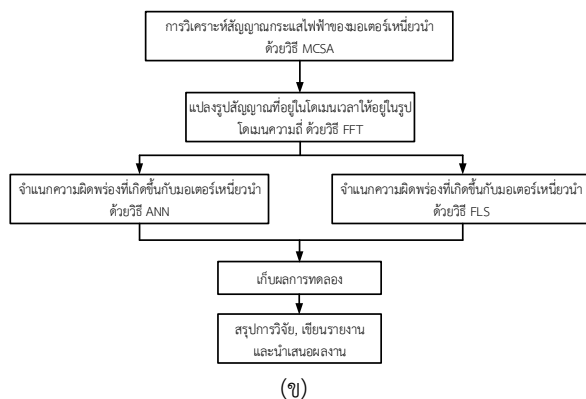
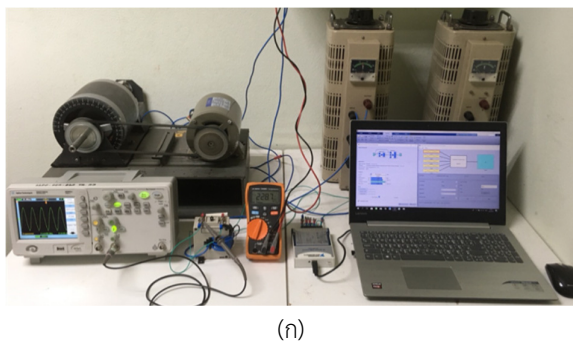
จากผลของสเปกตรัมกระแสสเตเตอร์เมื่อตัวนำโรเตอร์เสียหาย ผลของฮาร์โมนิกที่ปรากฏขึ้นในกระแสสเตเตอร์ จะใช้ในการตั้งค่าสำหรับการวิเคราะห์ในปัญญาประดิษฐ์ดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยจำนวนการแตกหักของแท่งตัวนำของโรเตอร์แบบปกติ(0BB), แบบเสียหาย 1(1BB), 3(3BB), 5(5BB), และ 7(7BB) ตัวนำ



รูปที่ 2 ความถี่มูลฐานในเทอมขององค์ประกอบแบนด์ข้างต่ำและสูง

2.3 กรอบแนวคิดกระบวนการทำงานของระบบตรวจจับความผิดปกติของตัวนำโรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในส่วนของการทดลองในการทดลองเพื่อตรวจสอบความผิดปกติของตัวนำโรเตอร์แตกหัก ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power Supply), โพรบวัดกระแส (Current Probe), มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor), อนาล็อก - ดิจิตอล (A-D), คอมพิวเตอร์ (Computer) ดังรูปที่ 3

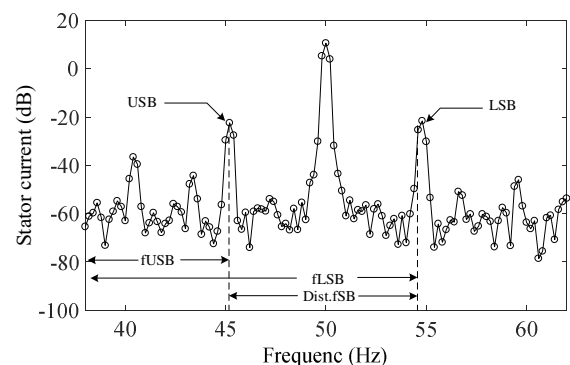


รูปที่ 3 การทดสอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะแท่งตัวนำเสียหาย

(ก) รูปการทดสอบ (ข) ไดอะแกรมการทดสอบ

ในการตรวจจับสัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ได้ทำการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ โดยข้อมูลของกระแสไฟฟ้าจะถูกบันทึกโดยใช้ฮาร์ดดิสก์ ซึ่งมีการสุ่ม (Sampling) 2 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) และได้บันทึกขนาดข้อมูลทั้งหมด 10,000 ข้อมูล ดังนั้นค่าความละเอียดของความถี่ (Frequency Resolution) มีค่าเท่ากับ 0.2 เฮิร์ตซ์ (Hz)

ผลของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นนี้จะนำไปใช้เป็นตัวตั้งต้นสำหรับอินพุตของปัญญาประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ ได้ 5 อินพุตประกอบไปด้วย 1. ขนาดของความถี่มูลฐานในเทอมขององค์ประกอบแบนด์ข้างต่ำ (LSB) 2. ขนาดของความถี่มูลฐานในเทอมขององค์ประกอบแบนด์ข้างสูง (USB) 3. ตำแหน่งของความถี่มูลฐานในเทอมขององค์ประกอบแบนด์ข้างต่ำ (fLSB) 4. ตำแหน่งของความถี่มูลฐานในเทอมขององค์ประกอบแบนด์ข้างสูง (fUSB) 5. ระยะห่างระหว่างตำแหน่งความถี่มูลฐานในเทอมขององค์ประกอบแบนด์ข้างต่ำกับแบนด์ข้างสูง (Dist.fSB) ดังรูปที่ 4 และตารางที่ 1



รูปที่ 4 ตำแหน่งของอินพุต

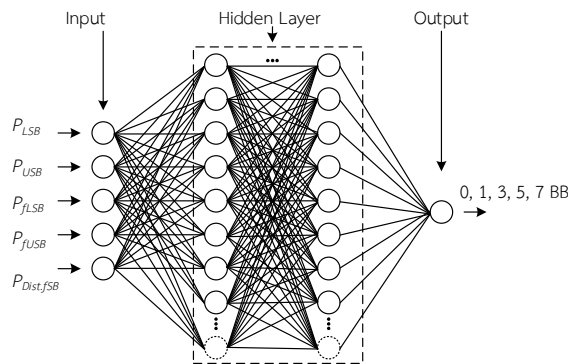
ตารางที่ 1 ข้อมูลอินพุตสำหรับปัญญาประดิษฐ์

Position	0BB	1BB	3BB	5BB	7BB
LSB	-59.54	-35.97	-26.40	-23.31	-22.28
USB	-73.60	-36.88	-27.44	-23.24	-21.43
fLSB	45.20	45.20	45.20	45.20	45.20
fUSB	54.80	54.80	54.80	54.80	54.80
Dist.fSB	9.60	9.60	9.60	9.60	9.60

3. การวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม คือ ระบบการคำนวณที่สร้างเลียนแบบการทำงานของระบบสมองมนุษย์เพื่อใช้ประโยชน์ใน

การคาดคะเนเหตุการณ์จากข้อมูลที่มีอยู่ โครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neural) ซึ่งจำลองมาจากการทำงานของระบบสมองมนุษย์ โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบแอส (Bias) เป็นเครื่องมือจำลองคุณสมบัติของเซลล์ประสาทดังรูปที่ 5 เซลล์ประสาทหลายส่วนจะถูกเชื่อมต่อกันให้เกิดเป็นลักษณะของโครงข่ายเป็น (Layer) ซึ่งเซลล์ประสาทแต่ละตัวที่อยู่ในชั้นเดียวกันจะไม่มีมีการเชื่อมต่อกัน



รูปที่ 5 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

ในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าแบบหลายชั้นดังรูปที่ 5 ประกอบด้วย ส่วนแรก ชั้นอินพุต มี 5 อินพุต (LSB, USB, fLSB, fUSB, Dist.sSB) ส่วนที่ 2 ชั้นซ่อนมี 1 และ 2 ชั้นซ่อน (5-2-1, 5-3-1, 5-4-1, 5-5-1, 5-6-1, 5-7-1, 5-8-1, 5-6-2-1, 5-6-3-1, 5-6-4-1, 5-6-5-1, 5-6-6-1, 5-6-7-1, 5-6-8-1,) เพื่อเปรียบเทียบหาชั้นซ่อนและโหนดชั้นซ่อนในแต่ละชั้นที่เหมาะสมที่สุด และส่วนสุดท้ายชั้นเอาต์พุต มี 1 ชั้น (0BB, 1BB, 3BB, 5BB, 7BB)

โครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าแบบหลายชั้นนี้มีฟังก์ชันถ่ายโอนที่ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และชั้นเอาต์พุตคือฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแทนซิมมอยด์ (Tansig) ดังสมการที่ 2 และฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น (Linear) ดังสมการที่ 3 ตามลำดับ และมีการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับประเภท (Levenberg Marquardt : LM) [12] โดยมีตัวชี้การทำให้บรรลุผลสำเร็จของการเรียนรู้ คือใช้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Error: MSE) เป็นตัวชี้ โดยอัลกอริธึมจะปรับค่าน้ำหนักและไบแอสเพื่อลดค่าผิดพลาด

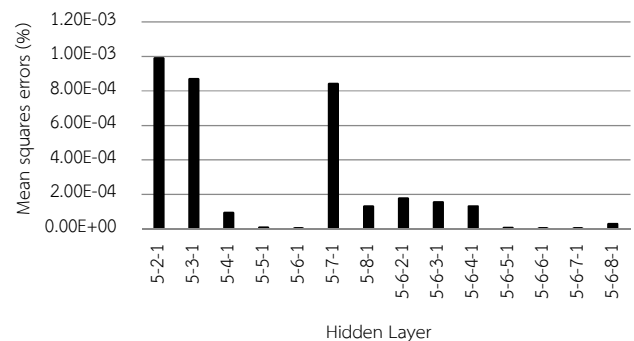
$$f(n) = \frac{2}{1 + \exp(-2n)} - 1 \quad (2)$$

$$f(n) = n \quad (3)$$

โดย n คือ ค่าเอาต์พุตสเกลาร์ (Scalar Output)

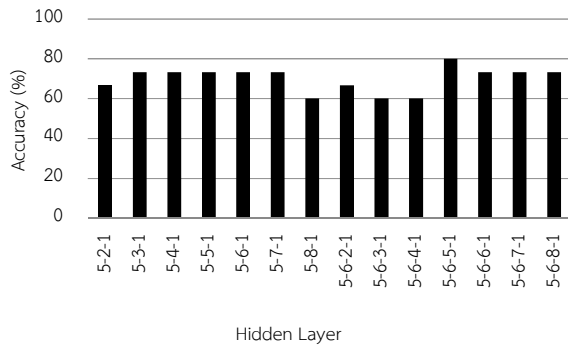
จากการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการวิเคราะห์เพื่อตรวจจับและจำแนกความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับแท่งตัวนำโรเตอร์ โดยมีการกำหนดชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียมออกเป็น 1 และ 2 ชั้นและมีจำนวนเลเยอร์ในแต่ละชั้น 2 - 8 เลเยอร์ สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองจากการเรียนรู้ของข้อมูลตัวอย่างในตารางที่ 1 และความถูกต้อง (Accuracy) จากการจำแนกชุดตัวอย่างข้อมูล 15 ชุด มีผลการทดสอบดังรูปที่ 6 และ 7

รูปที่ 6 คือเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง จากการเรียนรู้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (W) และค่าไบแอส (b) ของโครงข่ายประสาทเทียม จากการปรับเปลี่ยนรูปแบบของชั้นซ่อนในแบบต่างๆ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นซ่อนแบบ 5-5-1, 5-6-1, 5-6-5-1, 5-6-6-1 และ 5-6-7-1 มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองจากการเรียนรู้ต่ำกว่าชั้นซ่อนแบบอื่นๆ



รูปที่ 6 ความคลาดเคลื่อนจากการเรียนรู้

รูปที่ 7 คือเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการทดสอบหาความผิดปกติบนแท่งตัวนำโรเตอร์ของโครงข่ายประสาทเทียม จากชุดข้อมูลทดสอบจำนวน 150 ชุด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นซ่อนแบบ 5-5-1, 5-6-1, 5-6-5-1, 5-6-6-1 และ 5-6-7-1 มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองจากการเรียนรู้ของข้อมูลตัวอย่าง

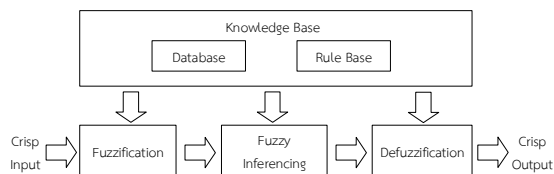


รูปที่ 7 ความถูกต้องในการตรวจจับและจำแนกความผิดปกติ

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นอินพุต ชั้นซ่อน และเอาต์พุตที่ทำให้ความถูกต้องในการตรวจจับและจำแนกความผิดปกติที่เกิดขึ้นดีที่สุด คือ 5-7-1 มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกำลังสองในการเรียนรู้ (1.0E-03%) และมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการตรวจจับและจำแนก (93.54%)

4. การวิเคราะห์ฟัซซีลอจิกหรือตรรกศาสตร์คลุมเครือ

ฟัซซีลอจิกหรือตรรกศาสตร์คลุมเครือเป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความคลุมเครือ ไม่ชัดเจนคล้ายกับตรรกะทางความคิดของมนุษย์ ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิกในงานวิจัยนี้ มีรูปแบบการทำงานเป็น 4 ขั้นตอนดังรูปที่ 8 ต่อไปนี้

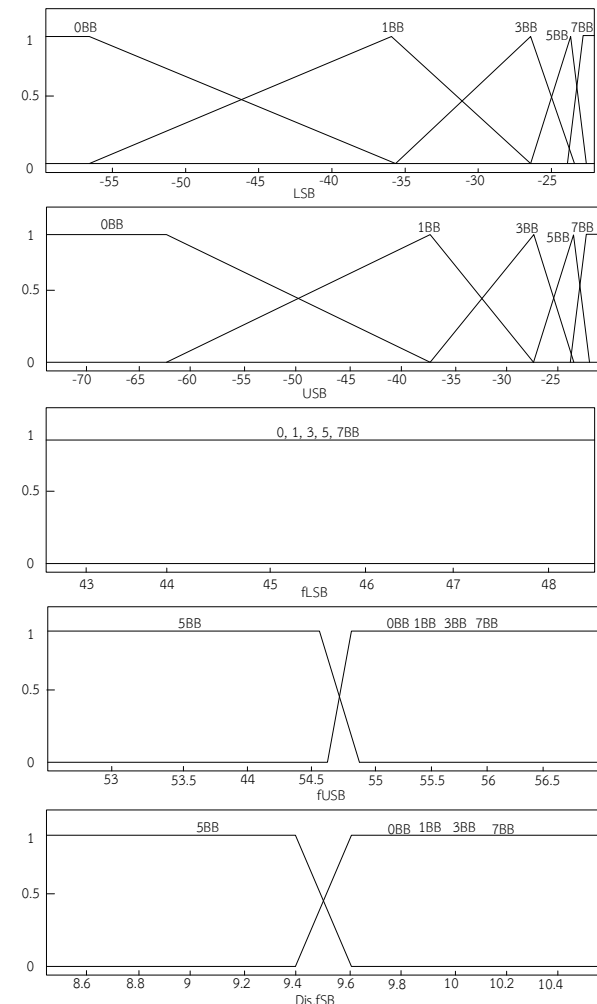


รูปที่ 8 ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแปลงการอินพุตแบบทวินัย เปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี โดยจะสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) โดยไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเดียวกัน ขึ้นกับคุณลักษณะของแต่ละอินพุต (Input) และความสำคัญต่อการเอาต์พุต (Output)

ในงานวิจัยนี้และ [13-16] จะใช้ฟังก์ชันสมาชิกฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular) ดังสมการที่ 4 และฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) ดังสมการที่ 5 เพราะว่าให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบอื่นๆ ในการออกแบบฟังก์ชันสมาชิก

ในงานวิจัยนี้ นำข้อมูลมาทำการพล็อตแบบกระจาย (Scatter Plot) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของข้อมูล จากการพิจารณาพบว่า ข้อมูลของ LSB และ USB ควรแบ่งเป็น 5 ฟัซซีเซต ข้อมูลของ fUSB และ Dis.fSB ควรแบ่งเป็น 2 ฟัซซีเซต และ fUSB ควรแบ่งเป็น 1 ฟัซซี โดยแบ่งการออกแบบและการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้ผลการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุตได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุต

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยการกำหนดค่าให้กับสมาชิกที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นจึงเป็นส่วนที่สำคัญต่อการดำเนินการของฟัซซี เพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา

$$\text{triangular}(x : a, b, c) = \begin{cases} 0 & , x < a \\ (x - a) / (b - a) & , a \leq x \leq b \\ (c - x) / (c - b) & , b \leq x \leq c \\ 0 & , x > c \end{cases} \quad (4)$$

โดย a, b, c คือ ตำแหน่งของฟังก์ชันสามเหลี่ยม

$$\text{trapezoidal}(x : a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & , x < a \\ (x - a) / (b - a) & , a \leq x \leq b \\ 1 & , b \leq x \leq c \\ (d - x) / (d - c) & , c \leq x \leq d \\ 0 & , x \geq d \end{cases} \quad (5)$$

โดย a, b, c, d คือ ตำแหน่งของฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตที่อาศัยหลักการของการหาเหตุและผล เช่น เขียนเป็นกฎการควบคุมระบบ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่ในรูปแบบ ถ้า (If) และ (And) หรือ (Or) ซึ่งเป็นภาษาสามัญ นำกฎทั้งหมดมาประมวลผลรวมกัน เพื่อการหาตัดสินใจที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการหาฟัซซีเอาต์พุต โดยการนำกฎการควบคุมที่สร้างขึ้น ในขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผลกับฟัซซีอินพุต โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำค่าที่ได้ประมวลผล วิธีการหาฟัซซีเอาต์พุตหรือค่าคลุมเครือ (Fuzzification) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การตีความหาเหตุผลเลือกใช้ Max-Min method

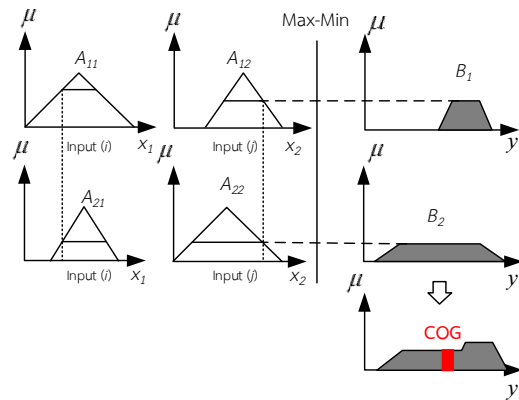
ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนสุดท้ายหรือขั้นตอนการสรุปเหตุผลฟัซซี โดยจะเปลี่ยนฟัซซีเอาต์พุตให้เป็นทวินัยเอาต์พุต ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การสรุปเหตุผลของระบบกฎฟัซซี 2 ชนิดที่ได้รับความนิยมและมีความน่าเชื่อถือ คือ รูปแบบแมมดานิ(Mamdani) และซูเกโน(Sugeno) สามารถยกตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

1. ระบบกฎฟัซซีของ Mamdani

กำหนดให้ระบบฟัซซีแบบ Mamdani มี 2 อินพุต x_1 และ x_2 และ 1 เอาต์พุต y ซึ่งมีกฎฟัซซีเป็น

If x_1 is A_{k1} and x_2 is A_{k2} Then y is B_k สำหรับ $k=1, 2, \dots, r$

ในงานวิจัยนี้หาผลรวมเอาต์พุตหาได้โดยการใช้วิธีการจัดองค์ประกอบแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด (Max-Min Composition) ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 วิธีการอนุมานแบบแมมดานิ

วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central of Gravity: COG) เป็นวิธีการเฉลี่ยผลที่ได้จากการตีความหาเหตุ ค่าที่ได้จะคำนวณจุดศูนย์ถ่วงโดยรวมจะหาได้จากการประมาณค่าจากสมการที่ 6

$$COG = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i w_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \quad (6)$$

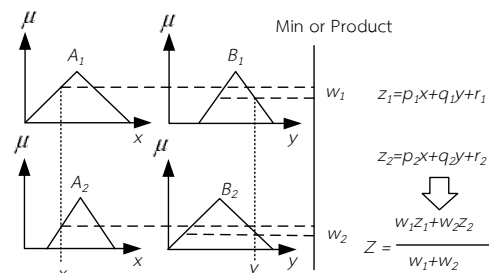
โดย COG คือค่าของจุดศูนย์ถ่วง, N คือค่าตั้งแต่ตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ i , α_i คือค่าฟัซซีของเอาต์พุตในเซตฟัซซีตำแหน่งที่ i และ w_i คือพื้นที่ใต้โค้งของเซตฟัซซีตำแหน่งที่ i

2. ระบบกฎฟัซซีแบบ Sugeno

กำหนดให้ระบบฟัซซีแบบ Sugeno มี 2 อินพุต x และ y และ 1 เอาต์พุต z ซึ่งมีกฎฟัซซีเป็น

If x is A and y is B Then z is $z = f(x, y)$

ผลรวมเอาต์พุตแสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 วิธีการอนุมานแบบ Sugeno

ผลการตรวจจับและจำแนกความผิดปกติของตัวนำโรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะต่างๆ โดยฟัซซีลอจิก ได้ผล

ความถูกต้องในการตรวจจับ(Accuracy) และค่าความผิดพลาด(Error) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาความผิดปกติของตัวนำโรเตอร์ด้วย FLS

ความผิดปกติ ของแท่งตัวนำ	เป้าหมาย (Target)	ความถูกต้อง		ความผิดพลาด (%)	
		Ma.	Su.	Ma.	Su.
0BB	1	1.09	1.01	9.00	1.00
0BB	1	1.01	1.00	1.00	0.00
0BB	1	1.00	1.00	0.00	0.00
0BB	1	1.00	1.00	0.00	0.00
0BB	1	1.05	1.01	5.00	1.00
1BB	2	2.03	2.00	1.50	0.00
1BB	2	2.00	2.00	0.00	0.00
1BB	2	1.95	2.00	2.50	0.00
1BB	2	1.98	2.00	1.00	0.00
1BB	2	2.00	2.00	0.00	0.00
3BB	3	2.94	3.00	2.00	0.00
3BB	3	2.95	3.00	1.67	0.00
3BB	3	2.93	3.00	2.33	0.00
3BB	3	2.93	2.99	2.33	0.33
3BB	3	2.90	2.99	3.33	0.33
5BB	4	4.00	4.00	0.00	0.00
5BB	4	4.00	4.00	0.00	0.00
5BB	4	4.00	4.00	0.00	0.00
5BB	4	4.00	4.00	0.00	0.00
5BB	4	4.05	4.05	1.25	1.25
7BB	5	5.00	5.00	0.00	0.00
7BB	5	5.00	5.00	0.00	0.00
7BB	5	5.00	5.00	0.00	0.00
7BB	5	5.00	5.00	0.00	0.00
7BB	5	5.00	5.00	0.00	0.00

เมื่อเปรียบเทียบผลตรวจจับและจำแนก ในการประมาณค่าฟังก์ชัน (Function Approximation) ของทั้งสองระบบ ระบบกฎฟัซซีแบบ Sugeno จะมีค่าเฉลี่ยจากความผิดพลาดในการตรวจจับและจำแนกคือ 0.17 % ซึ่งน้อยกว่าระบบกฎฟัซซีแบบ Mamdani ที่มีค่าเฉลี่ยจากความผิดพลาดในการตรวจจับและจำแนกคือ 1.32 %

5. ผลการทดลอง

ผลจากการประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิก(FLS) และโครงข่ายประสาทเทียม(ANN) ในการตรวจจับและจำแนกความผิดปกติของตัวนำ โรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะแตกหักของแท่งตัวนำของโรเตอร์แบบปกติ 0 (0BB), แบบเสียหาย 1 (1BB), 3 (3BB), 5 (5BB), และ 7 (7BB) ตัวนำ สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบ จากความถูกต้องในการตรวจจับและจำแนกหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นและเปอร์เซ็นต์ความ

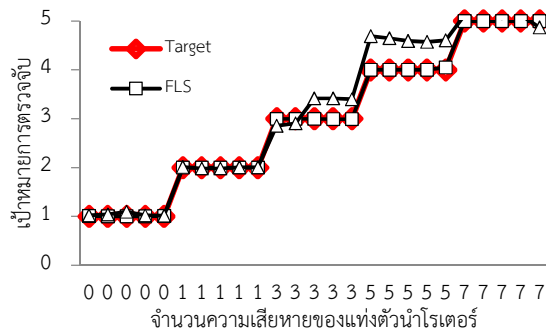
ผิดพลาดในการตรวจจับและจำแนกหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 12, 13 ดังต่อไปนี้

รูปที่ 12 แสดงค่าความถูกต้องในการตรวจจับและจำแนกความผิดปกติในมอเตอร์ของการประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกและโครงข่ายประสาทเทียมจากรูปเมื่อเปรียบเทียบกับเป้าหมายของการตรวจจับและจำแนก(Target) แสดงให้เห็นว่าฟัซซีลอจิกมีค่าความถูกต้องในการตรวจจับดีกว่าโครงข่ายประสาทเทียม โดยเฉพาะที่สภาวะแท่งตัวนำเสียหาย 5 แท่งตัวนำ ฟัซซีลอจิกสามารถตรวจจับได้ถูกต้องทั้งหมดซึ่งตรงกันข้ามกับโครงข่ายประสาทเทียมที่มีความผิดพลาด

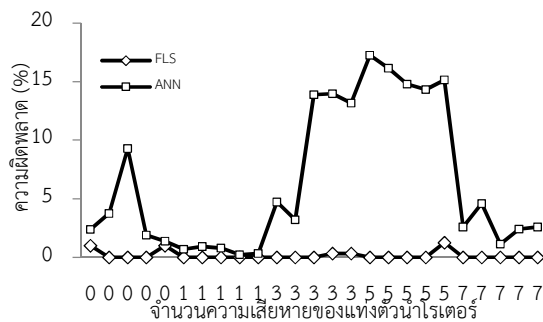
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบหาความผิดปกติของตัวนำโรเตอร์ด้วย FLS

และ ANN

ความผิดปกติ ของแท่งตัวนำ	เป้าหมาย (Target)	การตรวจจับ		ความผิดพลาด (%)	
		FLS	ANN	FLS	ANN
0BB	1	1.01	1.02	1.00	2.39
0BB	1	1.00	1.04	0.00	3.75
0BB	1	1.00	1.09	0.00	9.30
0BB	1	1.00	1.02	0.00	1.90
0BB	1	1.01	1.01	1.00	1.39
1BB	2	2.00	2.01	0.00	0.68
1BB	2	2.00	1.98	0.00	0.91
1BB	2	2.00	1.98	0.00	0.78
1BB	2	2.00	2.00	0.00	0.21
1BB	2	2.00	2.01	0.00	0.33
3BB	3	3.00	2.86	0.00	4.71
3BB	3	3.00	2.90	0.00	3.20
3BB	3	3.00	3.42	0.00	13.89
3BB	3	2.99	3.42	0.33	13.96
3BB	3	2.99	3.40	0.33	13.17
5BB	4	4.00	4.69	0.00	17.26
5BB	4	4.00	4.65	0.00	16.15
5BB	4	4.00	4.59	0.00	14.79
5BB	4	4.00	4.57	0.00	14.34
5BB	4	4.05	4.61	1.25	15.14
7BB	5	5.00	5.13	0.00	2.59
7BB	5	5.00	5.23	0.00	4.58
7BB	5	5.00	5.06	0.00	1.11
7BB	5	5.00	5.12	0.00	2.40
7BB	5	5.00	4.87	0.00	2.59



รูปที่ 12 ค่าความถูกต้องในการตรวจจับและจำแนก



รูปที่ 13 ค่าความผิดพลาดในการตรวจจับและจำแนก

รูปที่ 13 แสดงค่าความผิดพลาดในการตรวจจับ ของการประยุกต์ใช้ฟuzzyลอจิกและโครงข่ายประสาทเทียม จากรูปแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าความผิดพลาดในการตรวจจับมากกว่าฟuzzyลอจิก ในทุกๆสถานะของแท่งตัวนำเสียหาย

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการตรวจจับและจำแนกความผิดปกติที่เกิดขึ้นจากความเสียหายของตัวนำโรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดย ฟuzzyลอจิกและโครงข่ายประสาทเทียม โดยได้กำหนดข้อมูลอินพุตในแต่ละวิธีการให้สอดคล้องกัน และได้มีการเปรียบเทียบผลการทดสอบวิธีการทั้ง 2 วิธี ซึ่งผลที่ได้จากความถูกต้องและความผิดพลาดจากการตรวจจับและจำแนกความผิดปกติที่เกิดขึ้นฟuzzyลอจิกดีกว่าวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม คือวิธีการวิเคราะห์แบบฟuzzyลอจิกจะมีค่าเฉลี่ยจากความผิดพลาดในการตรวจจับและจำแนก 0.16 % ซึ่งน้อยกว่าวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม ที่มีค่าเฉลี่ยจากความผิดพลาดในการตรวจจับและจำแนก 6.46 %

จากข้อสันนิษฐานและผลการทดสอบยังสรุปได้อีกว่า การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ ประเภทต่างๆ จะเหมาะสมกับปัญหาบางประเภท โดยจะไม่มีปัญญาประดิษฐ์ ประเภทไหนแก้ปัญหาได้ทุกอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้คือฟuzzyลอจิก มีความเหมาะสมต่อการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นจากความเสียหายของตัวนำโรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสมากกว่าโครงข่ายประสาทเทียม เพราะเมื่อพิจารณาข้อมูลสำหรับอินพุตเพื่อใช้ในปัญญาประดิษฐ์ ทั้ง 2 วิธีจะเห็นว่ามีความไม่เป็นเชิงเส้น จึงทำให้วิธีการของฟuzzyลอจิกที่มีจุดเด่นตรงที่แยกแยะความคลุมเครือของข้อมูลที่เกิดขึ้นได้ ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีกว่า

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับทำงานวิจัย เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ งบประมาณ และบุคลากรในหน่วยงาน จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Siddiqui, Khadim Moin, Kuldeep Sahay, and V. K. Giri. (2014). Health monitoring and fault diagnosis in induction motor-a review. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 3.1, pp. 6549-6565.
- [2] P.F. Allbrecht, J.C.Appiarius and R.M.McCoy. (1986). Assessment of the Reliability of Motors in Utility Applications-Updated. IEEE transactions On Energy Conversion, Vol. 1, No. 1, pp. 39-46,1986.
- [3] W. T. Thosmson and Mark Fenger, (2001). Current signature analysis to detect induction motor faults. IEEE Industry Application Magazine, Volume 7, Issue 4, July - August, 26-34.
- [4] N. Sittisrijan and S. Ruangsinchaiwanich. (2013). Synthesis of stator current waveform of induction motor with broken bar conditions. International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Busan, Korea, 26 - 29 October.
- [5] N. Sittisrijan; B. Wangngon; S. Ruangsinchaiwanich. (2014). Synthesis of stator current waveform of inverter-fed induction motor with broken bar conditions. International

- Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 22-25 Oct, Incheon, South Korea. pp. 3441 - 3445.
- [6] M. Moradian, M. Ebrahimi, M. Danesh and M. Bayat. (2006). Detection of broken bars in induction motors using a neural network. IEEE Journal of Power Electronics (JPE), Volume 6, No.3, pp. 245 – 252.
- [7] Sri R Kolla and Shawn D Altman. (2006). Artificial neural network based fault identification scheme implementation for a three-phase induction motor. ISA Transactions, Vol. 46, Issue 2, pp. 1 - 6.
- [8] Dragan Mati and Filip Kuli. (2010). Artificial neural networks broken rotor bars induction motor fault detection. IEEE, Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering, 23 – 25 September, pp. 49-53.
- [9] A. Drira and N. Derbel. (2011). Classification of rotor fault in induction machine using Artificial Neural Networks. in Systems, Signals and Devices (SSD), International Multi-Conference on, pp. 1-6.
- [10] B. Wangngon, N. Sittisrijan, S. Ruangsinchaiwanich. (2014). Fault detection technique for identifying broken rotor bars by artificial neural network method. Electrical Machines and Systems (ICEMS), 17th International Conference on, pp. 3436 – 3440
- [11] k. kraikitrat, S. Pengpradern and S. Ruangsinchaiwanich. (2016). Detection and Classification of Induction Motor Faults Using Feed-Forward Backpropagation Network. International Conference of Multidisciplinary Approaches on UN Sustainable Development Goals, 28th - 29th December.
- [12] k. kraikitrat, B. Wangngon and S. Ruangsinchaiwanich. (2018). Classification of Broken Rotor Bars in Induction Motor Faults Using Cascade-forward Artificial Neural Network. EENET Journal, v. 1, n. 2, p. 26, feb. ISSN 2586-8780. (In Thai)
- [13] L. A. Pereira and D. da Silva Gazzana. (2004). Rotor broken bar detection and diagnosis in induction motors using stator current signature analysis and fuzzy logic. IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 3, 3019 – 3024.
- [14] C. G. Dias and L. E. Chabu. (2008). A fuzzy logic approach for the detection of broken rotor bars in squirrel cage induction motors. IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1987 - 1991.
- [15] S. E. Zouzou, W. Laala, S. Guedidi and M. Sahraoui. (2009). A Fuzzy Logic Approach for the Diagnosis of Rotor Faults in Squirrel Cage Induction Motors. International Conference on Computer and Electrical Engineering, Vol. 2, 173 - 177.
- [16] W. Laala, S. Guedini and S. Zouzou. (2011). Novel approach for diagnosis and detection of broken bar in induction motor at low slip using fuzzy logic. IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives, pp. 511 - 516.
- [17] Fatih Özcan a. Cengiz D. Atisb. Okan Karahan b. Erdal Uncuoglu c. Harun Tanyildizi d. (2009). Comparison of artificial neural network and fuzzy logic models for prediction of long-term compressive strength of silica fume concrete. Advances in Engineering Software, Volume 40, Issue 9, pp. 856-863.
- [18] A.Badri Z.Ameli A.MotieBirjandi. (2012). Application of Artificial Neural Networks and Fuzzy logic Methods for Short Term Load Forecasting. Energy Procedia, Volume 14, pp. 1883-1888.

เกณฑ์การคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมในการก่อสร้างสถานีขนส่งสินค้าในประเทศไทย โดยใช้วิธี

Analytic Hierarchy Process (AHP)

The Determination Criteria of Appropriate Location for The Construction of Truck Terminal in Thailand By using Analytic Hierarchy Process (AHP)

ดุชนันท์ สติระเศรษฐทวี¹, รัชสรรค์ สุวรรณห้อย^{1*}, ทรงยศ กิจธรรมเกษร², สติกรณณ์ เหลืองวิชเจริญ¹

D. Satirasetthavee¹, R. Suwannahoi^{1*}, S. Kitthamkesorn², S. Leungvichcharoen¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

*Corresponding author E-mail : rung2_su@hotmail.com

(Received: January 18, 2018, Revised: November 7, 2018, Accepted: November 15, 2018)

บทคัดย่อ

ระบบโลจิสติกส์ของประเทศไทยมีการพัฒนาการเชื่อมต่อรูปแบบการขนส่งอย่างต่อเนื่อง โดยปัจจุบันมีสถานีขนส่งสินค้าของภาครัฐเพียงสามแห่งตั้งอยู่บริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล ซึ่งไม่เพียงพอต่อการใช้งาน และยังไม่สามารถลดต้นทุนโดยรวม ของการขนส่งสินค้าลงได้ จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาและก่อสร้างสถานีขนส่งสินค้าเพิ่มเติมตามเมืองภูมิภาคต่างๆ มากขึ้น โดยในปี พ.ศ.2535 องค์การ JICA[1] ของประเทศญี่ปุ่น ได้ศึกษาตำแหน่งที่ตั้งของสถานีขนส่งสินค้าทั้งสามแห่งโดยให้น้ำหนักของปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย ด้วยน้ำหนักคะแนนที่เท่ากัน ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากมีปัจจัยอื่นๆเพิ่มขึ้น เช่น การมีเขตเศรษฐกิจพิเศษ โครงสร้างพื้นฐานด้านการคมนาคมและขนส่ง ผลกระทบสิ่งแวดล้อม และความเสี่ยงของพื้นที่ต่อภัยพิบัติทางธรรมชาติ เป็นต้น เพื่อให้ได้ปัจจัยในการคัดเลือกตำแหน่งที่ตั้งอย่างมีประสิทธิภาพ ลดต้นทุนภาคการขนส่ง การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์เพื่อหาพิกัดจำนวนและชนิดของปัจจัยที่มีความครอบคลุมปัจจัยใหม่ๆ ที่สำคัญ โดยการวิเคราะห์เพื่อหาค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัย ผ่านการเก็บข้อมูลจากแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญ โดยใช้เทคนิคเดลฟาย และ (Analytical Hierarchy Process, AHP) เพื่อให้ได้ปัจจัยที่มีความเหมาะสมกับประเทศไทย และยังได้อธิบายในรายละเอียดเกี่ยวกับเกณฑ์การให้คะแนนพื้นที่ทางเลือกตำแหน่งที่ตั้งของสถานีขนส่งสินค้า ซึ่งพื้นที่ทางเลือก ต.บึงพระ อ.เมือง จ.พิษณุโลก เป็นพื้นที่ทางเลือกที่มีความเหมาะสมในการคัดเลือกเป็นสถานที่ในการก่อสร้างสถานีขนส่งสินค้า ในกรณีใช้จังหวัดพิษณุโลกเป็นพื้นที่ศึกษา

คำสำคัญ: สถานีขนส่งสินค้า เกณฑ์การคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสม กระบวนการตัดสินใจเชิงลำดับขั้น

Abstract

The logistics of Thailand has been improved in various aspects such as multimodal-transportation. In the present, Thailand has only three truck terminals which are located in surrounded of Bangkok Metropolitans Area. It is still not enough to reduce the overall transportation cost in Thailand. Therefore, Thai government has policy to build more truck terminals in other regions. In 1992, equally weighted four main factors were used by JICA to

determine the appropriate locations which are (1) accessibility (2) goods volume (3) land use (4) land price. However, only these factors cannot cover other aspects for truck terminal location determination such as Special Economic Zone (SEZ), mega-transport infrastructure project, environmental impact and disaster risks. Therefore, this study aims to explore more factors and appropriate weight of each factor to determine an appropriate location which can more effectively decrease transportation cost in Thailand. The Delphi Technique and an Analytical Hierarchy Process (AHP) were employed to determine the weighted of influenced factor in this study. A case study of Phitsanulok Province.

Keywords: Truck Terminal, Location Determination, Analytic Hierarchy Process (AHP)

1. คำนำ

ปัจจุบันระบบโลจิสติกส์ของประเทศไทยมีการพัฒนา รูปแบบการขนส่งมาอย่างต่อเนื่อง โดยระบบการขนส่งนับว่ามีความสำคัญต่อต้นทุนของสินค้าโดยตรง ที่จะส่งผลทำให้สินค้ามีมูลค่าสูงขึ้นหรือลดลง เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนของราคาสินค้า ในส่วนของภาครัฐเองมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและระบบการขนส่งมาอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งหาวิธีการและแนวทางต่างๆ ที่จะช่วยลดให้ค่าใช้จ่ายในสินค้า และมีความศักยภาพเพียงพอที่สามารถแข่งขันกับประเทศอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในส่วนของสถานีขนส่งสินค้าย่อมมีบทบาทสำคัญต่อภาพรวมของระบบการขนส่งสินค้าและส่งผลโดยตรงต่อผู้ประกอบการขนส่ง เป็นสถานที่จัดการบริหารสินค้าผ่านระบบสถานีขนส่ง เป็นการสนับสนุนการบริหารจัดการสินค้าอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในการกำหนดพื้นที่จัดสร้างสถานีขนส่งสินค้าที่ไม่ตอบสนองต่อระบบการขนส่งและบริหารจัดการสินค้า อาจส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายราคาสินค้าที่อาจเพิ่มขึ้น

โดยในอดีตที่ผ่านมาการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งของสถานีขนส่งสินค้าทั้งสามแห่งที่ทำการศึกษาโดย JICA [1] ในปี ค.ศ.1992 จะให้น้ำหนักของปัจจัยในการคัดเลือกพื้นที่จำนวน 4 ปัจจัย ประกอบไปด้วย (1) ความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่ (2) ปริมาณการขนส่งสินค้า (3) การใช้ประโยชน์ที่ดิน และ (4) ราคาของที่ดิน ซึ่งอาจจะยังไม่เพียงพอต่อการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีขนส่งสินค้า ในปัจจุบันที่มีปัจจัยอื่นๆ ซ้ำซ้อนเพิ่มมากขึ้น เช่น การมีเขตเศรษฐกิจพิเศษในพื้นที่, โครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่ง, ผลกระทบสิ่งแวดล้อม และความเสี่ยงของพื้นที่ต่อภัยพิบัติทางธรรมชาติ เป็นต้น

ในการศึกษารังนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์เพื่อทบทวนจำนวนและชนิดของปัจจัยให้มีความครอบคลุมปัจจัยใหม่ๆ ที่มีความสำคัญ และยังได้อธิบายในรายละเอียดกำหนดเกณฑ์การคัดเลือกพื้นที่ โดยการวิเคราะห์เพื่อหาค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัย ในกรณีพื้นที่ศึกษา จ.พิษณุโลก ผ่านการเก็บข้อมูลจากแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญ โดยใช้เทคนิคเดลฟาย และ Analytical Hierarchy Process (AHP) และทำการคัดเลือกพื้นที่ที่ผ่านเกณฑ์การให้คะแนน เพื่อให้ได้ปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับลดต้นทุนของการขนส่งสินค้าของประเทศโดยรวม

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การคัดเลือกตำแหน่งของสถานีขนส่งสินค้าที่ผ่านมา

การหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุกบริเวณชานเมืองกรุงเทพมหานครทั้ง 3 แห่ง ที่ผ่านมา ได้เริ่มมีการศึกษาถึงความเหมาะสมและคุ่มค่าของสถานีขนส่งสินค้า ในปี พ.ศ. 2523 และได้ทำการศึกษาทบทวนความเหมาะสมอีกครั้งจนได้รับงบประมาณสนับสนุนจากทางภาครัฐในปี พ.ศ. 2537 และสามารถเปิดให้บริการได้ในปี 2543 โดยอยู่ในความควบคุมดูแลของกรมการขนส่งทางบก ประกอบด้วยสถานีขนส่งสินค้าพุทธมณฑล, สถานีขนส่งสินค้าร่มเกล้า และสถานีขนส่งสินค้าคลองหลวง

ในปี พ.ศ. 2553[2] ได้ใช้วิธีพิจารณาปัจจัยเงื่อนไขต่างๆ ของแต่ละพื้นที่ทางเลือกเปรียบเทียบกับกันโดยการให้คะแนนแต่ละข้อพิจารณาใน 3 ระดับคะแนน แล้วนำผลจากการคัดเลือกตำแหน่งดำเนินการโดยวิธีนับคะแนนที่ได้จากการเปรียบเทียบข้อพิจารณาและปัจจัยต่างๆทั้งหมด ประเมินตำแหน่งที่ตั้ง

เหมาะสมของพื้นที่ และในปี พ.ศ. 2558[3] ได้ทำการคัดเลือกพื้นที่เหมาะสมในการจัดตั้งสถานีขนส่งสินค้า ทำการคัดเลือกพื้นที่เบื้องต้นโดยวิธี Overlay Mapping และทำการรวบรวมข้อมูลพื้นที่จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งหน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนในพื้นที่ เสนอพื้นที่ที่มีศักยภาพที่เหมาะสมในการจัดตั้งสถานีขนส่งสินค้า แล้วทำการกำหนดปัจจัยและค่าน้ำหนักคะแนนความสำคัญจากการประยุกต์ใช้โครงการที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน อาทิ โครงการศึกษาการจัดตั้งศูนย์การขนส่งชายแดนจังหวัดนครพนม ซึ่งโดยการใช้วิธี Overlay Mapping ที่ผ่านมายังมีข้อจำกัดในการใช้งานในส่วนของการให้ค่าน้ำหนักของคะแนนที่เท่ากัน ไม่มีการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่แตกต่างกัน ซึ่งข้อมูลที่ได้ยังมีข้อท้วงติงคือไม่ตอบสนองต่อการให้ความสำคัญมากหรือน้อยของน้ำหนักปัจจัยที่ได้มา

2.2 เทคนิคการวิจัยเดลฟาย (Delphi Technique)

เป็นกระบวนการรวบรวมทัศนคติความคิดเห็นอย่างเป็นอิสระ มีความสอดคล้องเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน จากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญหรือผู้มีประสบการณ์ในสาขาที่ต้องการศึกษาหรือวิจัยเกี่ยวกับอนาคต ได้รับการค้นพบและพัฒนาโดย โอลาฟ เฮลเมอร์ (Olaf Helmer) และ นอร์แมน ดาลกี (Norman Dalkey) โดยใช้วิธีการแสวงหาความคิดเห็นของกลุ่มด้วยแบบสอบถาม โดยแต่ละคนสามารถมีความคิดเห็นอย่างอิสระ และทบทวนคำตอบอีกครั้ง เมื่อเห็นผลของคำตอบถูกเบี่ยงเบนออกไป

ขั้นตอนของกระบวนการเทคนิคเดลฟาย

2.2.1 กำหนดกลุ่มผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ความสามารถในเรื่องที่จะทำการศึกษาวิจัย

2.2.2 สร้างเครื่องมือการวิจัย โดยทั่วไปใช้เป็นแบบสอบถามหรือวิธีการสัมภาษณ์

2.2.3 เก็บข้อมูลด้วยการสอบถามผู้เชี่ยวชาญด้วยแบบสอบถามหรือสัมภาษณ์ 4 รอบ ดังนี้

- 1) รอบแรก ส่งแบบสอบถามให้ผู้เชี่ยวชาญแสดงความคิดเห็น เป็นคำถามปลายเปิดโดยให้แสดงความคิดเห็น เพื่อรวบรวมจัดประเด็น
- 2) รอบสอง นำคำตอบรอบแรกของผู้เชี่ยวชาญทุกคนมารวบรวม ดัดทอนสิ่งที่ซ้ำๆ กันออก
- 3) รอบสาม จัดส่งแบบสอบถามชุดเดิมให้ผู้เชี่ยวชาญพิจารณาการแสดงความคิดเห็นอีกครั้ง โดยผู้เชี่ยวชาญบางคนอาจจะเปลี่ยนแปลงคำตอบของตนหรือจะคงเดิมก็ได้ แต่ต้องให้แสดงเหตุผลประกอบ

- 4) รอบสี่ ดำเนินการเช่นเดียวกับรอบ 3 ซึ่งถ้าพบว่าคำตอบของกลุ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ต่อไปในขั้นตอนต่อไปได้

2.3 ทฤษฎีกระบวนการตัดสินใจเชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process, AHP)

เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อการตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ดีที่สุด (Best Alternatives) พัฒนาขึ้นโดยศาสตราจารย์โทมัส ซาตตี้ (Thomas Saaty) ปี ค.ศ.1970 โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบเกณฑ์ในการคัดเลือกทางเลือกที่ละคู่เพื่อให้ง่ายต่อการตัดสินใจ ว่าเกณฑ์ไหนสำคัญกว่ากัน

ในการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ด้านการขนส่งโลจิสติกส์ มีหลากหลายงานวิจัยในด้านการขนส่งที่ได้นำ AHP มาใช้ในกระบวนการคัดเลือก ไม่ว่าจะเป็นการคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้า, การคัดเลือกพื้นที่สำหรับการก่อสร้างสถานีขนส่งสินค้าทางน้ำ, Logistics Park, Ports, Shipper, Manufacture, Shippers Companies โดยการใช้หลักเกณฑ์ในการคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมเป็นที่ตั้งของการศึกษานั้นๆ เป็นต้น

จุดเด่นของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์มีดังนี้

- ใช้กระบวนการวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงคู่
 - มีโครงสร้างที่เป็นแผนภูมิแบบลำดับชั้น ง่ายต่อการใช้งานและการทำความเข้าใจ
 - การแสดงผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงเป็นตัวเลข ทำให้ง่ายต่อการจัดลำดับความสำคัญ
- ข้อจำกัดของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์
- ใช้เวลาค่อนข้างมากในการเก็บข้อมูล
 - การเก็บข้อมูลมีความซับซ้อน

2.4 ปัจจัยการคัดเลือกตำแหน่งของสถานีขนส่งสินค้าที่ผ่านมา

ผู้วิจัยได้จัดทำแบบสรุปปัจจัยหลักในการศึกษาที่ผ่านมาให้อยู่ในรูปของตารางแจกแจงความถี่เพื่อหาค่าปัจจัยหลัก ในตารางที่ 1 จากปัจจัยความถี่ที่ได้ ปัจจัยที่มีความถี่สูงอยู่ใน 7 ลำดับแรกได้แก่ ปัจจัยโครงสร้างพื้นฐาน, ปัจจัยการขนส่งหลายรูปแบบ, ปัจจัยเรื่องราคาที่ดิน, ปัจจัยศักยภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน, ปัจจัยสิ่งแวดล้อมในพื้นที่, ปัจจัยความเสี่ยงของพื้นที่ และปัจจัยทางด้านลดค่าใช้จ่าย หลังจากนั้นจะได้นำปัจจัยหลักที่ได้ และเพิ่มเติมส่วนของข้อมูลปัจจัยรองจัดทำแบบสอบถามที่ 1 ในลำดับถัดไป

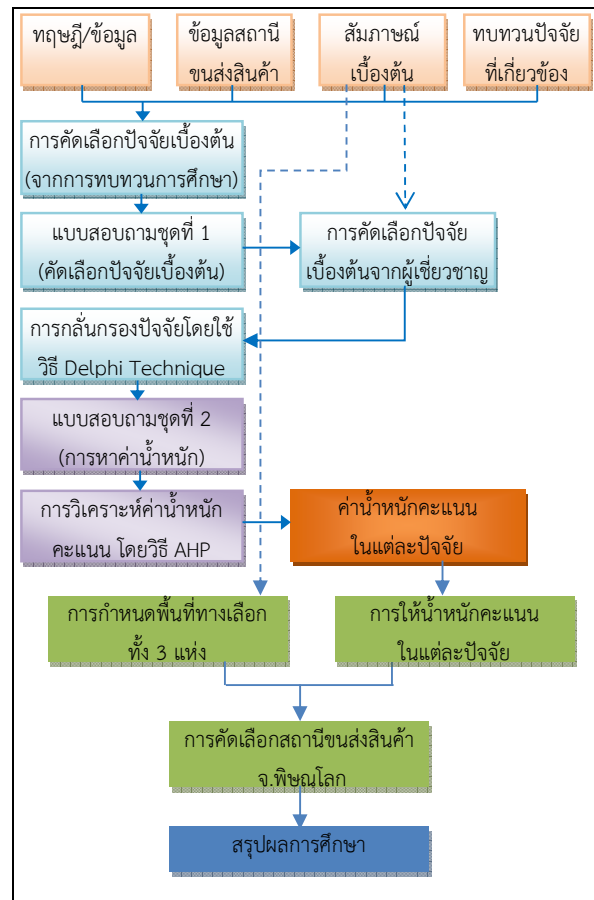
ตารางที่ 1 ปัจจัยในการคัดเลือกตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ

โครงการวิจัย	ปัจจัย										รวม
	โครงสร้างพื้นฐาน	การขนส่งหลายรูปแบบ	ราคาที่ดิน	ศักยภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน	สิ่งแวดล้อม/มลภาวะ	ความเสี่ยงของพื้นที่	ลดค่าใช้จ่าย	การสนับสนุนจากภาครัฐ	ปริมาณจราจร	ต้นทุน/ค่าก่อสร้าง	
Truck Terminal	/	/	/	/	-	-	-	-	-	-	4
Intermodal Facilities	/	/	/	/	/	/	-	-	-	-	6
Truck Terminal	/	/	/	/	/	/	-	-	-	-	6
Warehouse	/	/	/	/	/	/	-	-	-	-	6
Water Freight Transportation Terminal	/	/	/	-	/	/	-	-	-	-	5
Distribution Center	/	/	/	/	/	/	/	-	/	-	8
Freight Logistics Hubs	/	/	-	-	-	/	/	/	-	-	5
Site Selection location	/	-	/	-	/	-	/	-	-	/	5
Selection factors	/	/	/	/	/	/	/	-	-	-	7
Freight Villages	/	/	/	/	/	/	-	-	-	-	5
Cargo Terminal	/	/	/	/	/	/	/	-	-	-	7
Shippers Companies	/	-	/	/	-	-	/	-	-	-	4
Shipper	/	/	/	/	-	-	/	-	-	-	5
Remanufacture	/	/	-	/	-	-	-	/	-	-	4
Ports	/	/	-	/	-	-	/	-	-	-	4
รวม	15	13	12	12	9	8	8	2	1	1	

3. วิธีการศึกษา

3.1 ศึกษาหลักเกณฑ์ ทบทวนวรรณกรรม งานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

ดำเนินการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา ประกอบไปด้วยการทบทวนวรรณกรรม, เทคนิคเดลฟาย, ทฤษฎี AHP, ข้อมูลสำคัญของสถานีขนส่งสินค้า, การเก็บข้อมูลสัมภาษณ์เบื้องต้นจากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ, การทบทวนปัจจัยจากโครงการศึกษาต่างๆทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดวิธีการวิจัย

3.2 การคัดเลือกปัจจัยในการคัดเลือกตำแหน่งที่ตั้งสถานีขนส่งสินค้า

3.2.1 วิธีการคัดเลือกปัจจัยหลักในเบื้องต้น

โดยการนำข้อมูลจากการรวบรวมข้อมูลปัจจัยหลักจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มาทำการจัดเรียงความถี่ปัจจัยหลักที่มีการใช้จำนวนมาก ไปหาปัจจัยหลักที่มีจำนวนการใช้บ่อย ลำดับถัดไปนำข้อมูลความถี่ที่ได้มาพิจารณาคัดเลือกปัจจัยหลักในเบื้องต้น โดยใช้ความถี่จากฐานนิยม ทำการกำหนดเกณฑ์ปัจจัยหลักที่ใช้ในการเก็บข้อมูล โดยต้องมีความถี่ของค่าเฉลี่ยของปัจจัยหลักไม่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความถี่ปัจจัยจากโครงการวิจัยทั้งหมด แล้วนำผลจากปัจจัยที่ผ่านเกณฑ์แล้วจัดทำแบบสอบถามชุดที่ 1 ทำการเก็บข้อมูลโดยการสอบถามผู้เชี่ยวชาญ

ในส่วนของปัจจัยรองที่ได้นำมาใช้ในการศึกษานั้น ผู้วิจัยจะเป็นผู้คัดกรองปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลักและนำไปรวมกันไว้ในแบบสอบถามชุดที่ 1 ซึ่งผู้เชี่ยวชาญสามารถที่จะเพิ่มเติมปัจจัยรองเพิ่มมากขึ้นกว่าที่มีใช้ในแบบสอบถามได้ โดยผู้เชี่ยวชาญจะต้องให้เหตุผลประกอบต่อไป

3.2.2 การพัฒนาแบบสอบถามชุดที่ 1

เมื่อได้ผลของปัจจัยหลักที่ใช้ในการเก็บข้อมูลจากการรวบรวมปัจจัยความถี่ที่ได้ในเบื้องต้นมาแล้ว นำปัจจัยหลักที่ได้มาจัดทำแบบสอบถามชุดที่ 1 ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 กลุ่มๆละ ไม่น้อยกว่า 5 ชุด ประกอบด้วย

- กลุ่มที่ 1 นักวิชาการ จำนวนไม่น้อยกว่า 5 ท่าน ซึ่งเป็นการให้มุมมองจากผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ในส่วนของการสร้างหลักเกณฑ์และปัจจัยในการคัดเลือก จากนักวิชาการในมหาวิทยาลัยและกลุ่มผู้ที่ทำงานด้านวิชาการจากหน่วยงานเอกชนภายนอกภาครัฐ ทั้งนี้เพื่อให้งานวิจัยมีความเหมาะสมและน่าเชื่อถือมากขึ้น
- กลุ่มที่ 2 ผู้เชี่ยวชาญที่ทำงานเกี่ยวข้องกับสถานีขนส่งสินค้า จำนวนไม่น้อยกว่า 5 ท่าน เป็นกลุ่มบุคคลภายในหน่วยงานที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดนโยบาย การจัดตั้งหรืออนุญาตให้มีสถานีขนส่งสินค้าเพื่อประกอบกิจการด้านการขนส่งสินค้า
- กลุ่มที่ 3 หน่วยงานภาครัฐและเอกชน จำนวนไม่น้อยกว่า 5 ท่าน เป็นกลุ่มมุมมองจากบุคลากรที่ทำงานเกี่ยวข้องและมีนโยบายที่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการ ทั้งหน่วยงานภาครัฐและหน่วยงานเอกชนที่เกี่ยวข้อง เช่น สำนักงานโยธาธิการและผังเมือง, สำนักงานพาณิชย์จังหวัด, สำนักงานทางหลวง, องค์การบริหารส่วนจังหวัด, สภาอุตสาหกรรมจังหวัด และหอการค้าจังหวัด เป็นต้น

ตารางที่ 2 แบบสอบถามชุดที่ 1 การคัดเลือกปัจจัยหลักและปัจจัยรอง

หลักเกณฑ์ ปัจจัยหลัก ในการคัดเลือกพื้นที่เหมาะสม	มาก.....น้อย				
	ความสำคัญ				
	5	4	3	2	1
X1					
X2					
X3					
...					
Xn-1					
Xn					

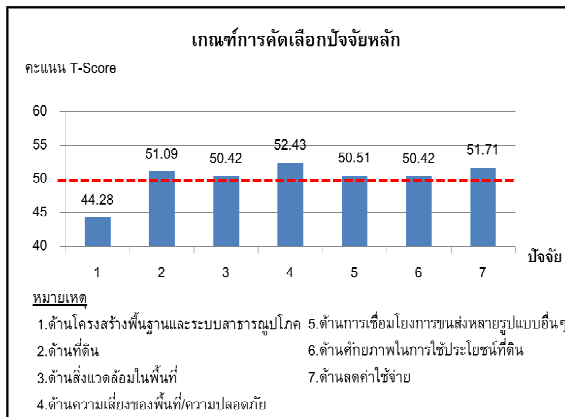
ในการจัดทำแบบสอบถามชุดที่ 1 หลังจากได้ข้อมูลปัจจัยหลักจากตารางความถี่ในตารางที่ 1 มาแล้ว และผู้วิจัยได้หาข้อมูลเพิ่มเติมในส่วนของปัจจัยรอง ที่มีข้อมูลรองรับกับปัจจัย

หลัก แล้วนำข้อมูลปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่ได้มาจัดทำการให้ค่าน้ำหนักคะแนน มาใช้ใน AHP ต่อไป ซึ่งปัจจัยหลักที่ได้ทำการคัดกรองจากผลความถี่ในตารางที่ 3 ประกอบด้วย 7 ปัจจัยหลักดังนี้

- 1) ปัจจัยความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐานและระบบสาธารณูปโภค เช่น ระบบไฟฟ้า ประปา โทรศัพท์
- 2) ปัจจัยด้านที่ดิน เช่น กรรมสิทธิ์ในที่ดินปัจจุบัน , ราคาที่ดิน, ขนาดของที่ดิน, ลักษณะรูปร่างของที่ดิน
- 3) ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม/มลภาวะ เช่น ผลกระทบต่อชุมชน/การยอมรับของชุมชน, ระยะห่างจากโบราณสถาน/แหล่งท่องเที่ยว, มลภาวะทางเสียง/ฝุ่น/น้ำเสีย
- 4) ปัจจัยด้านความเสี่ยงของพื้นที่/ความปลอดภัย เช่น พื้นที่เสี่ยงต่อการแผ่นดินไหว, พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วม
- 5) ปัจจัยด้านการเชื่อมโยงการขนส่งหลายรูปแบบอื่นๆ เช่น ระยะห่างจากถนนสายหลัก, ระยะห่างจากสถานีรถไฟ/ย่านรถไฟ, ระยะห่างจากท่าเรือสินค้า, ระยะห่างจากสนามบิน
- 6) ปัจจัยด้านศักยภาพในการใช้ประโยชน์ที่ดิน เช่น ความสัมพันธ์กับเขตเศรษฐกิจพิเศษ, ระยะห่างจากชายแดน, ระยะห่างจากโรงงาน/นิคมอุตสาหกรรม
- 7) ปัจจัยด้านลดค่าใช้จ่าย เช่น ต้นทุนของสินค้า, ต้นทุนค่าวัสดุ, ต้นทุนแรงงาน เป็นต้น

3.2.3 การกลั่นกรองปัจจัยโดยใช้สถิติและวิธี Delphi Technique

หลังจากที่ได้ปัจจัยจากการเก็บข้อมูลจากแบบสอบถามชุดที่ 1 มาแล้วนั้น ลำดับต่อไปคือการนำข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามมาคำนวณหาค่าสถิติจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน S.D และค่า T-Score โดยการกำหนดเกณฑ์ปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่ได้ ต้องมีค่า T-Score โดยค่าเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 50 แล้วนำผลปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่ได้ไปทำการทบทวนปัจจัยโดยใช้วิธี Delphi Technique โดยการสอบถามผู้เชี่ยวชาญอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นนำผลปัจจัยที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญนำไปทำการหาค่าน้ำหนักปัจจัยโดยใช้กระบวนการของ AHP ต่อไป



รูปที่ 2 เกณฑ์การคัดเลือกปัจจัยหลัก

จากการที่ได้มีการกำหนดเอาไว้ เกณฑ์คะแนนค่า T – Score ต้องมีระดับคะแนนไม่น้อยกว่า 50 ทำให้มีปัจจัยหลักที่ผ่านเกณฑ์อยู่ 6 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยด้านที่ดิน, ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมในพื้นที่, ปัจจัยด้านความเสี่ยงของพื้นที่/ความปลอดภัย, ปัจจัยด้านการเชื่อมโยงการขนส่งหลายรูปแบบอื่นๆ, ปัจจัยด้านศักยภาพในการใช้ประโยชน์ที่ดิน และปัจจัยด้านลดค่าใช้จ่าย

เนื่องด้วยปัจจัยด้านลดค่าใช้จ่าย ผู้เชี่ยวชาญส่วนใหญ่ (วิธี Delphi Technique) ให้ความเห็นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เป็นปัจจัยที่มีผลต่อเนื่องมาจากปัจจัยด้านการเชื่อมโยงการขนส่งหลายรูปแบบและปัจจัยด้านศักยภาพในการใช้ประโยชน์ที่ดิน ดังนั้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบการขนส่งที่มีประสิทธิภาพย่อมส่งผลให้ปัจจัยด้านลดค่าใช้จ่ายถูกลด ช่วยลดต้นทุนการขนส่งและโลจิสติกส์ในภาพรวมของประเทศ ส่วนปัจจัยด้านศักยภาพของพื้นที่ในการเป็นที่ตั้งหรือศูนย์รวบรวมและกระจายสินค้า ตามจุดยุทธศาสตร์ต่างๆ ของประเทศ ยังเป็นส่วนช่วยในการรองรับการพัฒนาของพื้นที่ และส่งผลต่อเนื่องทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนของต้นทุนสินค้าลดลงได้อีกทางหนึ่ง การศึกษาวิจัยในครั้งนี้จึงไม่นำปัจจัยด้านลดค่าใช้จ่ายมาเป็นปัจจัยหลักที่ใช้ในการหาค่าน้ำหนักคะแนน ซึ่งจะส่งผลให้ปัจจัยที่เหลืออยู่ทั้ง 5 ปัจจัยเป็นปัจจัยหลักที่ใช้ในการศึกษาหาค่าคะแนนโดยวิธี AHP ต่อไป

3.3 การศึกษาค่าน้ำหนักในแต่ละปัจจัย

ในการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละองค์ประกอบการตัดสินใจโดยใช้กระบวนการของ AHP นั้น จะนำข้อมูลจากแบบสอบถามชุดที่ 1 ที่ผ่านการคัดเลือกเกณฑ์ปัจจัยหลัก และปัจจัยรอง จากผู้เชี่ยวชาญ มาทำโครงสร้างรูปแบบลำดับชั้นของ AHP ซึ่งประกอบด้วย การจัดลำดับชั้นในการวิเคราะห์

(Structuring the Hierarchy) โดยจะทำการแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นลำดับชั้นดังนี้คือ เป้าหมาย (Goal) ปัจจัยหลัก (Criteria) ปัจจัยรอง (Sub Criteria) และทางเลือก (Alternatives)

หลังจากที่ได้ทำการแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นลำดับชั้นแล้ว จะนำข้อมูลปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่ได้ มาทำการจัดเก็บข้อมูลจากแบบสอบถามชุดที่ 2 จากการสอบถามผู้ที่เกี่ยวข้องในพื้นที่กลุ่มตัวอย่าง แล้วนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักปัจจัยหลักและปัจจัยรองจาก ค่าสัดส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio), ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index) และดัชนีจากการสุ่มตัวอย่าง (Random Index) เพื่อหาค่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ต่อไป

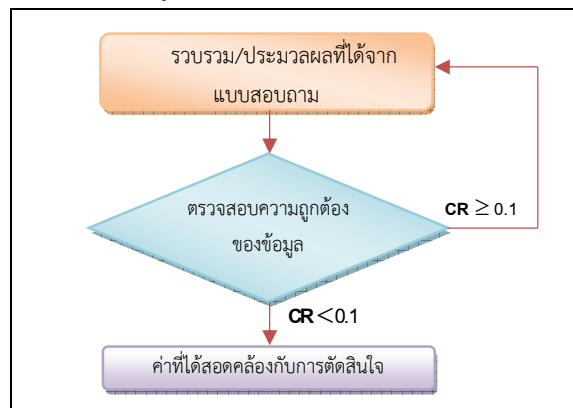
3.3.1 การพัฒนาแบบสอบถามชุดที่ 2

หลังจากที่ได้รูปแบบของโครงสร้างปัจจัยจาก AHP แล้ว จะนำข้อมูลที่ได้ ไปทำการเก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามชุดที่ 2 ทำการเก็บข้อมูลโดยการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่มๆละ ไม่น้อยกว่า 5 ชุดตัวอย่าง ประกอบด้วย

- กลุ่มที่ 1 หน่วยงานราชการ/หน่วยงานรัฐวิสาหกิจ
- กลุ่มที่ 2 องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น
- กลุ่มที่ 3 องค์กรเอกชน/ภาคเอกชน/หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

3.3.2 การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักคะแนนโดยวิธี AHP

เมื่อได้ข้อมูลจากแบบสอบถามแล้ว ผู้วิจัยจะได้นำมาประมวลผลโดยใช้กระบวนการ AHP หาค่าน้ำหนักคะแนนและตรวจสอบความถูกต้องตามลำดับต่อไป



รูปที่ 3 กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถาม

ในการตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency Ratio: CR) ของ AHP นั้นเนื่องจากการเก็บข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถาม ซึ่งอาจจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง จึงต้องมีการตรวจสอบความถูกต้อง โดยการหาค่าความสอดคล้องของข้อมูล โดยถ้าค่า CR ที่ได้สูงกว่า 0.1 ข้อมูลที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนต้องมีการเก็บข้อมูลจากแบบสอบถามใหม่ แต่ถ้าค่า CR ต่ำกว่า 0.1 ก็แสดงว่าการเก็บข้อมูลจากแบบสอบถามชุดนั้นมีความถูกต้องน่าเชื่อถือ สามารถนำไปใช้ได้

4. ผลการศึกษา

จากการรวบรวมข้อมูลวรรณกรรม รวบรวมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับศึกษา ให้อยู่ในรูปตารางความถี่ คัดเลือกปัจจัยที่มีความถี่ที่มีจำนวนเกณฑ์ไม่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของจำนวนปัจจัยทั้งหมด เหลือ 7 ปัจจัย ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลจากแบบสอบถาม ชุดที่ 1 นำผลที่ได้จากแบบสอบถามชุดที่ 1 คัดกรองกำหนดเกณฑ์โดยใช้ค่าคะแนน T-Score ที่ 50 เหลือปัจจัยหลักที่ได้เบื้องต้น 6 ปัจจัย และทำการคัดกรองจากผู้เชี่ยวชาญอีกครั้งหนึ่งโดยใช้เทคนิคเดลฟาย เหลือปัจจัยหลัก 5 ปัจจัยและปัจจัยรอง 16 ปัจจัย มาทำการจัดเรียงในรูปแบบการวิเคราะห์ของ AHP จัดทำแบบสอบถามชุดที่ 2 ทำการเก็บข้อมูล หาค่าน้ำหนักคะแนนของปัจจัยหลักและปัจจัยรอง

เก็บข้อมูลโดยการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยการแบ่งผู้ตอบแบบสอบถาม 3 กลุ่ม จำนวน 15 ชุดแบบสอบถาม และนำข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามชุดที่ 2 ทำการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักคะแนน ทำการตรวจสอบความถูกต้องของชุดข้อมูล/คะแนน ซึ่งผลที่ได้จากค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง CR (Consistency Ratio) ของชุดปัจจัยหลัก เท่ากับ $0.074 < 0.10$ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยจากแบบสอบถามปัจจัยหลัก

ปัจจัยหลัก	ที่ดิน	ความเสี่ยงของพื้นที่	การเชื่อมโยงรูปแบบอื่นๆ	ศักยภาพในการใช้ประโยชน์ที่ดิน	สิ่งแวดล้อม/มลภาวะ
ที่ดิน	1.000	3.208	1.285	0.576	1.343
ความเสี่ยงของพื้นที่	0.312	1.000	0.928	0.280	0.685
การเชื่อมโยงรูปแบบอื่นๆ	0.778	1.077	1.000	1.364	2.810
ศักยภาพในการใช้ประโยชน์ที่ดิน	1.736	3.574	0.733	1.000	3.500
สิ่งแวดล้อม/มลภาวะ	0.744	1.456	0.356	0.286	1.000

ตารางที่ 4 ค่าน้ำหนัก/ค่าคะแนน ปัจจัยหลักและปัจจัยรอง

ปัจจัยหลัก	ค่าน้ำหนัก/ค่าคะแนน	ปัจจัยรอง	ค่าน้ำหนัก/ค่าคะแนน
1.ที่ดิน	0.227	กรรมสิทธิ์ที่ดิน	0.044
		ราคาที่ดิน	0.066
		ขนาดของที่ดิน	0.078
		รูปร่างของที่ดิน	0.039
2.ความเสี่ยงของพื้นที่	0.107	เสี่ยงต่อแผ่นดินไหว	0.037
		เสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วม	0.070
3.การเชื่อมโยงรูปแบบอื่นๆ	0.239	ทางหลวงสายหลัก	0.139
		สถานีรถไฟ/ยานรถไฟ	0.057
		ท่าเรือสินค้า	0.018
		สนามบิน	0.025
4.ศักยภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน	0.311	เขตเศรษฐกิจพิเศษ	0.155
		ด่านชายแดน	0.092
		นิคมอุตสาหกรรม	0.064
5.สิ่งแวดล้อม/มลภาวะ	0.116	ผลกระทบต่อสาธารณสุขในชุมชน	0.057
		โบราณสถาน/ท่องเที่ยว	0.037
		มลภาวะ (ฝุ่น/เสียง)	0.022

จากค่าน้ำหนักคะแนนของปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่ได้มีผลน้ำหนักระบุดังนี้

- ปัจจัยด้านศักยภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน (0.311)
- ปัจจัยในการเชื่อมโยงรูปแบบอื่นๆ (0.239)

- ปัจจัยทางด้านที่ดิน (0.227)
- ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม/มลภาวะ (0.116)
- ปัจจัยด้านความเสี่ยงของพื้นที่ (0.107)

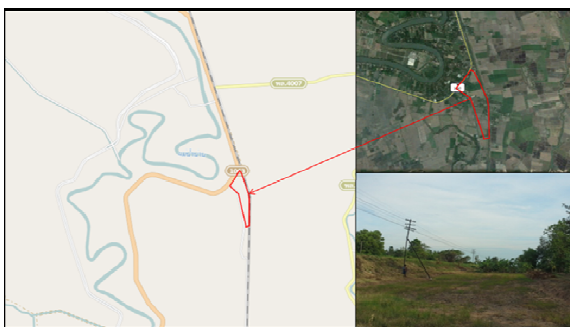
ค่าน้ำหนักคะแนนที่ได้ในแต่ละปัจจัย มีค่าน้ำหนักคะแนนความสำคัญไม่เท่ากัน ทำให้ทราบว่าปัจจัยใดที่ควรพิจารณาให้ความสำคัญมากที่สุดและปัจจัยใดที่ให้ความสำคัญรองลงมาเพื่อนำค่าคะแนนที่ได้ไปใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

4.1.1 การกำหนดพื้นที่ทางเลือกเบื้องต้น 3 แห่ง

จากรายงานสรุปผลกลุ่มย่อย (Focus Group) จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งได้กล่าวถึง เรื่องการศึกษาความเป็นไปได้และรูปแบบการบริหารจัดการสถานีขนส่งสินค้าภูมิภาค มาเป็นพื้นที่ทางเลือกเบื้องต้นในการพื้นที่ที่เหมาะสมในการคัดเลือกตำแหน่งที่ตั้งสถานีขนส่งสินค้าจังหวัดพิษณุโลก ประกอบไปด้วยพื้นที่ทางเลือกทั้ง 3 แห่ง ดังนี้

1.บริเวณพื้นที่เลียบทางรถไฟ ตำบลวังน้ำคู้ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก

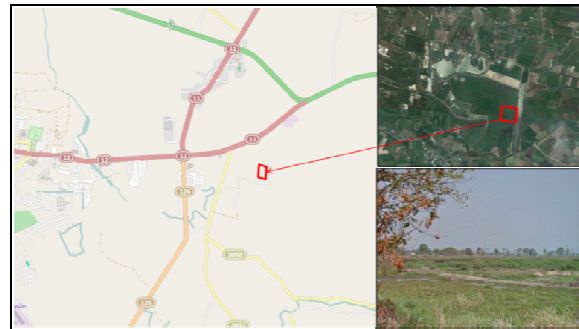
ศักยภาพที่สำคัญของที่ดินแปลงนี้ได้แก่ ติดทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 1063 เชื่อมต่อทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 126 เลี้ยวเมืองพิษณุโลก (ตอนใต้) ระยะทาง 12 กม. และระยะทางอีก 15 กม. เชื่อมต่อไปยังทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 11 และหมายเลข 12 บริเวณสี่แยกอินโดจีน และเชื่อมต่อทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 117 (พิษณุโลก-นครสวรรค์) ระยะทาง 14 กม.



รูปที่ 4 บริเวณพื้นที่เลียบทางรถไฟ ต.วังน้ำคู้ อ.เมือง

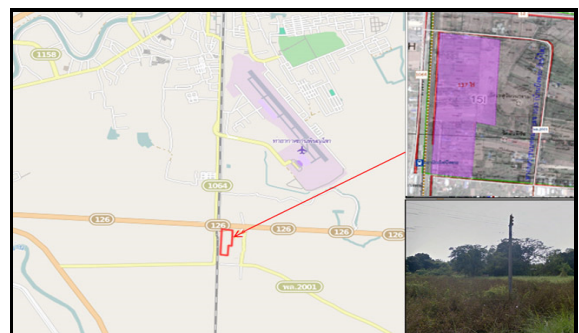
2.บริเวณพื้นที่ ตำบลวังทอง อำเภอวังทอง จังหวัดพิษณุโลก

ศักยภาพที่สำคัญของที่ดินแปลงนี้ได้แก่ จะอยู่บนตามแนวทางหลวงหมายเลข 11 และทางหลวงหมายเลข 12 ตามเส้นทางระเบียงเศรษฐกิจเหนือ – ใต้ (NSEC) และเส้นทางระเบียงเศรษฐกิจแนวตะวันออก-ตะวันตก (EWEC)



รูปที่ 5 บริเวณพื้นที่ ตำบลวังทอง อำเภอวังทอง

3. บริเวณ ตำบลบึงพระ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ศักยภาพที่สำคัญของที่ดินแปลงนี้ได้แก่ อยู่ติดกับสถานีรถไฟบึงพระ อยู่ใกล้ทางหลวงหมายเลข 126 เส้นทางเลี้ยวเมืองพิษณุโลกและตั้งอยู่ไม่ไกลจากท่าอากาศยานพิษณุโลก



รูปที่ 6 บริเวณพื้นที่ ทล.11 ตำบลบึงพระ อำเภอเมือง

ตารางที่ 5 สรุปการกำหนดเกณฑ์การให้คะแนนปัจจัยในการพิจารณา

ปัจจัยหลัก	ปัจจัยรอง	หน่วย/ขนาด	เกณฑ์คะแนน				ที่มา/อ้างอิง
			A(1.00)	B(0.67)	C(0.33)	D(0)	
1.ที่ดิน (0.227)	กรรมสิทธิ์ที่ดิน (0.044)	ง่าย - ยาก	ง่าย	ปานกลาง	ค่อนข้างยาก	ยาก	รายงานการศึกษา กรมการขนส่งทางบก, 2558
	ราคาที่ดิน (0.066)	0 – 1.00	$\left[\begin{array}{ll} y = 1 - \left[\frac{x}{3,000,000} \right] & ; x < 3,000,000 \\ y = 0 & ; x \geq 3,000,000 \end{array} \right]$				ราคาที่ดิน (บาท/ไร่)
	ขนาดของที่ดิน (0.078)	0 – 1.00	$\left[\begin{array}{ll} y = 0.005 X & ; x < 200 \\ y = 1 & ; x \geq 200 \end{array} \right]$				ขนาดที่ดิน (ไร่)
	รูปร่างของที่ดิน (0.039)	มาก- น้อยมาก	มาก	ปานกลาง	น้อย	น้อยมาก	รายงานการศึกษา กรมการขนส่งทางบก, 2558
2. ความเสี่ยง ของพื้นที่ (0.107)	เสี่ยงต่อแผ่นดินไหว (0.037)	น้อยมาก- มาก	น้อยมาก	น้อย	ปานกลาง	มาก	กรมทรัพยากรธรณี, 2548
	เสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วม (0.070)	น้อยมาก- มาก	น้อยมาก	น้อย	ปานกลาง	มาก	รายงานการศึกษา กรมการขนส่งทางบก, 2558
3. การเชื่อมโยง การขนส่ง รูปแบบอื่น ๆ (0.239)	ทางหลวงสายหลัก (0.097)	0 – 1.00					ระยะทาง (กิโลเมตร)
	จากสถานีรถไฟ/ย่านรถไฟ (0.067)	0 – 1.00	$\left[\begin{array}{ll} y = 1 - 0.2X & ; x < 5 \\ y = 0 & ; x \geq 5 \end{array} \right]$				
	ท่าเรือสินค้า (0.038)	0 – 1.00					
	สนามบิน (0.037)	0 – 1.00					
4. ศักยภาพใน การใช้ประโยชน์ ที่ดิน (0.311)	เขตเศรษฐกิจพิเศษ (0.155)	0 – 1.00					ระยะทาง (กิโลเมตร)
	ด้านชายแดน (0.092)	0 – 1.00	$\left[\begin{array}{ll} y = 1 - 0.02X & ; x < 50 \\ y = 0 & ; x \geq 50 \end{array} \right]$				
	นิคมอุตสาหกรรม (0.064)	0 – 1.00					
5.สิ่งแวดล้อม/ มลภาวะ (0.116)	ผลกระทบต่อ สุขภาพในชุมชน (0.057)	น้อยมาก- มาก	น้อยมาก	น้อย	ปานกลาง	มาก	กรมทางหลวง, 2559
	โบราณสถาน/ ท่องเที่ยว (0.037)	0 – 1.00	$\left[\begin{array}{ll} y = 0.5X & ; x < 2 \\ y = 1 & ; x \geq 2 \end{array} \right]$				ระยะทาง (กิโลเมตร)
	มลภาวะ (ฝุ่น/เสียง) (0.022)	0 – 1.00					

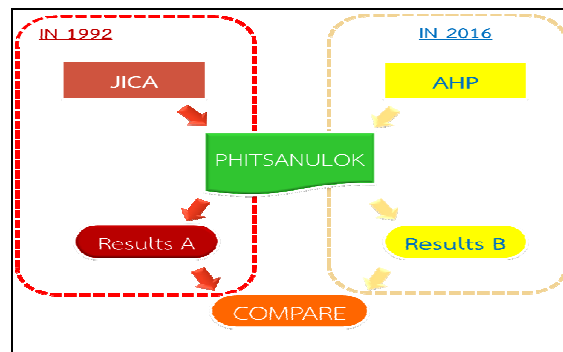
ตารางที่ 6 การให้คะแนนคัดเลือกพื้นที่

ปัจจัย	ทางเลือก ที่ 1 ต.วังน้ำคู้	ทางเลือกที่ 2 ต.วังทอง	ทางเลือกที่ 3 ต.บึงพระ
1. ที่ดิน (22.70)	18.05	20.39	14.25
- กรรมสิทธิ์ที่ดิน (4.40)	2.95	2.95	-
- ราคาที่ดิน (6.60)	6.01	5.74	5.28
- ขนาดของที่ดิน (7.80)	7.80	7.80	5.07
- รูปร่างของที่ดิน (3.90)	1.29	3.90	3.90
2. ความเสี่ยงของพื้นที่ (10.70)	10.70	8.39	10.70
- เสี่ยงต่อแผ่นดินไหว (3.70)	3.70	3.70	3.70
- เสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วม (7.00)	7.00	4.69	7.00
3. การเชื่อมโยงการขนส่ง รูปแบบอื่น ๆ (23.90)	1.71	-	18.49
- ทางหลวงสายหลัก (13.90)	-	-	13.07
- จากสถานีรถไฟ/ย่านรถไฟ (5.70)	1.71	-	5.42
- ท่าเรือสินค้า (1.80)	-	-	-
- สนามบิน (2.50)	-	-	-
4. ศักยภาพในการใช้ ประโยชน์ที่ดิน (31.10)	1.92	0.38	2.56
- เขตเศรษฐกิจพิเศษ (15.50)	-	-	-
- ด่านชายแดน (9.20)	-	-	-
- นิคมอุตสาหกรรม (6.40)	1.92	0.38	2.56
5. สิ่งแวดล้อม/มลภาวะ (11.60)	5.58	-	4.39
- ผลกระทบต่อการสัญจรใน ชุมชน (5.70)	1.88	-	1.88
- โบราณสถาน/ท่องเที่ยว (3.70)	3.70	-	2.22
- มลภาวะ (ฝุ่น/เสียง) (2.20)	-	-	0.29
รวม	37.96	29.16	50.39

4.1.2 การให้ค่าน้ำหนักคะแนนในแต่ละปัจจัย

เมื่อได้ปัจจัยและค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละองค์ประกอบการตัดสินใจแล้ว ในการกำหนดเกณฑ์การให้คะแนนจะใช้ข้อมูลจากผลรายงานการศึกษาความเป็นไปได้และรูปแบบการบริหารจัดการสถานีขนส่งสินค้าภูมิภาค ปี 2558 และโครงการศึกษาทางผังและออกแบบสถานีขนส่งสินค้าจังหวัดชายแดน ปี 2559 มาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา ซึ่งรายละเอียดเกณฑ์การให้คะแนนมีรายละเอียดดังตารางที่ 5

โดยการกำหนดค่าน้ำหนักเกณฑ์คะแนนในแต่ละปัจจัยเป็นการกำหนดเกณฑ์การให้ค่าน้ำหนักคะแนนในแต่ละเงื่อนไขของปัจจัย เพื่อให้การกำหนดแนวทางตัดสินใจแต่ละพื้นที่ทางเลือกมีการตัดสินใจอย่างยุติธรรม และปราศจากความลำเอียงหรืออคติ



รูปที่ 7 เปรียบเทียบปัจจัยในอดีตกับปัจจัยในปัจจุบัน

4.1.3 ผลการคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสม

จากผลการคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมในการคัดเลือกสถานีขนส่งสินค้า โดย AHP กรณีศึกษาจังหวัดพิษณุโลก ในตารางที่ 6 พื้นที่ที่มีค่าน้ำหนักคะแนนมากที่สุดคือพื้นที่ทางเลือกที่ 3 ต.บึงพระ อ.เมือง จ.พิษณุโลก เป็นพื้นที่ทางเลือกที่มีความเหมาะสมในการคัดเลือกเป็นสถานที่ในการก่อสร้างสถานีขนส่งสินค้า โดยในการเปรียบเทียบวิธีการศึกษาของ JICA ในอดีตกับการศึกษาโดยใช้ AHP ในปัจจุบัน ทำการวิเคราะห์ผลทางเลือกที่ได้จากการศึกษาในอดีตกับผลการศึกษาในปัจจุบัน ซึ่งได้ผลลำดับที่ ทางเลือกดังในตารางที่ 7 ดังนี้

ตารางที่ 7 ผลการคัดเลือกพื้นที่เหมาะสมในการก่อสร้างสถานีขนส่งสินค้า
(เปรียบเทียบ JICA และ AHP)

กรณีศึกษา (จ.พิษณุโลก)	ทางเลือกที่ 1	ทางเลือกที่ 2	ทางเลือกที่ 3
JICA	3	2	1
AHP	2	3	1

ในการศึกษาพบว่า วิธีการคัดเลือกสถานีขนส่งสินค้าในอดีต โดย JICA และในปัจจุบัน โดย AHP ให้ผลทางเลือกที่เหมือนกันในลำดับที่ 1 คือพื้นที่ทางเลือกที่ 3 ต.บึงพระ อ.เมือง จ.พิษณุโลก ส่วนพื้นที่ทางเลือกลำดับที่ 2 และ ลำดับที่ 3 ซึ่งมีความแตกต่างกัน ในส่วนของปริมาณการขนส่งสินค้าและลักษณะของพื้นที่อยู่ห่างจากตัวเมืองแตกต่างกัน และส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่าย โดยอาจเป็นการเพิ่มภาระค่าใช้จ่ายให้กับราคาสินค้า รวมทั้งปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมในพื้นที่มีผลกระทบต่อ การคัดเลือกพื้นที่ โดยการดำเนินการคัดเลือกพื้นที่ในปัจจุบัน ต้องผ่านการยอมรับของชุมชน และกฎหมาย ขอรระเบียบบังคับ รวมทั้งมีวิธีการป้องกันปัญหาที่ช่วยลดผลกระทบได้อย่างเหมาะสม

5. บทสรุป

ในการศึกษาค้นคว้านี้ได้รับการพัฒนาจากความต้องการในการ คัดเลือกตำแหน่งที่ตั้งของสถานีขนส่งสินค้าในปัจจุบัน เพื่อรองรับการพัฒนาาระบบโลจิสติกส์ของประเทศไทย โดยในอดีต JICA ได้มาศึกษาและกำหนดจำนวนตัวแปรที่จำกัดและขาด ความสอดคล้องกับสถานการณ์ในปัจจุบันของประเทศไทย เช่น เขต เศรษฐกิจพิเศษ และอื่นๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นใน การศึกษาหาปัจจัยที่มีความจำเป็นเพิ่มเติมในการคัดเลือก ตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสม โดยใช้ Delphi Technique และการ หาค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยโดยใช้ Analytical Hierarchy Process ซึ่งจากผลการศึกษาจะพบว่าทางเลือกตำแหน่งที่ตั้ง ของสถานีขนส่งสินค้าควรมีปัจจัยหลักจำนวน 5 ปัจจัย ได้แก่ ศักยภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน, การเชื่อมต่อการขนส่งรูปแบบ อื่น, ที่ดิน, สิ่งแวดล้อม, ความเสี่ยงของพื้นที่ ตามลำดับจาก น้ำหนักมากไปน้อย และมีปัจจัยรองที่เกี่ยวข้องอื่นๆ โดยทั้ง ปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่ได้ทำการวิจัยมาสามารถนำไป ประยุกต์ใช้กับการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งของสถานีขนส่งสินค้าได้ อย่างเหมาะสม ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในด้านการ ขนส่งสินค้า ของประเทศได้ในอนาคต

จากผลการศึกษาที่ได้พื้นที่พบว่าทางเลือกที่ 3 ตำบลบึงพระ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก เป็นพื้นที่ทางเลือกที่มีความ เหมาะสมในการศึกษา โดยการให้ค่าน้ำหนักคะแนนที่ได้จาก AHP แต่อย่างไรก็ตามควรมีการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางด้าน เศรษฐศาสตร์และเศรษฐกิจของพื้นที่อีกครั้ง รวมทั้งนโยบายของ ทางภาครัฐซึ่งจะช่วยสนับสนุนการลงทุนก่อสร้างสถานีขนส่ง สินค้าให้เกิดขึ้นได้ในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Japan International Cooperation Agency. (1992). "The study on greater Bangkok truck terminal in the Kingdom of Thailand"
- [2] Office of Transport and Traffic Policy and Planning Ministry of Transport. (2010). "Intermodal Facilities" Chiang Saen District and Chiang Khong of Chiang Rai Province. (In Thai)
- [3] Department of Land Transport. (2015). "Feasibility Study and Management Model of Regional Truck Terminal in Thailand." Bangkok. (In Thai)
- [4] Nareerat Pothikun. (2005). "Applying Analytic Hierarchy Process (AHP) to Warehouse Location Selection" Master. Science (Logistics Management), Graduate School of Chulalongkorn University, Bangkok (In Thai)
- [5] Charnwet Haripai. (2006). "Site Selection of Water Freight Transportation Terminal Construction by Fuzzy Multiattribute Decision Making Method. Master of Engineering Thesis in Civil Engineering, Graduate School, Khon Kaen University, Khon Kaen. (In Thai)
- [6] Warin Wongmanee, Wanchai Ratanavong. (2006). "Study of Location Suitability Distribution Center Indochina Intersection of Phitsanulok Province" Seminar of Thai Value Chain Management and Logistics. (In Thai)
- [7] Phatchari Nimsrikul. (2009). "Application of Multiple Criteria Decision Making for Selecting the Freight Logistics Hubs in Thailand on the Economic Corridors" Master of Engineering (Industrial Engineering) of Chiang Mai University, Chiang Mai. (In Thai)
- [8] Sivalai Pimolikitroek, Nanthawan Leamprecha. (2013). "Study on Rice Logistics Center Site Selection of Nakhon Sawan Province" Master of Science (Logistics and Supply Chain) Naresuan University, Phitsanulok. (In Thai)
- [9] Chuthamat Inkaew. (2013). Analysis of location selection factors: The case study of SS Timber Ltd., Surat Thani

Province. University of the Thai Chamber of Commerce, Bangkok, (Thailand). (In Thai)

- [10] Bahadır Fatih Yildirim, Emrah Önder. (2014) “Evaluating Potential Freight Villages in Istanbul Using Multi Criteria Decision Making Techniques” School of Business, Department of Quantitative Methods, Istanbul University, Istanbul, Turkey.
- [11] E. Mirzaei, Y. Minatour, H. Bonakdari, A. A. Javadi. (2015) “Application of Interval-valued Fuzzy Analytic Hierarchy Process Approach in Selection Cargo Terminals, a Case Study” International Journal of Engineering IJE TRANSACTIONS C: Aspects Vol. 28, No. 3, 387-395.
- [12] Guy, E. and Urli, B. (2006) Port Selection and Multicriteria Analysis: An Application to the Montreal-New York Alternative. Maritime Economics and Logistics 8[2], 169 - 186.
- [13] Kumar, S. and Vijay, R. (2002) An Analysis of intermodal carrier selection criteria for Pacific-rim imports to New England. Journal of Transportation Management 13[1], 19-28.
- [14] Lu Qing, Mark Goh, Miti Garg. (2012) Robert de Souza The Logistics Institute-Asia Pacific, National University of Singapore, Singapore 119613.
- [15] Kwok Hung Lau, Tu Li. (2012) Supply Chain Networks, Collaborations and Culture Competition and Collaboration: a Tale of Two Ports in China ,School of Business IT and Logistics RMIT University Melbourne Australia 3000.



ทรงยศ กิจธรรมเกษร

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



สสิกรณณ์ เหลืองวิชเจริญ

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

7. ประวัติ



ดุษฎี สติรเศรษฐทวี

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร



รังสรรค์ สุวรรณห้อย

นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

การจดจำวัตถุจากการสัมผัสของหุ่นยนต์เสมือนมนุษย์ด้วยวิธีการประมวลผลภาพจาก
การสัมผัสร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม

Object Recognition for Humanoid Robot using Tactile image processing and
Artificial Neural Network

สมชาย เปาะทองคำ, จักรี ศรีนนท์ฉัตร*

S. Pohongkam, J. Srinonchat

ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางด้านการประมวลผลสัญญาณ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Signal Processing Research Laboratory Department of Electronics and Telecommunication Engineering

Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi

*Corresponding author E-mail : jakkree.s@en.rmutt.ac.th

(Received: September 30, 2017, Revised: April 17, 2018, Accepted: July 2, 2018)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบสำหรับจดจำวัตถุจากการสัมผัสบริเวณพื้นผิววัตถุโดยใช้ประสาทสัมผัสทางกายเทียม ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบการทดสอบเพื่อเป็นพื้นฐานของมือหุ่นยนต์ที่ติดตั้งระบบเซ็นเซอร์วัดแรงกดแบบอาร์เรย์ ระบบได้รับการออกแบบโดยใช้เซ็นเซอร์สัมผัสขนาด 16x10 พิกเซล เมื่อระบบสัมผัสวัตถุจะทำการจัดเรียงข้อมูลให้เป็นรูปภาพ ภาพที่ได้จะถูกนำมาประมวลผลเพื่ออธิบายลักษณะของวัตถุที่สัมผัสที่ต่างกันสำหรับผิวสัมผัสของวัตถุจะสร้างความแตกต่างของแรงกดให้มือหุ่นยนต์ หลังจากนั้นได้จะแยกลักษณะของวัตถุโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ผลการทดสอบวัตถุ 10 ชนิดแสดงผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องโดยเฉลี่ยสูงสุด 93.2% โดยใช้การหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงกดที่กระทำบนเซ็นเซอร์

คำสำคัญ: เซ็นเซอร์วัดแรงกด, ระบบประสาทสัมผัสทางกาย, ภาพจากการสัมผัส, โครงข่ายประสาทเทียม

Abstract

This paper presents an improvement recognition objects system, in the term of touching surface of objects, by using Artificial Neural Networks (ANNs). The experiment of this article is implemented and designed base on the robot hand for installs a sensor array on the robot hand. The sensor array is designed as 16X10 pixels. When the robot hand touches the object, the data is then organized into the image form for processing. This is to identify the characterize of object surface which different objects will provides a different images. This also depends on the force to touch objects. Then the Artificial Neural Networks technique is used to classify the objects. This system is tested with 10 different objects. The experiment results shown that it provides the accuracy approximately 93.2% based on average and standard deviation values.

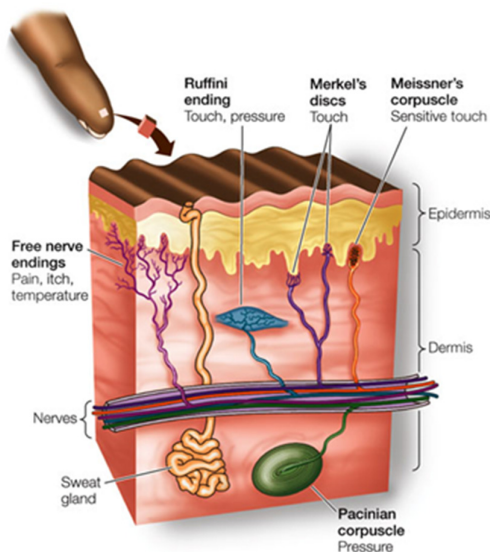
Keywords: Tactile Sensor, Nervous System, Tactile image, Artificial Neural Networks

1.บทนำ

เทคโนโลยีหุ่นยนต์เสมือนมนุษย์ (Humanoid Robot) ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องซึ่งการพัฒนาสามารถแยกได้เป็นสองส่วนคือทางด้านกายวิภาคของหุ่นยนต์ (Robot Anatomy) และทางด้านระบบประสาทของหุ่นยนต์ (Robot Nervous System) ซึ่งทั้งสองอย่างล้วนแล้วแต่กระทำการเลียนแบบระบบของมนุษย์จริงๆ ในบทความนี้จะกล่าวถึงระบบประสาทสัมผัสทางกายของหุ่นยนต์เสมือนมนุษย์ เพื่อให้หุ่นยนต์เสมือนมนุษย์มีความสามารถในการจดจำวัตถุจากการสัมผัส พื้นฐานการทำงานพัฒนามาจากระบบประสาทสัมผัสทางกายของมนุษย์ [1] มีโครงสร้างดังรูปที่ 1 โครงสร้างระบบประกอบด้วยส่วนของปลายประสาทที่ทำหน้าที่แตกต่างกัน 5 แบบดังนี้

- 1.Free nerve ending เป็นส่วนของการรับรู้ความเจ็บปวดและอุณหภูมิ,
- 2.Merkel's discs เป็นส่วนของการรับรู้การสัมผัส,
- 3.Meissner's corpuscle เป็นส่วนของการรับรู้การสัมผัสแบบแผ่วเบา,
- 4.Ruffini ending และ
- 5.Pacinian corpuscle ที่เป็นส่วนของการรับรู้แรงกด ซึ่งการทำงานของระบบร่างกายมนุษย์นี้จะเริ่มจากระบบประสาทสัมผัสได้สัมผัสกับตัวกระตุ้น เช่นอุณหภูมิภายนอก, หรือสัมผัสโดนวัตถุใดๆแล้วทำให้เกิดแรงกดขึ้นเป็นต้น ระบบประสาทจะเปลี่ยนข้อมูลที่ได้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเรียกว่าสื่อกระแสประสาท ส่งผ่านเส้นประสาท (Nerves) เข้าสู่สมองเพื่อตีความว่าวัตถุที่สัมผัสคืออะไรนั่นเอง

ในทำนองเดียวกันนี้การจะพัฒนาหุ่นยนต์เสมือนมนุษย์ให้มีความสามารถในการรับรู้ทางกายก็อาศัยกลไกเดียวกันนี้เป็นพื้นฐานในการออกแบบ



รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบประสาทรับรู้สัมผัสทางกายของมนุษย์ [1]

จากการพัฒนาเทคโนโลยีทางหุ่นยนต์ที่ได้นำเอาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันซึ่งมีประสิทธิภาพสูงและแนวคิดที่จะให้ระบบหุ่นยนต์และคอมพิวเตอร์มาทำงานร่วมกันเพื่อให้มีความสามารถในการเรียนรู้และจดจำเลียนแบบมนุษย์ โดยจะทำการพัฒนาระบบการเรียนรู้และจดจำวัตถุโดยใช้ระบบประสาทสัมผัสเทียมขึ้นโดยการทำงานจะใช้เซ็นเซอร์วัดแรงกดเป็นเหมือนปลายประสาทของตัวรับ (Receptors) ชนิด Ruffini ending และ Pacinian ซึ่งเป็นปลายประสาทรับแรงสัมผัสและแรงกดของมนุษย์ จากนั้นก็ส่งข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์ทำการวิเคราะห์ ซึ่งเปรียบเสมือนสมองของมนุษย์ที่ตีความจากข้อมูลที่ส่งมาจากปลายประสาท งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบอ่านเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งไว้ที่มือหุ่นยนต์ โดยเป็นเซ็นเซอร์สัมผัสแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Tactile Sensor) ที่มีลักษณะเป็นเซ็นเซอร์วัดแรงกดแบบอาร์เรย์ (Tactile Sensor Array) ซึ่งจะถูกฝังไว้ที่มือของหุ่นยนต์ เมื่อมือของหุ่นยนต์สัมผัสวัตถุจะเกิดแรงที่วัตถุกระทำต่อมือหุ่นยนต์เกิดเป็นรูปแบบแรงกด (Pressure Profile) ซึ่งมีลักษณะเป็นเมตริกซ์ข้อมูลของแรงกดของวัตถุนั้นๆ ซึ่งเราเรียกว่าภาพจากการสัมผัส (Tactile Image) เซ็นเซอร์วัดแรงสัมผัสซึ่งประกอบด้วยอาร์เรย์ของเซ็นเซอร์วัดแรงกดกำลังเป็นชิ้นส่วนที่พบบ่อยในระบบสมัยใหม่ซึ่งคาดการณ์ว่าการออกแบบมือหุ่นยนต์แบบใหม่จะมีเซ็นเซอร์วัดการสัมผัสฝังตัวเอาไว้ด้วยในแต่ละปลายนิ้วและในส่วนพื้นผิวต่างๆของมือ และประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ในยุคปัจจุบันก็ได้ถูกพัฒนาให้มียุคประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่ารุ่นก่อนหน้า ประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ทั้งในส่วนความสามารถในการรับแรง, ความละเอียด, ความสามารถในการเข้าค่า และมีการออกแบบเซ็นเซอร์ออกมาหลายรูปแบบ [2] และบางแบบมีความละเอียดสูงมากเช่นแบบ optical gel [3] ซึ่งมีความละเอียดสูงเท่ากับความละเอียดของกล้องที่นำไปใช้งานร่วม เซ็นเซอร์สัมผัสถูกพบว่าทำงานเหมือนกับกล้องที่บันทึกค่าความลึกซึ่งจะได้ค่าข้อมูลเป็นพิกเซลและค่าความลึกที่ได้จะขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุที่นำมาทำตัวปิด เมื่อเรามองรูปแบบข้อมูลที่ไดมาจากเซ็นเซอร์อาร์เรย์ตัวข้อมูลถูกวางเป็นเมตริกซ์ซึ่งมีลักษณะเดียวกับรูปภาพ เราจึงสามารถทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการคอมพิวเตอร์วิชั่นได้ การตีความข้อมูลจากภาพสัมผัสง่ายกว่าการตีความข้อมูลจากภาพถ่ายเนื่องจากไม่มีผลกระทบอันเกิดจากมุมมองของภาพและข้อมูลเป็นแบบความเข้มช่องเดียว แต่การเก็บภาพด้วยวิธีนี้

จะมีความยุ่งยากมากกว่าเนื่องจากแพทช์มีขนาดเล็กและมีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมเช่นอุณหภูมิความชื้นและแรงกดอากาศที่จะทำให้ค่าความต้านทานของแพทช์เปลี่ยนแปลงไป

งานวรรณกรรมทางด้านการจดจำภาพมีอย่างแพร่หลาย แต่งานที่เกี่ยวข้องกับการจดจำภาพจากการสัมผัสเป็นงานที่นักวิจัยให้ความสนใจค่อนข้างน้อย อาจเป็นเพราะว่าเซ็นเซอร์มีน้อย ในช่วงต้นๆงานวิจัยเน้นที่เรื่องการทำจุดสัมผัสและการดึงข้อมูลจากจีโอเมทรีของวัตถุ [4-8] โดยที่นักวิจัยทำออกแบบระบบให้เก็บข้อมูลจากจีโอเมทรีของวัตถุจากการจับวัตถุ และบางงานอาจใช้เซ็นเซอร์สัมผัส แต่โดยทั่วไปแล้วเพียงเพื่อวัตถุประสงค์ในการบอกตำแหน่งจุดสัมผัสหรือประมาณการพื้นผิวที่เกี่ยวข้องกับจุดสัมผัส งานเกือบทั้งหมดต้องควบคุมตำแหน่งที่แน่นอนและควบคุมแรงสุทธิตัวที่ใช้ด้วย โดยทั่วไปตัวอย่างที่ได้จากแพทช์เล็กๆ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกดึงเวกเตอร์คุณลักษณะออกมา และทำการกระจายข้อมูลบนเวกเตอร์คุณลักษณะเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูล งานวิจัยด้านการจับ, สัมผัสและจดจำวัตถุนี้มีหลายกลุ่มซึ่งพอแบ่งได้เป็นทางด้านการพัฒนาตัวฮาร์ดแวร์ คือระบบกลไกแขนของหุ่นยนต์ ระบบเซ็นเซอร์ทั้งเซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง วัดมุมของนิ้ว เซ็นเซอร์วัดแรงกด และเซ็นเซอร์อาร์เรย์สำหรับวัดการสัมผัส มีทั้งพัฒนาตัวเซ็นเซอร์แบบต่างๆอย่างหลากหลาย และงานที่ทำการพัฒนาระบบอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ และงานที่พัฒนาควบคุมทั้งระบบกลไกของมือหุ่นยนต์และระบบเซ็นเซอร์ งานวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งคือการพัฒนาโปรแกรมสำหรับจดจำโดยมีทั้งงานที่อ่านค่าจากเซ็นเซอร์จากตัวฮาร์ดแวร์ชนิดต่างๆ ทั้งแบบที่อ่านค่าจีโอเมทรีวัตถุที่สัมผัส และการพัฒนาเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลจากเซ็นเซอร์อาร์เรย์โดยตรง และการประมวลผลค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์อาร์เรย์ในลักษณะของภาพจากการสัมผัส และงานที่พัฒนาทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ไปพร้อมกัน งานวิจัยกลุ่มแรกคือกลุ่มที่เน้นพัฒนาโปรแกรมที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งข้อมูลก็นำมาวิเคราะห์มีหลากหลายรูปแบบ ทั้งลักษณะที่มองข้อมูลเป็นภาพ และนำภาพขนาดเล็กมาทำการวิเคราะห์ เช่นในปี 2009 [9] ได้นำเสนองานด้านการพัฒนาระบบซอฟต์แวร์สำหรับจดจำวัตถุ (Object) ที่สัมผัสโดยใช้ Bag-of-Feature เป็นพื้นฐานในการดำเนินการ งานเช่นเดียวกันนี้ที่ใช้ภาพที่ได้จากเซ็นเซอร์อย่างง่ายและใช้หลากหลายวิธีในการสกัดคุณลักษณะของข้อมูล งานชิ้นนี้ได้กล่าวถึงวิธีการดำเนินการในที่จะตรวจสอบชนิดของวัตถุโดยการสัมผัส แต่ใช้การตรวจสอบ

รูปร่างของวัตถุมากกว่าที่จะเก็บรวบรวมค่าที่อ่านได้จากผิวสัมผัส งานนี้กล่าวถึงการเลือกข้อมูลที่ดีที่สุดโดยการใช้เอนโทรปีน้อยสุด แต่พวกเขาไม่ได้อธิบายผลของตำแหน่งวัตถุที่จับ

ในปี 2012 [10] และในปี 2013 [11] ได้ทำการทดลองการวิเคราะห์ภาพที่ได้จากการสัมผัสวัตถุที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ โดยใช้มือทาสีและไปจับวัตถุโดยมีกระดาดรองอยู่ สีจากมือจะมาติดที่กระดาดมีความเข้มข้นเบาขึ้นอยู่กับแรงกดที่กระทำกับตำแหน่งของวัตถุนั้นๆ และถ่ายภาพความเข้มของสีที่ติดกระดาดได้มาเป็นข้อมูลภาพ แล้วนำมาสร้างเวกเตอร์ข้อมูลป้อนเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ สามารถแยกกลุ่มของวัตถุได้เป็นสี่กลุ่ม ในปี 2014 [12] นำเสนองานมีการออกแบบมือของหุ่นยนต์ให้ใกล้เคียงกับการแบ่งส่วนของระบบประสาทสัมผัสของมือมนุษย์ทำการทดลองกับวัตถุ 20 วัตถุทดสอบวัตถุละ 24 ครั้ง ใช้เทคนิค SHALLOW ANN และ PCA ในการจดจำวัตถุ ผลการทดลองที่ได้พบว่า ถ้าใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์สัมผัส มุมของนิ้ว มุมของมือเอว กระแส ความตึงสปริง มาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ แต่ข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดแรงกดที่ได้นำมาวิเคราะห์โดยตรง เนื่องจากใช้ข้อมูลที่มีความหลากหลาย และไม่ได้มองข้อมูลจากการสัมผัสเป็นภาพ แต่มองเป็นเวกเตอร์ข้อมูลตัวหนึ่ง ในปี 2015 [13] ได้นำเสนอการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดแรงกดที่ตำแหน่งต่างๆของฝ่ามือโดยบันทึกแรงกดตั้งแต่เริ่มจับวัตถุจนถึงตำแหน่งสุดท้ายในการจับเพื่อศึกษาแรงกดที่เปลี่ยนแปลงไปและนำมาเป็นอินพุตของระบบ แต่การวิเคราะห์ไม่ได้มองข้อมูลเป็นภาพ แต่มองข้อมูลเป็นเวกเตอร์ที่นำไปประมวลผลโดยตรง และในปี 2016 [14] นำเสนอรูปแบบการแบ่งส่วนภาพที่ได้ตามส่วนของมือมนุษย์จริงงานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการจดจำวัตถุได้มากขึ้นแต่ภาพที่ได้จากการสัมผัสยังไม่ใช่ภาพจากเซ็นเซอร์ งานของ [15] ได้ทำวัตถุจำลองในคอมพิวเตอร์ (Simulated Object) และสร้างเซ็นเซอร์จำลองขึ้นมาด้วย และโปรแกรมให้ระบบทำการสัมผัสวัตถุจำลองเช่นกัน เพื่อให้ได้ภาพจากการสัมผัสมาทำการวิเคราะห์ งานดังกล่าวหลีกเลี่ยงผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมที่อาจจะเกิดขึ้นกับตัวเซ็นเซอร์และระบบ การทำงานร่วมกันระหว่างเซ็นเซอร์ตรวจการสัมผัสและการระบุชนิดของวัตถุหรือการบ่งชี้วัตถุ เป็นการนำเสนอการทำงานร่วมของ 1. การรับรู้วัตถุจากคุณลักษณะที่ได้จากการสัมผัส กับ 2.การวิเคราะห์เพื่อระบุวัตถุที่ไม่รู้จักจากข้อมูลที่ปรากฏ การจดจำวัตถุใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพสำหรับการมองเห็นของคอมพิวเตอร์โดยดึง

ภาพมาจากเซ็นเซอร์วัดการสัมผัส และนำเสนอการดึงคุณลักษณะข้อมูลที่เราเรียกว่า bag-of-feature ที่ใช้อธิบายภาพจากการสัมผัส โดยเป็นวิธีการที่ดัดแปลงมาจาก Vision-Domain งานดังกล่าวเมื่อทำจำลองในคอมพิวเตอร์มีความถูกต้องค่อนข้างสูงแต่เมื่อนำมาทดลองกับวัตถุจริงพบว่าประสิทธิภาพลดลงซึ่งเป็นผลมาจากตัวแปรหลายๆอย่าง งานอีกกลุ่มคืองานที่นำเสนอเซ็นเซอร์แบบต่างๆและเทคนิคและการออกแบบระบบอ่านเซ็นเซอร์เช่นใน [16] ได้ออกแบบระบบเซ็นเซอร์อาร์เรย์ขนาด 8x8 พิกเซล พร้อมกับวงจรอ่านค่า ตัวเซ็นเซอร์ทำมาจากวัสดุยางเพียโซรีซิสทีฟ (piezoresistive rubber) มีขนาด 25x25 มิลลิเมตร ส่วนวงจรออกแบบบนพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC33FJ256 และ [17] นำเสนอการพัฒนาเซ็นเซอร์สัมผัสในรูปแบบต่างๆหลากหลายแต่ลักษณะงานเน้นที่การออกแบบเซ็นเซอร์แบบต่างๆมากกว่าระบบการอ่านค่าและการนำไปใช้

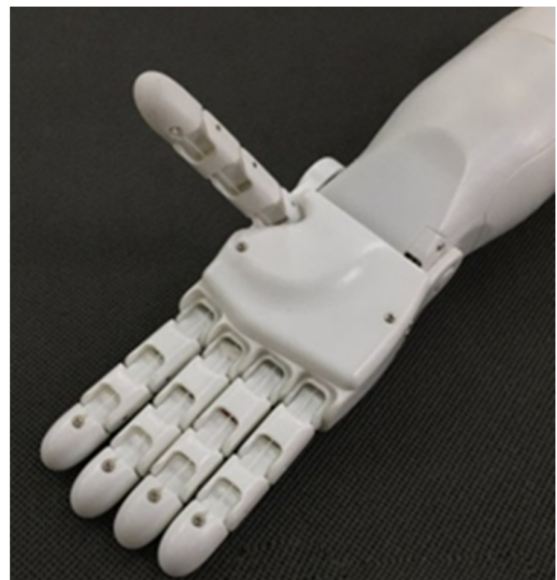
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาการจดจำวัตถุจากการสัมผัสของหุ่นยนต์เสมือนมนุษย์โดยการประมวลผลภาพจากการสัมผัสร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งเป็นงานที่ได้พัฒนาและปรับปรุงงานของ [10,11,14,16] โดยเพิ่มการพัฒนาระบบให้เป็นการนำภาพจากเซ็นเซอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ และนำภาพที่ได้เข้าสู่กระบวนการประมวลผลภาพจากนั้นก็ใช้วิธีการโครงข่ายประสาทเทียมเป็นระบบประมวลผลในการจดจำวัตถุซึ่งเป็นการพัฒนางานเก่าที่เป็นการใช้ภาพจากกระดาษและภาพที่จำลองขึ้นด้วยโปรแกรมเท่านั้น แต่งานนี้ได้พัฒนาโดยใช้ภาพจากเซ็นเซอร์จริง

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

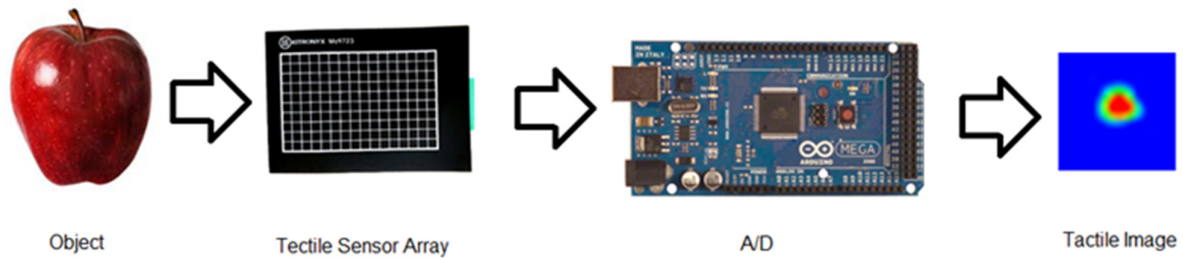
ในงานนี้ผู้วิจัยมุ่งเน้นทำการออกแบบระบบสำหรับวัดและบันทึกค่าที่ได้จากการสัมผัสวัตถุ เพื่อนำระบบที่ได้นี้ไปติดตั้งบนมือของหุ่นยนต์เพื่อให้หุ่นยนต์มีระบบประสาทสัมผัสทางกายสามารถรับรู้วัตถุที่มาสัมผัสได้ ลักษณะของมือหุ่นยนต์แสดงดังรูปที่ 2 ประกอบไปด้วยแขนของหุ่นยนต์ ฝ่ามือ และนิ้วทั้งห้า นิ้วซึ่งมีลักษณะเหมือนมือของมนุษย์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

การทำงานจะแยกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือส่วนของการเก็บภาพจากการสัมผัสซึ่งมีโครงสร้างการทำงานดังรูปที่ 3 ซึ่งจะประกอบด้วยตัววัตถุ ที่จะทำการสัมผัสซึ่งตัวของวัตถุจะมี

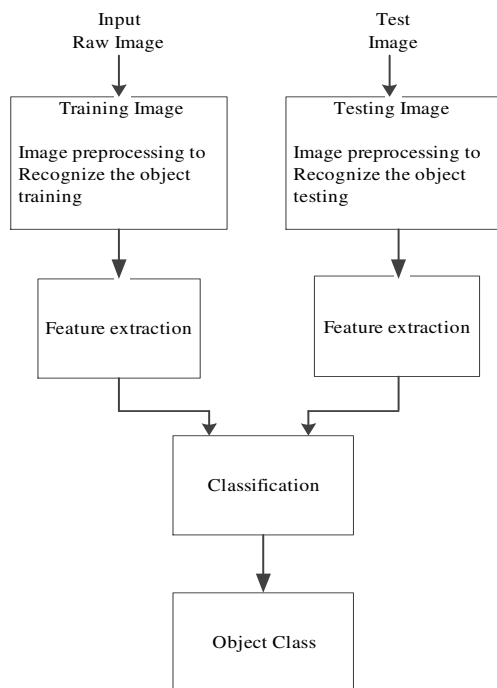
ส่วนของเหล็กลมม ส่วนเว้าส่วนโค้งและความแข็งความนุ่มที่แตกต่างกันอันเป็นลักษณะเฉพาะของวัตถุนั้นๆ การจะเก็บข้อมูลรูปร่างและลักษณะดังกล่าวของวัตถุเราใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าเซ็นเซอร์สัมผัส ตัวเซ็นเซอร์ถูกจัดเรียงเป็นอาร์เรย์เมื่อวัตถุมาสัมผัสโดยตำแหน่งใดของเซ็นเซอร์ ตำแหน่งนั้นก็จะมีค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปซึ่งวัตถุแต่ละตัวก็จะให้รูปแบบลักษณะแรงกด (Pressure Profile) ที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการแปลงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปเป็นข้อมูลตัวเลขโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (Analogue to Digital Converter) ทำการจัดเรียงข้อมูลให้เป็นรูปแบบเมตริกซ์ตามรูปแบบของเซ็นเซอร์ ลักษณะข้อมูลแรงกดที่เป็นเมตริกซ์นี้มีลักษณะเหมือนกับข้อมูลภาพดิจิตอล เราจึงมองในมุมมองรูปภาพซึ่งเรียกว่าภาพจากการสัมผัสจากนั้นจึงนำเข้าสู่ข้อมูลนี้สู่คอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลต่อไป สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์และประมวลผล



รูปที่ 2 มือของหุ่นยนต์



รูปที่ 3 การทำงานในส่วนเก็บภาพจากการสัมผัส



รูปที่ 4 การทำงานในส่วนการจดจำวัตถุ

ในส่วนที่สองของงานวิจัยนี้คือส่วนการจดจำวัตถุซึ่งมีลำดับขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 4 ซึ่งแบ่งขั้นตอนใหญ่ๆออกเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนการสอน (Training) เป็นการสอนให้ระบบคอมพิวเตอร์เรียนรู้ว่าลักษณะข้อมูลนี้เป็นรูปแบบข้อมูลของวัตถุใด อีกขั้นตอนคือขั้นตอนการทดสอบ (Testing) เป็นขั้นตอนที่นำข้อมูลเข้าระบบคอมพิวเตอร์ให้คอมพิวเตอร์ทำนายว่าคือข้อมูลของวัตถุใด การทำงานทั้งสองขั้นตอนจะเหมือนกันคือ เมื่อได้ภาพจากการสัมผัสเข้ามาแล้วจะใช้วิธีการประมวลผลภาพเพื่อทำการปรับปรุงภาพให้เหมาะสมกับการนำไปวิเคราะห์และทำการสกัดคุณลักษณะ (Feature extraction) และนำ

ข้อมูลที่ได้เข้าระบบโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำการทดสอบการจดจำต่อไป

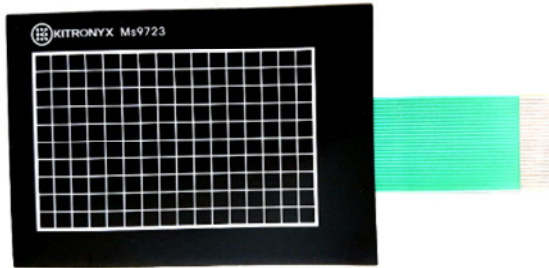
1. เซ็นเซอร์

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการรับแรงกดคือเซ็นเซอร์อาร์เรย์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เซ็นเซอร์ขนาด m คอลัมน์ n แถว เท่ากับ 16×10 พิกเซล ของ SNOWFORCE ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 5 การจัดวางเซ็นเซอร์เป็นแบบเมตริก ประกอบไปด้วยทั้งหมด 16 คอลัมน์ 10 แถว ซึ่งจะได้จำนวนพิกเซลทั้งหมดเป็น 160 พิกเซล ขนาดทางกายภาพของเซ็นเซอร์เท่ากับ 80×50 mm ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับฝ่ามือ และความละเอียดเพียงพอในการจับภาพวัตถุขนาดใกล้เคียงกับฝ่ามือได้ ทั้งนี้หากใช้เซ็นเซอร์ที่มีความละเอียดต่ำไปจะทำให้ภาพที่ได้มีความละเอียดต่ำยากต่อการวิเคราะห์ และหากใช้เซ็นเซอร์ที่มีความละเอียดสูงขึ้นความละเอียดของภาพก็จะสูงกว่าซึ่งจะเหมาะกับการทดสอบกับวัตถุที่มีขนาดเล็กหรือวัตถุที่มีรายละเอียดสูง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับวัตถุขนาดใหญ่จึงทดลองโดยใช้เซ็นเซอร์ขนาด 16×10 พิกเซล ในแต่ละพิกเซลขณะไม่มีแรงใดๆมากระทำ ความต้านทานจะอยู่ที่ประมาณ $10 \text{ M}\Omega$ ความสัมพันธ์ของแรงที่กระทำกับค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์แสดงดังรูปที่ 6 เมื่อมีแรงมากระทำต่อเซ็นเซอร์ขนาด 1 Kg/cm^2 ความต้านทานของเซ็นเซอร์จะลดลงเหลือประมาณ $25 \text{ k}\Omega$

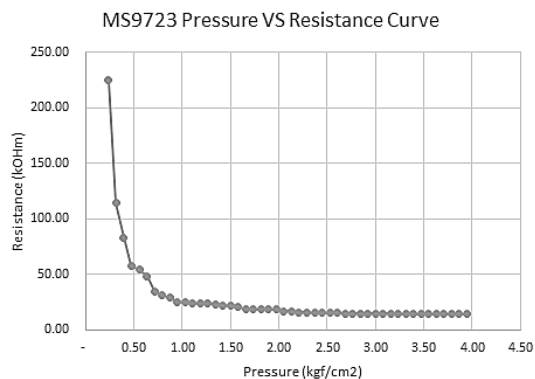
2. ไมโครคอนโทรลเลอร์

ส่วนเก็บข้อมูลภาพในงานวิจัยนี้ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ arduino รุ่น mega 2560 ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 7 และได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อทำการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์แบบสแกน โดยต่อสัญญาณจาก 16 คอลัมน์ของเซ็นเซอร์เข้ากับขา Analogue input A0-A15 และทำการการสแกนการ

อ่านที่ละแถวโดยการต่อสัญญาณในแต่ละแถวเข้ากับขา Digital Output จนครบทั้ง 10 แถว



รูปที่ 5 เซ็นเซอร์อาร์เรย์

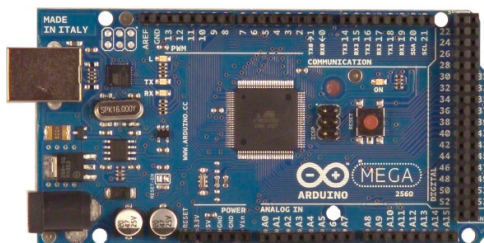


รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงที่กระทำกับค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ [18]

ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$R_s = kF^{-n} \quad (1)$$

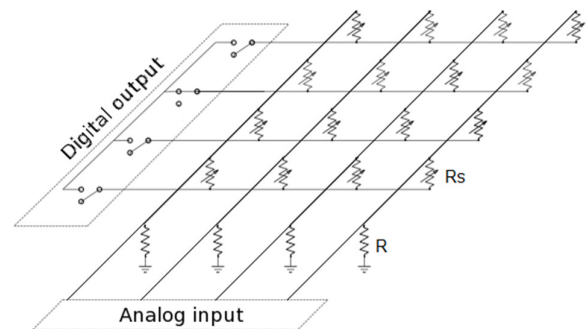
เมื่อ k เป็นค่าคงที่ของจีโอเมตริกคอนดิชัน และค่าความต้านทานของวัสดุเพียโซรีซิสทีฟ และ F คือค่าแรงที่ทำให้เกิดแรงกดบนพื้นผิวของเซ็นเซอร์ ส่วนค่า n เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของค่าการยืดหยุ่นของวัสดุ



รูปที่ 7 ไมโครคอนโทรลเลอร์

3. วงจรปรับแต่งสัญญาณ

วงจรปรับแต่งสัญญาณ (Signal Condition) สำหรับวัดค่าแรงกดที่กระทำบนตัวเซ็นเซอร์ เป็นวงจรที่ออกแบบบนพื้นฐานของวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage divider) ซึ่งการจัดวงจรแสดงดังรูปที่ 8 โดยที่ตัวเซ็นเซอร์ในแต่ละอีลิเมนต์จะมีความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงที่กระทำโดยที่ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์จะอยู่ที่ 10 MΩ -10 KΩ และต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทานค่าคง R ที่ขนาด 100 KΩ



รูปที่ 8 รูปแบบวงจรอ่านค่าจากเซ็นเซอร์

แรงดันจะถูกวัดบนตัวต้านทาน R เมื่อแรงกดกระทำต่อตัวเซ็นเซอร์ ความต้านทานของเซ็นเซอร์ R_s จะลดลงซึ่งจะทำให้แรงดันตกคร่อม R เพิ่มขึ้น ในกรณีที่ไม่มีความกดกระทำต่อเซ็นเซอร์ความต้านทานของเซ็นเซอร์จะสูงมากส่งผลให้แรงดันตกคร่อม R มีค่าใกล้เคียงกับ 0 โวลต์

4. การเก็บข้อมูล

1) การเก็บข้อมูล การเก็บข้อมูลใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega 2560 ซึ่งมีอินพุตอนาล็อก จำนวน 16 ช่อง ทำการมัลติเพล็กซ์เพื่ออ่านข้อมูลจากเซ็นเซอร์ขนาด 16x10 ตัว อนาล็อกอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์มีแปลงวงจรอนาล็อกเป็นดิจิตอลเมื่ออ่านค่าแล้วแปลงเป็นข้อมูลดิจิตอลเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อเป็นข้อมูลอินพุตสำหรับการวิเคราะห์โดยการประมวลผลภาพต่อไป

การเก็บข้อมูลสมมติว่าเซ็นเซอร์อาร์เรย์มีขนาดเป็น $m \times n$ อีลิเมนต์จัดเรียงอยู่ในลักษณะ m คอลัมน์ n แถวการสแกนเพื่ออ่านข้อมูลจากเซ็นเซอร์ทำงานโดยแถวใดๆที่จะทำการวัดจะทำการวัด ($row_1, \dots, row_n$) จะทำการจ่ายแรงดันไบอัส ($V_{applied}$) ที่ row_i และที่แถวอื่นๆจะไม่ถูกไบอัสและ

ปล่อยให้วงจรลอยไว้อยู่ในสถานะไฮอิมพีแดนซ์ เราใช้ดิจิตอลเอาต์พุต $(o_1, \dots, o_n)$ เพื่อทำการควบคุมว่าแถวใดจะทำการวัด และแถวใดไม่ทำการวัดโดยการควบคุมดิจิตอลเอาต์พุต ทำการให้เอาต์พุต $o_i = 1$ สำหรับแถวที่ทำการวัด และ $o_1, \dots, o_{i-1}, o_{i+1}, \dots, o_n = 0$ สำหรับแถวที่ไม่ต้องทำการวัด จากนั้นเราใช้อินพุตนอกจำนวน m ชุดเป็น $(i_1, \dots, i_m)$ สำหรับอ่านเซ็นเซอร์ m คอลัมน์เมื่อได้ข้อมูลจากในแต่ละคอลัมน์แล้วก็นำข้อมูลที่ได้มาจัดเรียงตามเมทริกซ์ของเซ็นเซอร์

ค่าความเข้มในแต่ละพิกเซลมีขนาด 8 บิตซึ่งสามารถหาค่าความเข้ม (I) จะได้ดังสมการที่ 2

$$I = \left(\frac{255R}{kF^{-n} + R} \right) \quad (2)$$

2) การสร้างภาพจากการสัมผัส เมื่อทำการอ่านสัญญาณจากในแต่ละพิกเซลของเซ็นเซอร์แล้วก็นำข้อมูลที่ได้มาจัดเรียงในรูปแบบสัญญาณสองมิติตามรูปแบบเดียวกับการจัดวางเซ็นเซอร์ จะได้เมทริกซ์ข้อมูลขนาดเท่ากับเซ็นเซอร์ซึ่งในที่นี้จะป็นเมทริกซ์ขนาด 16×10 ดังสมการที่ 3 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้พล็อตเป็นข้อมูลสองมิติที่มีความสูงเป็นความเข้มของภาพ จะได้เป็นภาพที่เกิดจากแรงกด หรือที่เรียกว่าภาพจากการสัมผัส

$$X = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_1^{(2)} & \dots & x_1^{(m)} \\ x_2^{(1)} & x_2^{(2)} & \dots & x_2^{(m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^{(1)} & x_n^{(2)} & \dots & x_n^{(m)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

5. คุณลักษณะของวัตถุ

ในการทดลองใช้จำนวนของวัตถุ 10 ชนิดประกอบด้วย แก้วน้ำ, ลูกกอล์ฟ, ชาม, รีโมทคอลโทรล, ประแจ, ประแจหกเหลี่ยม, แท่งลูกบาศก์, แท่งสามเหลี่ยม, แท่งวงกลม และแท่งวงรี ทำการสัมผัสวัตถุเพื่อเก็บภาพวัตถุในระนาบด้านเดียวแต่หมุนวัตถุให้เกิดการเปลี่ยนมุม ทำการสัมผัสวัตถุละ 100 ครั้ง ดังนั้นได้ภาพจากการสัมผัสทั้งหมดจำนวน 1000 ภาพ ขนาดของภาพในแต่ละภาพมีขนาด 160 พิกเซลส์ จาก (16×10) จึงทำให้ในแต่ละภาพมี 160 ข้อมูลที่ได้จากวงจรอ่านค่าจะถูกแปลงเป็นสัญญาณภาพขนาด 8 บิต ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากแรงกดที่วัตถุกระทำต่อเซ็นเซอร์ เราจึงทำการลดขนาดของมิติข้อมูลโดย

ใช้วิธีการดึงคุณลักษณะ (feature) ออกจากภาพเพื่อเป็นตัวแทนของภาพนั้น ประกอบด้วยค่าเฉลี่ยของค่าแรงสัมผัสที่เกิดขึ้น μ โดยได้จากสมการที่ 4

$$\mu = \frac{1}{NM} \sum_{i,j=1}^{N,M} x_i^j \quad (4)$$

ในส่วนของคุณลักษณะที่สองเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน S ของพิกเซลของภาพซึ่งได้จากสมการที่ 5

$$s = \left(\frac{1}{NM - 1} \sum_{i,j} (x_i^j - \mu)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

ค่าเฉลี่ยของภาพที่สัมผัสได้จะให้ค่าประมาณของแรงกดโดยรวมที่ใช้กับพื้นที่สัมผัสซึ่งค่าที่ได้จะเปลี่ยนไปตามจำนวนของจุดสัมผัสที่เกิดขึ้นเนื่องจากบางวัตถุมีปริมาณจุดสัมผัสหลายจุด บางวัตถุจะมีปริมาณจุดสัมผัสที่น้อยกว่าอันเกิดจากลักษณะรูปร่างของวัตถุที่แตกต่างกัน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นการอธิบายถึงประมาณจำนวนพิกเซลที่ได้จากการสัมผัสมีการกระจายของแรงมากหรือน้อย ทั้งสองคุณลักษณะนี้เป็นการลดมิติของข้อมูลจากข้อมูลทั้งหมด 160 ข้อมูลต่อภาพเหลือ 2 ข้อมูลต่อภาพ จากนั้นก็นำมาทำการจัดเรียงเป็นเวกเตอร์ข้อมูล Z ตามจำนวนภาพทั้งหมด N ภาพดังสมการที่ 6 และสมการที่ 7

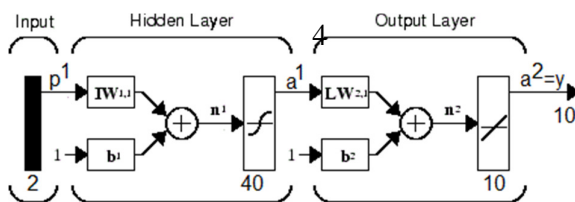
$$Z\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N\} \quad (6)$$

$$Zs = \{s_1, s_2, \dots, s_N\} \quad (7)$$

6. โครงข่ายประสาทเทียม

ANN หรือโครงข่ายประสาทเทียม มีหลักการทำงานจากพื้นฐานของสมองมนุษย์ โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นตัวประมวลผล วัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้คอมพิวเตอร์มีความชาญฉลาดในการเรียนรู้เหมือนที่มนุษย์มีการเรียนรู้สามารถฝึกฝนได้ และสามารถนำความรู้และทักษะรวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ ได้ดีกับปัญหาเช่น Classification, Regression เป็นต้น การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมทำได้โดยการส่งข้อมูลเข้ามายังส่วนที่เรียกว่าเพอร์เซ็ปตรอน (perceptron) สามารถเทียบได้กับเซลล์สมองของมนุษย์ โดยที่เพอร์เซ็ปตรอนทำการรับข้อมูลที่อยู่ในรูปของเวกเตอร์ของตัวเลข เข้ามาคำนวณ ดังรูปที่ 9 ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบ

แพร่หลายขึ้น (Multilayer Perceptron: MLP) โครงข่ายประสาทเทียมแบบ MLP เป็น รูปแบบหนึ่งของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงสร้างเป็นแบบหลายชั้นใช้สำหรับงานที่มีความซับซ้อนได้ผลเป็นอย่างดีโดยมีกระบวนการฝึกฝนเป็นแบบ supervise แบ่งกระบวนการทำงานเป็น 3 Layer ประกอบด้วยชั้นอินพุต (Input Layer), ชั้นซ่อน (Hidden layer) และชั้นเอาต์พุต (Output layer) โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นโดยชั้นที่สูงขึ้นไปจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณข้อมูลอินพุตให้เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 9 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียม

3

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบฟีดฟอร์เวิร์ด (Feed Forward back propagation ANN) มีโครงสร้างดังรูปที่ 9 ประกอบไปด้วย 3 ชั้นคือ ชั้นอินพุต ชั้นซ่อนจำนวน 40 โหนด และชั้นเอาต์พุต ในสมการที่ 9 เป็นเอาต์พุตจากโครงข่ายประสาทเทียม โดยเอาต์พุตเกิดจากฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้นจากข้อมูลเอาต์พุตของชั้นซ่อน และในสมการที่ 8 เป็นเอาต์พุตจากชั้นซ่อน ซึ่งเอาต์พุตของชั้นซ่อนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ tangent sigmoid จากอินพุต ดังนั้นเอาต์พุต y ของโครงข่ายประสาทเทียมตามโครงสร้างนี้จะเป็นดังสมการที่ 10

$$a^1 = \text{tsig} (IW_{1,1}p^1 + b_1) \quad (8)$$

$$a^2 = \text{purelin} (LW_{2,1}a^1 + b_2) \quad (9)$$

$$y = \text{purelin} \{LW_{2,1}\text{tsig}(IW_{1,1}p^1 + b_1) + b_2\} \quad (10)$$

เมื่อฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้นเป็นดังสมการที่ 11

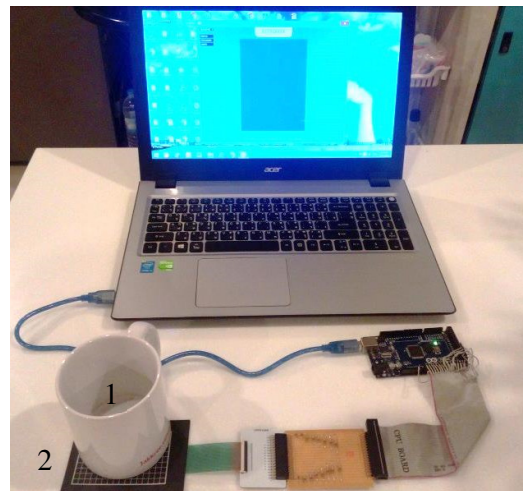
$$\text{Linear: } f(L) = \text{purelin} (L) = L \quad (11)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ tangent sigmoid ดังสมการที่ 12

$$\text{Tangent Sigmoid : } \text{tsig}(I) = \frac{2}{1 + e^{-2I}} - 1 \quad (12)$$

7. การทดสอบการทำงานของระบบ

ในการทดลองทั้งหมดของงานวิจัยนี้แบ่งออกได้เป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนของการเก็บข้อมูลภาพจากการสัมผัสโดยชุดอุปกรณ์ที่ได้พัฒนาขึ้น และอีกส่วนคือการทดสอบการจดจำภาพที่ได้จากการสัมผัสซึ่งขั้นตอนทั้งสองมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 10 ชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับเก็บภาพจากการสัมผัส

ประกอบด้วย 1) วัตถุที่ใช้ในการทดสอบ 2) เซ็นเซอร์
3) ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ 4) คอมพิวเตอร์

1) การเก็บข้อมูลภาพจากการสัมผัสโดยชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 10 ซึ่งก่อนที่จะนำระบบไปติดตั้งกับมือของหุ่นยนต์ได้ทำการทดสอบระบบโดยการนำวัตถุ 10 ชนิดคือ แก้วน้ำ, ลูกกอล์ฟ, ขาม, รีโมทคอนโทรล, ประแจ, ประแจหกเหลี่ยม, แท่งลูกบาศก์, แท่งสามเหลี่ยม, แท่งวงกลม และแท่งวงรี มาใช้ในการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบนั้นตัวระบบประกอบด้วย 4 ส่วนคือ 1) วัตถุที่ใช้ในการทดสอบ 2) เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง 3) ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ 4) คอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูล ลำดับขั้นตอนในการเก็บภาพเริ่มจากนำวัตถุที่ต้องการเก็บภาพจากการสัมผัสมาวางบนเซ็นเซอร์และออกแรงกดวัตถุจนระบบสามารถอ่านค่าจนได้ค่าสูงสุดของข้อมูลในพิกเซลใดพิกเซลหนึ่งซึ่งเท่ากับ 255 ก็จะทำการบันทึกชุดข้อมูลในขณะนั้นทั้งชุดถือเป็นข้อมูลภาพจากการสัมผัสหนึ่งภาพ จากนั้นหมุนวัตถุในมุมอื่นหรือเปลี่ยนตำแหน่งที่วางวัตถุ

และทำการกวัดจุดจนได้ค่าสูงสุดและบันทึกข้อมูลเป็นภาพที่
สองทำการบันทึกข้อมูลภาพแบบสุ่มทั้งมุมและตำแหน่งของ
เซ็นเซอร์จนได้จำนวนภาพ 100 ภาพจึงทำการเปลี่ยนวัตถุเป็น
วัตถุชิ้นถัดไป ทำการบันทึกภาพวัตถุทั้งหมด 10 ชนิด จะได้
ภาพที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 1000 ภาพ

2) การทดสอบการจดจำวัตถุจากภาพที่ได้จากการสัมผัส ใน
ส่วนของการจดจำภาพในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB
เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการดำเนินงาน การทดสอบการจดจำของ
งานวิจัยนี้ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปหน้าใน
การทดสอบ และการวิเคราะห์เน้นเฉพาะข้อมูลภาพจากการ
สัมผัสที่ได้จากการทดลองจึงไม่ได้นำตัวแปรอื่นของวัตถุเช่น
น้ำหนัก ขนาด และรูปร่างของวัตถุมาใช้ในการร่วมในการทดสอบ
ระบบ

ในการทดสอบระบบเริ่มจากการนำภาพที่ได้มาทำการสกัด
คุณลักษณะโดยสองคุณลักษณะคือ ค่าเฉลี่ยของภาพ และ ค่า
เบี่ยงเบนมาตรฐานของภาพ จากนั้นนำข้อมูลมาจัดเรียงเป็น
เวกเตอร์ข้อมูล 2 ชุดคือ 1) เวกเตอร์ข้อมูลค่าเฉลี่ยของภาพ
และ 2) เวกเตอร์ข้อมูลค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของภาพ จากนั้น
ทำการทดสอบการจดจำโดยทำการสอนระบบโครงข่าย
ประสาทเทียมและทดสอบผลการจดจำ โดยทำการสอนระบบ
3 ครั้ง คือ 1) สอนระบบโดยใช้เวกเตอร์ข้อมูลค่าเฉลี่ยของภาพ
2) สอนระบบโดยใช้เวกเตอร์ข้อมูลค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ
ภาพ และ 3) สอนระบบโดยใช้เวกเตอร์ข้อมูลทั้งสองชุด
จากนั้นวิเคราะห์ผลความถูกต้องที่ได้เพื่อเป็นการประเมินระบบ
ว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใดเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา
ในอนาคตต่อไป

3. ผลการวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของการทดลองนี้เพื่อสร้างระบบที่ทำให้
คอมพิวเตอร์และระบบหุ่นยนต์สามารถจดจำวัตถุที่สัมผัสได้
แนวทางการพัฒนาคือสร้างระบบประสาทรับด้วยความรู้สึทาง
กายสัมผัสให้ใกล้เคียงหรือมีลักษณะเดียวกันกับมนุษย์ ใน
งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเซ็นเซอร์วัดแรงกดแบบอาร์เรย์เป็นตัว
ตรวจวัดการสัมผัสวัตถุ และวัตถุตัวอย่างที่เลือกในการทดลองนี้
จะมีพื้นผิวพื้นผิวที่ซับซ้อนและแตกต่างกันประกอบไปด้วยวัตถุ
10 ชนิดคือ แก้วน้ำ, ลูกกอล์ฟ, ชาม, รีโมทคอนโทรล, ประแจ,
ประแจหกเหลี่ยม, แท่งลูกบาศก์, แท่งสามเหลี่ยม, แท่งวงกลม
และแท่งวงรี ผลของการทดลองนี้จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน

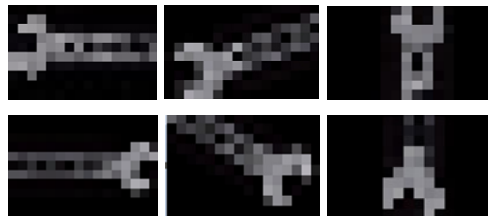
คือ ภาพที่ได้จากการสัมผัสวัตถุจากพื้นผิวของวัตถุที่หลากหลาย
ซึ่งเป็นภาพเหล่านี้จะถูกนำไปทำการวิเคราะห์เพื่อการจดจำ
วัตถุอีกทีหนึ่ง การทดสอบจะใช้ โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่ง
ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าคอมพิวเตอร์สามารถจดจำวัตถุได้
ความถูกต้องที่ยอมรับได้ในระดับที่ดี

1. ภาพจากการสัมผัส

ผลจากการทดลองที่ได้ในส่วนของภาพที่ได้จากการสัมผัส
จะเป็นภาพแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัว
ของแรงกดที่กระทำต่อเซ็นเซอร์จากรูปที่ 11 (A) เป็นรูปของ
ตัวอย่างวัตถุจริงคือประแจเมื่อเซ็นเซอร์สัมผัสประแจจะเกิด
รูปแบบแรงกดที่เกิดขึ้นกับเซ็นเซอร์เมื่อนำมาพล็อตเป็นรูปภาพ
จะเห็นการกระจายตัวของแรงกดที่เกิดขึ้น ในรูปที่ 11 (B) เป็น
ภาพที่เกิดจากการสัมผัสเมื่อนำประแจมาวางในมุมที่แตกต่าง
กันลักษณะการกระจายของแรงที่เกิดขึ้นบนตัวเซ็นเซอร์จะ
เปลี่ยนแปลงไปตามแนวหรือทิศทางของวัตถุ



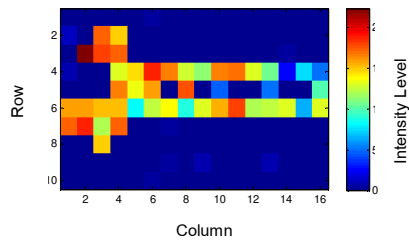
(A)



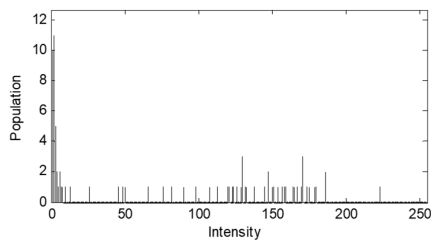
(B)

รูปที่ 11 ภาพเปรียบเทียบ (A) วัตถุจริง กับ (B) ภาพที่ได้จากการเซ็นเซอร์

ภาพที่ได้จากการสัมผัสวัตถุเมื่อเรานำมาพล็อตการกระจาย
ตัวของแรงที่เกิดขึ้นกับเซ็นเซอร์ ดังรูปที่ 12 เราจะพบว่าแรงจะ
กดจะมีค่าสูงในจุดที่มีการสัมผัสกับเซ็นเซอร์ซึ่งเป็นส่วนนูนของ
วัตถุ การกระจายตัวของแรงกดที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามลักษณะ
ส่วนนูนของวัตถุซึ่งจะมีค่าความเข้มสูงอยู่ในช่วง 100-200
หน่วย ส่วนบริเวณที่ไม่มีสัมผัสจะมีค่าต่ำใกล้เคียง 0 ดังรูปที่
13 แสดงการกระจายของฮิสโตแกรมของภาพจากการสัมผัส
ของวัตถุของประแจ

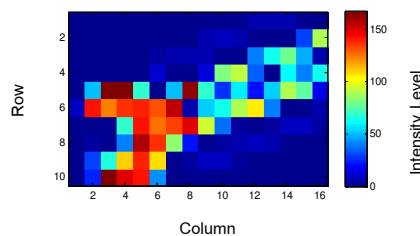


รูปที่ 12 การกระจายตัวของแรงที่เกิดขึ้นกับเซ็นเซอร์เมื่อนำวัตถุประแจมาสัมผัส

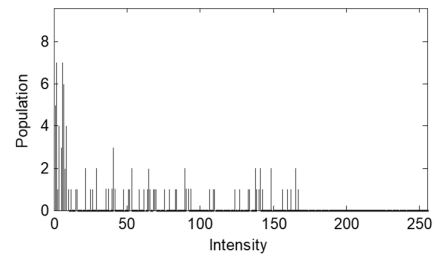


รูปที่ 13 การกระจายของฮิสโตแกรมของภาพจากการสัมผัสของวัตถุของประแจ

ภาพที่ได้จากการสัมผัสวัตถุเมื่อเราหมุนวัตถุให้เปลี่ยนตำแหน่งไป แล้วนำมาพล็อตการกระจายตัวของแรงที่เกิดขึ้นกับเซ็นเซอร์ ดังรูปที่ 14 เราจะพบว่าแรงจะกตกจะมีการเปลี่ยนไปตามลักษณะการหมุน และค่าสูงในจุดที่มีการสัมผัสกับเซ็นเซอร์ซึ่งเป็นส่วนบนของวัตถุ แต่ในส่วนที่จุดบนของวัตถุไม่ได้ขนานไปกับแนวของเซ็นเซอร์พบว่าแรงจะเกิดการกระจายตัวออก ดังนั้นค่าความเข้มจะกระจายตัวไปตามตำแหน่งเซ็นเซอร์ที่ได้รับการสัมผัส เมื่อแนวของวัตถุไม่ขนานไปกับเซ็นเซอร์ ค่าความเข้มจะกระจายอยู่ในช่วง 50-100 หน่วย ส่วนบริเวณที่ไม่มีการสัมผัสจะมีค่าต่ำใกล้เคียง 0 ดังรูปที่ 15 แสดงการกระจายของฮิสโตแกรมของภาพจากการสัมผัสของวัตถุของประแจเมื่อมาสัมผัสในแนวไม่ขนานกับเซ็นเซอร์

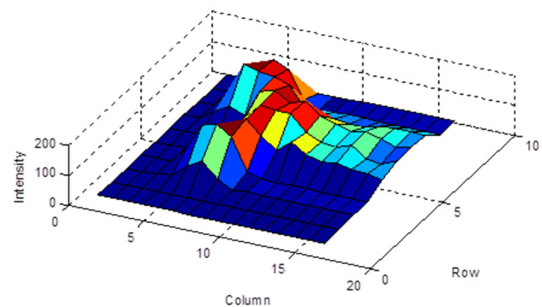


รูปที่ 14 การกระจายตัวของแรงที่เกิดขึ้นกับเซ็นเซอร์เมื่อนำวัตถุประแจมาสัมผัสในแนวไม่ขนานกับเซ็นเซอร์



รูปที่ 15 การกระจายของฮิสโตแกรมของภาพจากการสัมผัสของวัตถุของประแจเมื่อนำวัตถุประแจมาสัมผัสในแนวไม่ขนานกับเซ็นเซอร์

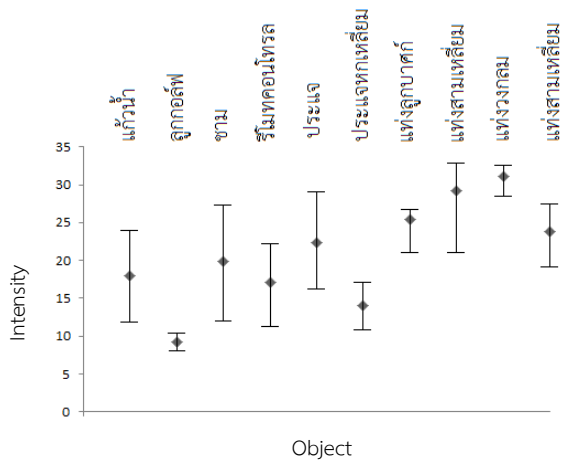
ผลจากการทดลองพบว่าภาพจากการสัมผัสที่ได้มีลักษณะเหมือนวัตถุที่สัมผัสดังรูปที่ 16 เมื่อพล็อตการกระจายของแรงที่เกิดขึ้นในรูปแบบสามมิติพบว่าการกระจายของแรงที่เกิดขึ้นมีลักษณะรูปร่างเหมือนกับวัตถุที่สัมผัสคือส่วนสูงของภาพตรงกับส่วนบนของวัตถุจึงทำให้ลักษณะภาพสัมผัสสามารถนำมาสร้างเป็นภาพวัตถุสามมิติได้



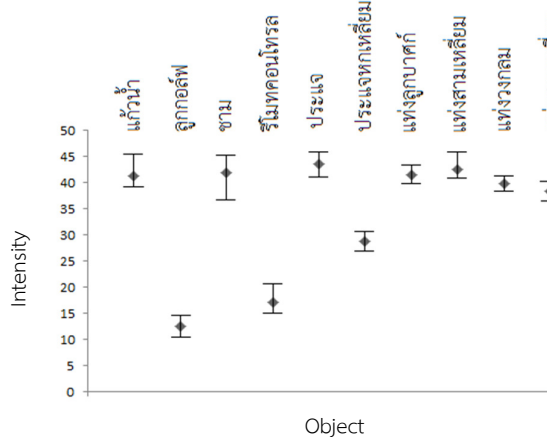
รูปที่ 16 การกระจายของแรงที่เกิดขึ้นในรูปแบบสามมิติ

2. การสกัดคุณลักษณะ

ภาพจากการสัมผัสที่ได้จะถูกนำมาทำการสกัดคุณลักษณะสองตัวคือค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าเฉลี่ยของแรงกตกที่ได้แสดงดังรูปที่ 17 พบว่าแรงกตกของแก้วน้ำ ขาม และประแจมีค่าเฉลี่ยในแต่ละภาพที่กว้างอยู่ในช่วงประมาณ 10-25 หน่วย ซึ่งเกิดจากลักษณะของตัววัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่าเซ็นเซอร์จึงทำให้เมื่อนำเซ็นเซอร์มาสัมผัสภาพที่ได้จะมีความแตกต่างกันค่อนข้างมากแต่ค่าเฉลี่ยแรงกตกของวัตถุ ลูกกอล์ฟ, ประแจหกเหลี่ยม, แท่งลูกบาศก์, แท่งสามเหลี่ยม, แท่งวงกลม และ แท่งวงรี มีค่าเฉลี่ยแรงกตกของแต่ละภาพค่อนข้างเท่ากัน เนื่องจากขนาดของวัตถุเล็กกว่าขนาดของเซ็นเซอร์แม้จะหมุนวัตถุอย่างไรรูปแบบแรงกตกก็ยังคงมีลักษณะแบบเดิมจึงทำให้ค่าเฉลี่ยแรงกตกคงที่



รูปที่ 17 ค่าเฉลี่ยของความเข้มของภาพจากการสัมผัสของวัตถุแต่ละตัว



รูปที่ 18 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มของภาพจากการสัมผัสของวัตถุแต่ละตัว

จากรูปที่ 18 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของวัตถุชนิดเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกันและวัตถุเกือบทุกชนิดจะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 35-45 หน่วย แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ของเซ็นเซอร์ถูกสัมผัสกับวัตถุเป็นบริเวณกว้างและจำนวนพิกเซลของเซ็นเซอร์มีหลายพิกเซลและกระจายรับแรงกดไปค่อนข้างเท่ากัน ยกเว้นลูกกอล์ฟ รีโมทคอนโทรลและประแจหกเหลี่ยม ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำแสดงว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของเซ็นเซอร์ไม่ถูกสัมผัสหรือสัมผัสด้วยแรงกดเบาจึงทำให้ข้อมูลส่วนใหญ่ของในแต่ละพิกเซลมีค่าต่ำ

จากรูปที่ 17 และ รูปที่ 18 เราพบว่าข้อมูลที่สามารถบ่งชี้ขนาดและรูปร่างของวัตถุได้ว่าวัตถุใดมีขนาดใหญ่หรือวัตถุใดมีขนาดเล็กหรือรูปร่างของวัตถุมีความซับซ้อนหรือไม่อีกด้วย โดยพิจารณาจากค่าที่ได้ถ้าวัตถุมีขนาดเล็กทั้งค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าต่ำเช่นลูกกอล์ฟและประแจหกเหลี่ยม ถ้าวัตถุขนาดใหญ่แต่ไม่ซับซ้อนค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบน

มาตรฐานจะสูงแต่ช่วงกว้างของค่าต่ำเช่นแท่งลูกบาศก์, แท่งสามเหลี่ยม, แท่งวงกลม และ แท่งวงรี แต่ถ้าวัตถุมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนทั้งค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะสูงและช่วงกว้างของค่าจะสูงด้วยเช่น แก้วน้ำ, ประแจ, รีโมทคอนโทรล จากข้อมูลนี้ทำให้เราสามารถแยกชนิดของวัตถุได้อย่างคร่าวๆ

3. การจดจำวัตถุ

ผลจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการจดจำวัตถุ ได้ทำการสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมสามครั้ง ครั้งแรกนำข้อมูลค่าเฉลี่ย (μ) ของแรงที่วัตถุกระทำต่อเซ็นเซอร์ ไปเป็นอินพุตในการสอน ครั้งที่สองใช้ข้อมูลค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) ในการสอน และครั้งที่สามใช้ทั้งค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการสอน (μ, s) เมื่อทำการทดสอบและหาค่าความถูกต้องพบว่าได้ผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจดจำวัตถุ 10 ชนิด

วัตถุที่ใช้ทดสอบ	%ความถูกต้อง		
	(μ)	(s)	(μ, s)
แก้วน้ำ	22	71	84
ลูกกอล์ฟ	100	100	100
ขาม	29	54	81
รีโมทคอนโทรล	43	100	100
ประแจ	12	55	79
ประแจหกเหลี่ยม	76	100	100
แท่งลูกบาศก์	70	93	96
แท่งสามเหลี่ยม	73	99	93
แท่งวงกลม	85	100	100
แท่งวงรี	76	97	99
% ความถูกต้องเฉลี่ย	58.6	86.9	93.2

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับภาพจำนวนทั้งหมดเป็น 1000 ภาพจากการทดสอบกับวัตถุ 10 ชนิด ชนิดละ 100 ครั้งพบว่าหากใช้ค่าเฉลี่ยทำการสอนเพียงอย่างเดียว แล้วทำการทดสอบพบว่า มีความถูกต้องเฉลี่ยอยู่ที่ 58.6% โดยวัตถุที่มีค่าความถูกต้องในการจดจำมากที่สุดคือลูกกอล์ฟ มีค่าความถูกต้องในการจดจำถึง 100% และตัวที่มีค่าความถูกต้องในการจดจำน้อยสุดคือประแจมีค่าความถูกต้อง 12% เท่านั้น เนื่องจากค่าเฉลี่ยของประแจมีค่าใกล้เคียงกับวัตถุอื่นจึงทำให้

เกิดความผิดพลาด (Error) ในการจดจำสูง จากนั้นได้ทำการทดสอบระบบโดยการสอนด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของรูปที่ได้จากการสัผัส เพียงอย่างเดียวพบว่าความถูกต้องเฉลี่ยมากกว่าการสอนด้วยค่าเฉลี่ยโดยที่มีความถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 86.9% โดยวัตถุที่มีค่าความถูกต้องในการจดจำมากที่สุดคือลูกกอล์ฟ รีโมทคอนโทรล และประแจหกเหลี่ยมมีค่าความถูกต้องในการจดจำที่ 100% และตัวที่มีค่าความถูกต้องในการจดจำน้อยสุดคือขามมีค่าความถูกต้องในการจดจำที่ 54% เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขามมีความใกล้เคียงวัตถุอื่น และสุดท้ายคือการสอนด้วยคุณลักษณะทั้งสองตัวร่วมกัน เป็นที่น่าสนใจว่าเมื่อใช้คุณลักษณะทั้งสองตัวร่วมกันมาทำการสอนและทำการทดสอบพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยอยู่ที่ 93.2% โดยวัตถุที่มีค่าความถูกต้องในการจดจำมากที่สุดคือลูกกอล์ฟ, รีโมทคอนโทรล, ประแจหกเหลี่ยม และแท่งวงกลม มีค่าความถูกต้องในการจดจำถึง 100% และตัวที่มีค่าความถูกต้องในการจดจำน้อยสุดคือประแจมีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ 79% ผลจากการทดลองพบว่าในกรณีที่ใช้ค่าเฉลี่ยเป็นข้อมูลอินพุตในการสอนค่าความถูกต้องเฉลี่ยที่ได้จะต่ำสุดอยู่ที่ 58.6% เท่านั้น เนื่องจากการกระจายตัวของข้อมูลมีสูงจึงไม่สามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลที่เพียงพอ เมื่อใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาเป็นค่าอินพุตในการสอนพบว่าความถูกต้องในการจดจำวัตถุมีค่าสูงกว่าการใช้ค่าเฉลี่ยมากเพราะมีค่าความถูกต้องเฉลี่ย 86.9% และเมื่อเราใช้ทั้งค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาใช้ในการสอนพบว่าค่าเฉลี่ยมีค่าสูงสุดถึง 93.2% ดังนั้นการสอนระบบด้วยคุณลักษณะที่หลากหลายจะสามารถเพิ่มความถูกต้องในการจดจำวัตถุของระบบได้

ในรูปที่ 19 เป็นผลที่ได้จากการทดสอบโดยสอนด้วยคุณลักษณะทั้งสองตัวร่วมกันค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเกิดจากตัวภาพจากการสัผัสของประแจที่รายงานผลผิดเป็นแก้วน้ำและขามเนื่องจากทั้งค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของประแจใกล้เคียงกับแก้วน้ำและขามจึงทำให้เกิดความผิดพลาดสูงในทำนองเดียวกันผลของขามก็มีความผิดพลาดสูงรองลงมาเนื่องจากรายงานผลว่าเป็นประแจดังนั้นวัตถุที่มีรูปร่างต่างกันโดยสิ้นเชิงแต่มีโอกาสที่ค่าเฉลี่ยของความเข้มของแสงกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอาจจะใกล้เคียงกันเป็นผลให้การรายงานผลผิดพลาด

1	84	0	8	0	10	0	4	0	0	0
2	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	0	81	0	11	0	0	5	0	1
4	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0
5	4	0	5	0	79	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
7	9	0	2	0	0	0	96	2	0	0
8	0	0	1	0	0	0	0	93	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
10	0	0	3	0	0	0	0	0	0	99
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Target Class

รูปที่ 19 ผลการทดสอบเมื่อสอนระบบด้วยค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

และการรายงานผลของลูกกอล์ฟทั้งสามการทดสอบมีค่าความถูกต้องเป็น 100% เนื่องจากลักษณะการสัมผัสของลูกกอล์ฟกับเซ็นเซอร์จะเป็นเพียงจุดเล็กๆจุดเดียว และลูกกอล์ฟเป็นบอลทรงกลมที่มีความสมมาตรในทุกทิศทางดังนั้นไม่ว่าจะหมุนลูกกอล์ฟอย่างไรภาพที่ได้ก็จะมีลักษณะเดิมเสมอจึงทำให้ค่าเฉลี่ยของภาพมีค่าต่ำแตกต่างจากตัวอื่นอย่างมากจึงทำให้ระบบสามารถแยกแยะลูกกอล์ฟได้โดยง่ายค่าความถูกต้องจึงมีค่าสูงในทุกครั้งที่มีการทดสอบ

4. สรุปและเสนอแนะ

ระบบประสาทสัมผัสทางกายเอเล็คทรอนิกส์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้พัฒนาโดยใช้เซ็นเซอร์วัดแรงกดแบบอาร์เรย์ขนาด 16x10 พิกเซลเมื่อนำไปสัมผัสวัตถุและทำการอ่านข้อมูลในแต่ละพิกเซลและนำมาจัดเรียงข้อมูลในลักษณะเมทริกซ์จะได้ภาพจากการสัมผัสมีขนาด 16x10 พิกเซล ลักษณะภาพที่ได้จะเป็นไปตามรูปแบบแรงกดที่วัตถุกระทำต่อเซ็นเซอร์ จากนั้นนำภาพที่ได้มาสกัดคุณลักษณะสองตัวคือค่าเฉลี่ยของภาพ และหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของภาพ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จะแปรเปลี่ยนไปตามขนาดและรูปร่างของวัตถุ การทดสอบการจดจำของระบบทำโดยนำค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาจัดเรียงเป็นเวกเตอร์ข้อมูลสำหรับสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมแบบฟีดฟอร์เวิร์ด เมื่อทำการทดสอบกับวัตถุชนิด 10 ชนิด มีความถูกต้องของการจดจำวัตถุ 58.6% เมื่อสอนระบบด้วยค่าเฉลี่ยของภาพ มีความถูกต้องของการจดจำวัตถุ 86.9% เมื่อสอนระบบด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ

ภาพ และมีความถูกต้องของการจดจำวัตถุ 93.2% เมื่อสอนระบบด้วยคุณลักษณะของภาพทั้งค่าเฉลี่ยของภาพและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของภาพ ซึ่งการใช้คุณลักษณะร่วมกันสองตัวให้ความถูกต้องของการจดจำสูงสุด และระบบที่พัฒนาสามารถจดจำวัตถุเพื่อนำไปใช้กับหุ่นยนต์เสมือนมนุษย์ได้

งานวิจัยในอนาคตจะทำการพัฒนาระบบโดยใช้เซ็นเซอร์ที่มีความละเอียดสูงขึ้น และพัฒนาอัลกอริทึมใหม่สำหรับการเรียนรู้โดยจะเน้นการสกัดหาคุณลักษณะภาพแบบใหม่ที่ทำให้ค่าความถูกต้องมากกว่าเนื่องจากงานนี้ค่าคุณลักษณะที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงกดที่กระทำต่อเซ็นเซอร์ซึ่งวัตถุต่างชนิดกันอาจจะให้แรงกดที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันได้ และจะทำการเก็บภาพจากวัตถุที่หลากหลายและมีความซับซ้อนของวัตถุมากกว่า หรือวัตถุที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการหมุนของวัตถุในแนวรอบทิศทาง เนื่องจากงานนี้มีการเก็บภาพจากวัตถุด้านเดียวและวัตถุหลายตัวมีขนาดเล็กกว่าเซ็นเซอร์

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (2009). Haptic perception: A tutorial. *Attention Perception & psychophysics*, 71, 1439-1459. <http://dx.doi.org/10.3758/APP.71.7.1439>
- [2] Pressure Mapping: Geotechnical Engineering Retrieved Achieve Design and Process Optimization with Interface Pressure Measurement. (2016). Retrieved from <https://www.tekscan.com/news/new-ebook-advancing-geotechnical-engineering-pressure-Mapping>
- [3] Micah, K. J., & Edward, H. A. (2009). Retrographic sensing for the measurement of surface texture and shape, *Computer Vision and Pattern Recognition 2009* : Proceedings of an IEEE Conference on in Miami, FL, USA, 20-25 June 2009 (pp. 1070-1077). <http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2009.5206534>
- [4] Casselli, S., Magnanini, C., & Zanichelli, F. (1995). On the robustness of haptic object recognition based on polyhedral shape representations, *Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots'* : Proceedings of an IEEE/RSJ international conference in Pittsburgh, PA, USA, 5-9 Aug. 1995 Vol2 (pp 200-206). <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.1995.526160>
- [5] Bajcsy, R. (1984). What can we learn from one finger experiments?. *Proceedings of a Symposium on Robotic Research* Bretton Woods, NH, 1984, (pp. 509-527).
- [6] Ronald, S. F., & Binford, T.O. (1991). Using a Cylindrical Tactile Sensor for Determining Curvature. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7, 806 - 817. <http://dx.doi.org/10.1109/70.105389>
- [7] Bay, S. J. (1989). Tactile shape sensing via single- and multi fingered hands, *Robotics and Automation 1989* : Proceedings of an IEEE international conference in Scottsdale, AZ, USA, 14-19 May 1989 Vol 1 (pp 290-295). <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.1989.100003>
- [8] Allen, P. K. & Roberts, K. S. (1989). Haptic object recognition using a multi fingered dexterous hand, *Robotics and Automation 1989* : Proceedings of an IEEE international conference in Scottsdale, AZ, USA, 14-19 May 1989 Vol 1 (pp 290-295). <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.1989.100011>
- [9] Alexander, S. Jürgen, S. & Cyrill. S. (2009). Object Identification with Tactile Sensors using Bag-of-Features, *Intelligent Robots and Systems 2009* : Proceedings of an IEEE international conference in St. Louis, MO, USA, 10-15 October 2009 (pp 243-248). <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2009.5354648>
- [10] Khasnobish, A., Jati, A., Singh, G., Bhattacharyya, S., Konar, A., Tibarewala, D. N., Kim, E. & Nagar, A. K. (2012). Object-Shape Recognition from Tactile Images Using a Feed-forward Neural Network, *World Congress on Computational Intelligence* : Proceedings of an IEEE international conference in Brisbane, QLD, Australia, 10-15 June 2012. <http://dx.doi.org/10.1109/IJCNN.2012.6252593>
- [11] Datta, S., Khasnobish, A., Konar, A., Tibarewala, D. N. & Janarthanan, R. (2013). Object Shape and Size Recognition From Tactile images, *Control Communication and Computing 2013* : Proceedings of an IEEE international conference in Thiruvananthapuram, India, 13-15 December 2013 (pp 16-21). <http://dx.doi.org/10.1109/ICCC.2013.6731617>
- [12] Alexander, S., Yusuke, B., Kuniaki, N., Hiroyasu, I., Tetsuya, O. & Shigeki, S. (2014). Object Recognition using Deep Learning and Dropout, *Humanoid Robots (Humanoids) 2014* : Proceedings of an IEEE international conference in Madrid, Spain, 18-20 November 2014 (pp

1044-1050). <http://dx.doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2014.7041493>

- [13] Harold, S. & Yiannis, D. (2014). Incrementally Learning Objects by Touch: Online Discriminative and Generative Models for Tactile-Based Recognition. IEEE Transactions On Haptics, 7, 512-525. <http://dx.doi.org/10.1109/TOH.2014.2326159>
- [14] Somchai, P. & Jakkree, S. (2016) Object Recognition from Human Tactile Image Using Artificial Neural Network, Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology 2016 : Proceedings of an IEEE international conference in Chiang Mai, Thailand, 28 June-1 July 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/ECTICON.2016.7561402>
- [15] Zachary, P., Erion, P., Caitlin, R. & Gregory, D. H. (2011). Tactile-Object Recognition From Appearance Information. IEEE Transactions On Robotics, 27, 473-487. <http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2011.2125350>
- [16] Alin, D., Gert, K., Arne, B. & Danica, K. (2011). Classification of Rigid and Deformable Objects Using a Novel Tactile Sensor, Advanced Robotics 2011 : Proceedings of an IEEE international conference in Tallinn, Estonia, 20-23 June 2011 (pp 427-434). <http://dx.doi.org/10.1109/ICAR.2011.6088622>
- [17] Hiroshi, F., Koichi, I., Tsuyoshi, S., Makoto, T., Takao, S. & Takayasu, S. (2013). Large-Area and Flexible Sensors with Organic Transistors, Advances in Sensors and Interfaces 2013 : Proceedings of an IEEE international conference in Bari, Italy, 13-14 June 2013 (pp 87-90). <http://dx.doi.org/10.1109/IWASI.2013.6576084>
- [18] ms9723-pvsr_orig ,Retrieved August 05, 2017, from http://www.kitronyx.com/store/p30/MS9723_FSR_Matrix_Array_Sensor_%2816x10_Rows_and_Columns_%2F_80mm_x_50mm_Active_Sensing_Area%29.html

6. ประวัติ



สมชาย เปาทองคำ จบการศึกษาในระดับปริญญาตรีและปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกในมหาวิทยาลัยเดียวกัน



ดร.จักรี ศรีนันทมิตร จบการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ระดับปริญญาโท และปริญญาเอก จาก Northumbria University, UK ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ที่ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสาน
จากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

Engineering Economic Value Analysis of Interlocking Block Pilot Plant Using
Mae Moh Power Plant Bottom Ash

สุวิทย์ สายสุธนาวิชัย^{1,2*} และ นิวิธ เจริญใจ²

S. Saisuthanawit^{1,2*} and N. Charoenchai²

¹หลักสูตรบัณฑิตศึกษา/ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

¹Graduate/Master's Degree Program in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering,
Faculty of Engineering, Chiang Mai University

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

*Corresponding authors E-mail: suwit.s@egat.ac.th

(Received: April 20, 2018, Revised: August 17, 2018 Accepted: August 28, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ต้นทุน และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เก็บรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิในการผลิตบล็อกประสานจากโรงงานต้นแบบขนาดกำลังผลิต 1,000 ก้อนต่อวัน และใช้ข้อมูลทุติยภูมิจากเอกสารที่เกี่ยวข้องมาดำเนินการวิเคราะห์ต้นทุน และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสาน ด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบแทนจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR) อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) ระยะเวลาคืนทุน (PB) และวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ กำหนดให้มีอายุการใช้งาน 10 ปี ผลการวิเคราะห์ พบว่า โรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานขนาดกำลังผลิต 1,000 ก้อนต่อวัน มีต้นทุนค่าใช้จ่ายในการลงทุนรวมเท่ากับ 2,027,000.00 บาท ต้นทุนค่าใช้จ่ายการดำเนินงานต่อปีเท่ากับ 1,707,200.00 บาท คิดเป็นต้นทุนรวมต่อหน่วย เท่ากับ 6.12 บาท และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมที่อัตราคิดลดร้อยละ 3 และร้อยละ 7.12 พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (NPV) เท่ากับ 7,465,205.13 และ 5,836,766.15 อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) เท่ากับร้อยละ 60.51 และ 54.34 อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) เท่ากับร้อยละ 1.45 และ 1.42 ตามลำดับ โดยมีระยะเวลาคืนทุน (PB) เท่ากับ 18.85 เดือน ดังนั้นโครงการโรงงานผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความคุ้มค่าในการลงทุน

คำสำคัญ: เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โรงงานต้นแบบ การผลิตบล็อกประสาน โรงไฟฟ้าแม่เมาะ เถ้าหนัก

Abstract

The purposes of this research are to analyze cost and engineering economic value of the interlocking block pilot plant using Mae Moh power plant bottom ash. Primary data were collected through the survey of

production from interlocking block pilot plant scale 1,000 unit per day. Secondary data were collected from related documents. Net Present Value (NPV), Benefit-Cost Ratio (BCR), Internal Rate of Return (IRR) and to conduct a sensitivity analysis of the project were used to analyze cost and engineering economic value of project. The results showed that the interlocking block pilot plant investment cost is 2,027,000.00 baht, the operation cost per year is 1,707,200.00 baht, and total cost per unit is 6.12 baht. The discount rate at 3 percentages and 7.12 percentages was used to analyze. The engineering economic value analysis showed that the net present value (NPV) was equal to 7,465,205.13, 5,836,766.15 baht, Internal Rate of Return of the project (IRR) was equal to 60.51, 54.34 percentages, The Benefit Cost Ratio (BCR) was equal to 1.45, 1.42 respectively and the payback period was equal to 18.85 months. Therefore, the interlocking block pilot plant using Mae Moh power plant bottom ash project is worth for the investment.

Keywords: Engineering economic, Pilot plant, Interlocking block, Mae Moh Power plant, Bottom ash.

1. บทนำ

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์ที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย มีกำลังการผลิตติดตั้งรวมทั้งสิ้น 2,400 MW ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ปีละประมาณ 18,000 ล้านหน่วย (GWh) โดยใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะเป็นเชื้อเพลิงประมาณ 16 ล้านตันต่อปี ในกระบวนการแปรสภาพพลังงานสะสมของถ่านหินลิกไนต์ให้เป็นพลังงานนั้นจะมีส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ คือเถ้าลอย (Fly ash) และเถ้าหนัก (Bottom ash) ปริมาณเถ้าลอยจะพบมากที่สุด โดยพบในปริมาณร้อยละ 80 ของเถ้าทั้งหมด [1] ในปัจจุบันเถ้าลอยจะถูกจำหน่ายให้กับลูกค้าที่ต้องการนำไปใช้งานต่างๆ ส่วนเถ้าหนักยังไม่มีการนำไปใช้งานมากนัก จากการสำรวจข้อมูลในปี 2558-2559 มีปริมาณเถ้าหนักทั้งในบ่อกักจัด 1,322,378 และ 1,357,225 ตันต่อปี [2-3] จึงถูกนำไปทิ้งและกองทับถมอยู่เป็นจำนวนมาก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา ประกอบกับในปัจจุบันพื้นที่ฝังกลบในบ่อทิ้งเถ้าหนักเริ่มมีพื้นที่จำกัด ดังนั้น กฟผ. จึงได้ร่วมมือกับสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) นำเอาเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะไปสร้างผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน โดยได้เริ่มทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ได้สูตรอัตราส่วนที่เหมาะสม และได้ขยายผลนำมาผลิตบล็อกประสานจำนวนมากในโรงงาน

ต้นแบบ จากส่วนผสมที่เป็นอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 มีความแข็งแรงสูงสุดและเป็นค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลรับน้ำหนัก (มอก.) คือสูงกว่า 140.7 ksc (kilogram per square centimeter กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ในทุกสัดส่วนของเถ้าหนัก โดยสัดส่วนของเถ้าหนักที่มีความแข็งแรงสูงสุด คือ เถ้าหนักร้อยละ 12 มีค่า 164.08 ksc (ที่มา: การทดสอบสูตรในการทดลองจากห้องปฏิบัติการของ วว. ที่มีความแข็งแรงผ่านเกณฑ์มาตรฐานและสามารถใช้ปริมาณเถ้าหนักและปูนซีเมนต์ได้อย่างเหมาะสม, 2560) นำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดกำลังสูงโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเผาแล้วนำมาบ่มด้วยความชื้น 7-28 วัน จะได้บล็อกประสานที่มีความแข็งแรงสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างอาคารผนังรับน้ำหนักได้ นอกจากนี้การใช้บล็อกประสานในการก่อสร้างยังสามารถลดค่าใช้จ่ายการก่อสร้างลงถึงร้อยละ 15-20 เมื่อเปรียบเทียบกับ การก่อสร้างระบบคอนกรีต เหล็ก ผังก่ออิฐฉาบปูน [4] การพัฒนาอาชีพให้แก่ชุมชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่โดยรอบโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นหนึ่งในพันธกิจด้านการสนับสนุนสังคมชุมชน หรือความรับผิดชอบต่อสังคม (Corporate Social Responsibility: CSR) ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เพื่อลดความยากจนสร้างรายได้ยกระดับคุณภาพชีวิต ให้ชุมชนมีความมั่นคงเพียงพอต่อการดำรงชีพในชีวิตประจำวันอย่างมีความสุข สร้างการยอมรับและความพึงพอใจของชุมชนในการอยู่ร่วมกันระหว่างชุมชนและ กฟผ. จากสถิติที่เก็บรวบรวมจาก

โรงงานผลิตบล็อกประสานพบว่า ปัจจุบันมีเครื่องจักรที่ทำการผลิตบล็อกประสาน มีทั้งเครื่องอัดมือโยกอัดครั้งละ 1 ก้อน เครื่องอัดไฮดรอลิคแบบอัดได้ครั้งละ 2 ก้อน และ 4 ก้อน โดยเครื่องอัดมือโยกจะเหมาะสำหรับโรงงานขนาดเล็กแบบครัวเรือนกำลังการผลิต 300-500 ก้อนต่อวัน ส่วนเครื่องอัดไฮดรอลิคแบบ 2 ก้อน ส่วนใหญ่จะเหมาะสำหรับโรงงานขนาดเล็กหรือขนาดกลางกำลังการผลิต 1,000 ก้อนต่อวัน และเครื่องจักรไฮดรอลิคแบบ 4 ก้อนต่อวัน เหมาะสำหรับโรงงานขนาดใหญ่หรือเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่กำลังการผลิต 4,000 ก้อนต่อวันขึ้นไป และเครื่องจักรมีราคาแพงมาก ซึ่งต้องมีระบบสายพานลำเลียงดินและส่วนประกอบเพิ่ม ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงได้กำหนดขนาดกำลังการผลิตที่ 1,000 ก้อนต่อวัน จะเหมาะสมกับการรวมกลุ่มของชุมชนที่จะจัดตั้งเป็นกลุ่มวิสาหกิจชุมชนขนาดกลางและขนาดเล็ก ที่จะช่วยให้กลุ่มมีความยั่งยืนเกิดขึ้นในการพัฒนาอาชีพเป็นกลุ่มวิสาหกิจการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ [4] การนำเถ้าหนักไปใช้เป็นส่วนผสมผลิตบล็อกประสานเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนค่าใช้ของเสียจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะโดยนำมาเป็นส่วนผสมผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน ซึ่งช่วยลดต้นทุนการกำจัดเถ้าหนักโดยเฉลี่ย 25 บาทต่อตัน และบล็อกประสานที่ผลิตได้นำมาก่อสร้างอาคารโรงงานต้นแบบในการผลิตบล็อกประสานภายในพื้นที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะขนาดกำลังการผลิต 1,000 ก้อนต่อวัน ตามรายการแบบก่อสร้างโรงงาน BOQ ของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนครั้งแรก 2,027,000 บาท ซึ่งผลงานเหล่านี้จะเป็นต้นแบบของการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งการรักษาสีสิ่งแวดล้อม และเป็นอาคารโรงงานตัวอย่างของการนำเถ้าถ่านหินที่เกิดจากกระบวนการผลิตไฟฟ้ามาทำประโยชน์ในรูปของผลิตภัณฑ์ทางงานก่อสร้างได้ อีกทั้งยังสามารถนำมาส่งเสริมให้ชุมชนโดยรอบโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่มีความสนใจสร้างเป็นอาชีพในชุมชนได้ [4-5] ดังนั้นโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนัก จึงต้องมีการวิเคราะห์ต้นทุนและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของโครงการ เพื่อให้ทราบถึงต้นทุนการผลิตบล็อกประสาน และความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม จะยังมีความชัดเจน และช่วยให้การตัดสินใจเลือกโครงการมีความเหมาะสมมากที่สุด ก่อนนำไปถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับชุมชนรอบโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเพื่อ

เป็นประโยชน์ต่อสังคมและชุมชน ในการกำหนดนโยบายการส่งเสริมการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักได้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนและวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยมีขอบเขตด้านเวลาอายุของโครงการ คือ 10 ปีตามหลักการคำนวณค่าเสื่อมราคาทางบัญชีของสิ่งปลูกสร้างประเภทอาคารโรงงาน นอกจากนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับแก้เหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นจากความไม่แน่นอน จึงได้วิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ (Sensitivity Analysis) เพื่อเป็นแนวทางสำหรับชุมชนที่จะลงทุนในการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนัก

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

โรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ตั้งอยู่ในพื้นที่โครงการชีววิถีเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เลขที่ 800 หมู่ที่ 6 ตำบลแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้พื้นที่ภายในบริเวณด้านหลัง เนื่องจากเป็นทำเลที่เหมาะสมทางด้านสิ่งแวดล้อม มีต้นไม้สูงยืนต้นล้อมรอบดบังเป็นอย่างดี เพื่อป้องกันฝุ่นในช่วงทำการผลิต และมีขนาดพื้นที่ประมาณ 2,500 ตารางเมตร (ขนาดยาว 50 เมตร และกว้าง 50 เมตร) เหมาะสมในการจัดตั้งเป็นโรงงานต้นแบบ

โครงการพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะประกอบด้วยอาคารโรงงานต้นแบบที่ก่อสร้างด้วยบล็อกประสานทำมาจากเถ้าหนักประมาณ 20,000 ก้อน เพื่อเป็นอาคารที่ใช้ในการติดตั้งเครื่องจักรและวางผังโรงงานเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตบล็อกประสาน 1 โรงงาน และอาคารโรงงานจัดเก็บวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์บล็อกประสานที่ผลิตได้จำนวน 1 โรงงาน แสดงตามรูปที่ 1

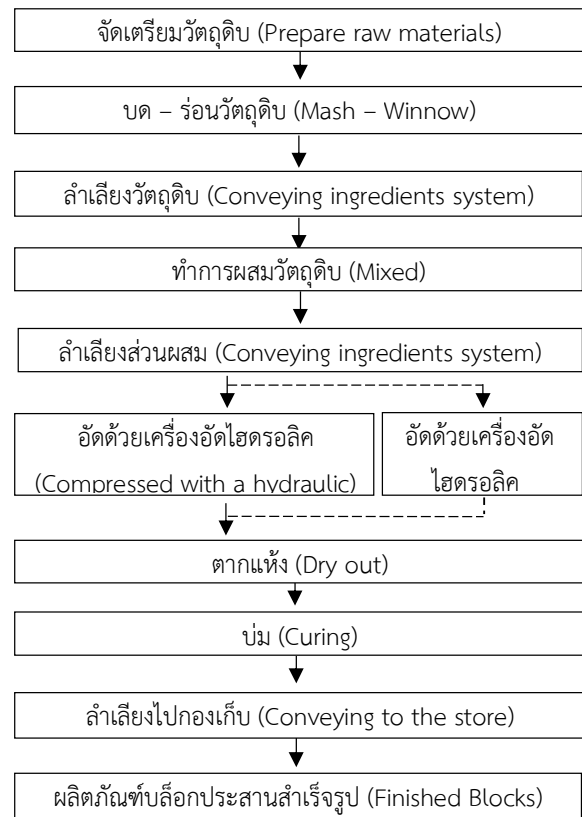


รูปที่ 1 ภาพอาคารโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนัก

2.2 กระบวนการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนัก

กระบวนการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ในกระบวนการผลิตบล็อกประสาน ได้ดำเนินการตามขั้นตอนและกระบวนการผลิตสามารถสังเคราะห์ สรุปรายละเอียดและขั้นตอนการผลิตดังนี้

กระบวนการผลิตบล็อกประสาน จะเริ่มจากการจัดเตรียมวัตถุดิบ (Prepare raw materials) โดยนำวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น ปูนซีเมนต์ เถ้าหนัก ทราาย มาจัดเตรียมให้พร้อม และตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมเพื่อกำหนดสัดส่วนวัตถุดิบเพื่อการผลิตให้ได้ตามสูตร [6] (สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2560) จากนั้นนำวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องบดร่อน (Mash – Winnow) ให้มีขนาดเล็กลง และใช้รถเข็นลำเลียงขนย้ายวัตถุดิบ (Conveying ingredients system) ที่ผ่านการบดร่อนอย่างละเอียดแล้ว ไปทำการผสมวัตถุดิบที่สถานีผสม (Mixed) โดยป้อนปูนซีเมนต์ และน้ำเข้าสู่เครื่องผสมเช่นกัน และลำเลียงส่วนผสมที่ได้ตามสูตร (Conveying ingredients system) ไปเข้าเครื่องอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (Compressed with a hydraulic injection machine) ได้เป็นผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน จึงนำไปตากแห้ง (Dry out) เป็นระยะเวลา 1 วัน หลังจากนั้นทำการขนย้ายลำเลียงบล็อกประสานไปบ่ม (Curing) ต่ออีกครั้งเป็นระยะเวลา 7-28 วัน เสร็จแล้วจึงจะลำเลียงผลิตภัณฑ์บล็อกประสานสำเร็จรูป (Finished blocks) ไปกองเก็บที่อาคารเก็บผลิตภัณฑ์บล็อกประสานสำเร็จรูป (Conveying to the store) ต่อไป ตามแผนผังกระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 4 พบว่าผลิตภัณฑ์บล็อกประสานทำมาจากส่วนผสมวัตถุดิบหลักประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ เถ้าหนัก หินฝุ่น น้ำประปา โดยมีบล็อกประสานจำนวน 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่ 1 บล็อกทรงหรือทรงสี่เหลี่ยมใช้สำหรับก่อสร้างอาคาร ขนาดเดิมก่อน 12.5 x 25 x 10 ซม. และประเภทที่ 2 บล็อกโค้งใช้สำหรับก่อสร้างถังเก็บน้ำขนาดเดิมก่อน 15 x 30 x 10 ซม. [7] แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 แผนผังหรือขั้นตอนกระบวนการผลิตบล็อกประสาน



รูปที่ 3 บล็อกประสานที่ผลิตจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

นอกจากนี้จากการทบทวนข้อมูลพบว่า การผลิตบล็อกประสานในเขตภาคเหนือที่ดำเนินการธุรกิจบล็อกประสานในปี 2558 มีจำนวนโรงงานรวมเท่ากับ 141 โรงงาน แบ่งเป็นโรงงานขนาดใหญ่ที่มีกำลังการผลิต 3,001-5,000 ก้อน/วัน จำนวน 4 โรงงาน ปริมาณการผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 3,840,000 ก้อนต่อปี โรงงานขนาดกลางที่มีกำลังการผลิต 1,001-3,000 ก้อน/วัน จำนวน 40 โรงงาน ปริมาณการผลิตเฉลี่ยเท่ากับ

19,200,000 ก้อนต่อปี และโรงงานขนาดเล็กที่มีกำลังการผลิตไม่เกิน 1,000 ก้อน/วันจำนวน 97 โรงงาน ปริมาณการผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 11,640,000 ก้อนต่อปี โดยมีปริมาณการผลิตในพื้นที่เขตภาคเหนือเฉลี่ยรวมเท่ากับ 34,680,000 ก้อนต่อปี [8] ส่วนการผลิตบล็อกประสานสามารถผลิตจากส่วนผสมมวลรวมชนิดอื่นขึ้นอยู่กับแหล่งวัตถุดิบที่อยู่ในท้องถิ่นเพื่อประหยัดค่าขนส่งวัตถุดิบจากระยะทางไกล แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 4 กระบวนการผลิตบล็อกประสานโดยใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์

ตารางที่ 1 การผลิตบล็อกประสานจากส่วนผสมวัตถุดิบหลัก

วัตถุดิบ	ผู้ศึกษา
เถ้าหินถ่านหิน, หินปูน	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย [7 - 8]
ขยะคอนกรีต	อาหาร ชูพลสิทธิ์ และณิชาภา มินาบูลย์ [9]
ดินลูกรัง, ทราย	กมล อมรฟ้า [10]
เถ้าปาล์มน้ำมัน	จรรยา เจริญเนตรกุล [11]
เถ้าไม้ยางพารา	อาปีติน ดะแซสาเมาะ และคณะ [12]

2.3 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 องค์ประกอบของต้นทุน

การวิเคราะห์ต้นทุนในการลงทุนนั้นควรเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการตัดสินใจในการลงทุน เนื่องด้วยต้นทุนสามารถจำแนกได้หลายประเภท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน ในการศึกษาครั้งนี้วิเคราะห์ต้นทุนแบ่งเป็น ต้นทุนคงที่ที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการผลิตหรือยอดขาย ต้นทุนแปรผันจะมีการเปลี่ยนแปลงหากมีการเพิ่มหรือลดปริมาณการผลิตและปริมาณของยอดขาย [13] ดังนั้นต้นทุนในการผลิตสินค้าที่เป็นเป้าหมายของโครงการสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ต้นทุนทางตรง (Direct Cost) และต้นทุนทางอ้อม (Indirect cost) โดยมีองค์ประกอบหลักดังนี้

2.3.1.1 ต้นทุนวัตถุดิบทางตรง หมายถึงมูลค่าของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสินค้าโดยตรง และ เป็นส่วนสำคัญที่สามารถคิดเข้าเป็นต้นทุนของหน่วยผลิตได้ โดยง่าย หรือหมายถึงต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนสำคัญในการประกอบหรือแปรรูปเป็นสินค้าสำเร็จรูป และสามารถกำหนดได้โดยง่ายที่ใช้ไปในการผลิต ปริมาณ เท่าใด เช่น ปูนซีเมนต์ หินปูน เถ้าหิน เป็นต้น

2.3.1.2 ต้นทุนค่าแรงทางตรง หมายถึงค่าแรงที่ใช้ในการผลิตสินค้าโดยตรง และสามารถคิดเป็นต้นทุนของหน่วยที่ผลิตได้โดยง่าย หรือหมายถึง ค่าแรงงานที่จ่ายให้แก่คนงานที่ทำหน้าที่ในการผลิตโดยตรง สามารถกำหนดได้โดยง่ายว่า ใช้เวลาในการผลิตงานเลขที่ใด เป็นเวลานานเท่าใด

2.3.1.3 ค่าใช้จ่ายในการผลิต หมายถึงค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสินค้า แต่ไม่รวมถึงค่าวัตถุดิบทางตรงและค่าแรงงานทางตรง หรือ หมายถึงต้นทุนที่เกิดขึ้นในโรงงานทั้งหมด ที่ไม่ใช่ค่าวัตถุดิบทางตรงและค่าแรงงานทางตรง เช่น ค่าน้ำค่าไฟฟ้าโรงงาน ค่าวัสดุทางอ้อม ค่าจ้างเหมาแรงงานทางอ้อม ค่าซ่อมแซมบำรุงรักษา เป็นต้น

2.3.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

กษมา ศิริสมบุญ และกรวรรณ พะนาวัน (2559) [14] ได้ศึกษาถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนการผลิตแผ่นยางรมคว้นโดยระบบเตาเผาและอบแห้ง 3 แบบ โดยพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเตาเผาอบแห้งยางพารารวมคว้นแบบอุโมงค์ (แบบดั้งเดิม) เตาอบแห้งยางพารารวมคว้นแบบประหยัดพลังงาน และเตาเผาอบแห้งยางพาราแบบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเตาเผา โดยทำการคำนวณผลตอบแทนจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR)

ระยะเวลาคืนทุน (PB) และอัตราผลตอบแทนการลงทุน (BCR) ที่กำหนดให้มีอายุการใช้งาน 5 ปี จากผลคำนวณพบว่า ราคาต้นทุนของเตาอบรมควัน 617,000 บาท 907,000 บาท และ 347,000 บาท ตามลำดับ และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของเตาอบแต่ละแบบมีค่า 2,403,484 บาท 3,526,415 บาท และ 2,148,692 บาท อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR) เท่ากับ 96% 95% และ 145% ตามลำดับ มีระยะเวลาคืนทุน (PB) เท่ากับ 11 เดือน 11 เดือน และ 7 เดือน ตามลำดับ และอัตราผลตอบแทนการลงทุน (BCR) เท่ากับ 1.07 เท่า 1.07 เท่า และ 1.09 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการลงทุนของเตาอบแห้งยางพารารวมกันทั้ง 3 ประเภท พบว่า เตาอบยางพารารวมกันแบบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเตาเผา นำลงทุนสูงสุดเนื่องจากมีระยะเวลาในการคืนทุนต่ำที่สุด ส่วนค่า IRR และ BCR สูง สำหรับการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ พบว่าราคาน้ำยางและรายได้จากการขายแผ่นยางรมควันส่งผลกระทบต่อผลตอบแทนของโครงการมากที่สุด

กรณีฐ ธรรมศิริ (2557) [15] ได้ศึกษาเรื่องความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และการเงิน ระหว่างการเลือกใช้รถยนต์ไฮบริดกับรถยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย เป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับรถยนต์เบนซิน แยกตามประเภทเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ในกรณีไม่มีการแทรกแซงด้านราคาจากภาครัฐ พบว่าการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าแทนการใช้รถยนต์เบนซินที่ใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ (E85) เป็นเชื้อเพลิง จะให้ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุดเนื่องจากมีระยะเวลาคืนทุนเร็วที่สุดเท่ากับ 6 ปี 6 เดือน มูลค่าปัจจุบันสุทธิเมื่อมีอายุการใช้งานรถยนต์ครบ 10 ปี เท่ากับ 175,031.18 บาท อัตราส่วนของ ผลประโยชน์ต่อต้นทุนมีค่าเท่ากับ 1.50 เท่า และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับร้อยละ 17.57 ต่อปี โดยมีอัตราคิดลดที่แท้จริงร้อยละ 4.79 นอกจากนี้ยังสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ มากที่สุดถึง 103.56 ตันต่อคัน หรือคิดเป็นมูลค่ารายรับจากการขายคาร์บอนเครดิตได้เท่ากับ 2,421.80 บาทต่อคัน

พรรณนิตดา เหล่าพวงศักดิ์ นพพร จันทรนาชู และณัฐกฤตย์ ดิฐวิรุฬห์ (2556) [16] ได้ศึกษาวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการสายแยกทางหลวงหมายเลข 331-บ้านหนองคล้า อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี

โดยใช้วิธีการศึกษาที่ใช้ คือ การวิเคราะห์ต้นทุน ผลประโยชน์ และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการ โดยใช้วิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ผลวิจัยพบว่าโครงการมีมูลค่าปัจจุบันของมูลค่าของการประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้รถเท่ากับ 209.36 ล้านบาท มูลค่าของการประหยัดเวลาในการเดินทางเท่ากับ 130.32 ล้านบาท มูลค่าของผลประโยชน์ในการเดินทางเท่ากับ 339.68 ล้านบาท และมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนเท่ากับ 105.99 ล้านบาท จะได้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 233.69 ล้านบาท อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนเท่ากับ 3.20 และอัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 35.9 แสดงว่าโครงการนี้มีความคุ้มค่าในการลงทุน

วุฒิกรณ์ จันทะพันธ์ (2557) [17] ได้ศึกษาวิจัยเรื่องการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์โครงการก่อสร้างอาคารพักอาศัยรวมข้าราชการและพนักงานของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาต้นทุนค่าใช้จ่ายและรายได้ของโครงการก่อสร้าง วิเคราะห์ผลระยะเวลาคืนทุน วิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) และวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ การดำเนินการศึกษาประกอบด้วย การเก็บข้อมูลเชิงพรรณนาและเชิงปริมาณ และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ทางการเงินของโครงการลงทุน โดยใช้หลักเกณฑ์การตัดสินใจแบบที่ไม่มีการปรับค่าของเวลาและแบบที่มีการปรับค่าของเวลา และวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ ผลการวิเคราะห์พบว่า ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 8 ปี 3 เดือน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 67,846,252.64 บาท อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 1.4799 และอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) มีค่าเท่ากับ 9.19% ดังนั้นโครงการก่อสร้างอาคารพักอาศัยรวมข้าราชการและพนักงานของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา จึงคุ้มค่าต่อการลงทุน และถึงแม้ว่าต้นทุนรวมจะเพิ่มขึ้นหรือผลตอบแทนรวมจะลดลง 10% โครงการก็ยังคุ้มค่าดำเนินการต่อไปได้ และยังคงคุ้มค่าต่อการลงทุน

ศิริทิพย์ บุญเลิศ (2546) [18] ได้ศึกษาต้นทุนและผลตอบแทนของธุรกิจผลิตปลีอกประสานในจังหวัดเชียงใหม่ โดยเก็บข้อมูลผ่านการสัมภาษณ์แบบเจาะลึกกับผู้ประกอบการธุรกิจผลิตปลีอกประสานจำนวน 4 รายที่เป็นโรงงานขนาดกำลังการผลิต

ผลิต 800 ก่อนวันขึ้นปี ผลการศึกษาพบว่า ต้นทุนการผลิตเฉลี่ยก่อนละ 5.32 บาท ส่วนใหญ่เป็นต้นทุนวัตถุดิบทางตรง และค่าแรงงานทางตรง ส่วนอัตรากำไรสุทธิต่อยอดขายของแต่ละโรงงานอยู่ระหว่าง 7.83-20.76 ทั้งนี้โรงงานขนาดเล็กมีการลงทุนในสินทรัพย์ต่ำจะมีอัตรากำไรสุทธิต่อยอดขายสูงกว่าโรงงานขนาดใหญ่ โครงสร้างของต้นทุนของธุรกิจผลิตบล็อกประสานมีลักษณะเป็นต้นทุนผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย ต้นทุนลงทุนในการลงทุนครั้งแรก ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพื่อซื้อสินทรัพย์ถาวร เท่ากับ 1,955,000 บาท ต้นทุนการผลิต ได้แก่ วัตถุดิบทางตรง ค่าแรงงานทางตรง ค่าใช้จ่ายในการผลิต โดยมีสัดส่วนร้อยละ 84.11 และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ได้แก่ เงินเดือนพนักงาน ค่าน้ำ ค่าไฟ ค่าส่งเสริมการตลาด ค่าใช้จ่ายก่อนการดำเนินงาน โดยมีสัดส่วนร้อยละ 15.89 และได้จำลองโครงการธุรกิจเพื่อศึกษาข้อมูลทางด้านการตลาด ด้านเทคนิคการตลาดและการเงิน กำหนดอายุโครงการ 5 ปี อัตราผลตอบแทนที่ต้องการร้อยละ 12 พบว่าโครงการลงทุนธุรกิจผลิตบล็อกประสานในจังหวัดเชียงใหม่ ใช้เงินลงทุน 2,300,000 บาท จากแหล่งเงินกู้ระยะยาวจำนวน 760,000 บาท เพื่อสร้างอาคารโรงงานอาคารสำนักงานและซื้อเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ลงทุน และจากส่วนของเจ้าของมูลค่า 1,540,000 บาท เพื่อลงทุนสินทรัพย์หมุนเวียนต่างๆ พบว่า ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ 3 ปี 5 เดือน 1 วัน มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการเท่ากับ 439,317 บาท อัตราผลตอบแทนจากการลงทุนของโครงการเท่ากับ 18.38% ผลตอบแทนจากการลงทุนสูงกว่าอัตราผลตอบแทนที่ต้องการ และปัจจัยที่ต้องระมัดระวังคือ แนวโน้มความต้องการของตลาด แหล่งวัตถุดิบและการขนส่งสินค้า

2.3.3 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักรังไฟฟ้าแม่เมาะ ได้นำข้อมูลต้นทุน รายได้และค่าใช้จ่ายจากการดำเนินงานของโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนัก มาใช้ในการคำนวณหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม ซึ่งเกณฑ์การวิเคราะห์ที่แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าในการลงทุนคือมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวก และระยะเวลาคืนทุนสั้นจะแสดงถึงความคุ้มค่าในการลงทุน [19-20] โดยการประเมินจะต้องอาศัยเกณฑ์ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม เพื่อใช้

วิเคราะห์ถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ว่ามีความเหมาะสมใช้เป็นเกณฑ์การตัดสินใจลงทุนในโครงการหรือไม่ โดยส่วนใหญ่ใช้หลักการวิเคราะห์ต้นทุนผลประโยชน์(cost-benefit analysis) พิจารณาต้นทุนทางตรง เช่น เงินลงทุนในโครงการ รวมทั้งผลประโยชน์ทางตรง เช่น รายได้จากการจำหน่ายบล็อกประสาน ผลประโยชน์ทางอ้อม เช่น มูลค่าการจัดเก็บภาษี แล้วนำมาวิเคราะห์โดยใช้เกณฑ์ต่างๆ [21] ประกอบกัน ดังนี้

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) หมายถึง ระยะเวลาที่การลงทุนนั้นใช้ไปในการลงทุน เพื่อให้กระแสเงินสดรับสุทธิที่ได้จากการลงทุนคุ้มค่างบประมาณที่ต้องลงทุนไป

$$\text{Payback Period} = \frac{I}{\left(\sum_{i=1}^n C_i \right) / n} \quad \dots\dots\dots(1)$$

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) หมายถึง การหามูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดสุทธิของโครงการ ถ้า NPV มากกว่าศูนย์ หรือมีค่าเป็นบวกเสมอ แสดงว่าโครงการนี้เหมาะสมที่จะลงทุน แต่ถ้า NPV มีค่าน้อยกว่าศูนย์ หรือมีค่าติดลบ แสดงว่าโครงการไม่เหมาะสมต่อการลงทุน

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+k)^n} - I \quad \dots\dots\dots(2)$$

โดย C คือ กระแสเงินสดรับสุทธิในแต่ละปี

n คือ อายุโครงการ (ปี)

k คือ อัตราคิดลด หรืออัตราผลตอบแทนที่ธุรกิจกำหนดไว้

I คือ เงินลงทุนเริ่มแรก

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) หมายถึง อัตราผลตอบแทนที่ทำให้เงินลงทุนมีค่าเท่ากับเงินที่ได้รับกลับคืน ซึ่งอัตราผลตอบแทนภายในนี้จัดว่าเป็นอัตราคิดที่ใช้นำมาคำนวณมูลค่าของเงินตรงเวลา เช่นเดียวกับอัตราดอกเบี้ย

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+IRR)^n} - I = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

โดย IRR คือ อัตราคิดลดหรืออัตราดอกเบี้ย

อัตราส่วนของผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit Cost Ratio: BCR) หมายถึง อัตราส่วนของมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนของโครงการ ถ้า

BCR >1 แสดงว่าโครงการมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
วิศวกรรมในการลงทุนสำหรับโครงการ

$$BCR = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} + C_0} \dots\dots\dots(4)$$

โดย B_t = ผลตอบแทนของโครงการที่เกิดขึ้นในปีที่ t

C_t = ต้นทุนของโครงการที่เกิดขึ้นในปีที่ t

C_0 = ต้นทุนในการลงทุนเริ่มแรก

r = อัตราคิดลด

n = อายุโครงการ

t = ปีการดำเนินงานโครงการคือ ตั้งแต่ปีที่ 1, 2, 3.... n

2.3.4 การเลือกใช้อัตราส่วนคิดลดมาใช้ในการคำนวณ

ในงานวิจัยนี้ดำเนินการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของโครงการ โดยเลือกใช้อัตราคิดลด (Discount Rate) ทั้ง 2 กรณีมาใช้เป็นเกณฑ์สำหรับการพิจารณาหาค่า NPV, IRR และ BCR เพื่อการคำนวณประกอบการตัดสินใจป้องกันความเสี่ยงและอัตราเงินเฟ้อในอนาคต ได้แก่

1) จากแนวคิดอัตราค่าเสียโอกาสของเอกชน กรณีที่กำหนดอัตราคิดลดของโครงการของรัฐบาล จึงใช้อัตราคิดลดเท่ากับร้อยละ 3 โดยพิจารณาจากอัตราดอกเบี้ยพันธบัตรออมทรัพย์ ของกระทรวงการคลัง ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ครั้งที่ 2 (เพิ่มเติมครั้งที่ 2) ซึ่งเป็นพันธบัตรล่าสุดของรัฐบาล [22]

2) จากแนวคิดอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ที่ธนาคารพาณิชย์กำหนดเรียกเก็บค่าธรรมเนียมจากลูกค้าขั้นต่ำ (Minimum Retail Rate: MRR) เฉลี่ยจากธนาคารพาณิชย์จดทะเบียนในประเทศไทย ซึ่งเท่ากับ 7.12% (ข้อมูลจากธนาคารกรุงไทยจำกัดมหาชน ณ วันที่ 5 ตุลาคม 2560) และกำหนดให้มีอัตราคงที่ตลอดอายุโครงการ [23]

2.3.5 หลักการวิเคราะห์ความอ่อนไหว

หลักการของการประเมินต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการจะเป็นการพยากรณ์ใน รายละเอียดของต้นทุนและผลประโยชน์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคต ภายใต้ข้อสมมุติที่สำคัญว่า ค่าของตัวแปรใด ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์แต่ละตัวมี

ความแน่นอน มีเพียงหนึ่งค่าในแต่ละช่วงเวลาตลอดอายุโครงการ แต่ในทางปฏิบัติ ตัวแปรเหล่านี้มีค่าไม่แน่นอนมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการจึงมีความไม่แน่นอนอยู่ตลอดเวลาเช่นกัน และมีผลทำให้การ พิจารณาตัดสินใจลงทุนผิดพลาดได้ ดังนั้น ผู้วิเคราะห์โครงการจึงจำเป็นต้องพิจารณาให้ทราบว่าปัจจัยใดที่มีความสำคัญ และมีผลต่อความสำเร็จของโครงการ เพื่อดูความไวหรือความอ่อนไหวของการเปลี่ยนแปลงสถานะทางการเงินของโครงการเมื่อปัจจัยเหล่านั้นเปลี่ยนแปลงไป [24] การวิเคราะห์ความอ่อนไหวช่วยให้ผู้วิเคราะห์ไม่หวังผลมากเกินไปในความสำเร็จของโครงการ และลดความเสี่ยงของโครงการอันเกิดจากการเปลี่ยนค่าของตัวแปรบางตัว ที่มีผลกระทบต่อโครงการ หากถ้าค่าของตัวแปรใดเปลี่ยนแปลงได้ง่าย และส่งผลอย่างรุนแรงต่อค่า NPV ก็แสดงว่าโครงการมีความอ่อนไหวต่อตัวแปรนี้มาก และเป็นจุดอ่อนของโครงการ ซึ่งผู้วิเคราะห์ต้องให้ความสำคัญกับตัวแปรนี้เป็นพิเศษ การวิเคราะห์ความอ่อนไหวจึงเป็นการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบว่า หากต้นทุนและผลตอบแทนในการลงทุนโครงการโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจะทำให้ค่าดัชนีชี้วัดต่าง ๆ คือค่า NPV IRR และ BCR มีการเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงใด ซึ่งสภาพความเป็นจริงแล้วจะเห็นว่าต้นทุนและผลตอบแทนจากโครงการโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนัก มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ โดยที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ มีแนวโน้มที่สูงขึ้น ส่วนผลตอบแทนก็มีความไม่แน่นอนเนื่องจากปริมาณยอดขายของบล็อกประสานขึ้นอยู่กับความต้องการของตลาด เพื่อป้องกันความเสี่ยงและความไม่แน่นอนในการลงทุน จึงต้องทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการภายใต้สมมติฐาน ให้ต้นทุนและผลตอบแทนมีการเปลี่ยนแปลงตามตารางที่ 9-12

จากการตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยศึกษาต้นทุนโครงการ เช่น ค่าก่อสร้างอาคารโรงงาน ค่าเครื่องจักร ค่าวัสดุอุปกรณ์ ค่าสาธารณูปโภค ค่าบำรุงรักษา เป็นต้น และผลประโยชน์ เช่น รายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์หรือบริการของโครงการ เป็นต้น และเครื่องมือที่เป็นตัวชี้วัดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตรา

ผลตอบแทนภายใน (IRR) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) และระยะเวลาคืนทุน (PB)

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ วิศวกรรมของโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีวิธีดำเนินการวิจัยตามลำดับขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

3.1.1 การเก็บข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) ข้อมูลปฐมภูมิที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยนี้ได้มาจากการสำรวจข้อมูลในช่วงเวลาทำการทดลองการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักในโรงงานต้นแบบ ที่ได้ก่อสร้างอาคารโรงงานด้วยบล็อกประสานจากเถ้าหนัก วางผังโรงงาน และทำการติดตั้งเครื่องจักรเพื่อทำการผลิตภายในโรงงานต้นแบบ ในพื้นที่บริเวณศูนย์ชีววิถีเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนภายในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

3.1.2 การเก็บข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ข้อมูลที่ทำการศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นข้อมูลแบบทุติยภูมิ ซึ่งเก็บรวบรวมจากแหล่งข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น โรงไฟฟ้าแม่เมาะ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เอกสารรายงานทางวิชาการ วิทยานิพนธ์ และวารสารต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง และแหล่งวิจัยอื่นๆ ที่สามารถค้นหาได้จาก อินเทอร์เน็ต เช่น อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (MRR) อัตราส่วนคิดลด (Discount Rate) และอื่น ๆ

3.2 กำหนดตัวชี้วัดที่สำคัญของโครงการ ประกอบด้วย

3.2.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) โดยนำค่าใช้จ่ายมาหักออกจากผลประโยชน์ เพื่อให้ได้ผลตอบแทนในแต่ละปี แล้วปรับค่าเวลาด้วยค่า Present worth factor ได้มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิ เมื่อนำมารวมกันทุกปี จะได้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ

3.2.2 อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (Internal Rate of Return: IRR) โดยการหักผลตอบแทนของ โครงการด้วยค่าใช้จ่ายเป็นปีๆ ไปจนตลอดอายุของโครงการ เพื่อให้ได้ผลตอบแทนสุทธิแต่ละปี หรือกระแสเงินสด (Cash Flow) ในแต่ละปี

3.2.3 อัตราผลตอบแทนต่อค่าใช้จ่าย (Benefit Cost Ratio: BCR) เป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบัน

ของผลตอบแทนกับมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายทั้งหมด ตลอดอายุโครงการ

3.2.4 ระยะคืนทุน (Payback Period: PB) เป็นระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิ จากการดำเนินโครงการ (Net Cash Inflow) มีค่าเท่ากับค่าใช้จ่ายในการลงทุนของโครงการ (Investment Costs) พอดี โดยไม่คำนึงถึงเรื่องมูลค่าของเงินตามระยะเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง การคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนจึงมองที่กระแสเงินสดรับ ไม่ใช่ตัวกำไรหรือขาดทุนของกิจการ โดย ณ จุดได้ที่ผลสะสมของกระแสเงินสดรับเท่ากับเงินลงทุนในครั้งแรกก็จะได้ระยะเวลาคืนทุนนั่นเอง

3.2.5 วิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ (Sensitivity Analysis) เป็นการประเมินมูลค่าของโครงการ อีกครั้งหนึ่งโดยการศึกษาจากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงการภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปจากสถานการณ์ที่คาดหมาย เช่น ต้นทุนโครงการเพิ่มขึ้น รายได้จากโครงการลดลง

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 การวิเคราะห์เชิงพรรณนา (Descriptive Method) เพื่อให้ทราบความเป็นมาของโครงการ และรายละเอียดการลงทุนโครงการ

3.3.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Method) เป็นการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาต้นทุนการผลิตบล็อกประสานต่อหน่วย และความเหมาะสมในการลงทุนของโครงการโดยใช้หลักการวิเคราะห์ต้นทุน-ผลประโยชน์ (Cost-Benefit Analysis) โดยการนำต้นทุน และผลประโยชน์มาเปรียบเทียบกับแบบปรับค่าของเวลาซึ่งประกอบด้วยต้นทุน และผลประโยชน์ของโครงการ

3.3.3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลง (Sensitivity Analysis) เป็นการวิเคราะห์เพื่อทราบว่าถ้าสถานการณ์เปลี่ยนไปจากการที่ปัจจัยต้นทุน ผลตอบแทนเปลี่ยนไป จะส่งผลกระทบต่อความเป็นไปได้ของโครงการอย่างไร การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการนี้ได้เลือกวิเคราะห์ ความอ่อนไหวภายใต้สมมติฐาน ได้แก่ กรณีต้นทุนเพิ่มขึ้น และกรณีผลตอบแทนลดลง ซึ่งเป็นกรณีที่มีความสำคัญต่อโครงการที่อาจจะส่งผลกระทบต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้ ต่อจากนั้นคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการใหม่อีกครั้งหนึ่งเพื่อทำการเปรียบเทียบกับก่อนและหลังการวิเคราะห์ว่ามีค่าแตกต่างกันเพียงใด โดยในการศึกษานี้

เลือกวิเคราะห์ในกรณีต้นทุนเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ผลตอบแทนลดลงร้อยละ 10 ในเบื้องต้น และวิเคราะห์ว่าต้นทุนเพิ่มขึ้นและรายได้ลดลงร้อยละเท่าไรจึงจะไม่คุ้มค่าในการลงทุน

4. ผลการศึกษาวิจัย

4.1 การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตบล็อกประสาน

การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตบล็อกประสานจากเจ้าหนักราคาต่อหน่วย โดยวิเคราะห์ต้นทุนจากค่าก่อสร้างอาคารโรงงานต้นแบบและเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ติดตั้ง คิดคำนวณจากราคาตามแบบ BOQ ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ส่งให้ฝ่ายจัดการโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในปี 2559 ประกอบด้วย 1) ต้นทุนราคาอาคารโรงงานรวมเท่ากับ 1,340,000 บาท 2) ต้นทุนราคาค่าเครื่องจักรเท่ากับ 437,000 บาท และ 3) ต้นทุนราคาค่าวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานเท่ากับ 250,000 บาท ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรก หรือต้นทุนของโรงงานต้นแบบและเครื่องจักรวัสดุอุปกรณ์ในการผลิตบล็อกประสานจากเจ้าหนักพบว่าต้นทุนรวม 2,027,000.00 บาท แสดงตามรายการในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ต้นทุนโรงงานต้นแบบและเครื่องจักรวัสดุอุปกรณ์

รายการ	ราคา (บาท)
ค่าก่อสร้างโรงงานผลิตบล็อกประสานต้นแบบ 1 หลัง	950,000.00
ค่าก่อสร้างโรงงานเก็บวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ 1 หลัง	390,000.00
เครื่องอัดบล็อกแบบไฮดรอลิก	327,000.00
เครื่องผสมวัตถุดิบ	55,000.00
เครื่องบด/ร่อนเจ้าหนัก	55,000.00
ชั้นเก็บบล็อกประสาน	100,000.00
พาเลทวางบล็อกสำเร็จรูป	100,000.00
วัสดุอุปกรณ์ใช้ในกระบวนการผลิต	50,000.00
รวมต้นทุนโรงงานต้นแบบ	2,027,000.00

ที่มา : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2559

4.2 รายได้และค่าใช้จ่ายจากโครงการพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสาน

โรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานกำหนดเงื่อนไขประกอบด้วย

1. จำนวนวันทำงาน 26 วันต่อเดือน หรือ 312 วันต่อปี

2. ปริมาณเจ้าหนักใช้ในการผลิตเท่ากับ 420 ตันต่อปี สามารถผลิตบล็อกประสานได้ 312,000 ก้อนต่อปี

3. กำหนดราคาขายหน้าโรงงาน เท่ากับ 10 บาทต่อก้อน ดังนั้นทำให้มีรายได้ เท่ากับปริมาณการผลิตต่อปีคูณด้วยราคาขาย (312,000 * 10 = 3,120,000 บาท) กำหนดเงื่อนไขให้ปริมาณการผลิตสามารถจำหน่ายได้ทั้งหมด ดังนั้นรายได้และผลประโยชน์จากการลงทุนโครงการโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเจ้าหนัก พบว่ามีรายได้โดยประมาณรวม 3,130,500.00 บาทต่อปี แสดงตามรายการในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายได้และผลประโยชน์จากการลงทุนโครงการต่อปี

รายการ	ผลประโยชน์ (บาท)
รายได้จากการจำหน่ายบล็อกประสาน (@10 บาทต่อก้อน)ผลิตปีละ 312,000 ก้อน	3,120,000.00
มูลค่ากำจัดเจ้าหนัก (@25 บาทต่อก้อนใช้เจ้าหนักประมาณ 420 ตันต่อปี)	10,500.00
มูลค่าทรัพย์สินสุทธิเมื่อสิ้นสุดโครงการ	0.00
รวม	3,130,500.00

ส่วนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่อปีของโครงการโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเจ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะพบว่าค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวม 1,707,200 บาทต่อปี แสดงตามรายการในตารางที่ 4-5 และรายการเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายการดำเนินงาน ปีที่ 1 ถึงปีที่ 10 แสดงรายละเอียดในตารางที่ 17

ตารางที่ 4 รายการเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายของการดำเนินงานต่อเดือนโดยเฉลี่ย

ลำดับ	รายการ: หน่วย/เดือน	ราคา: บาท/หน่วย	จำนวนเงินต่อเดือน (บาท)
1	ค่าวัตถุดิบ - ต้นทุนปูนซีเมนต์ 375 ถุง - ต้นทุนหินฝุ่น 83 ตัน - ต้นทุนเจ้าหนัก 35 ถุง	@135 @230 @20	70,415.00 50,625.00 19,090.00 700.00
2	ค่าแรงงาน 6 คน	@300	46,800.00
3	ค่าจ้างเหมา 2 งาน	@6,500	13,000.00
4	ค่าพลังงาน (ไฟฟ้า+ประปา) 1 งาน	@5,200	5,200.00
5	ค่าใช้จ่ายโรงงาน 5%	@6,775	6,775.00
รวมค่าใช้จ่าย			142,267.00

ที่มา: จากการวิเคราะห์ต้นทุนของกระบวนการผลิตในโครงการ

ตารางที่ 5 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่อปี

รายการ	ราคา (บาท)
ค่าวัสดุดิบ (Material Cost)	845,900.00
ค่าแรงงาน (Labor Cost)	561,600.00
ค่าจ้างเหมา (Outsource)	156,000.00
ค่าพลังงาน (Energy Cost)	62,400.00
ค่าใช้จ่ายโรงงาน 5% (Overhead Cost)	81,300.00
รวม	1,707,200.00

ต้นทุนวัสดุดิบ เป็นต้นทุนของวัสดุดิบส่วนผสมที่เป็นอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 มีค่าความแข็งแรงสูงสุดและเป็นค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกกลวงรับน้ำหนัก (มอก.) คือสูงกว่า 140.7 ksc ในทุกสัดส่วนของเอ้าหนัก โดยสัดส่วนของเอ้าหนักที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุด คือ เอ้าหนักร้อยละ 12 มีค่า 164.08 ksc เพื่อผลิตบล็อกประสานจำนวนมากในโรงงานต้นแบบ ประกอบด้วย ต้นทุนปูนซีเมนต์ หินฝุ่น และเอ้าหนัก ที่มีปริมาณการใช้เป็นส่วนผสมต่อเดือน คือ ปูนซีเมนต์ 375 ถุงๆ ละ 135 บาท หินฝุ่น 83 ตันๆ ละ 230 บาท เอ้าหนัก 35 ถุงๆ ละ 20 บาท ที่เป็นส่วนผสมในการผลิตบล็อกประสาน คิดเป็นค่าใช้จ่ายดำเนินงานต่อปีเท่ากับ 845,900 บาท

ต้นทุนแรงงาน คือค่าตอบแทนที่จ่ายให้คนงานที่ทำการผลิตบล็อกประสาน คิดจากอัตราค่าแรงต่อวันๆละ 300บาท จำนวน 6 คน คิดเป็นค่าใช้จ่ายดำเนินงานต่อปีเท่ากับ 561,600 บาท

ต้นทุนค่าจ้างเหมา คือค่าจ้างเหมางานที่มีไว้เพื่อจ่ายเป็นค่าจ้างในงานจ้างเหมางานต่างๆ ในกระบวนการผลิตบล็อกประสาน เช่น การขนส่งหรืองานที่เป็นลักษณะแตกต่างการจ้างแรงงานประจำ คิดเป็นค่าใช้จ่ายดำเนินงานต่อปีเท่ากับ 156,000 บาท

ต้นทุนพลังงาน คือต้นทุนค่าไฟฟ้ารวมกับต้นทุนค่าน้ำประปา โดยค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ คำนวณอัตราค่าไฟฟ้าแบบ Time of Use (TOU) เป็นอัตราค่าไฟฟ้าที่กำหนดให้ราคาแตกต่างกันตามช่วงเวลาคิดรวมทุกเครื่องจักร และค่าน้ำประปาที่ใช้ในกระบวนการผลิตในโครงการคิดเป็นค่าใช้จ่ายดำเนินงานโดยเฉลี่ยต่อเดือนๆ ละ 5,000 บาท หรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายต่อปีเท่ากับ 62,400 บาท

ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงานร้อยละ 5 คือ ค่าใช้จ่ายทางอ้อมที่คำนวณจากผลรวมของค่าใช้จ่ายผันแปรที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงาน ประกอบด้วย ค่าวัสดุดิบ ค่าแรงงาน ค่าจ้างเหมา งาน ค่าพลังงาน โดยคิดเป็นค่าใช้จ่ายต่อปีเท่ากับ 81,300 บาท

4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนโครงการพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสาน

การวิเคราะห์ดำเนินการคำนวณต้นทุนต่อหน่วย แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตบล็อกประสานคือ ต้นทุนคงที่ต่อหน่วย และต้นทุนผันแปรต่อหน่วย หลังจากนั้นนำต้นทุนมารวมกันจะได้เป็นต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตบล็อกประสาน โดยคำนวณจากสูตร ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนรวม} &= \text{ต้นทุนคงที่ต่อหน่วย} + \text{ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย} \\ \text{ต้นทุนคงที่ต่อหน่วย} &= \text{ต้นทุนค่าก่อสร้าง} + \text{ต้นทุนค่าเครื่องจักร} \\ &\quad + \text{ต้นทุนค่าอุปกรณ์} \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย} &= \text{ต้นทุนวัสดุดิบ} + \text{ต้นทุนแรงงาน} \\ &\quad + \text{ต้นทุนค่าจ้างเหมา} + \text{ต้นทุนพลังงาน} \\ &\quad + \text{ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงาน} \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

ต้นทุนคงที่ต่อหน่วย สามารถคำนวณจากสูตรดังนี้

$$\text{ต้นทุนคงที่ต่อหน่วย} = \text{ต้นทุนคงที่รวม} / (\text{อายุการใช้งาน} \times \text{จำนวนเดือน} \times \text{จำนวนวันทำงาน} \times \text{จำนวนการผลิตต่อวัน})$$

$$\text{ต้นทุนคงที่ต่อหน่วย} = 2,027,000 / (10 \times 12 \times 26 \times 1,000) = 0.65$$

ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย คำนวณจากสูตรดังนี้

$$\text{ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย} = \text{ต้นทุนผันแปรรวมต่อปี} / \text{ปริมาณการผลิตรวมต่อปี}$$

$$\text{ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย} = 1,707,200 / 312,000 = 5.47$$

$$\text{ต้นทุนรวม} = 0.65 + 5.47 = 6.12 \text{ บาทต่อหน่วย}$$

ดังนั้นต้นทุนการผลิตบล็อกประสานต่อหน่วยเท่ากับ 6.12 บาท

4.4 ผลตอบแทนการลงทุนการผลิตบล็อกประสาน

ผลตอบแทนหรือรายได้จากการลงทุนโครงการโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเอ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ประกอบด้วย ผลประโยชน์ของโครงการ ได้แก่ 1) รายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน ผู้วิจัยได้สำรวจข้อมูลในตลาดจำหน่ายผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน จากเว็บไซต์ต่าง ๆ จึง

ได้กำหนดราคาจำหน่ายผลิตภัณฑ์บล็อกประสานหน้าโรงงาน ก่อนละ 10 บาทในปีที่ 1- 5 ซึ่งต่ำกว่าตลาดที่จำหน่ายโดยเฉลี่ย ก่อนละ 12 บาท และปรับราคาในปีที่ 6-10 เป็นราคาก่อนละ 12 บาท ทั้งนี้จะกำหนดเงื่อนไขส่งผลิตและสามารถจำหน่ายได้หมดตลอดอายุโครงการ 2) มูลค่าการจัดเก็บหนี้ที่ต้องขนไปทิ้งในบ่อซีเมนต์ โดยปกติปริมาณหนี้ที่เกิดขึ้นจากการกระบวนการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหิน จะมีหนี้หนี้กองมาในปริมาณเฉลี่ย 1.3 ล้านตันต่อปี และมีค่าต้นทุนการจัดโดยเฉลี่ยในปีที่ 1- 5 เท่ากับ 25 บาทต่อตันและปรับค่าต้นทุนการจัดในปีที่ 6-10 เท่ากับ 30 บาทต่อตัน ในโครงการนี้ปริมาณการใช้ถ่านหินในปริมาณโดยเฉลี่ย 420 ตันต่อปี 3) มูลค่าทรัพย์สินสุทธิเมื่อสิ้นสุดโครงการโรงงานต้นแบบเท่ากับ 0.00 บาท ตามรายการคำนวณค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรง ดังนั้นรายได้รวมทั้งหมดของโครงการจากปีที่ 1 ถึงปีที่ 10 แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 รายได้จากโครงการโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสาน

ปีที่	รายได้จากการจำหน่าย(บาท)	มูลค่าการจัดเก็บหนี้(บาท)	รวมรายได้จากการลงทุนโครงการ (บาท)
1	3,120,000.00	10,500.00	3,130,500.00
2	3,120,000.00	10,500.00	3,130,500.00
3	3,120,000.00	10,500.00	3,130,500.00
4	3,120,000.00	10,500.00	3,130,500.00
5	3,120,000.00	10,500.00	3,130,500.00
6	3,744,000.00	12,600.00	3,756,600.00
7	3,744,000.00	12,600.00	3,756,600.00
8	3,744,000.00	12,600.00	3,756,600.00
9	3,744,000.00	12,600.00	3,756,600.00
10	3,744,000.00	12,600.00	3,756,600.00
รวม	34,320,000.00	115,500.00	34,435,500.00

ที่มา : จากการวิเคราะห์รายได้จากการลงทุนโครงการ

ในการวิเคราะห์ผลตอบแทนจากการลงทุนโครงการกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์ไว้ 2 กรณีคือใช้อัตราคิดลด (Discount rate) ร้อยละ 3.00 และร้อยละ 7.12 มีที่มาดังนี้

1. แนวคิดอัตราค่าเสียโอกาสของเอกชน กรณีที่การกำหนดอัตราคิดลดของโครงการของรัฐบาล จึงใช้อัตราคิดลด เท่ากับ ร้อยละ 3.00 โดยพิจารณาจากอัตราดอกเบี้ยพันธบัตรออมทรัพย์ของกระทรวงการคลัง ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ครั้งที่ 2 (เพิ่มเติมครั้งที่ 2) ซึ่งเป็นพันธบัตรล่าสุดของรัฐบาล

2. อัตราดอกเบี้ยเงินกู้กำหนดให้เท่ากับร้อยละ 7.12 ซึ่งเป็นอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ที่ธนาคารพาณิชย์กำหนดเรียกเก็บค่าธรรมเนียมจากลูกค้าขั้นต่ำ (Minimum Retail Rate: MRR) เฉลี่ยจากธนาคารพาณิชย์จดทะเบียนในประเทศไทย (ข้อมูลจากธนาคารกรุงไทยจำกัดมหาชน ณ วันที่ 5 ตุลาคม 2560) และกำหนดให้มีอัตราคงที่ตลอดอายุโครงการ

4.4.1 เกณฑ์การตัดสินใจเพื่อการลงทุนโครงการภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจที่ไม่มีการปรับค่าของเวลา

เกณฑ์การตัดสินใจที่ไม่มีการปรับค่าของเวลา ซึ่งก็คือ การวิเคราะห์เพื่อหาระยะเวลาคืนทุนของโครงการ (Payback Period) การหาระยะเวลาคืนทุนของโครงการ จะแทนค่าในสมการดังนี้

ระยะเวลาคืนทุน = ค่าใช้จ่ายในการลงทุน / ผลตอบแทนเฉลี่ยสุทธิต่อปี

จะได้ $= 2,027,000.00 / (12,904,690.29 / 10) = 1.571$
ระยะเวลาคืนทุน = 1.571 ปี หรือ คิดเป็น 18.849 เดือน
ดังนั้นการลงทุนในโครงการโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากถ่านหิน มีระยะเวลาคืนทุน (PB) ที่ 18.85 เดือน

ตารางที่ 7 กระแสเงินสดของโครงการโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสาน

ปีที่	ต้นทุนรวม (บาท)	รายได้รวม (บาท)	รวมกระแสเงินสดสุทธิ (บาท)
1	1,707,200.00	3,130,500.00	1,423,300.00
2	1,797,804.75	3,130,500.00	1,332,695.25
3	1,887,694.99	3,130,500.00	1,242,805.01
4	1,982,079.74	3,130,500.00	1,148,420.26
5	2,081,183.72	3,130,500.00	1,049,316.28
6	2,185,242.91	3,756,600.00	1,571,357.09
7	2,294,505.06	3,756,600.00	1,462,094.94
8	2,409,230.31	3,756,600.00	1,347,369.69
9	2,529,691.82	3,756,600.00	1,226,908.18
10	2,656,176.41	3,756,600.00	1,100,423.59
รวม	21,530,809.71	34,435,500.00	12,904,690.29

ที่มา : จากการวิเคราะห์กระแสเงินสดของโครงการ

4.4.2 เกณฑ์การตัดสินใจเพื่อการลงทุนโครงการภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจที่มีการปรับค่าของเวลา

เกณฑ์การตัดสินใจที่มีการปรับค่าของเวลา ประกอบด้วย 3 เกณฑ์ คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนต่อ

ต้นทุน (BCR) และอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ แสดงในตารางที่ 8 และรายละเอียดในตารางที่ 13-14

ตารางที่ 8 ผลตอบแทนจากการลงทุนโครงการโดยใช้อัตราคิดลด

รายการ	กรณีใช้อัตราคิดลด ร้อยละ 3.00	กรณีใช้อัตราคิดลด ร้อยละ 7.12
NPV	7,465,205.13	5,836,766.15
IRR	60.51 %	54.34 %
BCR	1.45	1.42

ที่มา: จากการวิเคราะห์ผลตอบแทนของโครงการ

จากตารางที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์ผลตอบแทนจากการลงทุนโครงการพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยวิเคราะห์ใช้อัตราคิดลดร้อยละ 3.00 เนื่องจากเป็นโครงการภาครัฐที่จัดตั้งศูนย์ส่งเสริมการเรียนรู้เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักให้กับสังคมชุมชนรอบโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และร้อยละ 7.12 สำหรับชุมชนนำโครงการไปดำเนินการต่อยอดพัฒนาเป็นอาชีพจัดตั้งเป็นกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ถ้าหากกู้ยืมเงินลงทุนโครงการ ซึ่งทั้ง 2 กรณี จากข้อมูลการวิเคราะห์พบว่า ถ้าใช้อัตราคิดลดกำหนดที่ร้อยละ 3.00 โครงการดังกล่าวให้ค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) สูงถึง 7,465,205.13 บาท ค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มีค่าเท่ากับร้อยละ 60.51 และค่าอัตราผลตอบแทนจากการลงทุนเท่ากับ (BCR) เท่ากับ 1.45 และถ้าใช้อัตราคิดลดกำหนดที่ร้อยละ 7.12 โครงการดังกล่าวให้ค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) สูงถึง 5,836,766.15 บาท ค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มีค่าเท่ากับร้อยละ 54.34 ค่าอัตราผลตอบแทนจากการลงทุนเท่ากับ (BCR) เท่ากับ 1.42

4.5 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวโครงการ

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ เป็นการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลง ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น และทำให้เกิดผลกระทบต่อต้นทุนหรือผลตอบแทนของโครงการ ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการใช้วิธีทดสอบการเปลี่ยนแปลงหลายกรณี ได้แก่ กรณีที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 โดยกำหนดให้ผลตอบแทนรวมคงที่ และกรณีที่ผลตอบแทนรวมลดลงร้อยละ

10 โดยกำหนดให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีคงที่ กรณีที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีเพิ่มขึ้นร้อยละเท่าไร โดยกำหนดให้ผลตอบแทนรวมคงที่ และกรณีที่ผลตอบแทนรวมลดลงร้อยละเท่าไร โดยกำหนดให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีคงที่ เพื่อหาว่าโครงการจะไม่คุ้มค่าในการลงทุนเนื่องจากมีความเสี่ยงภายใต้การเปลี่ยนแปลงที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

4.5.1 กรณีที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีเพิ่มขึ้นและให้ผลตอบแทนรวมคงที่

การเปลี่ยนแปลงที่คาดว่าจะเกิดขึ้น กรณีที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 โดยกำหนดให้ผลตอบแทนรวมคงที่ จากการคำนวณผลที่ได้แสดงในตารางที่ 9 กำหนดใช้อัตราคิดลดร้อยละ 3.00 พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 5,924,377.14 บาท อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) มีค่าเท่ากับร้อยละ 51.06 และผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 1.33 และใช้อัตราคิดลดร้อยละ 7.12 พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 3,533,534.99 บาท อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) มีค่าเท่ากับร้อยละ 45.25 และผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 1.31 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 15

ตารางที่ 9 ผลตอบแทนของโครงการ กรณีที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และให้ผลตอบแทนรวมคงที่

รายการ	ต้นทุนในการดำเนินงาน รวมต่อปีเพิ่มขึ้น 10% (ใช้อัตราคิดลด 3%)	ต้นทุนในการดำเนินงาน รวมต่อปีเพิ่มขึ้น 10% (ใช้อัตราคิดลด 7.12%)
NPV	5,924,377.14	3,533,534.99
IRR	51.06 %	45.25 %
BCR	1.33	1.31

ที่มา: จากการวิเคราะห์ผลตอบแทนของโครงการ

4.5.2 กรณีที่ผลตอบแทนรวมลดลงและให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีคงที่

การเปลี่ยนแปลงที่คาดว่าจะเกิดขึ้น กรณีที่ผลตอบแทนรวมลดลงร้อยละ 10 โดยกำหนดให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีคงที่ จากการคำนวณผลที่ได้แสดงในตารางที่ 10 กำหนดใช้อัตราคิดลดร้อยละ 3.00 พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 4,975,156.62 บาท อัตราผลตอบแทน

ภายในของโครงการ (IRR) มีค่าเท่ากับร้อยละ 44.16 และผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 1.30 และใช้อัตราคิดลดร้อยละ 7.12 พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 3,796,542.72 บาท อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) มีค่าเท่ากับเท่ากับร้อยละ 38.62 และผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 1.28 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 16

ตารางที่ 10 ผลตอบแทนของโครงการ กรณีที่ผลตอบแทนรวมลดลงร้อยละ 10 และให้ต้นทุนในการดำเนินงานต่อปีรวมคงที่

รายการ	ผลตอบแทนรวมลดลง 10% (ใช้อัตราคิดลด 3%)	ผลตอบแทนรวมลดลง 10% (ใช้อัตราคิดลด 7.12%)
NPV	4,975,156.62	3,796,542.72
IRR	44.16 %	38.62 %
BCR	1.30	1.28

ที่มา: จากการวิเคราะห์ผลตอบแทนของโครงการ

4.5.3 กรณีที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีเพิ่มขึ้นและผลตอบแทนรวมคงที่จนส่งผลให้โครงการไม่คุ้มค่าในการลงทุน

การเปลี่ยนแปลงที่คาดว่าจะเกิดขึ้น กรณีที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีเพิ่มขึ้นร้อยละเท่าไร โดยกำหนดให้ผลตอบแทนรวมคงที่ เป็นการค้นหาร้อยละของต้นทุนการดำเนินงานรวมต่อปีที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งส่งผลให้โครงการไม่คุ้มค่าในการลงทุนโครงการ จากการคำนวณผลที่ได้แสดงในตารางที่ 11 พบว่าต้นทุนในการดำเนินงานรวมต่อปีเพิ่มขึ้นร้อยละ 49 ที่อัตราคิดลดร้อยละ 3.00 พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าติดลบเท่ากับ -84,852.05 บาท อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.63 และผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 1.00 และต้นทุนในการดำเนินงานรวมต่อปีเพิ่มขึ้นร้อยละ 45 ที่อัตราคิดลดร้อยละ 7.12 พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าติดลบเท่ากับ -82,545.43 บาท อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) มีค่าเท่ากับเท่ากับร้อยละ 5.78 ซึ่งต่ำกว่าอัตราดอกเบี้ย MRR และผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 1.00 ในขณะที่ผลตอบแทนรวมคงที่จะส่งผลให้โครงการไม่คุ้มค่าในการลงทุน

ตารางที่ 11 ผลตอบแทนของโครงการ กรณีที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีเพิ่มขึ้นและผลตอบแทนรวมคงที่จนส่งผลให้โครงการไม่คุ้มค่าในการลงทุน

รายการ	ต้นทุนในการดำเนินงาน ต่อปีเพิ่มขึ้น 49% (ใช้อัตราคิดลด 3%)	ต้นทุนในการดำเนินงาน ต่อปีเพิ่มขึ้น 45% (ใช้อัตราคิดลด 7.12%)
NPV	-84,852.05	-82,545.43
IRR	1.63 %	5.78 %
BCR	1.00	1.00

ที่มา: จากการวิเคราะห์ผลตอบแทนของโครงการ

4.5.4 กรณีที่ผลตอบแทนรวมลดลงและให้ต้นทุนในการดำเนินงานรวมต่อปีคงที่ จนส่งผลให้โครงการไม่คุ้มค่าในการลงทุน

การเปลี่ยนแปลงที่คาดว่าจะเกิดขึ้น กรณีที่ผลตอบแทนรวมลดลงร้อยละเท่าไร โดยกำหนดให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีคงที่ เป็นการค้นหาร้อยละของผลตอบแทนรวมลดลง จนกระทั่งส่งผลให้โครงการไม่คุ้มค่าในการลงทุนโครงการ จากการคำนวณผลที่ได้แสดงในตารางที่ 12 พบว่า ผลตอบแทนรวมลดลงร้อยละ 30 ที่อัตราคิดลดร้อยละ 3.00 พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าติดลบเท่ากับ -4,940.40 บาท อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.94 และผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 1.00 และผลตอบแทนรวมลดลงร้อยละ 28.65 ที่อัตราคิดลดร้อยละ 7.12 พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าติดลบเท่ากับ -8,473.98 บาท อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.89 ซึ่งต่ำกว่าอัตราดอกเบี้ย MRR และผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 1.00 ในขณะที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีคงที่ จะส่งผลให้โครงการไม่คุ้มค่าในการลงทุน

ตารางที่ 12 ผลตอบแทนของโครงการ กรณีที่ผลตอบแทนรวมลดลงและให้ต้นทุนในการดำเนินงานรวมต่อปีคงที่ จนส่งผลให้โครงการไม่คุ้มค่าในการลงทุน

รายการ	ผลตอบแทนรวมลดลง 30% (ใช้อัตราคิดลด 3%)	ผลตอบแทนรวมลดลง 28.65% (อัตราคิดลด 7.12%)
NPV	-4,940.40	-8,473.98
IRR	2.94 %	2.89 %
BCR	1.00	1.00

ที่มา: จากการวิเคราะห์ผลตอบแทนของโครงการ

ตารางที่ 13 การวิเคราะห์ค่า NPV, BCR และ IRR ที่อัตราคิดลดร้อยละ 3.00

ปีที่	ต้นทุนรวม (บาท)	ผลตอบแทนรวม (บาท)	อัตราดอกเบี้ย 3% (COMPOUNDING AND DISCOUNTING TABLES)	ต้นทุนปัจจุบันปรับด้วยอัตราคิดลด 3% (บาท)	ผลตอบแทนปัจจุบันปรับด้วยอัตราคิดลด 3% (บาท)	กระแสเงินสดรับสุทธิ (บาท)	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (ปรับด้วยอัตราคิดลด 3%) (บาท)
0	2,027,000.00	0.00	1.00000	2,027,000.00	0.00	-2,027,000.00	-2,027,000.00
1	1,707,200.00	3,130,500.00	1.03000	1,657,475.73	3,039,320.39	1,423,300.00	1,381,844.66
2	1,797,804.75	3,130,500.00	1.06090	1,694,603.40	2,950,796.49	1,332,695.25	1,256,193.09
3	1,887,694.99	3,130,500.00	1.09273	1,727,503.58	2,864,843.10	1,242,805.01	1,137,339.52
4	1,982,079.74	3,130,500.00	1.12551	1,761,050.31	2,781,405.76	1,148,420.26	1,020,355.45
5	2,081,183.73	3,130,500.00	1.15927	1,795,253.68	2,700,406.29	1,049,316.27	905,152.61
6	2,185,242.91	3,756,600.00	1.19405	1,830,110.05	3,146,099.41	1,571,357.09	1,315,989.36
7	2,294,505.06	3,756,600.00	1.22987	1,865,648.45	3,054,469.17	1,462,094.94	1,188,820.72
8	2,409,230.31	3,756,600.00	1.26677	1,901,868.78	2,965,494.92	1,347,369.69	1,063,626.15
9	2,529,691.82	3,756,600.00	1.30477	1,938,802.87	2,879,128.12	1,226,908.18	940,325.25
10	2,656,176.41	3,756,600.00	1.34392	1,976,439.38	2,795,255.67	1,100,423.59	818,816.29
	21,530,809.71	34,435,500.00		20,175,756.23	29,177,219.33	10,877,690.29	9,001,463.10
NPV = 7,465,205.13, BCR = 1.45, IRR = 60.51%							

ตารางที่ 14 การวิเคราะห์ค่า NPV, BCR และ IRR ที่อัตราคิดลดร้อยละ 7.12

ปีที่	ต้นทุนรวม (บาท)	ผลตอบแทนรวม (บาท)	อัตราดอกเบี้ย 7.12% (COMPOUNDING AND DISCOUNTING TABLES)	ต้นทุนปัจจุบันปรับด้วยอัตราคิดลด 7.12% (บาท)	ผลตอบแทนปัจจุบันปรับด้วยอัตราคิดลด 7.12% (บาท)	กระแสเงินสดรับสุทธิ (บาท)	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (ปรับด้วยอัตราคิดลด 7.12%) (บาท)
0	2,027,000.00	0.00	1.00000	2,027,000.00		-2,027,000.00	-2,027,000.00
1	1,707,200.00	3,130,500.00	1.07120	1,593,726.66	2,922,423.45	1,423,300.00	1,328,696.79
2	1,797,804.75	3,130,500.00	1.14747	1,566,756.10	2,728,177.23	1,332,695.25	1,161,421.13
3	1,887,694.99	3,130,500.00	1.22917	1,535,748.61	2,546,842.08	1,242,805.01	1,011,093.47
4	1,982,079.74	3,130,500.00	1.31669	1,505,354.78	2,377,559.82	1,148,420.26	872,205.04
5	2,081,183.73	3,130,500.00	1.41043	1,475,562.47	2,219,529.33	1,049,316.27	743,966.85
6	2,185,242.91	3,756,600.00	1.51086	1,446,359.78	2,486,403.28	1,571,357.09	1,040,043.50
7	2,294,505.06	3,756,600.00	1.61843	1,417,735.03	2,321,138.24	1,462,094.94	903,403.20
8	2,409,230.31	3,756,600.00	1.73366	1,389,676.79	2,166,857.95	1,347,369.70	777,181.16
9	2,529,691.82	3,756,600.00	1.85710	1,362,173.86	2,022,832.29	1,226,908.18	660,658.44
10	2,656,176.41	3,756,600.00	1.98932	1,335,215.23	1,888,379.66	1,100,423.58	553,164.43
	21,530,809.71	34,435,500.00		16,655,309.31	23,680,143.33	10,877,690.29	7,024,834.01
NPV = 5,836,766.15, BCR = 1.42, IRR = 54.34%							

ตารางที่ 15 การวิเคราะห์ค่า NPV, BCR และ IRR ที่อัตราคิดลดร้อยละ 7.12 กรณีที่ต้นทุนการดำเนินงานรวมต่อปีเพิ่มขึ้นร้อยละ 10

ปีที่	ต้นทุน ดำเนินงานรวม ต่อปีเพิ่มขึ้น ร้อยละ 10 (บาท)	ผลตอบแทน รวม (บาท)	อัตราดอกเบี้ย 7.12% (COMPOUNDING AND DISCOUNTING TABLES)	ต้นทุน ปัจจุบัน ปรับด้วยอัตราคิด ลด 7.12% (บาท)	ผลตอบแทน ปัจจุบันปรับด้วย อัตราคิดลด 7.12% (บาท)	กระแสเงินสด รับสุทธิ (บาท)	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (ปรับด้วยอัตราคิด ลด 7.12%) (บาท)
0	2,027,000.00	0.00	1.00000	2,027,000.00		-2,027,000.00	-2,027,000.00
1	1,877,920.00	3,130,500.00	1.07120	1,753,099.33	2,922,423.45	1,252,580.00	1,169,324.12
2	1,977,585.23	3,130,500.00	1.14747	1,723,431.72	2,728,177.23	1,152,914.78	1,004,745.52
3	2,076,464.49	3,130,500.00	1.22917	1,689,323.47	2,546,842.08	1,054,035.51	857,518.61
4	2,180,287.71	3,130,500.00	1.31669	1,655,890.26	2,377,559.82	950,212.29	721,669.56
5	2,289,302.10	3,130,500.00	1.41043	1,623,118.72	2,219,529.33	841,197.90	596,410.61
6	2,403,767.20	3,756,600.00	1.51086	1,590,995.75	2,486,403.28	1,352,832.80	895,407.53
7	2,523,955.56	3,756,600.00	1.61843	1,559,508.54	2,321,138.24	1,232,644.44	761,629.70
8	2,650,153.33	3,756,600.00	1.73366	1,528,644.47	2,166,857.95	1,106,446.67	638,213.48
9	2,782,661.00	3,756,600.00	1.85710	1,498,391.24	2,022,832.29	973,939.00	524,441.05
10	2,921,794.06	3,756,600.00	1.98932	1,468,736.75	1,888,379.66	834,805.94	419,642.91
	25,710,890.68	34,435,500.00		18,118,140.24	23,680,143.33	8,724,609.32	5,562,003.08
NPV = 3,533,534.99, BCR = 1.31, IRR = 45.25%							

ตารางที่ 16 การวิเคราะห์ค่า NPV, BCR และ IRR ที่อัตราคิดลดร้อยละ 7.12 กรณีที่ผลตอบแทนรวมลดลงร้อยละ 10

ปีที่	ต้นทุนรวม (บาท)	ผลตอบแทน รวม ลดลง ร้อยละ 10 (บาท)	อัตราดอกเบี้ย 7.12% (จาก COMPOUNDING AND DISCOUNTING TABLES)	ต้นทุนปัจจุบันปรับ ด้วยอัตราคิดลด 7.12% (บาท)	ผลตอบแทน ปัจจุบันปรับด้วย อัตราคิดลด 7.12% (บาท)	กระแสเงินสด รับสุทธิ (บาท)	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (ปรับด้วยอัตราคิด ลด 7.12%) (บาท)
0	2,027,000.00	0.00	1.00000	2,027,000.00		-2,027,000.00	-2,027,000.00
1	1,707,200.00	2,817,450.00	1.07120	1,593,726.66	2,630,181.11	1,110,250.00	1,036,454.44
2	1,797,804.75	2,817,450.00	1.14747	1,566,756.10	2,455,359.51	1,019,645.25	888,603.40
3	1,887,694.99	2,817,450.00	1.22917	1,535,748.61	2,292,157.87	929,755.01	756,409.26
4	1,982,079.74	2,817,450.00	1.31669	1,505,354.78	2,139,803.84	835,370.26	634,449.06
5	2,081,183.73	2,817,450.00	1.41043	1,475,562.47	1,997,576.40	736,266.27	522,013.92
6	2,185,242.91	3,380,940.00	1.51086	1,446,359.78	2,237,762.95	1,195,697.09	791,403.18
7	2,294,505.06	3,380,940.00	1.61843	1,417,735.03	2,089,024.41	1,086,434.94	671,289.38
8	2,409,230.30	3,380,940.00	1.73366	1,389,676.79	1,950,172.16	971,709.70	560,495.37
9	2,529,691.82	3,380,940.00	1.85710	1,362,173.86	1,820,549.06	851,248.18	458,375.21
10	2,656,176.42	3,380,940.00	1.98932	1,335,215.23	1,699,541.69	724,763.58	364,326.47
	21,530,809.71	30,991,950.00		16,655,309.31	21,312,128.99	7,434,140.29	4,656,819.68
NPV = 3,796,542.72, BCR = 1.28, IRR = 38.62%							

ตารางที่ 17 รายการเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายการดำเนินงาน ปีที่ 1 ถึงปีที่ 10

ปีที่	ค่าวัตถุดิบ (บาท)	ค่าแรงงาน (บาท)	ค่าจ้างเหมา (บาท)	ค่าพลังงาน (บาท)	ค่าบำรุงรักษา (บาท)	ค่าใช้จ่ายโรงงาน 5% (บาท)	รวมต้นทุนผันแปร (บาท)
1	845,900.00	561,600.00	156,000.00	62,400.00	0.00	81,300.00	1,707,200.00
2	888,195.00	589,680.00	163,800.00	65,520.00	5,000.00	85,609.75	1,797,804.75
3	932,604.75	619,164.00	171,990.00	68,796.00	5,250.00	89,890.24	1,887,694.99
4	979,234.99	650,122.20	180,589.50	72,235.80	5,512.50	94,384.75	1,982,079.74
5	1,028,196.74	682,628.31	189,618.98	75,847.59	5,788.13	99,103.99	2,081,183.72
6	1,079,606.57	716,759.73	199,099.92	79,639.97	6,077.53	104,059.19	2,185,242.91
7	1,133,586.90	752,597.71	209,054.92	83,621.97	6,381.41	109,262.15	2,294,505.06
8	1,190,266.25	790,227.60	219,507.67	87,803.07	6,700.48	114,725.25	2,409,230.31
9	1,249,779.56	829,738.98	230,483.05	92,193.22	7,035.50	120,461.52	2,529,691.82
10	1,312,268.54	871,225.93	242,007.20	96,802.88	7,387.28	126,484.59	2,656,176.41
รวม	10,639,639.30	7,063,744.45	1,962,151.24	784,860.49	55,132.82	1,025,281.41	21,530,809.71

ที่มา : จากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายการดำเนินงานต่อปี

5. สรุปผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ พบว่าโครงการมีผลตอบแทนจากการลงทุนสูง มีอัตราผลตอบแทนภายในที่สูง ทั้งนี้ได้วิเคราะห์โดยใช้อัตราคิดลดร้อยละ 3.00 พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 7,465,205.13 บาท อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) มีค่าเท่ากับร้อยละ 60.51 อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 1.45 และวิเคราะห์โดยใช้อัตราคิดลดร้อยละ 7.12 พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 5,836,766.15 บาท อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) มีค่าเท่ากับร้อยละ 54.34 อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 1.42 และโครงการมีระยะเวลาคืนทุน (PB) เท่ากับ 1.57 ปี หรือ 18.85 เดือน ดังนั้นโครงการโรงงานผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จึงคุ้มค่าต่อการลงทุน ส่วนการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการที่ส่งผลกระทบต่อความคุ้มค่าในการลงทุน คือ ทั้งกรณีที่ดินทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมต่อปีเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และรายได้จากการจำหน่ายบล็อกประสานลดลงร้อยละ 10 เมื่อพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงรายได้จากการขายบล็อกประสาน พบว่า โรงงานต้นแบบยังเป็นโครงการที่ยังคงน่าลงทุน แต่ถ้ามีปัจจัยที่ส่งผลให้ผลตอบแทนรวมลดลงร้อยละ

28.65 หรือต้นทุนในการดำเนินงานรวมต่อปีเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 45 ที่อัตราคิดลดร้อยละ 7.12 จะทำให้การลงทุนโครงการนี้ไม่คุ้มค่าในการลงทุน ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงที่ผู้ลงทุนต้องให้ความใส่ใจเป็นพิเศษ

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยครั้งต่อไป

แม้ว่าโครงการพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะมีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมในการลงทุน ที่ได้นำเอาเถ้าหนักไปผลิตเป็นบล็อกประสาน และนำไปส่งเสริมถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน แต่ปัจจัยที่สำคัญคือรายได้จากยอดขายผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการเพิ่มเติมแล้ว พบว่ากรณีที่รายได้จากยอดขายผลิตภัณฑ์บล็อกประสานลดลงมากถึงร้อยละ 28.65 จะส่งผลกระทบต่อการลงทุนที่ไม่คุ้มค่า ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรจะดำเนินการวิจัยครั้งต่อไปในหัวข้อประเด็นการศึกษาถึงด้านการตลาด หรือการส่งเสริมและทดสอบตลาดของผลิตภัณฑ์บล็อกประสานจากเถ้าหนักเพิ่มเติม เพื่อให้ชุมชนมีความมั่นใจในประเด็นทางด้านการตลาด และรายได้จากยอดขายผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยฝ่ายจัดการโรงไฟฟ้าแม่เมาะร่วมกับสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และขอขอบคุณผู้บริหาร ผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ทำให้โครงการพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นศูนย์เรียนรู้สำเร็จลุล่วง สามารถเป็นโรงงานต้นแบบให้กับโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า รวมถึงเป็นต้นแบบให้ชุมชนได้มาเรียนรู้เทคโนโลยีการผลิตบล็อกประสานซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของความรับผิดชอบต่อสังคมของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Electricity Generating Authority of Thailand, (2017). Application report for Thailand Quality Awards 2017. Mae Moh power plant context, Mae Moh power plant, page 1.
- [2] Electricity Generation Authority of Thailand (EGAT), (2016). Electricity Generation Department, Mae Moh Power Plant: Annual report on operations of ash and gypsum conveyor systems division, 2016.
- [3] Electricity Generation Authority of Thailand (EGAT), (2016). Byproduct Sales and Contract Management Division, EGAT, Nonthaburi: Criteria and conditions for selling bottom ash Mae Moh power plant, 2016.
- [4] Larpiattaworn, S., (2018). Progress report #1 of the research project topic: The development of interlocking block pilot plant using by-product from Mae Moh power plant. pathumthani: Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR).
- [5] The benefits of bottom ash to promoting community careers., available online: <http://maemoh.egat.com/index.php/93-new/315-252>
- [6] Kokkamhaeng, W., (2008). Training document; Production of quality interlocking blocks. Pathumthani: Expert Centre of Innovative Materials, Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR).
- [7] Saisuthanawit, S. (2018). Development of interlocking block pilot plant using Mae Moh power plant ash. Master of Engineering Thesis Industrial Engineering, Chiangmai University. (in Thai)
- [8] Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR), (2017). Documentation for the research and innovation development grant, Development of interlocking block pilot plant using by-product from Mae Moh power plant project. (in Thai)
- [9] Choponsat A., Minaboon N. (2013). Interlocking block of waste concrete. Research of Rajamangala University of Technology Rattanakosin. (in Thai)
- [10] Amonfa K., (2016). Engineering properties improvement of interlocking block by mixing with sand. Naresuan University Engineering Journal, Vol.11, No.1, January-June 2016, pp.67-73 (in Thai)
- [11] Charoennatkul C., (2014). Interlocking blocks containing oil palm ash and shells waste. journal of community development and life quality. 2(1): 103-112.(in Thai)
- [12] Dasaesamoh, A., Vaji, P., Salae, P., Naesae, N., (2015). Para rubber wood fly ash containing interlocking brick. journal of yala rajabhat university, Vol.10, No.1, January-June 2015, pp.77-86 (in Thai)
- [13] Thubphan, Y., (2008). Project evaluation based on economics. Bangkok: Thammasat University Publisher.
- [14] Sirisomboon, K., Panawon, K. (2016). Feasibility Study on Furnace and Drying Systems for Rubber Smoked Sheet. Engineering Journal Chiang Mai University, 23(2), 15-24. (in Thai).
- [15] Thammasiri K., (2014). The economic and financial cost-benefit analysis of vehicle adoption: hybrid vehicle electric vehicle. Master of Economic Thesis Business Economic, Thammasat University. (in Thai)
- [16] Laophungsak P., Jannachoo N., Ditwiroon N., (2013). Cost-Benefit Analysis of Sanpatong-Hangdong (Phase 1) Bypass Project, Chiangmai. Management Information Systems MIS Journal of Naresuan University, 6(2), 68-83. (in Thai)
- [17] Jantaphan W., (2014). An Economic Worthiness Study of Residential Building Construction Project for Civil Servants and Employees of Nakhon Ratchasima Rajabhat University. (Master's Thesis, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology). (in Thai)

- [18] Boonlert, S. (2003). Cost and return on interlocking block manufacturing business in Chiang Mai province. Master of Accounting Independent study, Chiang Mai University. (in Thai)
- [19] Evan, (2011). The value of business analytics: identifying the path to profitability. Hoboken new jersey: wiley.
- [20] Brealey, Richard A., Stewart C. Myers, and Franklin Allen, (2014). Principles of corporate finance. New york: McGraw hill education.
- [21] Thongsukhowong A., (2016). Cost accounting. Bangkok; SE-EDUCATION Public Company Limited.
- [22] Savings Bonds of the Ministry of Finance in the fiscal year 2018 #2., available online: <https://www.kasikornbank.com/th/promotion/Pages/SavingsBonds2.aspx>
- [23] Minimum Retail Rate: MRR., available online: https://www.ktb.co.th/Download/rateFee/RateFeeDownload_4194loan_05_10_60.pdf
- [24] Nakruk, W., (2011). Decision-making under risk and uncertainty. Information Processing, Management and Application of Economics., Nonthaburi: Sukhothai Thammathirat Open University. (in Thai)

การพัฒนากระบวนการหาจุดเริ่มวิบัติในการวิเคราะห์รอยแตกในมวลหินด้วย
วิธีเอลิเมนต์ฟรีกาลอร์กิน

Development of Crack Initiation Algorithm in Crack Analysis of Rock Mass by
Element Free-Galerkin Method

เอกราช ศิลาบำเพ็ญ¹, พรเกษม จงประดิษฐ์^{2*}, อภิวิชญ์ ทองรักษา³ และ จักราวุธ ต้นสกุล⁴
E. Silabampen¹, P. Jongpradist^{2*}, A. Thongraksa³ and J. Tunsakul⁴

^{1,2,3}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล

^{1,2,3}Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

⁴Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kangwon Campus

* Corresponding author E-mail: pornkasem.jon@kmutt.ac.th

(Received: March 10, 2018 ,Revised: September 7, 2018 ,Accepted: September 24, 2018)

บทคัดย่อ

วิธีเอลิเมนต์ฟรีกาลอร์กินได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการแพร่ขยายของรอยแตก แต่ทว่างานวิจัยที่ผ่านมามุ่งเน้นเปรียบเทียบความถูกต้องของการทำนายทิศทางรอยแตกกับผลการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการที่ทดสอบภายใต้การกำหนดจุดเริ่มวิบัติเป็นหลัก ทำให้ความสนใจต่อการทำนายจุดเริ่มวิบัติได้ถูกละเลย ด้วยเหตุนี้จึงกลายเป็นข้อบกพร่องของวิธีเอลิเมนต์ฟรีกาลอร์กินเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาขนาดจริง โดยเฉพาะปัญหาทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีที่ไม่ทราบจุดเริ่มวิบัติล่วงหน้าได้ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับการประเมินหาการเกิดจุดเริ่มวิบัติเพื่อร่วมใช้กับวิธีการเอลิเมนต์ฟรีกาลอร์กิน การพัฒนาในครั้งนี้ได้วิเคราะห์และถูกตรวจสอบความถูกต้องด้วยเงื่อนไขการวิบัติแบบแรงดึงภายใต้ปัญหาแบบระนาบความเครียด (Plane strain) ของถังเก็บแก๊สรูปโคม่วงกลมภายใต้แรงดันสูงที่มีทั้งผลเฉยเชิงวิเคราะห์และผลการทดสอบแบบจำลองย่อส่วน โดยได้มีการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนสภาพความเค้นในที่เท่ากับ 0.5, 1 และ 3 ที่ทำให้เกิดจุดวิบัติเริ่มต้นที่แตกต่างกัน จากผลการวิเคราะห์พบว่าจุดเริ่มวิบัติที่ทำนายสอดคล้องกับทั้งผลเฉยเชิงวิเคราะห์และผลการทดสอบเป็นอย่างดี ขั้นตอนกระบวนการที่พัฒนาสามารถสะท้อนอิทธิพลของค่าอัตราส่วนสภาพความเค้นในที่ได้ ผลการวิเคราะห์หัตถ์แปรยังแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนกระบวนการที่พัฒนาสามารถสะท้อนอิทธิพลของความลึกและกำลังรับแรงดึงของมวลหินด้วย ขั้นตอนวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นจึงมีความน่าเชื่อถือ

คำสำคัญ : วิธีเอลิเมนต์ฟรีกาลอร์กิน, จุดเริ่มวิบัติ, รอยแตกในหิน

Abstract

The element free-Galerkin (EFG) method has been continuously developed for crack propagation analysis. Previous researches focus on comparing the accuracy of the propagation direction with the results of the experiment in laboratory of which the crack initiation can be well specified. Thus, the attention on crack initiation prediction has been ignored. This becomes the drawback of implementation of EFG in full-scale engineering problem, particularly in the field of geotechnical engineering which the crack initiation point generally cannot be

predetermined. This research aims to develop the algorithms for assessing the initial point of failure to be equipped with the EFG method. The development is based on tensile failure criterion under plane strain condition. The developed algorithm is verified and validated by the failure behavior of rock mass surrounding a gas storage circular tunnel under high internal pressure problem. The in-situ stress ratio of 0.5, 1 and 3 are considered in the study. The analysis results can thus be compared with the existing results of analytical solutions and physical model tests. The comparisons show that the crack initiation points from the prediction using the developed algorithm have good agreement with the close form solutions and the experiments. Moreover, with a series of parametric study, not only the effect of in-situ stress condition, but also those of the depth and rock tensile strength can be simulated by the method developed in this study. The algorithm developed is therefore acceptable.

Keywords : Element free-Galerkin method, Initial crack, Rock fracture

1. บทนำ

พฤติกรรมการแพร่ขยายรอยแตก (Crack propagation) ในหลากหลายการประยุกต์ใช้งานได้ถูกศึกษาอย่างต่อเนื่อง [1,2] เพื่อประโยชน์การประเมินเสถียรภาพและคาดการณ์พฤติกรรมการวิบัติ การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical modeling) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการแพร่ขยายของรอยแตกจึงมีความสำคัญ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element method, FEM) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และได้รับความเชื่อมั่นว่าเป็นวิธีการเชิงตัวเลขที่มีประสิทธิภาพ ในการศึกษาพฤติกรรมแบบจำลองที่มีความต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการแพร่ขยายของรอยแตกเป็นแบบจำลองที่มีความไม่ต่อเนื่อง หากนำวิธี FEM แบบดั้งเดิมมาใช้จำเป็นต้องมีการใช้เทคนิคการขึ้นโครงตาข่ายใหม่ (Remeshing) [15] เพื่อรองรับการขยายตัวของรอยแตก ซึ่งเกี่ยวข้องอย่างมากกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงตาข่าย (Mesh) เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากในการวิเคราะห์ วิธีไร้โครงตาข่าย (Meshless method) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น

วิธีไร้โครงตาข่ายจะสามารถหาการเคลื่อนตัวของรอยแตกจากจุดโหนด (Node) ที่กระจายตัวในโดเมน (Domain) โดยความน่าสนใจของวิธีไร้โครงตาข่ายคือความสามารถในการจัดการกับขอบเขตการเคลื่อนตัวและความไม่ต่อเนื่องของรอยแตก เนื่องจากการไม่มีโครงตาข่ายทำให้เส้นทางรอยแตกสามารถวางตัวอยู่ในโดเมนได้อย่างอิสระ [3] วิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กิน (Element free-Galerkin (EFG) method) เป็นหนึ่ง

ในวิธีไร้โครงตาข่ายที่ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางซึ่งถูกเสนอโดย Belytschko et al. [4] ณ ปัจจุบันวิธี EFG ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงใช้กับงานในสาขาต่างๆ [5,6] อย่างไรก็ตามในงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของการจำลองปัญหาด้วยวิธี EFG กับการทดสอบเป็นหลัก Tunsakul et al.[7] ได้เริ่มนำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมเทคนิคธรณีกับปัญหาการแตกร้าวในมวลหินรอบถังเก็บแก๊สใต้ดินแรงดันสูง วิธีดังกล่าวได้แสดงศักยภาพในการใช้งานทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีสำหรับปัญหาจริง แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวมุ่งเน้นพัฒนาวิธี EFG เพียงการทำนายทิศทางแพร่ขยายรอยแตก การทำนายจุดเริ่มวิบัติได้ถูกละเลย ซึ่งภายใต้สภาพความเค้นในที่ที่ต่างกัน พฤติกรรมการแตกร้าวของมวลหินในปัญหาหนึ่งๆจะแตกต่างกันไปด้วย โดยเฉพาะจุดเริ่มวิบัติ ทำให้ตำแหน่งเริ่มต้นของการวิบัติกลายเป็นที่ไม่ทราบ ดังนั้นเพื่อให้วิธี EFG สามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านวิศวกรรมเทคนิคธรณีอย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการหาจุดเริ่มวิบัติจึงมีความจำเป็นที่จะต้องถูกพัฒนาขึ้น

2. วิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กิน

วิธี EFG มีกระบวนการวิเคราะห์ที่คล้ายกับวิธี FEM แต่ในการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equations) ด้วยวิธี EFG จะอาศัยเพียงข้อมูลที่โหนดโดยปราศจากเอลิเมนต์ที่จัดเรียงในรูปแบบโครงตาข่ายเหมือนในวิธี

FEM ซึ่งเป็นปัญหาในการวิเคราะห์ปัญหาที่ไม่ต่อเนื่อง การศึกษานี้ฟังก์ชันรูปร่าง (Shape function) ในวิธี EFG จะถูกสร้างขึ้นโดยใช้วิธี Moving Least Square [8] ด้วยวิธีดังกล่าว การประมาณค่า Field increment ที่จุดใดๆในโดเมนได้แสดงในสมการที่ 1

$$\Delta\phi(x) = \sum_{j=1}^m p_j(x) a_j(x) = p^T(x) a(x) \quad (1)$$

เมื่อ $\Delta\phi(x)$ คือค่า Field increment, $p(x)$ คือพจน์ของตัวแปรสมการพหุนามกำลัง m , $a(x)$ คือสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามที่ไม่ทราบค่า ซึ่งการศึกษานี้ใช้ฟังก์ชันเชิงเส้นสองมิติ ดังนั้นพจน์ของ $p(x)$ และ $a(x)$ จะเป็นดังสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

$$\begin{aligned} p^T(x) &= [p_1(x) \quad p_2(x) \quad p_3(x)] \\ &= [1 \quad x \quad y] \end{aligned} \quad (2)$$

$$a^T(x) = [a_1(x) \quad a_2(x) \quad a_3(x)] \quad (3)$$

ต่อมาค่า Field increment ที่จุดไหนในโดเมนจะถูกใช้เพื่อสร้าง Weighted squared error [4] ในสมการที่ 4

$$J = \sum_{I=1}^n w(x-x_I) [p^T(x_I) a(x) - \Delta\phi_I]^2 \quad (4)$$

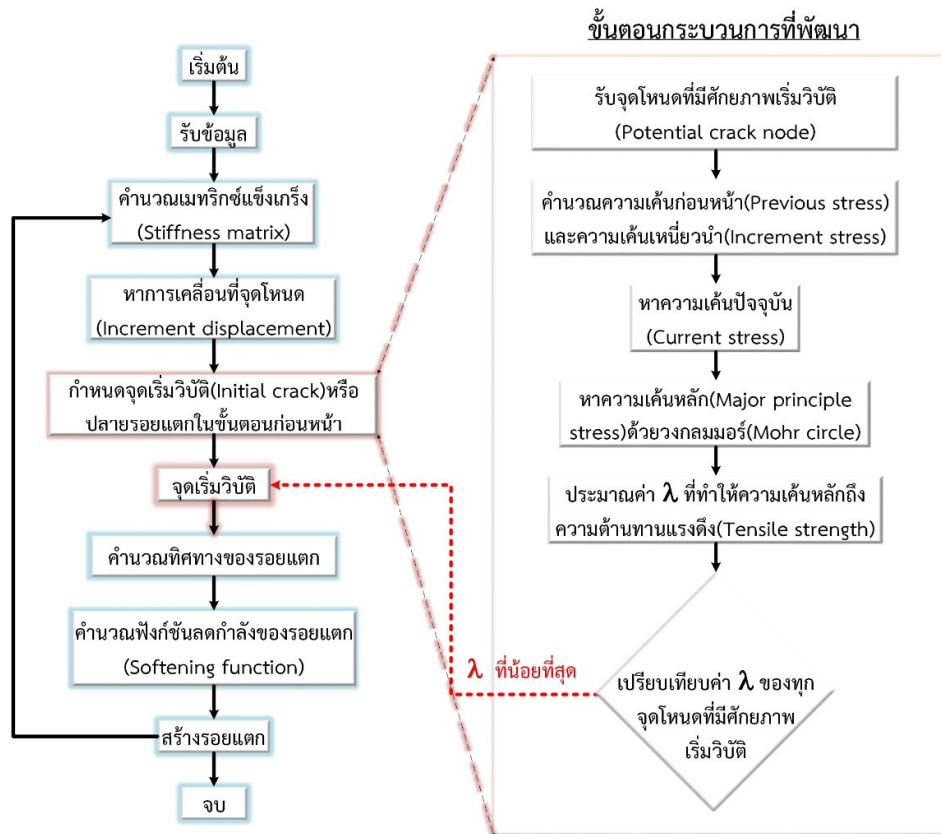
เมื่อ $\Delta\phi_I$ คือค่า Field increment ที่จุดไหน I , x_I คือตำแหน่งของจุดไหน I , $w(x-x_I)$ คือ Weight function ที่ตำแหน่ง x_I โดยถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันที่มีค่าลดลงไปตามระยะทาง $d_I = |x-x_I|$ ซึ่งในการศึกษานี้ Gaussian weight function [9] ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้าง Weight function ซึ่งแสดงดังสมการที่ 5

$$w(d_I) = \begin{cases} \frac{e^{-(d_I/c)^2} - e^{-(d_{ml}/c)^2}}{1 - e^{-(d_{ml}/c)^2}} & d_I \leq d_{ml} \\ 0 & d_I > d_{ml} \end{cases} \quad (5)$$

เมื่อ d_{ml} คือโดเมนที่มีอิทธิพลต่อจุดไหน I , c คือพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการขยายของ Weight function ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากที่ต้องเลือกใช้ d_{ml} และ c ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ฟังก์ชันรูปร่างที่ดีขึ้น ด้วยเหตุนี้ d_{ml} และ c ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันระยะห่างระหว่างจุดไหนที่ถูกสร้างจากพารามิเตอร์อีกตัวที่ถูกเรียกว่าพฤติกรรมระยะห่างของจุดไหน c_I [9] จากนั้น d_{ml} และ c จะถูกเขียนให้อยู่ในเทอมของ c_I ดังสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

$$d_I = d_{\max} c_I \quad (6)$$

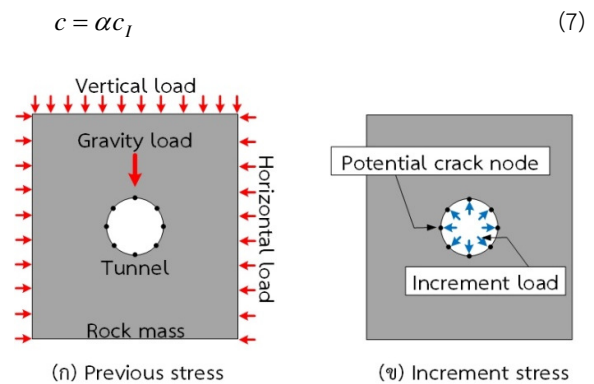
เมื่อ α และ $d_{\max}$ คือค่าคงที่ ซึ่งถูกแนะนำให้มีอัตราส่วนของ $d_{\max}/\alpha$ ไม่เกิน 4.0 เพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานของฟังก์ชันรูปร่างที่ผิดพลาด [9] โดยในการศึกษานี้ $\alpha = 0.625$ และ $d_{\max} = 2.5$ ได้ถูกนำมาใช้งาน



รูปที่ 1 วิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กินและขั้นตอนกระบวนการประเมินจุดเริ่มร้าวที่พัฒนาในการศึกษานี้

3. ขั้นตอนวิธีการหาจุดเริ่มร้าว

ขั้นตอนกระบวนการของวิธี EFG ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยที่ขั้นตอนจะเริ่มจากการกำหนดชุดของพารามิเตอร์ที่สำคัญอาทิ ข้อมูลจุดโหนด, คุณสมบัติวัสดุ, สภาพขอบเขตและลักษณะแรงที่กระทำจะถูกนำเข้ากระบวนการ จากนั้นพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกใช้เพื่อสร้างเมทริกซ์แข็งเกร็ง (Stiffness matrix) ที่ซึ่งนำไปแก่สมการสำหรับคำนวณหาการเคลื่อนที่ของจุดโหนด (Increment displacement) โดยสภาพความเค้นที่เกิดขึ้นจะได้มาจากการเคลื่อนที่ของจุดโหนดถูกคำนวณร่วมกับเมทริกซ์ Constitutive และฟังก์ชันรูปร่าง ต่อจากนั้นกระบวนการจะเข้าสู่ขั้นตอนกระบวนการประเมินจุดเริ่มร้าว (Initial crack assessment) ซึ่งเป็นวิธีการที่ถูกพัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้ จุดเริ่มร้าวที่ต้องเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนวิธีการดังนี้



รูปที่ 2 หลักการ Superposition สำหรับวิเคราะห์ความเค้น

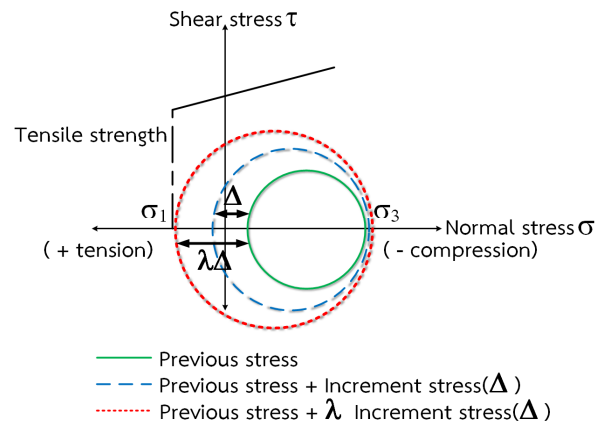
ขั้นตอนกระบวนการประเมินจุดเริ่มร้าวจะเริ่มต้นจากการรับจุดโหนดที่มีศักยภาพ (Potential crack nodes) ที่จะเป็นจุดเริ่มร้าว ซึ่งในปัญหาลักษณะนี้การรวมกันของจุดโหนดที่วางตัวอยู่บนขอบรอบอุโมงค์จะถูกจัดเป็นจุดโหนดที่มีศักยภาพที่จะเป็นจุดเริ่มร้าว จากนั้นกระบวนการจะพิจารณาแรงที่

กระทำกับปัญหาโดยใช้หลักการ Superposition ที่แบ่งแยกแรงกระทำออกเป็นสองประเภท แรงประเภทแรกจะเป็นแรงที่ถูกใช้ในการจำลองสภาวะแวดล้อมของปัญหาที่ทำให้สภาพความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองเหมือนกับสภาพแวดล้อมเริ่มต้น ซึ่งประกอบไปด้วย แรงในแนวดิ่ง (Vertical load) แรงในแนวนอน (Horizontal load) และแรงเนื่องจากน้ำหนักของตัววัสดุเอง (Gravity load) โดยความเค้นที่ได้จากแรงเหล่านี้จะถูกเรียกว่าความเค้นก่อนหน้า (Previous stress) แสดงดังรูปที่ 2 (ก) ต่อมาแรงประเภทที่สองเป็นแรงดันที่ให้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (Increment load) ในอุโมงค์ในแบบจำลองเพื่อมุ่งหวังให้จุดเริ่มวิบัติเกิดขึ้นโดยความเค้นที่ได้จากแรงนี้จะถูกเรียกว่าความเค้นที่เพิ่มขึ้น (Increment stress) แสดงดังรูปที่ 2 (ข) หากนำความเค้นที่ได้จากแรงทั้งสองประเภทรวมเข้าด้วยกันจะถูกเรียกว่าความเค้นปัจจุบัน (Current stress) ซึ่งเป็นสภาพความเค้นจริงที่กระทำกับแบบจำลอง ดังในสมการที่ 8

$$\sigma_{current} = \sigma_{previous} + \sigma_{increment} \quad (8)$$

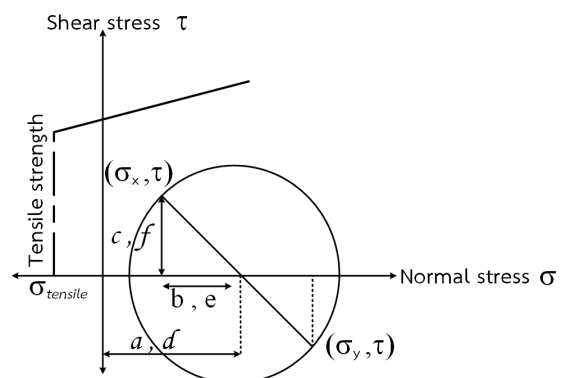
แต่โดยปกติแล้วความเค้นที่เพิ่มขึ้นที่มีจะทำให้จุดเริ่มวิบัติเกิดขึ้นในแบบจำลองจะไม่สามารถทราบค่าได้ตั้งแต่แรกเนื่องจากภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ต่างกันทำให้ความเค้นที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปัญหาแตกต่างกัน ด้วยสาเหตุนี้ความเค้นที่เพิ่มขึ้นจะถูกสมมติให้สร้างจากแรงดันที่มีขนาด 1 หน่วย ความเค้นปัจจุบันที่เกิดจากการรวมกันของความเค้นก่อนหน้ากับความเค้นที่เพิ่มขึ้นที่ได้จากแรงดันขนาด 1 หน่วยจะถูกคำนวณหาความเค้นหลัก (Major principle stress) ด้วยทฤษฎีวงกลมมอร์ (Mohr circle) ความเค้นหลักที่ได้จะถูกนำไปประเมินว่าเท่ากับกับความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) หรือไม่ แต่ทว่าบ่อยครั้งที่ความเค้นหลักที่ได้ข้างต้นยังคงมีค่าไม่ถึงความต้านทานแรงดึง พารามิเตอร์ λ (lamda) จึงสร้างขึ้นเพื่อคูณกับความเค้นที่เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ความเค้นหลักเพิ่มขึ้นจนในที่สุดมีค่าเท่ากับกับความต้านทานแรงดึงดังสมการที่ 9 ซึ่งสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีวงกลมมอร์ที่แสดงในรูปที่ 3

$$\sigma_{tensile} = \sigma_{current}^{major} = \sigma_{previous} + \lambda \sigma_{increment} \quad (9)$$



รูปที่ 3 ตัวอย่างของสภาพความเค้นที่ก่อให้เกิดจุดเริ่มวิบัติโดยอ้างอิงกับวงกลมมอร์

ดังนั้นพารามิเตอร์ λ จึงถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการศึกษาครั้งนี้เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถบ่งชี้ได้ว่าจุดไหนที่มีศักยภาพแต่ละจุดจะเริ่มวิบัติเมื่อใดโดยมีค่า λ ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจุดไหนที่มีค่า λ ต่ำที่สุดจะถูกกำหนดว่าเป็นจุดเริ่มวิบัติ อย่างไรก็ตามจุดเริ่มวิบัติมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นระหว่างจุดไหนที่มีศักยภาพ ด้วยเหตุนี้กระบวนการที่พัฒนาได้มีการป้องกันความผิดพลาดดังกล่าวโดยการสร้างจุดไหนดสมมติ (Dummy node) ขึ้นมาระหว่างจุดไหนดศักยภาพ แล้วคำนวณซ้ำจนกว่าจะได้คำตอบจะเข้าสู่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง [14] นอกจากนี้การหาค่า λ ที่ทำให้จุดเริ่มวิบัติเกิดขึ้น ทฤษฎีวงกลมมอร์ได้ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างสมการ(องค์ประกอบแสดงในรูปที่ 4) และสามารถเขียนอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 รายละเอียดขององค์ประกอบวงกลมมอร์

องค์ประกอบของวงกลมมอร์ที่สถานะเนื่องจากความเค้นก่อนหน้าและความเค้นที่เพิ่มขึ้นสามารถเขียนอธิบายได้ดังสมการที่ 10-12 และ 13-15 ตามลำดับ

$$a = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad (10)$$

$$b = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \quad (11)$$

$$c = \tau \quad (12)$$

$$d = \frac{d\sigma_x + d\sigma_y}{2} \quad (13)$$

$$e = \frac{d\sigma_x - d\sigma_y}{2} \quad (14)$$

$$f = d\tau \quad (15)$$

เมื่อ $\sigma_x, d\sigma_x$ คือความเค้นตั้งฉากที่มีทิศทางตามแนวแกน x ของความเค้นก่อนหน้าและความเค้นเหนี่ยวนำตามลำดับ, $\sigma_y, d\sigma_y$ คือความเค้นตั้งฉากที่มีทิศทางตามแนวแกน y ของความเค้นก่อนหน้าและความเค้นเหนี่ยวนำตามลำดับ, $\tau, d\tau$ คือความเค้นเฉือนของความเค้นก่อนหน้าและความเค้นเหนี่ยวนำตามลำดับ โดยแทนสมการที่ 10-15 ในสมการที่ 9 ซึ่งสามารถเขียนดังนี้

$$\sigma_{tensile} = \frac{(\sigma_x + \lambda d\sigma_x) + (\sigma_y + \lambda d\sigma_y)}{2} + \sqrt{\left(\frac{(\sigma_x + \lambda d\sigma_x) - (\sigma_y + \lambda d\sigma_y)}{2}\right)^2 + (\tau + \lambda d\tau)^2} \quad (16)$$

เมื่อ $\sigma_{tensile}$ คือความต้านทานแรงดึง หากทำการจัดสมการที่ 16 ใหม่ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายจะสามารถเขียนอยู่ในเทอมของสมการพหุนามกำลังสอง (Second degree polynomial) ดังในสมการที่ 17 โดยผลลัพธ์ที่ได้จากสมการข้างต้นจะมีสองคำตอบซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าคำตอบทั้งสองจะมี

เครื่องหมายต่างกันเสมอ ดังนั้นคำตอบที่ λ เป็นค่าบวกจะถูกนำมาใช้งาน เนื่องจากสอดคล้องกับพฤติกรรมของความเค้นที่เพิ่มขึ้นจากการได้รับแรงดันในอุโมงค์สูงขึ้น

$$A\lambda^2 + B\lambda + C = 0 \quad (17)$$

เมื่อ

$$A = d^2 - e^2 - f^2 \quad (18)$$

$$B = 2d(a - \sigma_{tensile}) - 2be - 2cf \quad (19)$$

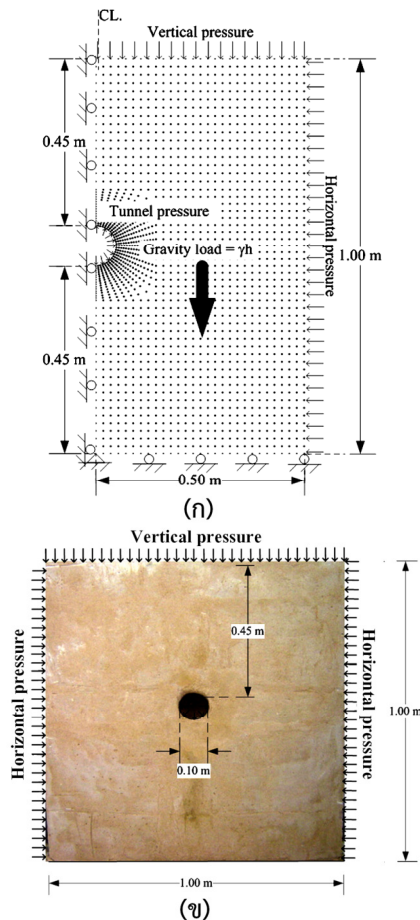
$$C = (\sigma_{tensile} - a)^2 - b^2 - c^2 \quad (20)$$

4. แบบจำลองและผลการวิเคราะห์

4.1 กรณีตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการที่พัฒนา

ขั้นตอนกระบวนการประเมินหาจุดเริ่มวิบัติที่พัฒนาขึ้นจะถูกตรวจสอบความถูกต้องด้วยปัญหาถึงเก็บแก๊สรูปอุโมงค์วงกลมภายใต้แรงดันสูง [7] เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับการศึกษาก่อนหน้านี้ได้ ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบจะถูกสร้างให้เหมือนกับแบบจำลองย่อยส่วน (Physical model) ทุกประการดังรูปที่ 5(ข) โดยมีอุโมงค์รูปวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 เซนติเมตรและอยู่ลึกจากผิวดินด้านบนเท่ากับ 45 เซนติเมตร ซึ่งในการตรวจสอบครั้งจะสร้างแบบจำลองแบบครึ่งเดียวและวิเคราะห์ปัญหาแบบระนาบความเครียด (Plane strain) และคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) โดยมีลักษณะรูปแบบของปัญหาดังรูปที่ 5(ก) ขอบเขต (Boundary condition) ของแบบจำลองขยายออกไปทางข้างจากแกนสมมาตรเป็นระยะ 50 เซนติเมตร เช่นเดียวกันขอบเขตแนวตั้งขยายออกเป็นระยะ 100 เซนติเมตร นอกจากนี้ลักษณะรูปแบบการให้แรงกระทำสำหรับการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในรูปที่ 5 (ก) เช่นเดียวกัน สำหรับคุณสมบัติของวัสดุในการวิเคราะห์ครั้งนี้จะใช้คุณสมบัติเดียวกันกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Tunsakul et al. [7] โดยแสดงในตารางที่ 1 กรณีวิเคราะห์เป็นแรงดันในแนวตั้งเท่ากับ 12.5 kPa และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเค้นในที่ (In-situ stress ratio, k) เป็นสามค่า

คือ 0.5, 1 และ 3 ตามลำดับ เพื่อให้ครอบคลุมอัตราส่วนความ
เค้นในที่ ที่เป็นไปได้ตามธรรมชาติ [16] ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 5 ขนาดและการให้แรงของปัญหา (ก)แบบจำลองในEFG
(ข)แบบจำลองย่อยของการศึกษาก่อนหน้า[7]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้เปรียบเทียบกับการศึกษา ก่อนหน้า [7]

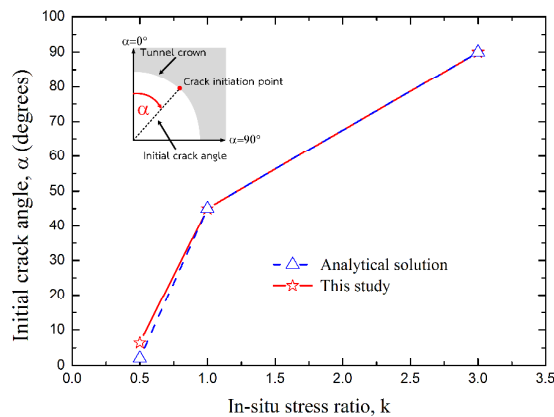
ปริมาณ	ขนาด	หน่วย
หน่วยน้ำหนัก	20	kN / m^3
ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด	0.18	MPa
ค่ากำลังต้านทานแรงดึง	0.013	MPa
มอดูลัสของยัง	25	MPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.2	-
Fracture energy	0.5	N / m

ตารางที่ 2 กรณีที่ใช้เปรียบเทียบการวิเคราะห์

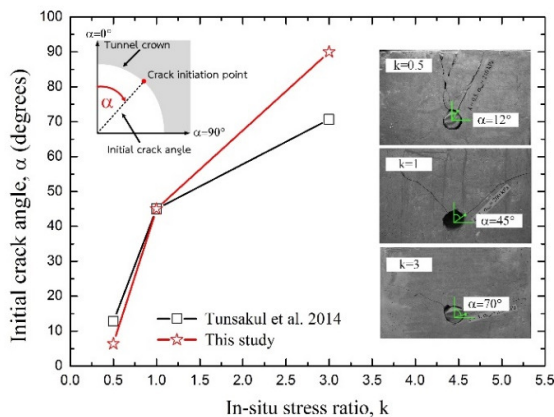
อัตราส่วนความ เค้นในที่	แรงดันที่กระทำ(kPa)	
	ทิศทางแนวนิ่ง	ทิศทางแนวราบ
0.5	12.5	6.25
1	12.5	12.5
3	12.5	37.5

ผลการวิเคราะห์การประเมินหาจุดเริ่มวิบัติของปัญหา
อุโมงค์รูปวงกลม แสดงด้วยตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติที่ถูกนิยามด้วย
มุมที่วัดจากหลังคาด้านบนของอุโมงค์ไปถึงตำแหน่งการเริ่มวิบัติ α
(Initial crack angle) จากผลการวิเคราะห์พบว่าในแต่ละกรณี
ของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเค้นในที่ ตำแหน่งจุดเริ่ม
วิบัติมีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามรูปที่ 6 และ 7 ซึ่งจะเห็น
ว่ากรณีที่อัตราส่วนความเค้นในที่เท่ากับ 0.5 ตำแหน่งการเริ่ม
วิบัติจะเกิดขึ้นที่ด้านบนของอุโมงค์ทำมุมเท่ากับ 6 องศา กรณี
ต่อมาอัตราส่วนความเค้นในที่เท่ากับ 1 จะพบว่าจุดเริ่มวิบัติจะ
ปรากฏขึ้นที่ 45 องศา และกรณีสุดท้ายอัตราส่วนความเค้นในที่
เท่ากับ 3 ตำแหน่งการเกิดจุดเริ่มวิบัติจะเกิดขึ้นที่ 90 องศา ผล
การวิเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการที่พัฒนาจะถูกตรวจสอบ
ความถูกต้อง (Verification) โดยเปรียบเทียบกับผลเฉลยเชิง
วิเคราะห์ที่มีอยู่ (Analytical solution) ซึ่งได้จากค่าความเค้น
แรงดึงสูงสุดตามแนวเส้นรอบวง (อุโมงค์) ที่พิจารณาจาก
การศึกษาความเค้นตามแนวเส้นรอบวงจากอิทธิพลของแรงดัน
ภายในอุโมงค์ (Internal pressure) [12] ร่วมกับการศึกษา
ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงจากอิทธิพลของแรงดันที่กระทำ
บนขอบเขต (Boundary) [13] ผลเฉลยดังกล่าวสามารถยืนยัน
ได้ว่าตำแหน่งของความเค้นแรงดึงสูงสุดแตกต่างกันไปตาม
สภาวะอัตราส่วนความเค้นในที่ จากผลเปรียบเทียบแสดงให้เห็น
ถึงความสอดคล้องอันดีระหว่างวิธีทั้งสอง (รูปที่ 6) อย่างไร
ก็ตามสำหรับกรณีอัตราส่วนความเค้นในที่เท่ากับ 0.5
ผลเปรียบเทียบมีความแตกต่างเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากความ
ผิดพลาดในการคำนวณความเค้นที่อยู่ใกล้ขอบเขตของวิธี EFG
ข้อด้อยดังกล่าวสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการขึ้นแบบจำลอง
ขนาดเต็ม (Full model) หลังจากนั้นผลการวิเคราะห์ถูก
เปรียบเทียบกับแบบจำลองย่อยของ Tunsakul et al. [7]
(รูปที่ 7) เพื่อทดสอบการใช้งาน (Validation) พบว่าผลลัพธ์ทั้ง
สองไปในทางเดียวกัน กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

สภาพความเค้นในที่ทำให้เกิดจุดวิบัติเริ่มต้นที่ต่างกันโดยที่อัตราส่วนสภาพความเค้นในที่มีค่าต่ำ จุดเริ่มวิบัติจะเกิดขึ้นที่หลังค่อโมงค์และจะเคลื่อนที่ไปด้านข้างค่อโมงค์เมื่ออัตราส่วนสภาพความเค้นในที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยความแตกต่างของตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติระหว่างวิธีที่พัฒนามากับผลการทดสอบทางห้องปฏิบัติการอาจเกิดจากสภาพการให้แรงดันในการทดสอบที่ใช้ระบบถูกลมแบบไปกับขอบของตัวอย่างทดสอบด้วยความคาดหวังว่าจะคงที่สม่ำเสมอตลอดขอบด้านข้างของตัวอย่างตลอดการทดสอบ อย่างไรก็ตามเมื่อตัวอย่างเกิดการเสียรูปขณะทดสอบ มีความเป็นไปได้ที่ความเค้นจะไม่สม่ำเสมอในบางจุด ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น สภาพแรงดันที่ให้คงที่ตลอดการวิเคราะห์



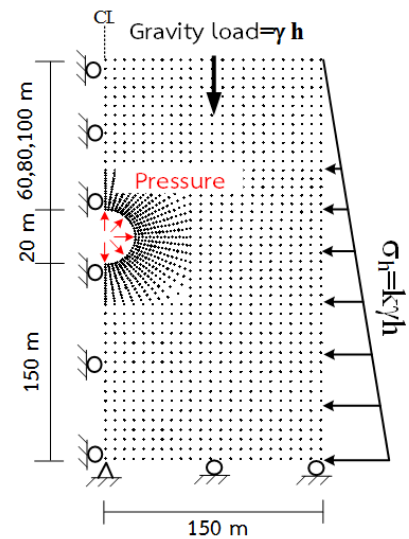
รูปที่ 6 ตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติของขั้นตอนกระบวนการที่พัฒนาเปรียบเทียบกับ Analytical solution



รูปที่ 7 ตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติของขั้นตอนกระบวนการที่พัฒนาเปรียบเทียบกับแบบจำลองย่อส่วน

4.2 กรณีศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลกับจุดเริ่มวิบัติ

ต่อมากระบวนการประเมินหาจุดเริ่มวิบัติที่ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องแล้ว (ในหัวข้อที่ 4.1) ได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาแบบขนาดจริง (Full-scale problem) โดยแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้มีลักษณะปัญหาเหมือนกับกรณีตรวจสอบก่อนหน้านี้คือถึงเก็บแก๊สรูปอุโมงค์วงกลมภายใต้แรงดันสูงที่ขึ้นแบบจำลองแบบครึ่งเดียวและวิเคราะห์ปัญหาแบบระนาบความเครียด แต่ทว่าขนาดแบบจำลองจะมีขนาดใหญ่กว่าโดยสร้างขึ้นให้เท่ากับขนาดจริงและคุณสมบัติหินจริงที่เป็นหินแข็ง อุโมงค์รูปวงกลมขนาดจริงจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20 เมตรและอยู่ลึกจากผิวดินลงไปเท่ากับ 60, 80 และ 100 เมตร ขอบเขตแบบจำลองในแนวตั้งส่วนล่างและแนวราบจะเท่ากับ 150 เมตร โดยวัดจากท้องอุโมงค์และแกนสมมาตรตามลำดับ ลักษณะการให้แรงทางด้านข้างมีรูปแบบแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งขนาดแรงแปรเปลี่ยนไปตามความลึก สำหรับการศึกษาในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาเชิงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติซึ่งได้แก่ อัตราส่วนความเค้นใน, ค่าความต้านทานแรงดึง[10] และความลึกของอุโมงค์ดังแสดงในตารางที่ 3

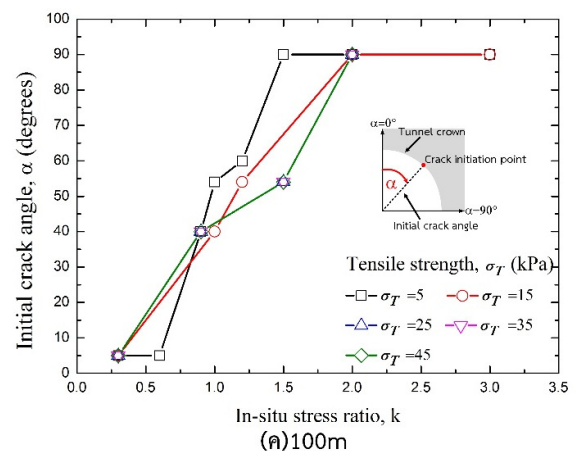
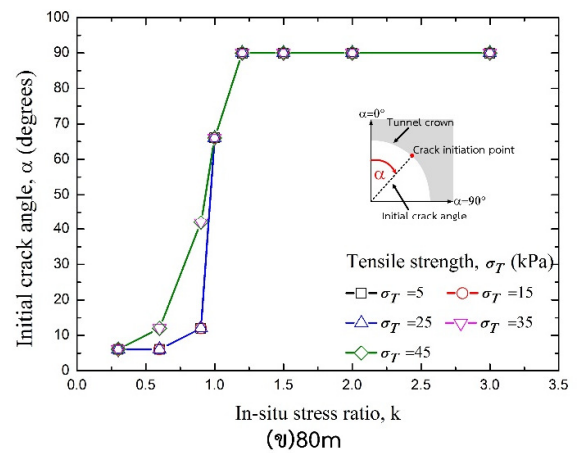
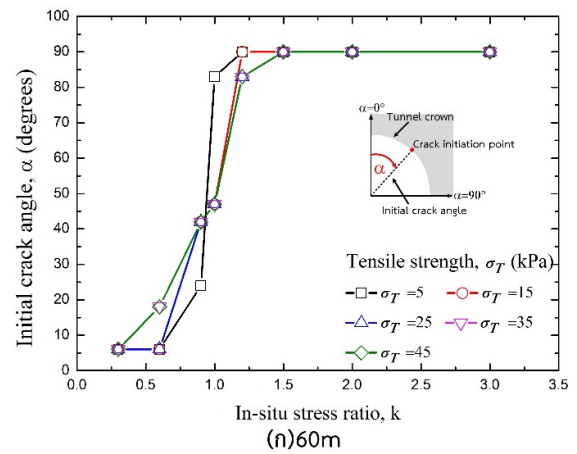


รูปที่ 8 ลักษณะขนาดและการให้แรงในการวิเคราะห์ปัญหาขนาดจริง

ตารางที่ 3 คุณสมบัติวัสดุและตัวแปรที่มีอิทธิพลกับจุดเริ่มวิบัติ

ปริมาณ	ขนาด	หน่วย
หน่วยน้ำหนัก [6]	26	kN / m^3
ความลึก	60,80,100	m
ค่ากำลังต้านทานแรงดึง	5,15,25,35,45	kPa
มอดูลัสของยัง	36	GPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.2	-
อัตราส่วนความเค้นในที่	0.3,0.6,0.9,1,1.2, 1.5,2,3	-
Fracture energy	100	N / m

จากผลการวิเคราะห์จุดเริ่มต้นวิบัติของมวลหินรอบอุโมงค์ ด้วยอัตราส่วนความเค้นในที่ที่แตกต่างกัน ต่อความลึกอุโมงค์ที่ 60, 80 และ 100 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ ผลลัพธ์ของทุกความลึกบ่งชี้ว่าอัตราส่วนความเค้นในที่ที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติ โดยพิสัยอัตราส่วนความเค้นในที่ที่ศึกษา พบว่าที่อัตราส่วนความเค้นในที่ 0.3 และ 0.6 จุดวิบัติจะเกิดขึ้นที่บริเวณหลังคาอุโมงค์ (α ประมาณ 6 – 20 องศา) จากนั้นตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติจะเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันโดยมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางผนังด้านข้างของอุโมงค์มากขึ้น (α เปลี่ยนไปประมาณ 10 – 90 องศา) ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงอัตราส่วนความเค้นในที่เท่ากับ 0.9 ถึง 1.5



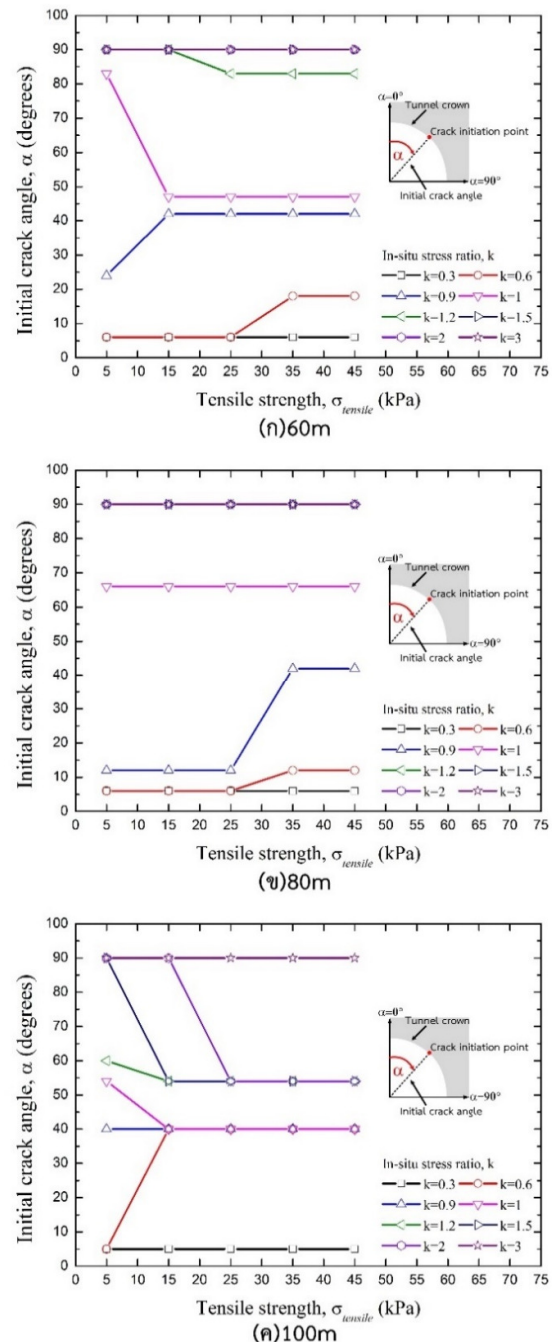
รูปที่ 9 อิทธิพลของความเค้นในที่ที่ส่งผลกระทบกับตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติสำหรับความลึกอุโมงค์ที่ 60, 80 และ 100 เมตร

ในขณะที่อัตราส่วนความเค้นในที่เท่ากับ 2 และ 3 จุดวิบัติจะเกิดขึ้นที่ผนังด้านข้างอุโมงค์ (α เท่ากับ 90 องศา) ซึ่งสาเหตุเนื่องมาจากในสภาพรับแรงดันสูงภายในอุโมงค์ ความเค้นหลักที่เป็นแรงอัดที่มากกว่าจะอยู่ตามแนวรัศมี กรณีที่อัตราส่วนความเค้นในที่มีค่าที่ต่ำ ส่งผลให้ความเค้นที่กระทำในแนวตั้งมีค่าที่มากกว่าความเค้นทางด้านข้าง บริเวณหลังคาอุโมงค์ที่ความเค้นหลักที่ค่ามากกว่าอยู่ในแนวรัศมีจึงเกิดการวิบัติได้ง่ายที่สุด ด้วยเหตุผลเดียวกันกรณีที่อัตราส่วนความเค้นในที่มีค่าที่สูง ค่าความเค้นแนวราบมีค่ามากกว่าซึ่งกระทำบริเวณด้านข้างอุโมงค์ โดยหลังจากเพิ่มแรงดันภายในแล้วทำให้ความเค้นหลักบริเวณผนังด้านข้างอุโมงค์ก็มีโอกาสเกิดการวิบัติมากกว่าบริเวณอื่น

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติต่อความต้านทานแรงดึงของมวลหินสำหรับความลึกของอุโมงค์ 60, 80 และ 100 เมตร (รูปที่ 10 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ) จากการสังเกตพบว่าในกรณีของอัตราส่วนความเค้นในที่น้อยกว่า 1 จะพบตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติอาจเกิดขึ้นบริเวณรอบๆ หลังคาอุโมงค์ (α ประมาณ 6 – 40 องศา) และเมื่อความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติจะมีโอกาสที่จะเคลื่อนที่จากหลังคาไปยังด้านข้างอุโมงค์มากขึ้น ตัวอย่างเช่นที่อัตราส่วนความเค้นในที่ 0.6 และ 0.9 ของความลึก 60 และ 80 เมตร สำหรับกรณีของอัตราส่วนความเค้นในที่มีมากกว่า 1 ผลการวิเคราะห์พบว่าตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติจะเริ่มเคลื่อนที่ขึ้นที่ผนังด้านข้าง (α ประมาณ 55 – 90 องศา) และเมื่อความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติจะเคลื่อนที่จากด้านข้างไปยังหลังคาอุโมงค์มากขึ้น เนื่องจากมวลหินรอบอุโมงค์ที่มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ แรงดันที่อัดให้อุโมงค์เกิดจุดเริ่มต้นวิบัติจะมีค่าน้อยกว่ามวลหินที่มีความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่า สภาพความเค้นในที่เริ่มต้นจึงยังคงส่งผลมาก หากการวิบัติเกิดที่ระดับแรงดันสูง แรงดันจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสภาพความเค้นหลักเป็นสาเหตุให้จุดเริ่มวิบัติเปลี่ยนแปลงในสภาพที่อัตราส่วนความเค้นในที่เดียวกัน[11]

อิทธิพลของความลึกอุโมงค์ต่อตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติที่ค่าอัตราส่วนความเค้นในที่ต่างๆ แสดงในรูปที่ 11 จากการสังเกตแนวโน้มสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกที่มีอัตราส่วนความเค้นในที่มีค่าที่ต่ำๆ อาทิ 0.3 และอัตราส่วนความเค้นในที่มีค่าที่สูง อาทิ 3 ความลึกอุโมงค์จะไม่แสดงผลกระทบ

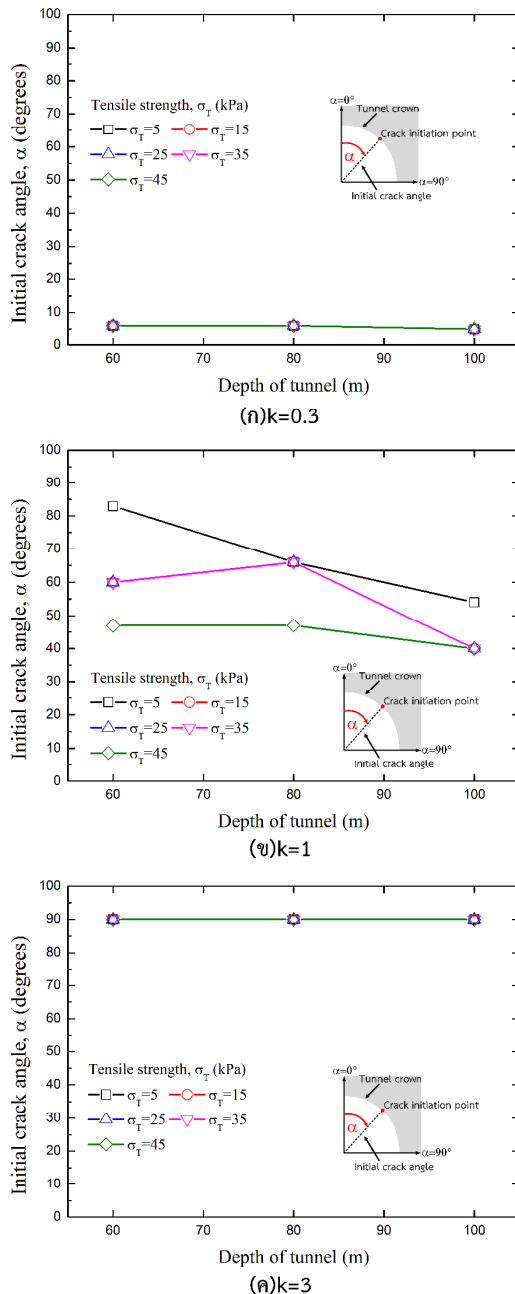
ต่อตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติ ในขณะที่กลุ่มสองที่มีอัตราส่วนความเค้นในที่เท่ากับ 1 (รูปที่ 11 (ข)) ตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติมีแนวโน้มที่ลดลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น ความลึกอุโมงค์จะมีอิทธิพลต่อตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอิทธิพลของสองตัวแปรที่กล่าวไปก่อนหน้านี้



รูปที่ 10 อิทธิพลของความต้านทานแรงดึงที่ส่งผลกระทบทับกับตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติสำหรับความลึกอุโมงค์ที่ 60 , 80 และ 100 เมตร

5. สรุปผล

บทความนี้ได้นำเสนอขั้นตอนกระบวนการประเมินหาจุดเริ่มวิบัติด้วยเกณฑ์ความต้านทานแรงดึงในวิธีเอลิเมนต์ฟริกาเลอร์กินเพื่อประเมินตำแหน่งเริ่มต้นวิบัติของมวลหินรอบอุโมงค์วงกลมอัดแรงดันแรงดันภายใต้สภาวะระนาบความเครียด ซึ่งได้ข้อสรุปดังนี้



รูปที่ 11 อิทธิพลของความความลึกอุโมงค์ที่ส่งผลกระทบกับตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติสำหรับความความเค้นใน 0.3, 1 และ 3

1) การตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนกระบวนการที่พัฒนาได้ถูกยืนยันผ่านการเปรียบเทียบกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์และผลการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของการศึกษาท่อน้ำซึ่งพบว่าผลการวิเคราะห์กับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์และผลการทดสอบ สอดคล้องกันเป็นอย่างดี

2) ขั้นตอนกระบวนการที่พัฒนาได้ถูกนำไปใช้ในการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติได้แก่ อัตราส่วนความเค้นในที่, ความต้านทานแรงดึงและความลึก ผลการวิเคราะห์พบว่าอัตราส่วนความเค้นในที่และความต้านทานแรงดึงมีอิทธิพลอย่างมากกับตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติ ในขณะที่ความลึกมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังทำให้เห็นว่าขั้นตอนกระบวนการที่พัฒนามีความสามารถในการสะท้อนอิทธิพลของค่าอัตราส่วนสภาพความเค้นในที่แล้วยังมีความสามารถสะท้อนอิทธิพลของค่าความต้านทานแรงดึงและความลึกได้อีกด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่มอบทุนเพชรโยธา และทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์ เลขที่ทุน CE-KMUTT-6211 สำหรับสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yen, F., Feng, X., Pan, P. & Li, S. (2015). Rock initiation and propagation simulation under compression-shear loading using continuous- discontinuous cellular automaton method. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 28(4), 736-746.
- [2] Yang, Z.J. & Chen, J. (2005). Finite element modelling of multiple cohesive discrete crack propagation in reinforced concrete beams. *Engineering Fracture Mechanics*, 72(14), 2280-2297.
- [3] Chen, J.S., Hillman, M. & Chi, S.W. (2017). Meshfree Methods: Progress Made after 20 Years. *Journal of Engineering Mechanics*.
- [4] Belytschko, T., Lu, Y.Y. & Gu, L. (2009). Element Free-Galerkin Method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37, 229-256.

- [5] Soparat, P. & Nanakorn, P. (2008). Analysis of Cohesive Crack Growth by the Element-Free Galerkin Method. *Journal of Mechanics*, 24(1), 45-54.
- [6] Tunsakul, J., Jongpradist, P., Hyung-Mok, K. & Nanakorn, P. (2018). Evaluation of rock fracture patterns based on the element-free Galerkin method for stability assessment of a highly pressurized gas storage cavern. *Acta Geotechnica*. 13(4). 817-832.
- [7] Tunsakul, J., Jongpradist, P., Soparat, P., Kongkitkul, W. & Nanakorn, P. (2014). Analysis of fracture propagation in a rock mass surrounding a tunnel under high internal pressure by the element-free Galerkin method. *Computers and Geotechnics*, 55, 78-90.
- [8] Lancaster, P. & Salkauskas, K. (1981). Surface Generated by Moving Least Square Methods. *Mathematics of Computation*, 37(155), 141-158.
- [9] Belytschko, T. & Fleming, M. (1999). Smoothing, enrichment and contact in the element-free Galerkin method. *Computers & Structures*, 71(2), 173-196.
- [10] Farmer, L.W. (1983). *Engineering Behaviour of Rocks*, Second Edition. Chapman and Hall, London. 10-15.
- [11] Punya-In, Y. (2014). Parametric study on Fracture Behaviors of Rock masses around High Pressurized Gas Storage Cavern by Numerical Analysis, Master of engineering thesis, Civil Engineering, Faculty of Engineering. King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- [12] Savin, G.N. (1961). *Stress concentration around holes*. Pergamon Press Publisher.
- [13] Bray J.W. (1987). Some applications of elastic theory. In *Analytical and computational methods in engineering rock mechanics*. Allen and Unwin Publisher. 32-94.
- [14] Silabampen, E. (2017). Development of Crack Initiation Algorithm in Crack Analysis of Rock Mass by Element Free-Galerkin Method. Master of engineering thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi. 41-60.
- [15] Trädegård, A., Nilsson, F. & Östlund, S. (1998). FEM-remeshing technique applied to crack growth problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 160. 115-131.
- [16] Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *J. Geotech. Eng. Div., ASCE* 106(GT9). 1013-1035.

การศึกษาการจำแนกประเภทและการหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่จากความเครียดทาง
พลศาสตร์ของสะพานโดยใช้แบบจำลองย่อส่วน
A Study of Classification and Weight Determination of Moving Truck from Dynamic
Bridge Strain by Using Scaled Model

ศุภชัย เชื้อเกตุ และ พัทธพงษ์ อาสนจินดา*
S. Chuaket and P. Asnachinda*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University
*Corresponding author E-mail: pattarapong@eng.buu.ac.th

(Received: December 1, 2017, Revised: November 6, 2018, Accepted: November 15, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการจำแนกประเภทพร้อมหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ โดยใช้เพียงผลตอบสนองความเครียดของสะพานและปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลาล้อหรือกล้องวิดีโอสำหรับประมวลผลภาพถ่าย ซึ่งสามารถลดต้นทุนของระบบและลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ข้อมูลจากผลตอบสนองจราจรจำนวนมาก โดยระบบที่นำเสนอสามารถจำแนกประเภทของรถบรรทุกจากจำนวนเพลาล้อและระยะห่างเพลาล้อซึ่งคำนวณจากสัญญาณความเครียดในหน้าตัดสะพานที่ได้ถูกปรับปรุงค่าเพื่อเพิ่มความชัดเจนและความถูกต้องในการคำนวณ และใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์วิเคราะห์หาความเร็ว จำนวนเพลาล้อ และระยะห่างเพลาล้อของรถบรรทุกจากรูปแบบของสัญญาณความเครียดที่สองตำแหน่งจราจร จากนั้นจึงคำนวณน้ำหนักเพลาล้อและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ปัญหาแบบย้อนกลับของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำเคลื่อนที่กับผลตอบสนองความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพานด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชันและเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน และเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักด้วยเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติในกระบวนการสุดท้าย การศึกษาได้พิจารณารถบรรทุกตั้งแต่ 2 เพลาล้อถึง 7 เพลาล้อ โดยผลการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วนพบว่า ระบบที่นำเสนอสามารถจำแนกประเภทรถบรรทุกได้ถูกต้องในทุกกรณีทดสอบ และหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกได้โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 3.75 และที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ระบบมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดร้อยละ 8.58

คำสำคัญ: การจำแนกประเภทรถบรรทุก ความเครียดของสะพาน การหาน้ำหนักเคลื่อนที่โดยใช้สะพาน แบบจำลองย่อส่วน

Abstract

This research aimed to develop the classification and weight determination of moving truck by using only bridge strain response without axle detector or video camera to compute vehicle type from recorded photos. This was to reduce the cost and complexity of data analysis due to large number of measurement responses. The proposed system was capable to classify vehicle configuration from amount of axles and axle spacings. Bridge strain signals in each bridge section were modified to improve signal distinction and accuracy in the computation. Concept of correlation coefficient of strain responses between two sections of the bridge was employed to analyze

moving speed, amount of axles and axle spacings. Based on the inverse problem of moving load and bridge dynamic response relationship, the system identified axle weight and gross weight using regularization least square with singular value decomposition (SVD) method. Moreover, to improve the accuracy of the analyzed truck weight, the updated static component (USC) technique was utilized in the final process. The study considered various truck type from 2-axle until 7-axle configurations type. Regarding to the experimental result from scaled model, it was found that the proposed system was able to successfully classify the truck configuration for all cases. The determination of truck gross weight allowed the average identification error of 3.75%. The maximum identification error was 8.58% at 95% confidence level.

Keywords: truck classification, bridge strain, bridge weigh-in-motion (B-WIM), scaled model

1. บทนำ

จากข้อจำกัดของด่านชั่งน้ำหนักถาวร (weigh station) ที่เกิดการชะลอตัวของกระแสจราจรบนเส้นทางที่มีการตรวจวัดและไม่สามารถควบคุมน้ำหนักได้อย่างทั่วถึงเนื่องจากผู้ขับขี่สามารถหลีกเลี่ยงสถานีตรวจวัด จึงได้มีการพัฒนาระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ที่เป็นระบบหาน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่อยู่บนผิวทาง โดยอาศัยโหลดเซลล์ (load cell) ฝังอยู่ใต้ผิวทางเพื่อใช้ในการตรวจวัดน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน โดยระบบ WIM มีหน้าที่คัดกรองรถบรรทุกก่อนเข้าสู่ด่านชั่งน้ำหนักถาวร เพื่อลดปริมาณการชะลอตัวของรถบรรทุกที่ต้องเข้าชั่งน้ำหนักในด่านชั่งน้ำหนักถาวร อย่างไรก็ตาม โหลดเซลล์ของระบบ WIM ซึ่งต้องติดตั้งบนผิวทางนั้นจะถูกสัมผัสกับล้อรถบรรทุกหนักโดยตรง ซึ่งการกระแทกจากเพลลา และการเคลื่อนตัวในแนวราบจากการเบรคหรือเร่งของล้อทำให้โหลดเซลล์เสื่อมคุณภาพได้เร็ว อีกทั้งในการซ่อมบำรุงจะต้องปิดเส้นทางจราจร เพื่อรีดผิวทางในการเข้าถึงอุปกรณ์ตรวจวัด ทำให้ระบบ WIM นี้มีค่าใช้จ่ายที่สูงในการใช้งานและซ่อมบำรุง เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบ WIM จึงมีการพัฒนาระบบชั่งน้ำหนักเคลื่อนที่โดยใช้ผลตอบสนองของสะพานแทนการใช้โหลดเซลล์บนผิวทาง โดยการนำมาตรวัดความเครียด (strain gage) ไปติดตั้งไว้ที่ผิวด้านใต้ของแผ่นพื้นสะพาน แล้วจึงนำข้อมูลความเครียดที่ตรวจวัดได้ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักรถบรรทุกในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยอาศัยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (inverse problem) ด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์ โดยระบบดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่าระบบชั่งน้ำหนักเคลื่อนที่โดยใช้สะพาน หรือ Bridge Weigh-In-Motion (B-WIM) แรกเริ่มนั้น ระบบ B-WIM จะประมาณ

น้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกโดยอาศัยความสัมพันธ์ของน้ำหนักเพลลาและค่าความเครียดของสะพาน ด้วยหลักการของเส้นอิทธิพลทางสถิตย (static influence line) โดยพิจารณาค่าความเครียดของพื้นสะพานเนื่องจากแรงกระทำขนาดหนึ่งหน่วยกระทำในตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน [1] ทั้งนี้ระบบจำเป็นที่จะต้องทราบความเร็วของรถบรรทุกเพื่อระบุตำแหน่งเพลลาขณะเคลื่อนที่บนสะพานได้ถูกต้อง จึงจะสามารถประมาณน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นระบบ B-WIM จึงต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (axle detector) บนผิวทาง ซึ่งอาจเป็นแบบท่อวัดความดันลม (pressure tube) หรือแบบเทปสวิทช์ (tape switch) ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลานั้นจะใช้ในการคำนวณหาความเร็ว ระยะทางเพลลา และจำนวนเพลลาของรถบรรทุก ก่อนที่จะคำนวณหาน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมเป็นลำดับสุดท้าย



รูปที่ 1 อุปกรณ์ตรวจจับเพลลาแบบติดตั้งบนผิวทาง [3]

โดยผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากหลักการเส้นอิทธิพลทางสถิตยนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากความเครียดของสะพานนั้นเป็นสัญญาณทางพลศาสตร์เนื่องจากผลของอัตราเร็วของรถ ความขรุขระของผิวทาง และปฏิสัมพันธ์

ระหว่างยานพาหนะและสะพาน (vehicle-bridge interaction) ดังนั้นการวิเคราะห์โดยใช้เส้นอิทธิพลความเครียดทางสถิติจึงเกิดความคลาดเคลื่อนสูง อีกทั้งการจำลองโครงสร้างยังพิจารณาสะพานด้วยแบบจำลองคาน

ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาวิธีการหาน้ำหนักเพลาบรรทุกขณะเคลื่อนที่ในโดเมนของเวลา (time-domain) [2] โดยพิจารณาการวิเคราะห์ด้วยหลักการทางพลศาสตร์ ความถูกต้องของน้ำหนักที่หาได้จะตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบกับระหว่างปฏิกริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิกริยาตอบสนองที่สร้างขึ้นจากน้ำหนักที่คำนวณได้ โดยวิธีการดังกล่าวสามารถคำนวณหาน้ำหนักรวมของยานพาหนะได้และมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกินร้อยละ 20 อย่างไรก็ตาม วิธีการหาน้ำหนักรถจากหลักการข้างต้นทั้งสองวิธีนั้นจำเป็นต้องทราบจำนวนเพลา ความเร็ว และตำแหน่งเพลาของรถบรรทุกก่อนจึงจะสามารถคำนวณน้ำหนักได้ในระดับความถูกต้องดังกล่าว

ต่อมาคณะกรรมการยุโรป หรือ WAVE [3] ได้พัฒนาระบบ B-WIM ซึ่งยังใช้เส้นอิทธิพลทางสถิติ แต่เป็นระบบที่ปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลา (free of axle detector, FAD) หรือเรียกว่า FAD B-WIM โดยการใช้ FAD sensor ติดตั้งบริเวณใต้ท้องสะพานแทนการใช้อุปกรณ์แบบเดิมที่ต้องติดตั้งบนผิวทาง เพื่อเลี่ยงการใช้อุปกรณ์บนผิวทาง (nothing on road, NOR) ที่เสื่อมสภาพเร็วและสามารถสังเกตได้เพื่อลดการเสี่ยงเส้นทางของผู้ขับขี่ที่อาจสังเกตเห็นอุปกรณ์บนผิวทาง ระบบ FAD นี้สามารถคำนวณความเร็ว จำนวนเพลาและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกได้โดยการเทียบลักษณะสัญญาณความเครียดจาก FAD sensor ที่ติดตั้งไว้สองตำแหน่งที่ผิวด้านใต้ของพื้นสะพาน อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้ FAD sensor จะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อล้อของรถบรรทุกเคลื่อนที่อยู่ในแนวที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ติดตั้ง FAD sensor อีกทั้งจำเป็นต้องเลือกสะพานที่มีความเหมาะสมกับการใช้ FAD sensor ตามข้อเสนอแนะของ WAVE เนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงกับความชัดเจนของสัญญาณที่ส่งผลกระทบต่อระดับความถูกต้องของการคำนวณข้อมูลระยะห่างเพลาบรรทุก สำหรับผลการคำนวณน้ำหนักรวมทางสถิติพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 25 ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของสะพาน

จากการศึกษาความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานแบบปราศจากข้อมูลระยะห่างเพลาและข้อมูลความเร็วรถ จึงมี

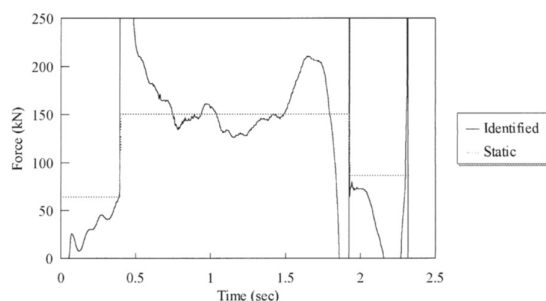
งานวิจัยที่เสนอวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกโดยใช้เพียงข้อมูลความเครียดของสะพานโดยใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุด (least squares) ระหว่างความเครียดที่ตรวจวัดและความเครียดทางทฤษฎีจากหลักการของเส้นอิทธิพลทางสถิติ โดยทำการประมาณค่าความเร็ว ระยะช่วงเพลา และน้ำหนักรถบรรทุกที่ทำให้เกิดผลต่างยกกำลังสองน้อยที่สุด [4] โดยผลการศึกษาพบว่าการใช้เพียงสัญญาณความเครียดในการประมาณน้ำหนักเพลาสามารถทำได้และมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 15 อย่างไรก็ตามวิธีการคำนวณยังจำกัดอยู่ที่รถบรรทุกประเภท 2 เพลาเท่านั้น

เพื่อพิจารณาตำแหน่งของเพลาบรรทุกที่ชัดเจนขึ้นจึงมีการศึกษาผลของการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gage) หลายตัวในหน้าตัด โดยติดตั้งกระจายตามตำแหน่งในแนวขวางของแต่ละหน้าตัดสะพาน [5] ซึ่งพบว่าจะสามารถนำสัญญาณความเครียดของมาตรวัดความเครียดในแต่ละช่องจราจรมารวมกันและหาผลต่างกับผลรวมสัญญาณในอีกช่องจราจร จะได้ลักษณะสัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจนมากขึ้นที่บ่งบอกถึงจำนวนและตำแหน่งของเพลาบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานได้

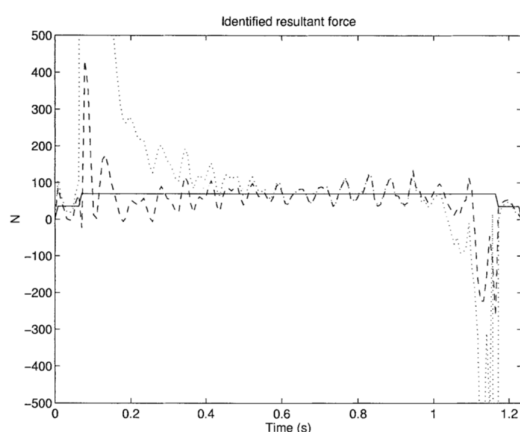
ในการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการทางพลศาสตร์นั้น พบว่าการวิเคราะห์จะได้ผลลัพธ์ที่มีความแปรปรวนของน้ำหนักเพลาเนื่องจากปัญหา ill-condition ของเมตริกซ์ในทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงของน้ำหนักเพลา โดยเฉพาะค่าน้ำหนักเพลา ณ เวลาที่เคลื่อนผ่านบริเวณจุดรองรับของสะพาน [6] ดังตัวอย่างในรูปที่ 2 ดังนั้นเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน (regularization) ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดความแปรปรวนของน้ำหนักเพลา เพื่อให้มีค่าสมเหตุสมผลมากขึ้น [7,8,9,10] ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 อย่างไรก็ตามยังพบว่าถึงแม้จะลดความแปรปรวนของน้ำหนักเพลาโดยส่วนมากได้ แต่บริเวณจุดรองรับของสะพานยังมีค่าน้ำหนักเพลาที่ต่ำกว่าปกติอยู่มาก

จากนั้นจึงมีงานวิจัยที่พยายามเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักเพลาให้สูงขึ้น โดยพัฒนาการคำนวณในลักษณะการคำนวณซ้ำเพื่อเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักเพลาบริเวณใกล้จุดรองรับของสะพาน ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า เทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (Update Static Component Technique) หรือเรียกโดยย่อว่าเทคนิค USC [11,12] โดยผลการศึกษาพบว่าน้ำหนักรถบรรทุกรวมทางสถิติที่คำนวณซ้ำสามารถเพิ่มความถูกต้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน

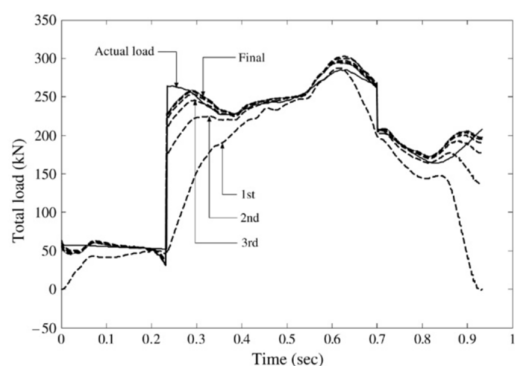
ร้อยละ 5 เท่านั้น ดังตัวอย่างของกราฟน้ำหนักบรรทุกที่วิเคราะห์ได้ในรูปที่ 4



รูปที่ 2 ลักษณะความแปรปรวนสูงของน้ำหนักบรรทุกรวมของรถบรรทุกจากผลการทดสอบภาคสนาม ซึ่งวิเคราะห์โดยไม่ได้ใช้เทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน [6]



รูปที่ 3 ลักษณะน้ำหนักบรรทุกรวมของรถบรรทุกที่ไม่ใช้เทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน (เส้นไขปลา) และใช้เทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน (เส้นประ) เทียบกับน้ำหนักทางสถิติ (เส้นทึบ) [8]



รูปที่ 4 ลักษณะน้ำหนักบรรทุกรวมของรถบรรทุกที่เพิ่มความถูกต้องด้วยเทคนิคการคำนวณซ้ำ USC [11]

ต่อมาได้มีการศึกษาเทคนิค USC กับการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน และติดตั้งมาตรวัดความเครียดหลายตัวในหน้าตัดและพิจารณาค่าความเครียดเฉลี่ยในหน้าตัดเดียวกันในการวิเคราะห์ [12] ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์สามารถได้ค่าน้ำหนักเพลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ไม่แตกต่างกันไม่ว่ารถบรรทุกจะสัญจรในช่องจราจรใด อีกทั้งผลการศึกษาเชิงตัวแปรพบว่ารถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำจะให้ผลการคำนวณน้ำหนักที่มีแนวโน้มดีกว่ารถบรรทุกที่มีน้ำหนักเบาและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง อย่างไรก็ตามวิธีการคำนวณน้ำหนักจำเป็นต้องทราบความเร็วและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกจึงจะสามารถคำนวณน้ำหนักได้

จากการศึกษาการหาความเร็วและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยการใช้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน โดยการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าสามารถหาความเร็วของการสัญจรได้อย่างถูกต้อง มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 2 และสามารถจำแนกประเภทของรถบรรทุกได้ทุกกรณี [13] ต่อมาได้ทำการศึกษาการจำแนกประเภทและการหาน้ำหนักของรถบรรทุกจากความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพานพบว่าสามารถจำแนกประเภทรถบรรทุกได้ทุกกรณีและสามารถคำนวณหาน้ำหนักรวมรถบรรทุกได้อย่างถูกต้องโดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 4 โดยศึกษากรณีรถบรรทุกประเภท 2-4 เพลา [14]

ในกรณีที่พิจารณาเฉพาะค่าน้ำหนักทางสถิติของน้ำหนักเพลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกนั้น อาจสามารถพิจารณาหลักการวิเคราะห์โดยใช้หลักของการแยกเส้นอิทธิพลความเครียด (strain influence line) ของโครงสร้างสะพานจริงจากการทดสอบภาคสนาม ซึ่งได้ผลการทดสอบที่มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ [15,16] อย่างไรก็ตามระดับความถูกต้องของระบบจะขึ้นอยู่กับ การทดสอบในการปรับเทียบหาเส้นอิทธิพลความเครียดเพื่อใช้ในการคำนวณ ซึ่งเส้นอิทธิพลความเครียดจะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงตามระดับความเร็วของรถบรรทุกหรือปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางพลศาสตร์ ซึ่งส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของรถบรรทุกที่อาจมีรูปแบบหรือสัญจรในความเร็วที่แตกต่างจากการปรับเทียบ รวมถึงผลจากการทำซ้ำ

จากงานวิจัยในอดีตดังกล่าวข้างต้นนั้น งานวิจัยส่วนใหญ่นั้นยังอยู่ในระดับการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [1,2,10] หรือการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน [4,5,7,8,9,11,12,13,14] และผลลัพธ์ของวิธีการคำนวณบางวิธียังมีระดับความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูง [1,2,6,7,8,9,10] และด้วยข้อจำกัดของวิธีการที่จำเป็นต้องทราบประเภท ความเร็ว จำนวนเพลลาและตำแหน่งของรถบรรทุกในช่วงเวลาที่บันทึกข้อมูล [1,2,6,7,8,9,10,11,12] และข้อจำกัดด้านความสามารถในการวิเคราะห์กับรถบรรทุกบางประเภทเท่านั้น [4,5,13,14] และการทดสอบภาคสนามยังมีความคลาดเคลื่อนสูง [3,6] หรือยังมีข้อจำกัดด้านระดับความถูกต้องซึ่งขึ้นกับการเปรียบเทียบภาคสนาม [15,16]

งานวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีจำแนกประเภทและคำนวณน้ำหนักของรถบรรทุกโดยใช้เพียงผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของสัญญาณความเครียดที่ติดตั้งได้ทั้งสะพานเพียงอย่างเดียว เพื่อพัฒนาวิธีการหาความเร็ว จำนวนเพลลา และระยะห่างเพลลาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลในการจำแนกประเภทรถบรรทุก และคำนวณน้ำหนักเป็นลำดับสุดท้าย ซึ่งประโยชน์ของการศึกษาจะสามารถนำไปพัฒนาในการทดสอบภาคสนามต่อไปได้ เพื่อสามารถนำไปใช้ตรวจสอบและประเมินการบรรทุกเกินพิกัดของรถบรรทุกหนักตามที่กฎหมายกำหนดได้ โดยระเบียบวิธีวิจัยนั้นจะประยุกต์หลักการปรับปรุงสัญญาณความเครียด [5] เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับเพลลา ศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อประเมินความเป็นไปได้และระดับความถูกต้องของการหาความเร็ว จำนวนเพลลา และระยะห่างเพลลา ด้วยสัญญาณความเครียดเพียงอย่างเดียว จากรถบรรทุกประเภทต่าง ๆ ตั้งแต่ประเภท 2 เพลลาถึง 7 เพลลา เพื่อให้สามารถใช้ได้กับรถบรรทุกหลายประเภทได้ จากนั้นจึงนำข้อมูลการจำแนกประเภท จำนวนเพลลา ระยะช่วงเพลลา และความเร็ว ที่คำนวณได้ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักของรถบรรทุกโดยหลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีเรกูลาร์ไรเซชันและซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน [7] และใช้เทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (USC) [10,11] เพื่อเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักรถบรรทุก ทั้งนี้ งานวิจัยนี้มีขอบเขตในการศึกษาโดยการทดสอบผ่านแบบจำลองย่อส่วนของสะพานและรถบรรทุก เพื่อให้สามารถ

ประเมินประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอจากการทดสอบของรถบรรทุกหลากหลายประเภท ที่มีน้ำหนัก และระดับความเร็วที่แตกต่างกัน ก่อนพัฒนาการวิจัยในการทดสอบภาคสนามกับโครงสร้างสะพานจริงต่อไป

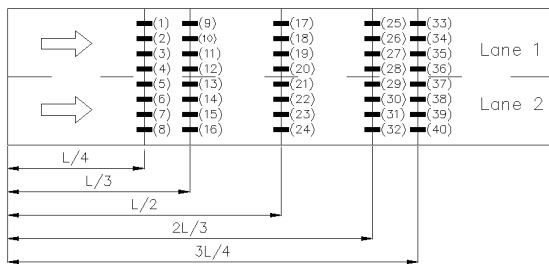
2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนการจำแนกประเภท และน้ำหนักของรถบรรทุกจากสัญญาณความเครียดทางพลศาสตร์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรก คือการหาความเร็วโดยใช้หลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ขั้นตอนที่สอง คือการวิเคราะห์หาจำนวนและระยะห่างเพลลา ซึ่งขั้นตอนนี้จะสามารถจำแนกประเภทรถบรรทุกได้ด้วยหลักการวิเคราะห์จุดยอด (peaks) ของสัญญาณที่บ่งบอกถึงตำแหน่งของเพลลาของรถบรรทุก และในขั้นตอนสุดท้าย คือการคำนวณน้ำหนักรถบรรทุกด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน และใช้เทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (USC technique) เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับการคำนวณน้ำหนักรถบรรทุก อย่างไรก็ตามวิธีการในขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สองจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสัญญาณความเครียดเพื่อใช้ในการจำแนกประเภทรถบรรทุกโดยมีรายละเอียดดังหัวข้อที่ 2.1 และหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการหาความเร็ว การจำแนกประเภทรถบรรทุก และการหาน้ำหนักรถบรรทุกจะอธิบายในหัวข้อที่ 2.2 ถึง 2.4 ตามลำดับ

2.1 การปรับปรุงสัญญาณความเครียดสำหรับการจำแนกประเภทรถบรรทุก

การนำสัญญาณความเครียดในหน้าตัดสะพานทั้งสองหน้าตัดมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อหาความเร็ว จะพบว่าหากสัญญาณความเครียดมีลักษณะความสูงในบริเวณที่ตรวจวัดไม่มาก หรือไม่สามารสังเกตเห็นยอดของความเครียดบริเวณจุดตรวจวัดได้อย่างชัดเจน จะทำให้ไม่สามารถคำนวณหาความเร็วของรถบรรทุกได้ [8] ดังนั้นการปรับปรุงสัญญาณความเครียดให้มีความชัดเจนบ่งบอกถึงตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านจุดตรวจวัดจะช่วยทำให้สามารถคำนวณหาความเร็วของรถบรรทุกได้ ทั้งนี้เนื่องจากจะสามารถคำนวณหาความเร็วของรถบรรทุกได้แล้วยังสามารถใช้สัญญาณความเครียดดังกล่าวคำนวณหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกได้ จากข้อมูลทางด้านความเร็ว จำนวนเพลลา

และระยะห่างเพลารถบรรทุกทำให้สามารถจำแนกประเภทของรถบรรทุกได้ ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดทั้งหมด 5 หน้าตัดเพื่อใช้ในการคำนวณน้ำหนักเพลานในกรณีที่มีจำนวนเพลามากขึ้น และติดตั้งมาตรวัดความเครียดหน้าตัดละ 8 ตัว เพื่อใช้ในการปรับปรุงสัญญาณความเครียดในการจำแนกประเภทรถบรรทุก ดังแสดงในรูปที่ 5 การปรับปรุงสัญญาณความเครียดเพื่อจำแนกประเภทของรถบรรทุกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) โดยการหาค่าสัมบูรณ์ผลต่างของผลรวมสัญญาณความเครียดในช่องจราจรที่ 1 กับช่องจราจรที่ 2



รูปที่ 5 ผังตำแหน่งมาตรวัดความเครียดของสะพาน

$$\tilde{\epsilon}_i = \left| \sum \epsilon_i^{lane1} - \sum \epsilon_i^{lane2} \right| \quad (1)$$

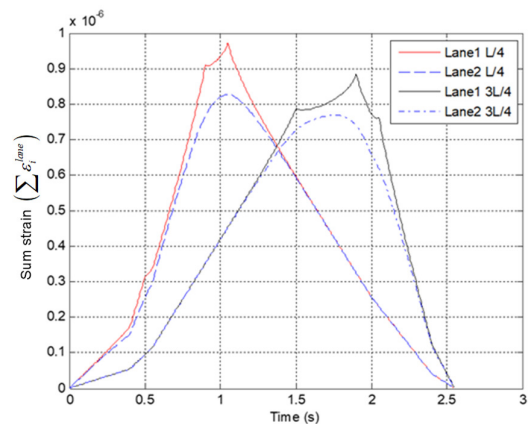
โดยที่ $\tilde{\epsilon}_i$ คือ เวกเตอร์สัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่ i ที่ปรับปรุงค่าแล้ว

$\sum \epsilon_i^{lane1}$ คือ เวกเตอร์ผลรวมของสัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่ i ที่ได้จากมาตรวัดความเครียดทุกตัวในช่องจราจรที่ 1

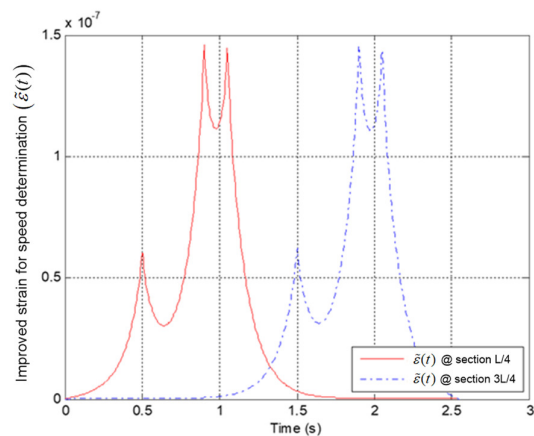
$\sum \epsilon_i^{lane2}$ คือ เวกเตอร์ผลรวมของสัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่ i ที่ได้จากมาตรวัดความเครียดทุกตัวในช่องจราจรที่ 2

รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างผลรวมของสัญญาณความเครียดทั้งสองช่องจราจร ณ หน้าตัด $L/4$ และ $3L/4$ เมื่อรถบรรทุกทุกคันเคลื่อนที่ผ่านในช่องจราจรที่ 1 จากการจำลองสัญญาณในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง โดยจำลองสะพานเป็นแผ่นบางและพิจารณาสัญญาณความเครียดจากน้ำหนักบรรทุกทุกตัวแรงกระทำแบบจุด และเคลื่อนแรงกระทำตามความยาวสะพานด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกทางสถิตย์คงที่ ซึ่งพบว่า

กราฟของผลรวมความเครียดในช่องจราจรที่แรงกระทำเคลื่อนที่ผ่านจะมียอดของสัญญาณเนื่องจากเพลารถ ในขณะที่ผลรวมความเครียดในอีกช่องจราจรจะไม่สามารถสังเกตเห็นผลของเพลารถได้ จึงทำให้ผลต่างของผลรวมความเครียดระหว่างช่องจราจรดังรูปที่ 7 โดยแกนตั้งของกราฟคือค่าความเครียดที่ใช้คำนวณความเร็ว ซึ่งได้จากการหาผลต่างของผลรวมค่าความเครียดระหว่างสองช่องจราจรดังสมการที่ (1) ซึ่งจากยอดของกราฟจะสามารถสังเกตได้ถึงจำนวนเพลารถและนำไปใช้หาความเร็วและระยะห่างเพลารถต่อไปได้



รูปที่ 6 ตัวอย่างผลรวมสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร ณ หน้าตัด $L/4$ และ $3L/4$ เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ในช่องจราจรที่ 1



รูปที่ 7 ตัวอย่างผลต่างของผลรวมความเครียดระหว่างสองช่องจราจรจากสัญญาณตัวอย่างในรูปที่ 6

จากสมการที่ (1) จะเห็นได้ว่ารถบรรทุกสามารถสัญจรบนช่องจราจรใดก็ได้ เนื่องจากพิจารณาเฉพาะรูปร่างของสัญญาณ

ความเครียดที่ปรับปรุงแล้วเท่านั้น จึงสามารถพิจารณาค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างผลรวมของสัญญาณความเครียดระหว่างสองช่องจรรยาเพื่อนำไปใช้ในการจำแนกประเภทรถบรรทุกได้ต่อไป

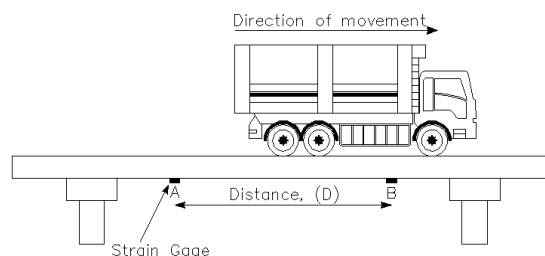
อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้มีขอบเขตการพิจารณาแยกประเภทและหาหน้าหนักรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ข้ามสะพานทีละคัน ซึ่งยังไม่พิจารณาผลของเหตุการณ์ที่มียานพาหนะคันอื่นเคลื่อนที่ข้ามสะพานพร้อมกันในอีกช่องจราจร

2.2 การหาความเร็วจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

การหาความเร็วของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพานที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด สามารถคำนวณได้ภายใต้สมมติฐานที่พิจารณาโดยประมาณว่ารถบรรทุกเคลื่อนที่ข้ามสะพานด้วยความเร็วคงที่ โดยใช้หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) จากข้อมูลสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้ว 2 หน้าตัดสะพาน ตัวอย่างดังรูปที่ 8 พิจารณาสัญญาณความเครียดของสะพานที่ตำแหน่ง A และ B ซึ่งอยู่ในระยะ $L/4$ และ $3L/4$ ตามลำดับ ซึ่งหน้าตัดสองจุดนี้อยู่ห่างกันเป็นระยะ D ซึ่งมีค่าเท่ากับ $L/2$ ซึ่งหลักการคือหากทราบเวลาที่ใช้ที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสองหน้าตัดนี้ได้ ก็จะสามารถคำนวณความเร็วได้ด้วยสมมติฐานของความเร็วคงที่ ดังนั้นหากสามารถพิจารณาจากกราฟสัญญาณความเครียดซึ่งทราบตำแหน่งเพลารถบรรทุกของทั้งสองหน้าตัดได้ จะสามารถใช้หลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณความเครียดสองหน้าตัดเพื่อหาเวลาที่เคลื่อนที่ผ่านระยะ D ได้ ทั้งนี้ก่อนที่จะใช้หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์คำนวณหาความเร็วรถบรรทุกต้องทำการปรับปรุงสัญญาณความเครียดสำหรับจำแนกประเภทรถบรรทุกก่อนซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) จะได้สัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้วที่มีค่า $\bar{\epsilon}_A$ และ $\bar{\epsilon}_B$ ที่บริเวณหน้า $L/4$ และ $3L/4$ ตามลำดับ

หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถคำนวณเวลาระหว่างสัญญาณความเครียดจากสองหน้าตัด ซึ่งเป็นเวลาที่รถบรรทุกใช้ในการเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B ดังนั้นเมื่อทราบระยะห่างระหว่างหน้าตัดจึงทำให้สามารถคำนวณความเร็วของรถบรรทุกได้จากหลักการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามเนื่องจากงานวิจัยนี้ติดตั้งมาตรวัดความเครียดจำนวน 5 หน้าตัด

ที่ระยะ $L/4$, $L/3$, $L/2$, $2L/3$ และ $3L/4$ ดังนั้นการคำนวณความเร็วสามารถพิจารณาที่หน้าตัด $L/3$ และ $2L/3$ ได้เช่นกัน



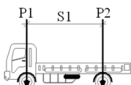
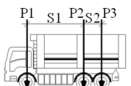
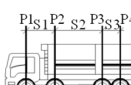
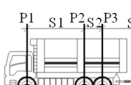
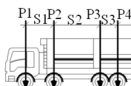
รูปที่ 8 การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกผ่านสะพาน

2.3 การหาจำนวนเพลและระยะห่างเพล

การหาจำนวนเพลและระยะห่างเพลจะวิเคราะห์จากลักษณะทางกายภาพของสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้ว โดยเลือกใช้สัญญาณความเครียดบริเวณหน้าตัด $L/2$ เนื่องจากบริเวณกึ่งกลางสะพานจะเกิดการโก่งตัวมากกว่าบริเวณอื่น เมื่อทำการปรับปรุงความเครียดด้วยสมการที่ (1) แล้ว จะได้สัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจน บ่งบอกถึงตำแหน่งเพล การพิจารณาของสัญญาณที่ปรับปรุงแล้วในช่วงระหว่างเพลหน้าถึงเพลหลังที่มีนัยสำคัญบ่งบอกถึงลักษณะและตำแหน่งเพลของรถบรรทุกในแต่ละประเภทในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ผ่านจุดตรวจวัดที่ได้ติดตั้งไว้บริเวณใต้ท้องสะพาน และเนื่องจากการพิจารณาจำนวนเพลและระยะห่างเพลนั้นจะพิจารณาจากจำนวนและตำแหน่งของยอดของสัญญาณเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ขั้นตอนการตรวจจบบยอดสัญญาณทำได้สะดวก จึงนำค่าส่วนต่างความเครียดระหว่างช่องจรรยาจากสมการที่ (1) ไปหารด้วยค่าสูงสุด (maximum normalized) เพื่อให้เป็นค่าความเครียดซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับหนึ่งหน่วยดังแสดงในรูปที่ 9

การหาระยะห่างเพลโดยใช้ฟังก์ชัน *findpeaks* ในโปรแกรม MATLAB ตรวจจบบยอดของสัญญาณที่อยู่ในช่วงระยะห่างเพลที่มากที่สุดที่คำนวณได้ เพื่อให้ได้ยอดสัญญาณที่บ่งบอกตำแหน่งเพลรถบรรทุก แล้วจึงคำนวณระยะห่างเพลจากตำแหน่งยอดสัญญาณที่ตรวจวัดจากนั้นจึงแยกประเภทรถบรรทุกจากลักษณะทางกายภาพตามเงื่อนไขของระยะห่างเพลและจำนวนเพลที่คำนวณได้ โดยพิจารณาระยะห่างเพลที่บ่งบอกว่าเพลเหล่านั้นเพลเดียว หรือเพลคู่ ดังแสดงในตารางที่ 1

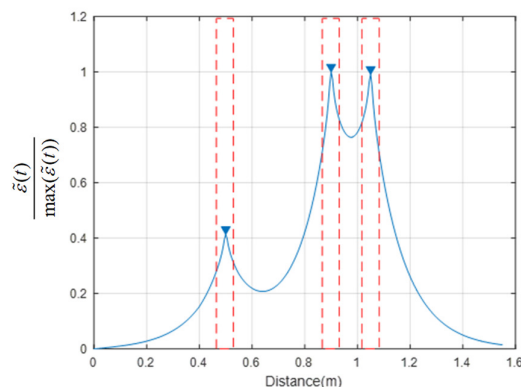
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการจำแนกประเภทรถบรรทุก

Truck type	Conditions :	
	No. of axle	Axle Spacing
	2	$S1 < a$ $S1 > b$
	3	$S1 < a$ $S1 > S2$ $S2 < b$
	4	$S1 > b$ $S1 < S2$ $S2 > S3$ $S2 < a$ $S3 < b$
	5	$S1 < a$ $S1 > S2$ $S2 < b$ $S3 < S4$ $S3 > b$ $S4 < a$ $S4 > b$
	6	$S1 < S2$ $S1 > b$ $S2 < a$ $S2 > S3$ $S3 < b$ $S4 < S5$ $S4 > b$ $S5 < a$ $S5 > b$
	7	$S1 > b$ $S1 < S2$ $S2 < a$ $S2 > S3$ $S3 < b$ $S4 < a$ $S4 > b$ $S4 < S5$ $S5 < a$ $S5 > b$ $S6 < b$

* หมายเหตุ $a = 0.8$ เมตร และ $b = 0.15$ เมตร สำหรับแบบจำลองรถบรรทุกย่อย (เทียบเท่าระยะในรถบรรทุกจริงที่ระยะ 8 เมตรและ 1.5 เมตร ตามลำดับ)

โดยที่ a คือระยะความยาวช่วงเพลามากที่สุดที่เป็นไปได้สำหรับช่วงเพลารถบรรทุก ซึ่งหากระบบคานวณระยะช่วงเพลามากกว่าค่านี้จะพิจารณาว่าเป็นยานพาหนะคนละคัน และ b คือระยะความยาวที่มากที่สุดของกลุ่มเพลาคู่ เช่น เพลาคู่หลังของรถบรรทุกสิบล้อ ซึ่งหากระบบคานวณระยะช่วงเพลามากกว่าค่านี้ จะพิจารณาว่าสองเพลานั้นเป็นเพลาคู่เดียว โดย

ระยะที่พิจารณาสำหรับการทดลองนี้พิจารณาระยะของแบบจำลองรถบรรทุกย่อยส่วนที่ค่า a และ b เท่ากับ 0.80 และ 0.15 เมตร ตามลำดับ ซึ่งเทียบเท่าในมิติของรถบรรทุกจริงที่ระยะ 8 เมตรและ 1.5 เมตร ตามลำดับระยะห่างเพลากลุ่มที่มากที่สุดใช้เป็นเงื่อนไขในการจำแนกโดยมีค่า 0.15 และ 0.20 เทียบเท่าระยะห่างเพลากลุ่มที่มากที่สุดของรถบรรทุกจริงที่มีค่า 1.5 และ 2.0 เมตร ตามลำดับ จากการย่อยส่วนลงจากขนาดจริง 10 เท่า



รูปที่ 9 สัญลักษณ์ความเครียดที่ใช้ระบุตำแหน่งเพลารถบรรทุกที่ได้จากสมการที่ (1) ซึ่งแปลงให้มีค่าสูงสุดหนึ่งหน่วยด้วยการหารค่าสูงสุด

2.4 การหาหน้าหนักรถบรรทุกด้วยความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพาน

การหาผลตอบสนองของสะพานโดยการพิจารณาจากแรงที่กระทำแบบจุดเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสะพานด้วยการวิเคราะห์การสั่นไหวของสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) โดยพิจารณาน้ำหนักเพลารถบรรทุกด้วยแรงกระทำแบบจุดที่อยู่ในโดเมนของเวลาด้วยแบบจำลองดังรูปที่ 10 และจำลองโครงสร้างสะพานด้วยชิ้นส่วนคาน (beam element) ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยสามารถสร้างสมการการเคลื่อนที่เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักเพลากับการเปลี่ยนตำแหน่งของสะพานได้ดังสมการที่ (2)

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{Y}(x(t))\hat{\mathbf{P}}(t) \quad (2)$$

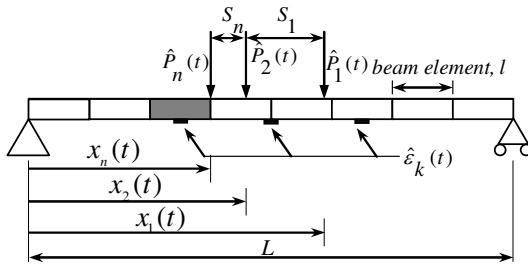
เมื่อ $\mathbf{u}(t)$ คือ เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งของสะพาน มีขนาด $d.o.f. \times n$ เมื่อ $d.o.f.$ คือจำนวนดีกรีความอิสระของสะพาน และ n คือจำนวนข้อมูลตรวจวัด ซึ่งหาได้จากผลคูณ

ของเวลาที่ตรวจวัดสัญญาณเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านกับความถี่บันทึกข้อมูล (sampling rate) ในหน่วย Hz

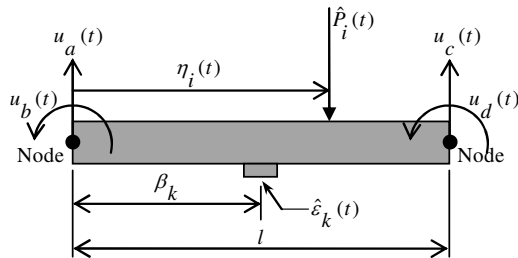
$\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ และ $\mathbf{K}$ คือ เมตริกซ์มวล เมตริกซ์ความหน่วงและเมตริกซ์สติฟเนสของสะพานตามลำดับ ซึ่งเป็นเมตริกซ์จัตุรัสมีขนาด $d.o.f. \times d.o.f.$

$\hat{\mathbf{P}}(t)$ คือ น้ำหนักเพลลาของรถบรรทุก มีขนาด $n_p \times n$ โดย n_p คือจำนวนเพลลาของรถบรรทุก

$\mathbf{Y}(x(t))$ คือฟังก์ชันรูปร่างสำหรับแปลงน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกให้เป็นแรงกระทำที่ข้อของชิ้นส่วนคาน มีขนาด $d.o.f. \times n_p$



รูปที่ 10 ระบบการหาน้ำหนักระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน



รูปที่ 11 ชิ้นส่วนคานในแบบจำลองสะพาน

สมการที่ (2) สามารถถูกจัดรูปให้อยู่ในความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งที่ข้อกับความเครียดตรวจวัดได้ โดยอาศัยวิธี state space เพื่อลดอันดับอนุพันธ์ให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับ 1 ซึ่งจะสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังสมการที่ (3)

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\hat{\mathbf{P}} \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาแต่ละจุดข้อมูลตรวจวัด จะได้ว่า

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \dot{\mathbf{u}} \end{bmatrix}_{2d.o.f. \times 1} \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{2d.o.f. \times 2d.o.f.} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Y} \end{bmatrix}_{2d.o.f. \times n_p} \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{P}} = [\hat{P}_1 \quad \hat{P}_2 \quad \dots \quad \hat{P}_{n_p}]^T_{n_p \times 1} \quad (7)$$

โดยที่ $\mathbf{X}$ คือ state variable ซึ่งประกอบด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งที่ข้อ $\mathbf{u}(t)$ และความเร็วของการเปลี่ยนตำแหน่งที่ข้อ $\dot{\mathbf{u}}(t)$

ทั้งนี้ผลตอบสนองที่ข้อของสะพาน $\mathbf{X}$ สามารถเชื่อมโยงกับค่าความเครียด ณ จุดตรวจวัดที่ k จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (8) ซึ่งจะสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (9)

$$\varepsilon_k = -\left(\frac{\bar{y}}{I^3}\right) \times \{u_a \quad u_b \quad u_c \quad u_d\} \times \begin{Bmatrix} (12\beta_k - 6l) \\ l(6\beta_k - 4l) \\ -(12\beta_k - 6l) \\ l(6\beta_k - 2l) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

โดยที่ $\bar{y}$ คือระยะจากแกนสะเทินถึงผิวล่างของแผ่นพื้นสะพานที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Q}\mathbf{X} \quad (9)$$

โดย ณ แต่ละจุดข้อมูลตรวจวัด จะได้ว่า

$\mathbf{Z}$ คือเวกเตอร์ของความเครียด จะมีขนาดเท่ากับ $k \times 1$

$\mathbf{Q}$ คือเมตริกซ์แปลงผลตอบสนองที่ข้อเป็นค่าความเครียดของสะพาน มีขนาดเท่ากับ $k \times 2d.o.f.$

จากสมการที่ (3) ถึงสมการที่ (7) จะสามารถจัดรูปให้อยู่ในความสัมพันธ์ของสมการไม่ต่อเนื่อง (discrete) ระหว่างข้อมูลที่ j และข้อมูลถัดไป $j+1$ ได้ดังนี้

$$\mathbf{X}_{j+1} = \mathbf{F}\mathbf{X}_j + \mathbf{G}_{j+1}\hat{\mathbf{P}}_j \quad (10)$$

$$\text{โดยที่ } \mathbf{F} = \mathbf{c}^{\Lambda h} \quad (11)$$

ซึ่ง h คือผลต่างของช่วงเวลาระหว่างข้อมูลที่ j และ $j+1$ และ

$$\mathbf{G} = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{F} - \mathbf{I})\mathbf{B} \quad (12)$$

เมื่อแทนสมการที่ (10) ลงในสมการที่ (9) และเมื่อจัดเรียงข้อมูลแต่ละช่วงเวลาจะทำให้ระบบสามารถกระจายได้ตั้งสมการที่ (13) ซึ่งสามารถพิจารณาในรูปเมตริกซ์ที่มีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นได้ตั้งสมการที่ (14)

$$\begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_1 \\ \hat{\mathbf{Z}}_2 \\ \hat{\mathbf{Z}}_3 \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{Z}}_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}\mathbf{G}_1 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{Q}\mathbf{F}\mathbf{G}_1 & \mathbf{Q}\mathbf{G}_2 & 0 & 0 \\ \mathbf{Q}\mathbf{F}^2\mathbf{G}_1 & \mathbf{Q}\mathbf{F}\mathbf{G}_2 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \mathbf{Q}\mathbf{F}^{n-1}\mathbf{G}_1 & \mathbf{Q}\mathbf{F}^{n-2}\mathbf{G}_2 & \cdots & \mathbf{Q}\mathbf{G}_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{P}}_0 \\ \hat{\mathbf{P}}_1 \\ \hat{\mathbf{P}}_2 \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{P}}_{n-1} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

$$\bar{\mathbf{Z}} = \mathbf{T}\bar{\mathbf{P}} \quad (14)$$

โดย $\bar{\mathbf{Z}}$ คือเวกเตอร์รวมของสัญญาณความเครียดมีขนาดเท่ากับ $(k \times n) \times 1$

$\mathbf{T}$ คือเมตริกซ์เชื่อมโยงระหว่างผลตอบสนองของสะพานกับน้ำหนักเพลลา มีขนาด $(k \times n) \times (n \times n_p)$

$\bar{\mathbf{P}}$ คือเวกเตอร์รวมของน้ำหนักเพลลา มีขนาด $(n \times n_p) \times 1$

จากสมการที่ (14) พบว่าในการคำนวณจะต้องมีจำนวนเมตริกซ์ของการวัดที่ไม่น้อยกว่าแรงภายนอกที่กระทำกับโครงสร้างสะพานจึงจะสามารถคำนวณน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกได้ ดังนั้นเมื่อจำนวนเพลลาของรถบรรทุกมากกว่าจำนวนเมตริกซ์ของการวัดจึงไม่สามารถคำนวณน้ำหนักของรถบรรทุกได้ ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวกระทำได้โดยการสมมติให้เพลลาที่มีจำนวนแรงกระทำ 2 แรง ให้พิจารณาเป็นแรงกระทำสองแรงซึ่งมีขนาดเท่ากัน ทำให้เพลลาคู่ซึ่งเดิมพิจารณาเป็นตัวแปรแรงกระทำ 2 แรงสามารถพิจารณาให้เหลือเพียงตัวแปรแรงกระทำเดียวได้ ทำให้รถบรรทุกประเภทหลายเพลลาสามารถลดจำนวนตัวแปรลงได้ ซึ่งในกรณีนี้รถบรรทุกประเภท 7 เพลลาจะเหลือตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเป็น

น้ำหนักเพลลาเพียง 5 เพลลา จึงสามารถวิเคราะห์จากความเครียดของสะพานที่ติดตั้งไว้จำนวน 5 หน้าตัดได้

ในการคำนวณน้ำหนักเพลลาบรรทุกขณะเคลื่อนที่จะอาศัยสมการที่ (14) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ในทางทฤษฎีมาประยุกต์หาน้ำหนักเพลลาด้วยค่าความเครียดตรวจวัดจริง ซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) จากวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด (least-square) ร่วมกับวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (singular value decomposition, SVD) [10] ซึ่งจากผลต่างยกกำลังสองน้อยที่สุดนั้น จะพิจารณาจากเวกเตอร์ความเครียดที่ตรวจวัดได้ตั้งสมการที่ (15) กับเวกเตอร์ความเครียดทางทฤษฎีตั้งสมการที่ (16) ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางทฤษฎีจากสมการที่ (14)

$$\mathbf{Z}(t) = \{\varepsilon_1(t) \quad \varepsilon_2(t) \quad \cdots \quad \varepsilon_k(t)\}^T \quad (15)$$

เมื่อ $\varepsilon_k(t)$ คือ ความเครียดตรวจวัดที่หน้าตัด k และ

$$\bar{\mathbf{Z}}(t) = \{\hat{\varepsilon}_1(t) \quad \hat{\varepsilon}_2(t) \quad \cdots \quad \hat{\varepsilon}_k(t)\}^T \quad (16)$$

เมื่อ $\hat{\varepsilon}_k(t)$ คือ ความเครียดทางทฤษฎีที่หน้าตัด k

จากนั้นเมื่อใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุด (least square) ร่วมกับเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน [8,9,10] เพื่อแก้ปัญหาการเกิดสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ที่บริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของตำแหน่งที่มีการเข้าออกของเพลลาบรรทุกซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างทันทีทันใด จะได้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของส่วนต่างความเครียดยกกำลังสองตั้งสมการที่ (17)

$$E = \sum_{i=1}^n \left[(\mathbf{Z}_i - \bar{\mathbf{Z}}_i)^T (\mathbf{Z}_i - \bar{\mathbf{Z}}_i) + \lambda \bar{\mathbf{P}}_i^T \bar{\mathbf{P}}_i \right] \quad (17)$$

โดยเทอมสุดท้ายในสมการที่ (17) คือการเพิ่มความราบเรียบให้กับน้ำหนักเพลลาเพื่อลดความแปรปรวนลง โดยที่ λ เป็นค่าคงที่ซึ่งเรียกว่าค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (regularization parameter, λ) หากค่า λ มีค่าน้อย จะทำให้คำตอบมีความใกล้เคียงกับข้อมูลแต่จะทำให้ได้ค่าน้ำหนักเพลลาที่มีการกวัดแกว่งทางพลศาสตร์สูงจนมีลักษณะที่ไม่สมเหตุผลผล แต่หากค่า λ มีค่ามาก แรงที่หาได้จะมีความราบเรียบแต่อาจมี

สัญญาณความเครียดที่ไม่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงนัก และหากค่า λ มีค่าเท่ากับศูนย์ การแก้ปัญหาก็จะเหมือนกับวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (least square) ตามปกติ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกใช้ค่า λ ที่เหมาะสม และเมื่อทำการแทนสมการที่ (14) ลงในสมการที่ (17) จะสามารถจัดรูปสมการใหม่ซึ่งสามารถคำนวณหาน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกได้ด้วยวิธีการหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าความเครียดที่ตรวจวัดกับค่าความเครียดทางทฤษฎี ดังแสดงในสมการที่ (18)

$$E = \sum_{i=1}^n \left[(Z_i - T\bar{P}_i)^T (Z_i - T\bar{P}_i) + \lambda \bar{P}_i^T \bar{P}_i \right] \quad (18)$$

ในที่นี้จะใช้วิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (singular value decomposition, SVD) ในการย่อยเมตริกซ์เชื่อมโยง T สำหรับการแก้ปัญหาที่เมตริกซ์เชื่อมโยง T เป็นเมตริกซ์ที่หาอินเวอร์สไม่ได้ ให้สามารถวิเคราะห์ได้คำตอบที่มีความถูกต้อง [10] โดยเมตริกซ์ T สามารถย่อยและมีขนาดเมตริกซ์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ดังสมการที่ (19) ถึงสมการที่ (22)

$$T = U\Sigma V^T \quad (19)$$

เมื่อ

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & \\ & \sigma_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_j \\ & & & & \ddots \end{bmatrix}_{(k \times n) \times (n \times n_p)} \quad (20)$$

$$U = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_i]_{(k \times n) \times (k \times n)} \quad (21)$$

$$V = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_j]_{(n \times n_p) \times (n \times n_p)} \quad (22)$$

โดยที่ Σ คือ เมตริกซ์ซิงกูลาร์ ซึ่งค่าในแนวทแยงจะเป็นค่าซิงกูลาร์ (singular value) จากกระบวนการซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน ซึ่งค่า σ_i เป็นปริมาณสเกลาร์

U คือออร์โทโกแนลลิตีเมตริกซ์ด้านหน้าจากกระบวนการซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน ซึ่งจะประกอบด้วยเวกเตอร์หลักย่อย U_i ซึ่งมีขนาด $(k \times n)$ แถว 1 หลัก มาประกอบกัน

V คือออร์โทโกแนลลิตีเมตริกซ์ด้านหลังจากกระบวนการซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชันซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์หลักย่อย V_i ซึ่งมีขนาด $(n \times n_p)$ แถว 1 หลัก มาประกอบกันในลักษณะเดียวกับเมตริกซ์ U

เมื่อแทนเมตริกซ์ T จากสมการที่ (19) ลงในสมการที่ (18) และหาอนุพันธ์เทียบกับน้ำหนักเพลลาเพื่อให้เกิดผลต่างยกกำลังสองน้อยที่สุด (minimization) จะสามารถจัดรูปสมการเพื่อใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักเพลลาที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าความเครียดตรวจวัดและค่าความเครียดทางทฤษฎีได้ดังสมการที่ (23) [10]

$$\bar{P} = \sum_{j=1}^{n \times n_p} \frac{\sigma_j}{(\sigma_j^2 + \lambda)} (U_j^T Z_j) V_j \quad (23)$$

อย่างไรก็ตามวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามสมการที่ (23) จะต้องเลือกใช้ค่า λ ที่เหมาะสมจึงจะได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ซึ่งการหาค่า λ ที่เหมาะสมจะต้องใช้เวลาคำนวณมากจึงไม่เหมาะต่อการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้เทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (USC) [11,12] ในการเพิ่มความถูกต้องให้กับวิธีเรกูลาร์ไรเซชัน โดยเทคนิค USC มีข้อดีที่สามารถเลือกใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ได้สะดวก ไม่จำเป็นต้องหาค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งเป็นค่าเฉพาะและคำนวณค่าได้ยุ่งยาก โดยเทคนิค USC นี้สามารถเพิ่มความถูกต้องของผลลัพธ์ได้ด้วยการคำนวณซ้ำและจะรู้ค่าคำตอบสุดท้าย ซึ่งทำให้สัญญาณความเครียดทางทฤษฎีที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดมากที่สุด สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบเพื่อทำให้กระบวนการทำซ้ำนั้นหยุดลงได้แสดงไว้ดังสมการที่ (24)

$$\delta = \frac{\hat{P}_{statics}^i - \hat{P}_{statics}^{i-1}}{\hat{P}_{statics}^{i-1}} \times 100\% \quad (24)$$

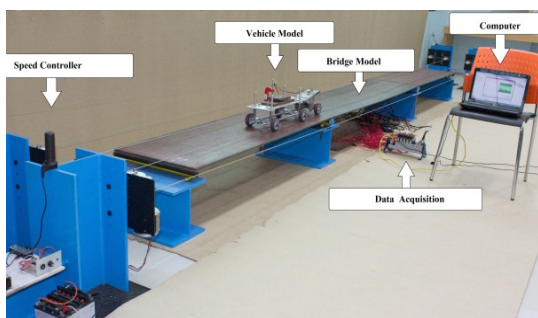
โดยที่ $\hat{P}_{statics}^i$ และ $\hat{P}_{statics}^{i-1}$ คือ น้ำหนักเพลลาทางสถิติที่คำนวณได้ในขั้นตอนปัจจุบัน และขั้นตอนก่อนหน้า

δ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ เพื่อเปรียบเทียบค่าของแต่ละรอบจากการทำซ้ำโดยในงานวิจัยนี้กำหนดไว้เท่ากับ 1%

3. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาในห้องปฏิบัติการจากแบบจำลองย่อส่วน โดยการออกแบบสะพานให้มีคุณสมบัติเทียบเท่าสะพานจริง การทดสอบนี้ใช้อัตราส่วน 1:10 โดยมีลักษณะดังรูปที่ 12 และมีรายละเอียดของแบบจำลองดังต่อไปนี้

3.1 สะพานจำลอง (Bridge model)



รูปที่ 12 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ

การออกแบบสะพานจำลองจะออกแบบให้สะพานมีความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานจริง และใช้เหล็กรูปพรรณสำหรับการออกแบบสะพานจำลอง เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมในช่วงอีลาสติกมีความกว้าง ความยาว และความหนา เท่ากับ 50, 200 และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยในการศึกษานี้พิจารณาสะพานช่วงเดียวมีจุดรองรับแบบธรรมดา (simple support) และเพื่อให้มีสภาพการทดสอบใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงจะออกแบบให้ระยะเวลาที่รถบรรทุกจำลองเคลื่อนที่ผ่านสะพานอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 วินาที ซึ่งเทียบเท่าระยะเวลาที่ใช้ของรถบรรทุกจริงในแต่ละประเภทเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสะพานความยาวช่วง 20 เมตร ค่าความเครียดสูงสุดเมื่อรถบรรทุกหนักเคลื่อนที่ผ่านสะพานจะมีค่าอยู่ในช่วง 70 ถึง 100 ไมโครสเตรนซึ่งเป็นค่าจริงที่คำนวณอ้างอิงจากสะพานจริง สะพานจำลองได้ถูกติดตั้งมาตรวัดความเครียดบริเวณใต้ท้องสะพานจำนวน 5 หน้าตัด แต่ละหน้าตัดติดตั้งมาตรวัดความเครียดจำนวน 8 ตัว โดยมีระยะห่างที่เท่าๆกัน เพื่อลดผลเนื่องจากการบิดของสะพาน โดยติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่ระยะ $L/4$, $L/3$, $L/2$, $2L/3$ และ $3L/4$ ดังแสดงในรูปที่ 5

3.2 รถบรรทุกจำลอง (Truck model)

รถบรรทุกจำลองที่ใช้ในการทดสอบจะจำลองให้มีพฤติกรรมที่คล้ายกับรถบรรทุกจริงในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 โดยสร้างจากวัสดุอลูมิเนียม สามารถเพิ่มน้ำหนักได้หลายระดับ ตั้งแต่ระดับน้ำหนักที่น้อยกว่าพิกัดจนถึงมากกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกที่กำหนด ซึ่งค่าน้ำหนักของรถบรรทุกจำลองกำหนดโดยพิจารณาจากความเครียดของสะพานจริงจากน้ำหนักรถบรรทุกจริง โดยลักษณะของรถบรรทุกจำลองแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 รถบรรทุกจำลองประเภท 2-7 เพลา

โดยคุณสมบัติของรถบรรทุกจำลอง คือ สามารถปรับเปลี่ยนน้ำหนัก และระยะห่างเพลาได้โดยอิสระ รูปแบบของรถบรรทุกจำลองที่ออกแบบสำหรับการศึกษานี้มี 6 รูปแบบ ได้แก่ รถบรรทุกประเภท 2 ถึง 7 เพลา โดยเทียบเคียงขนาดย่อส่วนกับรถบรรทุกจริง โดยรายละเอียดรถบรรทุกจำลองแสดงไว้ในตารางที่ 2 และรถบรรทุกในแต่ละประเภทจะมีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 3 ระดับ คือ น้อยกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 30 เท่ากับพิกัดน้ำหนักบรรทุกและมากกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 30 โดยรายละเอียดพิกัดน้ำหนักบรรทุกจำลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 รูปแบบรถบรรทุกจำลองที่ใช้ในการทดสอบ

Truck type	Axle Spacing (m)					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
2-Axle	0.420					
3-Axle	.0415	.0130				
4-Axle	0.180	0.350	0.130			
5-Axle	0.415	0.130	0.365	0.425		
6-Axle	0.180	0.350	0.130	0.365	0.425	
7-Axle	0.180	0.350	0.130	0.307	0.315	0.150

ตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกจำลองที่ใช้ในการทดสอบ

Truck type	Axle Weight (kg)						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
2-Axle (L)	3.319	3.284					
2-Axle (M)	4.838	4.897					
2-Axle (H)	5.849	6.412					
3-Axle (L)	2.114	4.190	4.190				
3-Axle (M)	2.066	6.769	6.769				
3-Axle (H)	4.276	8.117	8.117				
4-Axle (L)	1.492	1.802	5.341	5.341			
4-Axle (M)	2.403	2.440	7.442	7.442			
4-Axle (H)	2.561	3.214	9.772	9.772			
5-Axle (L)	2.305	4.031	4.031	4.541	4.976		
5-Axle (M)	2.942	5.662	5.662	6.329	7.230		
5-Axle (H)	3.689	7.752	7.752	8.573	9.325		
6-Axle (L)	1.785	1.869	4.366	4.366	4.906	5.520	
6-Axle (M)	2.225	2.249	6.279	6.279	6.959	7.589	
6-Axle (H)	3.042	3.109	8.287	8.287	9.088	9.829	
7-Axle (L)	1.654	1.803	4.098	4.098	4.348	4.742	4.742
7-Axle (M)	1.738	1.989	5.623	5.623	6.066	7.107	7.107
7-Axle (H)	2.450	2.641	7.639	7.639	8.216	9.287	9.287

* หมายเหตุ

- L คือ กรณีน้ำหนักเบากว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 30
- M คือ กรณีน้ำหนักเท่ากับพิกัดน้ำหนักบรรทุก
- H คือ กรณีน้ำหนักหนักกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 30

โดยการทดสอบจะทดสอบด้วยความเร็วของรถบรรทุกที่แตกต่างกัน 3 ระดับได้แก่ ความเร็วต่ำด้วยที่ประมาณ 0.56 เมตรต่อวินาที ความเร็วปานกลางที่ประมาณ 1.11 เมตรต่อวินาที และความเร็วสูงที่ประมาณ 1.67 เมตรต่อวินาที ซึ่งเทียบเท่าเหตุการณ์จริงเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 20, 40 และ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ จาก

การทดสอบทั้งหมด 54 กรณี ซึ่งแต่ละกรณีมีการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง นับเป็นจำนวนทดสอบทั้งหมดได้ 162 ครั้ง เพื่อให้การทดสอบมีความเชื่อถือได้ โดยในการทำซ้ำของกรณีเดียวกันอาจมีความแตกต่างกันของค่าความเร็วอยู่เล็กน้อยจากการทดลอง

4. ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคำหาความเร็ว ระยะช่วงเพลาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยการใช้ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การหาความเร็วของการสั่นไหวโดยใช้หลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 2) การจำแนกประเภทรถบรรทุกจากการหาจำนวนเพลาระยะห่างเพลาน้ำหนักของรถบรรทุก โดยมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

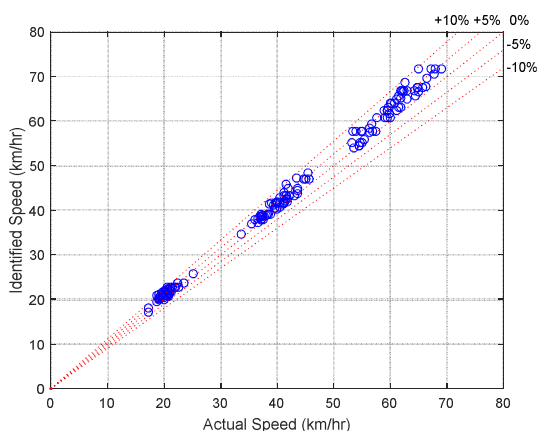
4.1 การหาความเร็วโดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

เมื่อนำความเครียดสำหรับหาความเร็วมาทำการคำนวณหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดทั้ง 2 หน้าตัด พบว่า สัญญาณความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดเมื่อซ้อนทับกันจะทำให้ทราบระยะเวลาที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านจุด 2 จุด ดังนั้นจึงสามารถหาความเร็วของรถบรรทุกได้

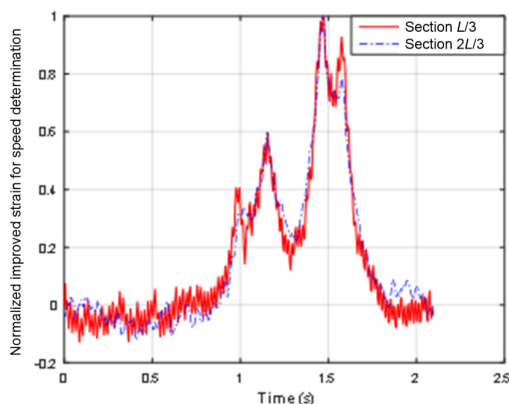
จากการศึกษาพบว่าความเร็วในการสั่นไหวสามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ร้อยละ 10.63 ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิธีที่นำเสนอให้ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วรถบรรทุกไม่เกินร้อยละ 8.74 โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลจากระดับสัญญาณรบกวนและสมมติฐานในการหาความเร็ว หากสัญญาณความเครียดมีระดับสัญญาณรบกวนน้อยจะทำให้การหาความเร็วมีความถูกต้องมาก และหากมีระดับสัญญาณรบกวนมากขึ้นความถูกต้องในการหาความเร็วก็จะลดลงทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดและเทคนิคการกรองสัญญาณรบกวน (noise filtering) ว่ามีประสิทธิภาพต่อการลดผลของสัญญาณรบกวนมากน้อยเพียงใด

จากสมมติฐานในการหาความเร็วโดยพิจารณาให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่พบว่ากรทดสอบในห้องปฏิบัติการยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการควบคุมความเร็วให้คงที่ได้ ดังนั้นความเร็วที่ทดสอบจึงไม่ใช่ความเร็วที่คงที่มากนักโดยสังเกตได้จากรูปที่ 15 ซึ่งเป็นตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถบรรทุก

ประเภทสี่เพลลา เมื่อสัญญาณสำหรับใช้หาความเร็วทั้ง 2 หน้าตัดมาซ้อนทับกัน สัญญาณทั้ง 2 หน้าตัดจะไม่ซ้อนทับกันอย่างพอดี ดังนั้นจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ อย่างไรก็ตามค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นยังถือว่ายังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เนื่องจากไม่ส่งผลต่อการจำแนกประเภทรถบรรทุกและยังสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้คำนวณน้ำหนักของรถบรรทุกได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 14 ผลการคำนวณความเร็วของรถบรรทุกในทุกกรณี

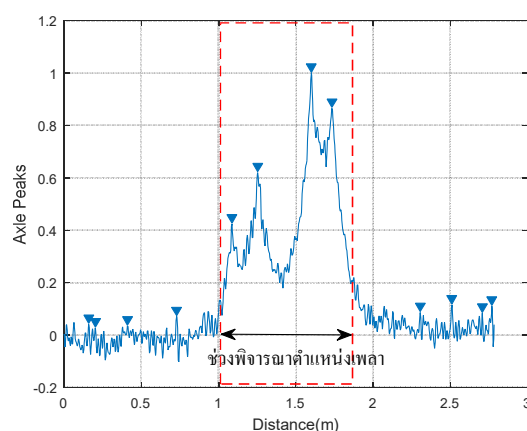


รูปที่ 15 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ กรณีรถบรรทุกแบบสี่เพลลา

4.2 การจำแนกประเภทรถบรรทุก

วิธีการที่ใช้หาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาจะใช้ฟังก์ชัน *findpeaks* ในโปรแกรม MATLAB ตรวจจับยอดสัญญาณ (peaks) ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยใช้สัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้วซึ่งถูกหารด้วยค่าสูงสุดให้มีแอมพลิจูดสูงสุด 1

หน่วย ณ หน้าตัดกึ่งกลางสะพาน เนื่องจากค่าความเครียดมีแอมพลิจูดสูงและมียอดสัญญาณชัดที่สุด ดังนั้นจากรูปที่ 16 จะสังเกตว่าจะพิจารณาตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุกเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่เป็นระยะไม่น้อยกว่ากึ่งกลางคานเป็นต้นไป ซึ่งในที่นี้คือที่ระยะ 1 เมตรของสะพานจำลอง โดยในการตั้งค่าฟังก์ชันสำหรับตรวจจับตำแหน่งเพลลาจะต้องกำหนดความสูงของยอดที่จะพิจารณาให้เป็นตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุก โดยในที่นี้ได้กำหนดให้ตรวจจับเฉพาะยอดสัญญาณที่มีค่าความสูงจากปลายยอดจนถึงฐานยอดไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 ของค่าสูงสุด ดังนั้นหากมียอดสัญญาณความเครียดในบริเวณใกล้เคียงมีค่าความสูงจากฐานยอดไม่ถึงร้อยละ 10 ของค่าสูงสุดแล้ว ระบบก็จะไม่ตรวจจับตำแหน่งยอดสัญญาณนั้นเป็นเพลลาของรถบรรทุก ด้วยหลักการนี้เมื่อได้ตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุกก็จะคำนวณระยะห่างเพลลาได้ การจำแนกประเภทรถบรรทุกจะพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของระยะห่างเพลลาและจำนวนเพลลาของรถบรรทุก โดยทั่วไปรถบรรทุกจะมีลักษณะทางกายภาพที่สามารถบ่งบอกถึงประเภทของรถบรรทุก ดังนั้นหลังจากที่คำนวณระยะห่างเพลลาและจำนวนเพลลาจะสามารถจำแนกประเภทรถบรรทุกและทำให้สามารถทราบพิกัดน้ำหนักตามกฎหมายของรถบรรทุกประเภทนั้นๆ ได้



รูปที่ 16 การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยฟังก์ชัน *findpeaks*

จากการศึกษาการจำแนกประเภทรถบรรทุกพบว่าการใช้ฟังก์ชัน *findpeaks* ในโปรแกรม MATLAB สามารถหา ระยะห่างเพลลา จำนวนเพลลาและจำแนกประเภทรถบรรทุกได้อย่างถูกต้องในทุกกรณีศึกษา มีค่าความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลลาที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยค่าความคลาด

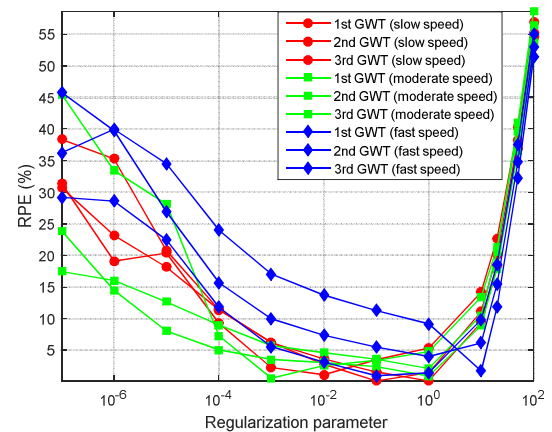
เคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลต่อการจำแนกประเภทรถบรรทุก ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากพฤติกรรมทางพลศาสตร์ ความเร็วของรถที่อาจไม่เป็นความเร็วคงที่โดยสมบูรณ์ และระดับสัญญาณรบกวนของระบบจึงส่งผลให้การตรวจจับยอดสัญญาณมีความคลาดเคลื่อนรวมไปถึงค่าความคลาดเคลื่อนสะสมจากการคำนวณหาความเร็วในขั้นตอนก่อนหน้า

4.3 การหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพาน

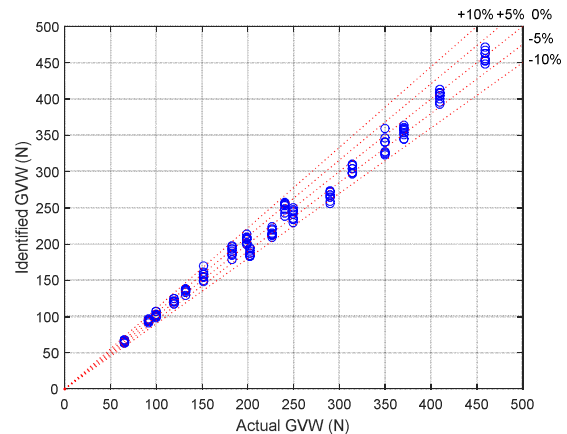
การหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพานด้วยหลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกัลลิ่งสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน โดยปราศจากการใช้เทคนิค USC จะยังมีความถูกต้องไม่มากนัก เนื่องจากองค์ประกอบของแรงมี 2 ส่วนด้วยกัน คือ องค์ประกอบทางสถิตยและองค์ประกอบทางพลศาสตร์ ในการคำนวณหาน้ำหนักเพียงครั้งเดียวจะทำให้ได้คำตอบที่ไม่ถูกต้อง โดยยังขาดองค์ประกอบของน้ำหนักทางสถิตย ดังนั้นวิธีการคำนวณซ้ำหรือเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิตย (USC) จึงเข้ามาช่วยปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิตยให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยได้เลือกใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันเท่ากับ 0.1 ดังรูปที่ 17 ซึ่งเป็นตัวอย่างความสัมพันธ์ของค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (relative percentage error, RPE) ของน้ำหนักกรรมของรถบรรทุกกับค่าเรกูลาร์ไรเซชันใน 9 กรณีทดสอบ ซึ่งมีผลสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [12] โดยจากรูปที่ 17 สามารถสังเกตได้ว่าค่าเรกูลาร์ไรเซชันสามารถเลือกใช้ได้กว้าง เมื่อใช้เทคนิค USC

สำหรับผลการคำนวณหาน้ำหนักกรรม (gross vehicle weight, GVW) ของรถบรรทุกทั้ง 162 การทดสอบได้แสดงไว้ดังรูปที่ 18 และตัวอย่างค่าน้ำหนักเพลารถบรรทุกที่คำนวณจากวิธีการที่นำเสนอ กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลาได้แสดงดังรูปที่ 19 ซึ่งสังเกตได้ว่าระบบที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีสำหรับระดับความคลาดเคลื่อนของรถบรรทุกแต่ละประเภท แสดงไว้ดังตารางที่ 4 ซึ่งพบว่ามีความสามารถในการหาน้ำหนักกรรมได้ใกล้เคียงที่ค่าความคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 0.03 และมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 3.75 โดยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สามารถหาน้ำหนักกรรมของรถบรรทุกแต่ละประเภทได้ความคลาดเคลื่อนสูงสุดในช่วงร้อยละ

4.77 – 10.66 โดยรถบรรทุกประเภท 2 เพลาเป็นประเภทที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเนื่องจากมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์น้อยที่สุด และหากพิจารณาจากจำนวนทั้งหมดแล้วจะมีระดับความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 8.58 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของน้ำหนักกรรมของรถบรรทุกประเภท 3 เพลา ที่ 3 ระดับความเร็ว รวม 9 กรณี



รูปที่ 18 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักกรรมของรถบรรทุกในทุกกรณีทดสอบ

จากการหาน้ำหนักกรรมของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยวิธีการที่กล่าวไว้พบว่า เทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิตย (USC) สามารถปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิตยให้มีความถูกต้องเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 19

ตารางที่ 4 ระดับความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

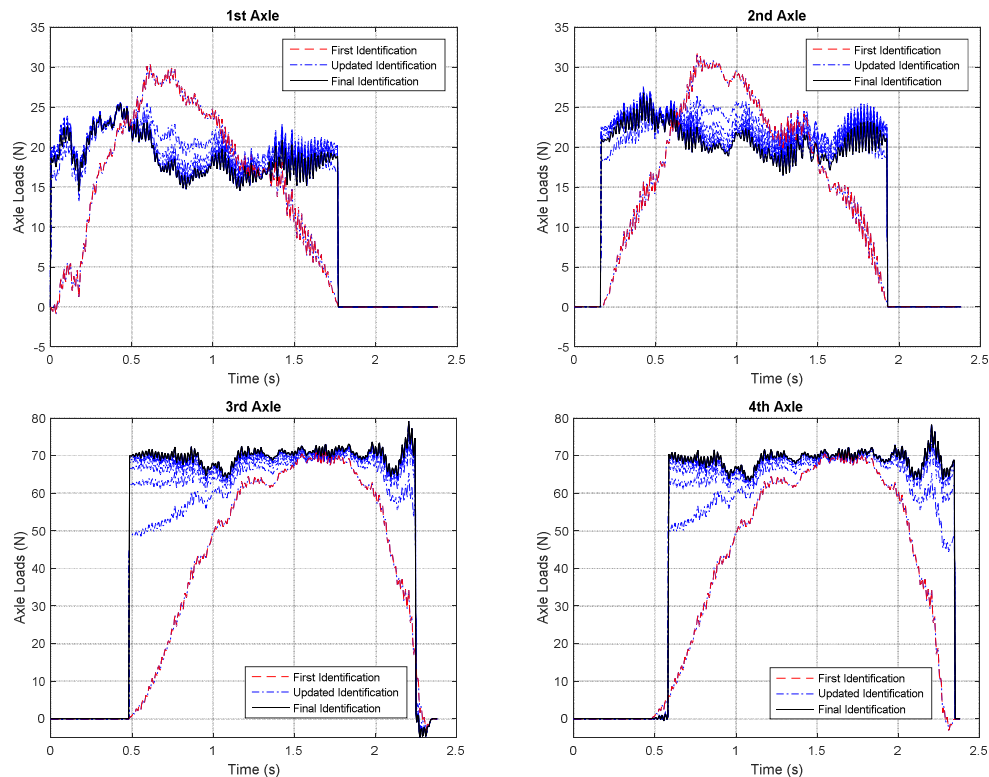
Truck type	Max. GVW error (%)	Min. GVW error (%)	Average GVW error (%)	Max. GVW error (%) at 95% Confidence level
2-axle	5.29	0.13	2.08	4.77
3-axle	11.64	0.31	3.38	7.47
4-axle	7.88	0.67	3.78	7.45
5-axle	11.59	1.84	6.76	10.66
6-axle	7.56	0.28	3.41	6.29
7-axle	8.19	0.03	3.41	7.71
Total	11.64	0.03	3.75	8.58

หมายเหตุ: ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ย คำนวณจากค่าสัมบูรณ์ของค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์

อย่างไรก็ตาม จากค่าน้ำหนักรวมของรถบรรทุกทางสถิติที่มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ แต่สำหรับการหาน้ำหนักเพลาทงสถิติพบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนสูง โดยในบางกรณีพบค่าความคลาดเคลื่อนถึงกว่าร้อยละ 50 โดยเฉพาะเพลามี

น้ำหนักเบา เนื่องจากการเทียบความคลาดเคลื่อนในรูปของร้อยละ และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดอาศัยการเทียบค่าความเครียดของสะพานซึ่งเป็นผลจากแรงกระทำทุกๆเพลารถให้เกิดส่วนต่างยกกำลังสองที่น้อยที่สุด จึงทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมมีค่าไม่มาก อีกทั้งระบบที่ใช้ดำเนินการวิเคราะห์น้ำหนักเพลานี้ในรูปของแรงกระทำทางพลศาสตร์ซึ่งไม่สามารถประเมินระดับความคลาดเคลื่อนทางพลศาสตร์ได้เนื่องจากไม่ทราบแรงกระทำจริงในเพลารถ เพราะไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนักที่เพลารถบรรทุกจำลองได้ ดังนั้นในการหาค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลารถจึงทำได้เพียงการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักเพลาทงสถิติที่ได้จากการคำนวณกับน้ำหนักเพลาทงสถิติที่ได้จากการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทางสถิติเท่านั้น

สำหรับการจำแนกความถูกต้องของระบบชั่งน้ำหนักขณะเคลื่อนที่โดยใช้สะพานโดยใช้ตารางเปรียบเทียบความถูกต้องของระบบชั่งน้ำหนักขณะเคลื่อนที่ (Accuracy Classification of WIM) [17] แสดงไว้ดังตารางที่ 5



รูปที่ 19 การหาน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพล

ตารางที่ 5 เกณฑ์สำหรับจำแนกระดับความถูกต้องของระบบชั่งน้ำหนักขณะเคลื่อนที่ COST 323 [17]

Criteria (type of measurement)	Domain of use	Accuracy Classes: Confidence interval width (%)						
		A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D+(20)	D(25)	E
1. Gross weight	Gross weight > 3.5 t	5	7	10	15	20	25	>25
Axle load:	Axle load > 1 t							
2. group of axles		7	10	13	18	23	28	>28
3. single axle		8	11	15	20	25	30	>30
4. axle of a group		10	14	20	25	30	35	>35
Speed	$V > 30 \text{ km/h}^{(1)}$	2	3	4	6	10	10	>10
Axle spacing		2	3	4	6	10	10	>10
Total flow		1	1	1	3	5	5	>5

(1) For sensors which do not work statically or at very low speed

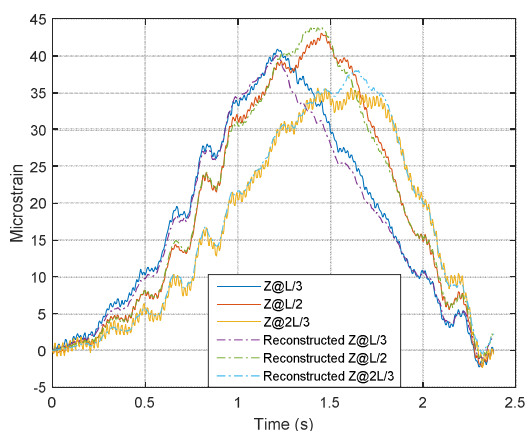
ตารางที่ 5 นั้นเป็นการจำแนกความถูกต้องประกอบด้วย 4 หลักเกณฑ์ ได้แก่ เกณฑ์ความถูกต้องของน้ำหนักรวม น้ำหนักกลุ่มเพลาน้ำหนักเพลเดี่ยว และน้ำหนักของเพลากลุ่ม โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะระดับความถูกต้องของค่าน้ำหนักรวม โดยมีระดับความถูกต้องดังตารางที่ 6

จากตารางที่ 6 พบว่าจากทั้งหมด 54 กรณีหลัก (แต่ละกรณีหลักทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง) มี 2 กรณีหลักที่มีระดับความถูกต้องอยู่ในระดับ C(15) มี 8 กรณีหลักที่มีระดับความถูกต้องในระดับ B(10) มี 12 กรณีหลักที่มีระดับความถูกต้องอยู่ในระดับ B+(7) และ 29 กรณีหลักที่มีระดับความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ A(5) ซึ่งแสดงว่ากรณีส่วนมากนั้นมีระดับความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก

เพื่อตรวจสอบว่าระบบที่นำเสนอขึ้นวิเคราะห์ได้ถูกต้องตามสมมติฐาน จึงพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดกับสัญญาณความเครียดทางทฤษฎีที่สังเคราะห์ขึ้นจากค่าน้ำหนักเพลที่วิเคราะห์ได้ โดยแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะของสัญญาณความเครียดทั้งสองที่ใกล้เคียงกันนั้นบ่งบอกถึงระเบียบวิธีการค่าที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่มีความถูกต้อง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดที่หน้าตัด $L/3$ $L/2$ และ $2L/3$ มีค่าเท่ากับ 0.9974 0.9980 และ 0.9976 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ผลการจำแนกระดับความถูกต้องของค่าน้ำหนักรวม

Truck type	Speed	GVW error (%)		
		Light	Medium	Heavy
2-Axle	Slow	A(5)	B+(7)	A(5)
2-Axle	Moderate	A(5)	A(5)	A(5)
2-Axle	Fast	A(5)	A(5)	A(5)
3-Axle	Slow	B(10)	A(5)	B+(7)
3-Axle	Moderate	A(5)	A(5)	B(10)
3-Axle	Fast	A(5)	C(15)	B+(7)
4-Axle	Slow	A(5)	B(10)	B+(7)
4-Axle	Moderate	A(5)	B+(7)	A(5)
4-Axle	Fast	A(5)	A(5)	B(10)
5-Axle	Slow	B+(7)	B+(7)	A(5)
5-Axle	Moderate	B(10)	B(10)	B+(7)
5-Axle	Fast	B(10)	C(15)	A(5)
6-Axle	Slow	A(5)	A(5)	A(5)
6-Axle	Moderate	B+(7)	B+(7)	A(5)
6-Axle	Fast	B(10)	B+(7)	A(5)
7-Axle	Slow	A(5)	A(5)	A(5)
7-Axle	Moderate	B(10)	B+(7)	A(5)
7-Axle	Fast	B(10)	B+(7)	A(5)



รูปที่ 20 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดที่ได้จากการวัด และสัญญาณความเครียดที่สร้างขึ้น

จากผลการศึกษาด้วยการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วนนี้ สามารถประเมินได้ว่ามีระดับความถูกต้องในเกณฑ์ที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาทดสอบกับโครงสร้างสะพานจริงเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงต่อไป โดยระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกที่นำเสนอจะใช้เพียงมาตรวัดความเครียดซึ่งมีราคาไม่แพงติดตั้งบริเวณใต้ท้องสะพาน และยังสะดวกในการบำรุงรักษาโดยไม่กระทบกับการสัญจรของยานยนต์บนเส้นทาง จึงมีความคุ้มค่าอย่างมากทั้งในด้านของต้นทุนโดยใช้โครงสร้างที่มีอยู่แล้วในเส้นทาง และในด้านการบริหารจัดการ ซึ่งใช้จำนวนบุคลากรน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบด้านชั่งน้ำหนักบรรทุกถาวร และด้านชั่งน้ำหนักเคลื่อนที่แบบฝังในผิวทาง ซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการจำแนกประเภท และการหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยการใช้เพียงผลการตอบสนองสัญญาณความเครียดของสะพานในแบบจำลองย่อส่วน โดยการใช้หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์หาความเร็วของรถบรรทุก การใช้ฟังก์ชัน *findpeaks* จากโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปจำแนกประเภทรถบรรทุก และการใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชันและการคำนวณด้วยวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน และเพิ่มความถูกต้องของผลลัพธ์ด้วยเทคนิคการปรับปรุง

องค์ประกอบทางสถิติ (USC) เพื่อคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1) การหาความเร็วรถบรรทุก การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกสามารถคำนวณเพื่อใช้จำแนกประเภทรถบรรทุกได้ถูกต้องทุกกรณีตามเงื่อนไขที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกโดยไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับเพลลาหรือ FAD sensor โดยความคลาดเคลื่อนในการหาระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกเกิดจากค่าความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการคำนวณหาความเร็ว อีกทั้งเป็นผลมาจากพฤติกรรมทางพลศาสตร์และระดับสัญญาณรบกวนของระบบ โดยข้อมูลทางความเร็วรถบรรทุก และประเภทของรถบรรทุกจะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการนำไปคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกได้ต่อไป ระดับความถูกต้องของความเร็วรถบรรทุกและระยะห่างเพลลาที่คำนวณได้จะส่งผลกับระดับความถูกต้องของน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกอย่างมีนัยสำคัญ

2) การคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสะพานจากข้อมูลทางด้านความเร็วและประเภทรถบรรทุกที่คำนวณได้ในขั้นตอนก่อนหน้า พบว่าสามารถหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด และค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดที่ร้อยละ 3.75, 11.64 และ 0.03 ตามลำดับ และที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ระบบที่นำเสนอมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 8.58 ซึ่งเมื่อเทียบกับระดับความถูกต้องตามมาตรฐาน COST 323 พบว่าวิธีการที่นำเสนอได้ผลลัพธ์โดยมีกรณีส่วนใหญ่ รวมไปถึงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของทุกกรณีอยู่ในระดับ A(5) ซึ่งเป็นระดับความถูกต้องสูงสุด ในขณะที่หากพิจารณาจากระดับความถูกต้องที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะอยู่ที่ระดับ B(10)

3) การพิจารณาเงื่อนไขของระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกแต่ละประเภท โดยพิจารณาจากกลุ่มเพลลาทำให้มีน้ำหนักเพลลาที่มีค่าเท่ากันจะสามารถลดจำนวนตัวแปรในการวิเคราะห์หลังได้ โดยสามารถจำแนกและหาน้ำหนักรถบรรทุกได้หลากหลายประเภทตั้งแต่ประเภท 2 เพลลาไปจนถึง 7 เพลลาด้วยการติดตั้งมาตรวัดความเครียด 5 หน้าตัด

4) ข้อสรุปข้างต้นเป็นผลการศึกษาจากการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วนเท่านั้น ซึ่งจากระดับความถูกต้องที่ได้ถือ

ว่ามีความเหมาะสมที่จะพัฒนาการศึกษาต่อการประยุกต์กับโครงสร้างสะพานจริง เนื่องจากได้พิจารณาผลกระทบของปัจจัยหลายอย่างได้แก่ ประเภทรถบรรทุก น้ำหนักบรรทุกและความเร็วในการสัญจร พบว่าการศึกษาดังกล่าวจะมีส่วนได้ผลลัพธ์ที่ดี อย่างไรก็ตามการศึกษายังต้องพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดในทางปฏิบัติให้สามารถวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกในขณะที่อาจมียานพาหนะคันอื่นสัญจรข้ามสะพานพร้อมกันได้ รวมถึงการพัฒนาให้ใช้จำนวนมาตรวัดความเครียดที่น้อยลง รวมถึงประเมินระดับความคลาดเคลื่อนที่อาจเพิ่มขึ้นเมื่อประยุกต์ใช้กับโครงสร้างสะพานจริงซึ่งมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนกว่าโครงสร้างสะพานจำลอง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 107/2558

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Moses, F. (1979). Weigh-in-motion system using instrumented bridges. *Transport Engineering Journal ASCE*, 105(3), 233-249.
- [2] Law, S. S., Chan, T. H. T. & Zeng, Q. H. (1999). Moving force identification a frequency and time domains analysis. *Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, 121(3), 394-401.
- [3] European Commission 4th Framework Programme Transport. (2001). *Weighing-in-motion of axle and vehicle for europe (WAVE) – Report of work package 1.2 Bridge WIM systems (B-WIM)*, Slovenia: University College Dublin.
- [4] Sangchuwong, P. (2007). *Determination of vehicle weight from bridge bending moment without axle detection*. (Unpublished master thesis). Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- [5] Weerachantachart, N. (2003). *Determination of velocity and axle spacings of vehicles on bridges from strain signals*. (Unpublished master thesis). Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- [6] Chan, T. H. T., Law S. S. & Yung, T. H. (2000). Moving force identification using an existing prestressed concrete bridge. *Engineering Structures*, 22, 1261-1270.
- [7] Zhu, X. Q. & Law, S. S. (2000). Identification of vehicle axle loads from bridge dynamic responses. *Journal of Sound and Vibration*, 236(4), 705-724.
- [8] Law, S. S., Chan, T. H. T. & Zeng, Q. H. (2001). Regularization in moving force identification. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(2), 136-148.
- [9] Law, S. S. & Fang, Y. L. (2001). Moving force identification: optimal state estimation approach. *Journal of Sound and Vibration*, 239(2), 233-254.
- [10] Zhu, X. Q. & Law, S. S. (2002). Moving loads identification through regularization. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 128(9), 989-1000.
- [11] Pinkaew, T. (2006). Identification of vehicle axle loads from bridge responses using update static component technique. *Journal of Engineering Structures*, 28(11), pp. 1599-1608.
- [12] Pinkaew, T. & Asnachinda, P. (2007). Experimental study on the identification of dynamic axle loads of moving vehicle from the bending moment of bridge. *Journal of Engineering Structure*, 29(9), 2282-2293.
- [13] Chuaket, C. & Asnachinda, P. (2015). Identification of speed and axle spacing of a moving vehicle using dynamic bridge strain responses. *Proceeding of The 20th National Convention on Civil Engineering held in Chonburi Thailand, 8-10 July 2015* (pp. 1-8). King Mongkut's University of Technology North Bangkok. (in Thai)
- [14] Chuaket, C. & Asnachinda, P. (2016). Classification and weight identification of heavy vehicle from dynamic bridge strain. *Proceeding of The 21st National Convention on Civil Engineering held in Songkhla, Thailand, 28-30 June 2016* (pp. 1-8). Rajamangala University of Technology Srivijaya. (in Thai)
- [15] Zhao, H. & Uddin, N. (2011). Influence line calculation of existing bridges in BWIM system. *Proceeding of International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE-IASS) Symposium held in, London, UK, 20-23 September 2011* (pp. 1-8). International Association for Bridge and Structural Engineering.

- [16] Hua Zhao & Nasim Uddin. (2011). Innovative bridge weigh-in-motion system for enforcement application. *Proceeding of International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE-IASS) Symposium held in, London, UK, 20-23 September 2011* (pp. 1-8). International Association for Bridge and Structural Engineering.
- [17] O'Brien, E.J. & Jehaes, S. (Eds.). (2002). *COST 323 Weigh-in-Motion of Road Vehicle, Final Report (1993-1998)*. LCPC Publications.

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสด
ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก

The Assessment of Life Cycle Greenhouse Gas Emissions for the Fresh Rice
Noodles in Amphoe Muang Phitsanulok Province

สุชาดา อยู่แก้ว^{1*} และ เมธิณี บุญสูง¹

S. Ukaew and M. Bunsung

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

*Corresponding author E-Mail : suchadauk@gmail.com

(Received: April 21, 2018, Revised: September 21, 2018, Accepted: November 23, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสดสองชนิด คือ ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 0.650 และ 0.709 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อกิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว ซึ่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ยในแต่ละขั้นตอนเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ การเพาะปลูกข้าว (50% ซึ่งมาจากการปล่อยก๊าซมีเทน 40%) การผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว (42% ซึ่งมาจากน้ำมันพืช 17% และแป้งมันสำปะหลัง 15%) การบริโภค (2%) การสีข้าว (2%) การกำจัดซาก (2%) และการขนส่ง (2%) การปล่อยน้ำออกจากนาข้าวในระยะสั้นในช่วงระยะข้าวเริ่มแตกกอและระยะก่อนการเก็บเกี่ยวสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากขั้นตอนการเพาะปลูกได้ 20% การปรับลดส่วนผสมของวัตถุดิบอาจจะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ แต่การปรับลดส่วนผสมอาจมีผลกระทบต่อคุณภาพและปริมาณของเส้นก๋วยเตี๋ยว แนวทางอื่นๆ ที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้รวมถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตและการใช้พลังงานโดยการนำกลับมาใช้เป็นพลังงานทดแทน การนำน้ำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่ การหมุนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในไอน้ำ และการโบว์ดาวน์หม้อไอน้ำ

คำสำคัญ: การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ การปล่อยก๊าซเรือนกระจก คาร์บอนฟุตพริ้นท์ ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่ ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก

Abstract

The objective of this research is to evaluate the greenhouse gas (GHG) emissions of two fresh rice noodles: wide rice noodles and rice stick noodles, which are studied in amphoe muang, Phitsanulok Province. From the results, the GHG emissions of wide rice noodles and rice stick noodles are 0.650 and 0.709 kg CO₂ eq/kg of noodles. The orders of average GHG emissions from high to low for each stage are as follows: rice cultivation (50%, from methane emission 40%), noodle production (42%, from vegetable oil 17% and cassava starch 15%), consumption (2%), rice milling (2%), disposal (2%), and transportation (2%). The study suggests that the short period of drainage

water from paddy field during the tillering stage and pre-harvesting stage could reduce the GHG emissions from the cultivation stage by 20%. The reduction of raw material compositions would help reduce the GHG emissions in the production stage but this would affect on the quality and quantity of noodles. Other possible ways to decrease the GHG emissions include improvement of production and energy efficiency by using rice husk as a renewable energy source, reusing condensate water, insulation covering of steam equipment, and blowing down the boiler to reduce the accumulation of slag.

Keywords: Life cycle assessment, Greenhouse gas emissions, Carbon footprint, Wide rice noodles, Rice stick noodles

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก๋วยเตี๋ยวเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมอาหารที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากการบริโภคมากที่สุดรองจากข้าว ซึ่งประเทศไทยมีการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวเพื่อบริโภคภายในประเทศเฉลี่ยต่อปีประมาณ 10,000 ล้านบาท และมีมูลค่าการส่งออกถึง 1,400 ล้านบาท [1] นอกจากนี้อุตสาหกรรมก๋วยเตี๋ยวยังเป็นอุตสาหกรรมการผลิตที่มีบทบาทสำคัญเนื่องจากการนำผลผลิตจากภาคเกษตรมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารโดยอาศัยเทคโนโลยีการแปรรูปอาหารมาใช้เพื่อผลิตอาหารให้มีคุณภาพและปลอดภัยต่อผู้บริโภค อย่างไรก็ตาม เส้นทางห่วงโซ่อุปทานของการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าวไปเป็นเส้นก๋วยเตี๋ยวจะเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการเพาะปลูกข้าว การสีข้าว การผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว ตลอดจนจนถึงการขนส่งและการกระจายสินค้า นั้นจะต้องใช้ทรัพยากรและพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องในทุกขั้นตอน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [2]

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้นจากการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดภัยธรรมชาติที่รุนแรง [3] จากเหตุการณ์ดังกล่าว ทำให้ผู้นำจากประเทศต่างๆ ร่วมประชุมหาแนวทางในการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยประเทศไทยได้กำหนดแนวทางในการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในทุกภาคส่วน 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ ภายในปี พ.ศ. 2573 [4]

จากความตระหนักถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและผลกระทบที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการวิจัยเพื่อหาแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ซึ่ง LCA เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์โดยพิจารณาตลอด

วัฏจักรชีวิต เพื่อใช้ในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [5]

จากการศึกษางานวิจัยทางด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวในต่างประเทศ พบว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวพาสต้าที่ได้จากการเพาะปลูกข้าวสาลีแบบดั้งเดิมและแบบอินทรีย์ในประเทศเยอรมนีมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 0.90 และ 0.75 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (kg CO₂ eq) ต่อ กิโลกรัมผลิตภัณฑ์ [6] สำหรับงานวิจัยในประเทศพบว่าเส้นเล็กอบแห้ง เส้นหมี่แห้ง และเส้นก๋วยเตี๋ยวแห้งมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 1 [7] 6.8 และ 7.6 [2] kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมผลิตภัณฑ์ ตามลำดับ นอกจากนี้ บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปและเส้นหมี่กึ่งสำเร็จรูปมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ในช่วง 2.11-3.13 และ 4.31-4.51 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมผลิตภัณฑ์ [8] โดยพบว่าขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด ในขณะที่ขั้นตอนการผลิตมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นอันดับสอง [2, 8]

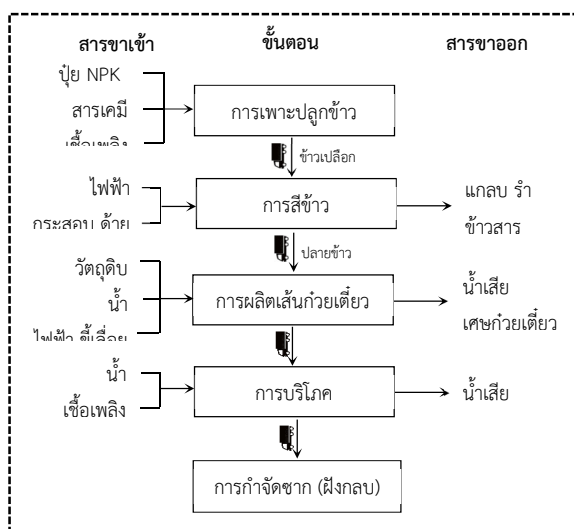
จากการรวบรวมข้อมูลในปัจจุบันพบว่า การศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสดยังไม่มีรายงานมาก่อน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสด ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสดสองชนิด คือ ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ผลที่ได้จากการศึกษาทำให้ทราบขั้นตอนที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด เพื่อนำไปสู่แนวทางในการใช้ทรัพยากรและพลังงานที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

2. วิธีการวิจัย

การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสด อ้างอิงตามแนวทางประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ [9] ซึ่งมีขั้นตอนการวิจัยดังนี้

2.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หรือเป้าหมายในการศึกษาเพื่อประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสด 2 ชนิด คือ ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก โดยใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตขอบเขตของระบบที่ใช้คือ เครเดิลทูเกรฟ (Cradle to grave) โดยทำการศึกษาคครอบคลุมตั้งแต่ขั้นตอนการเพาะปลูกข้าว การสีข้าว การผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว การขนส่งและการกระจายสินค้า การบริโภค และการกำจัดซากผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 หน่วยการทำงาน (Functional unit) ที่ใช้คือ 1 กิโลกรัม ก๋วยเตี๋ยว ผลที่ได้จากการศึกษาจะรายงานในหน่วยกิโลกรัม คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อกิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว (kg CO₂ eq ต่อกิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว) งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาคการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวแห้งเนื่องจากเส้นก๋วยเตี๋ยวแห้งมีการจำหน่ายในตลาดสดท้องถิ่นของจังหวัดในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับเส้นก๋วยเตี๋ยวสด



รูปที่ 1 ขอบเขตการศึกษาสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสด 1 กิโลกรัม

2.2 การปันส่วนของผลิตภัณฑ์ร่วม

ค่าการปันส่วนโดยน้ำหนักจะถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้ เพื่อกระจายภาระทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นไปยังแต่ละผลิตภัณฑ์ เนื่องจากปลายข้าวเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ใช้ในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว ดังนั้น ปลายข้าวจึงเป็นผลิตภัณฑ์ขาออกหลักในขั้นตอนการสีข้าว ในขณะที่ข้าวสาร รำ และแกลบเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม (ดูตารางที่ 2) การคิดค่าปันส่วนโดยน้ำหนักแสดงในสมการที่ (1) ในกรณีนี้ ข้อมูลในกระบวนการต้นน้ำของขั้นตอนการเพาะปลูกไปจนถึงขั้นตอนการสีข้าวจะถูกคูณด้วยค่าปันส่วนโดยน้ำหนัก ซึ่งค่าการปันส่วนของปลายข้าวในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.24

$$\text{ค่าการปันส่วนของปลายข้าว} = \frac{A}{A + B + C + D} \quad (1)$$

เมื่อ A B C และ D คือ น้ำหนักของปลายข้าว ข้าวสาร รำ และแกลบ ตามลำดับ

2.3 การวิเคราะห์ปัญหาการสิ่งแวดล้อม

การเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกในแต่ละขั้นตอนในงานวิจัยนี้ได้มาจากการลงพื้นที่สัมภาษณ์ งานวิจัยและวารสารที่เกี่ยวข้องที่ทำในประเทศไทย ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการต้นน้ำสำหรับวัตถุดิบ สารเคมี และพลังงานได้มาจากฐานข้อมูลวัฏจักรชีวิตของวัสดุพื้นฐานและพลังงานของประเทศ Ecoinvent 2.0 [10] และคู่มือของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) [11] รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนและสมมติฐานที่ใช้อธิบายจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3.1 การเพาะปลูกข้าว

พันธุ์ข้าวที่นำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวในจังหวัดพิษณุโลกโดยทั่วไปได้มาจากข้าวเจ้าไม่ไวต่อช่วงแสงพันธุ์พิษณุโลก 2 ซึ่งมีผลผลิตเฉลี่ยต่อฤดูการเพาะปลูก 747 กิโลกรัมต่อไร่ [12] และมีระยะเวลาการเพาะปลูก 120 วัน การเพาะปลูกข้าวครอบคลุมตั้งแต่การเตรียมที่ดิน การทำนาโดยวิธีปักดำต้นกล้า [13] การใส่ปุ๋ยในแปลงนา และการเก็บเกี่ยว ต่อซึ่งข้าวที่เหลือจะถูกปล่อยทิ้งไว้ในนาข้าวโดยไม่มีการเผา สำหรับการปล่อยก๊าซ N₂O จากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน และการปล่อยก๊าซ CO₂ จากการใช้ปุ๋ยยูเรียจะใช้วิธีการคำนวณอ้างอิง

ตามคู่มือ 2006 IPCC [14, 15] นอกจากนี้ การปล่อยก๊าซ CH_4 ในนาข้าวจะใช้ค่าการปล่อยที่ได้จากการศึกษาในประเทศ ระดับเทียบ 2 สำหรับข้าวนาปี คือ 0.189 กิโลกรัม CH_4 ต่อไร่ ต่อวัน [16] ข้อมูลการเพาะปลูกข้าวได้มาจากการสัมภาษณ์เจ้าพนักงานการเกษตรศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมสำหรับขั้นตอนการเพาะปลูกข้าวเจ้า พันธุ์พิษณุโลก 2 (ต่อ 1 กิโลกรัมข้าวเปลือก)

ข้อมูล	ปริมาณ
สารขาเข้า	
ปุ๋ยไนโตรเจน (kg)	0.0161
ปุ๋ยฟอสฟอรัส (kg)	0.0080
ปุ๋ยโพแทสเซียม (kg)	0.0040
ยาฆ่าแมลง (kg)	0.0004
น้ำมันดีเซล (L)	0.0115
สารขาออก	
ข้าวเปลือก (kg)	1.0000

2.3.2 การสีข้าว

หลังจากทำการเก็บเกี่ยว ข้าวเปลือกจะถูกขนส่งไปยังโรงสี เพื่อกระเทาะเปลือกออกเป็นข้าวกล้องและแกลบ ข้าวกล้องจะถูกนำไปขัด ได้ข้าวสาร ปลายข้าว รำ และแกลบ [17] โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการสีข้าวมีค่า 56 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ต่อตันข้าวเปลือก [2, 18, 19] ปริมาณสารขาเข้าและขาออก สำหรับขั้นตอนการสีข้าวแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมสำหรับขั้นตอนการสีข้าว (ต่อ 1 กิโลกรัมปลายข้าว)

ข้อมูล	ปริมาณ	ที่มา
สารขาเข้า		
ข้าวเปลือก (kg)	4.1667	[17]
ไฟฟ้า (kWh)	0.2340	[2, 18, 19]
กระสอบพลาสติก PP (kg)	0.0100	ข้อมูลปฐมภูมิ
ด้ายเย็บกระสอบ (kg)	1.37×10^{-5}	ข้อมูลปฐมภูมิ
สารขาออก		
ปลายข้าว (kg)	1.0000	[17]
ข้าวสาร (kg)	1.7640	[17]
รำ (kg)	0.4247	[17]
แกลบ (kg)	0.9799	[17]

2.3.3 การผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวสด

ปลายข้าวที่ได้จากขั้นตอนการสีข้าวจะถูกขนส่งมายังโรงงาน ผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวสดซึ่งเป็นโรงงานผลิตหลัก จำนวน 1 โรง ตั้งอยู่ในอำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ข้อมูลในขั้นตอนการผลิต ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กได้มาจากการสัมภาษณ์ เจ้าหน้าที่ฝ่ายผลิตของโรงงาน ข้อมูลปริมาณสารขาเข้าและสาร ขาออกสำหรับกระบวนการผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และ ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กแสดงในตารางที่ 3 รายละเอียดของการผลิต ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กมีดังนี้

1) การผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่

โรงงานมีกำลังการผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่ต่อวันเฉลี่ย 259 กิโลกรัม การผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่เริ่มจากการล้างทำความสะอาด ปลายข้าวด้วยน้ำและทำการแช่ปลายข้าว ข้าวที่ผ่านการ แช่จะถูกนำไปหมักและโม่ละเอียดด้วยเครื่องโม่หิน จากนั้น ผสมแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด และน้ำมันพืช ลงไปในน้ำ แป้งที่ได้จากการโม่และทำการกวนส่วนผสมแล้วพักส่วนผสมทิ้ง ไว้ 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา ส่วนผสมจะถูกปล่อยลงบน รางนึ่งไอน้ำ ซึ่งเลื่อยจะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนกับ หม้อต้มไอน้ำ ปริมาณไอน้ำที่ใช้สามารถวัดได้จากมาตรวัดน้ำ โดยมีสมมติฐานว่าปริมาณน้ำเข้าในหม้อไอน้ำเท่ากับปริมาณไอน้ำ ที่ผลิตได้ แผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยวที่ผ่านการนึ่งจะถูกถาดึงเข้าสู่ รางเลื่อนเพื่อเป่าลมและเคลือบด้วยน้ำมันเพื่อไม่ให้แผ่นแป้ง ติดกัน หลังจากนั้นแผ่นแป้งจะถูกตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด ใหญ่ด้วยเครื่องตัดและถูกนำไปวางซ้อนกันเพื่อตัดเป็นเส้นตาม ขนาดที่ต้องการแล้วนำไปบรรจุใส่ถุงพลาสติกโพลีเอทิลีน (PE)

2) การผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก

โรงงานมีกำลังการผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กต่อวันเฉลี่ย 218 กิโลกรัมต่อวัน สำหรับการผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก กระบวนการ ผลิตในขั้นต้น (การล้างและแช่ข้าว การโม่ข้าว การผสมแป้ง (ไม่ ต้องพักส่วนผสม 24 ชั่วโมง) และการนึ่ง) มีขั้นตอนการผลิต เหมือนก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่ หลังจากขั้นตอนการนึ่ง แผ่นแป้งจะ ถูกถาดึงเข้าสู่เครื่องอบหมาดเพื่อลดความชื้น จากนั้นแผ่นแป้ง จะถูกตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ และถูกนำไปวางซ้อนกัน และพักทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการตัดแผ่นแป้ง ก๋วยเตี๋ยวเป็นเส้นเล็กโดยใช้เครื่องจักรแล้วนำไปบรรจุใส่ ถุงพลาสติกโพลีเอทิลีน (PE)

ตารางที่ 3 บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมสำหรับขั้นตอนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว
(ต่อ 1 กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)

ข้อมูล	ปริมาณ	
	เส้นใหญ่	เส้นเล็ก
สารขาเข้า		
ปลายข้าว (kg)	0.3861	0.4587
น้ำ (m ³)	0.0039	0.0060
แป้งมันสำปะหลัง (kg)	0.1931	0.1376
แป้งข้าวโพด (kg)	0.0193	0.0229
เกลือ (kg)	0.0054	0.0032
น้ำมันพืช (kg)	0.0560	0.0459
ไฟฟ้า (kWh)	0.0250	0.0794
ซีลี้อย (kg)	0.6178	1.1009
ถุงพลาสติก PE (kg)	0.0031	0.0032
สารขาออก		
ก๋วยเตี๋ยว (kg)	1.0000	1.0000
เศษเส้นก๋วยเตี๋ยว (kg)	0.0000	0.0032
น้ำเสีย (m ³)	0.0011	0.0008
น้ำคอนเดนเสท (m ³)	0.0025	0.0045

2.3.4 การขนส่ง

การขนส่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การขนส่งผลิตภัณฑ์ และการขนส่งวัตถุดิบ การขนส่งผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย 1) การขนส่งข้าวเปลือกจากนาข้าวไปโรงสีข้าว 2) การขนส่งปลายข้าวจากโรงสีไปยังโรงงานผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว 3) การขนส่งเส้นก๋วยเตี๋ยวจากโรงงานไปยังตลาดสดเทศบาลทั้ง 6 แห่งในอำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก และ 4) การขนส่งซากผลิตภัณฑ์ไปยังสถานีกำจัดขยะมูลฝอยเทศบาลพิษณุโลก ตำบลบึงกอก อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก การขนส่งวัตถุดิบแสดงในเอกสารเพิ่มเติมในตารางที่ ก.8 และ ข.8 ข้อมูลในขั้นตอนการขนส่งได้มาจากการสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่ของโรงสีข้าว และเจ้าหน้าที่ฝ่ายผลิตของโรงงาน ข้อมูลการขนส่งผลิตภัณฑ์ในแต่ละขั้นตอนแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อมูลการขนส่งผลิตภัณฑ์สำหรับข้าวเปลือก ปลายข้าว
เส้นก๋วยเตี๋ยว และการขนส่งซาก

พาหนะ	ระยะทาง (km)
การขนส่งข้าวเปลือกไปโรงสีข้าว	
รถบรรทุก 6 ล้อ	10.00
รถอีแต่น	10.00
การขนส่งปลายข้าวไปโรงงาน	
รถบรรทุก 6 ล้อ จากโรงสี A	67.70
รถบรรทุก 6 ล้อ จากโรงสี B	54.00
รถบรรทุก 6 ล้อ จากโรงสี C	7.60
การขนส่งเส้นก๋วยเตี๋ยวไปตลาด	
รถซาเล้ง (จักรยานยนต์ 4 จังหวะ)	9.00
การขนส่งซากไปสถานีกำจัดขยะ	
รถบรรทุกขยะ 10 ล้อ	44.75

2.3.5 การบริโภค

สำหรับขั้นตอนการบริโภค มีสมมติฐานว่าก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่ และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กจะถูกนำไปบริโภคในครัวเรือนเป็นเมนูก๋วยเตี๋ยว ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะปริมาณน้ำที่ใช้ลวก และก๊าซหุงต้ม เท่านั้น โดยมีสมมติฐานว่าก๋วยเตี๋ยว 1 กิโลกรัม ใช้น้ำในการลวกปริมาณ 5 ลิตร (คำนวณปริมาณน้ำจากภาชนะที่ใส่) ปริมาณก๊าซหุงต้มที่ใช้คำนวณจากความร้อนที่ใช้ในการต้ม 5 ลิตร ให้เดือด (ก๊าซหุงต้ม 1 กิโลกรัม ให้ความร้อน 49.59 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [20]) ส่วนน้ำที่เหลือจากการลวกเส้นก๋วยเตี๋ยว 95% จะถือว่าเป็นน้ำเสีย วัตถุดิบและวัสดุที่ใช้ในการประกอบอาหาร ปริมาณน้ำและสารทำความสะอาดที่ใช้ในการล้างภาชนะจะไม่นำมาคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในงานวิจัยนี้ ปริมาณสารขาเข้าและขาออกสำหรับขั้นตอนการบริโภคแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมสำหรับขั้นตอนการบริโภค
(ต่อ 1 กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)

ข้อมูล	ปริมาณ
สารขาเข้า	
น้ำ (m ³)	0.0050
ก๊าซหุงต้ม (kg)	0.0300
สารขาออก	
น้ำเสีย (m ³)	0.0048

2.3.6 การกำจัดซากผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนการกำจัดซากผลิตภัณฑ์เป็นการกำจัดของเสียจากกระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอน โดยมีสมมติฐานว่าน้ำเสียและน้ำคอนเดนเสทที่ปล่อยออกมาจากขั้นตอนการผลิตและการบริโภคจะถูกรวบรวมและปรับปรุงคุณภาพผ่านระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ในขณะที่เศษเส้นก๋วยเตี๋ยวและซากบรรจุภัณฑ์จะถูกกำจัดซากด้วยวิธีฝังกลบทั้งหมด ข้อมูลปริมาณของเสียของก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมสำหรับขั้นตอนการกำจัดซากผลิตภัณฑ์ (ต่อ 1 กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)

ข้อมูล	ปริมาณ	
	เส้นใหญ่	เส้นเล็ก
กระสอบพลาสติก PP (kg)	0.0039	0.0046
ด้ายเย็บกระสอบ (kg)	5.2×10^{-6}	6.3×10^{-6}
น้ำเสีย (m ³)	0.0058	0.0056
น้ำคอนเดนเสท (m ³)	0.0025	0.0045
ถุงพลาสติก PE (kg)	0.0031	0.0032

2.4 การประเมินผลกระทบการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ข้อมูลบัญชีรายการวัฏจักรชีวิตที่ได้รวบรวมจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังแสดงในสมการที่ 2 [21]

$$\text{ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรม (kg CO}_2\text{ eq)} = \text{ข้อมูลกิจกรรม (หน่วย)} \times \text{ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kg CO}_2\text{ eq/หน่วย)} \quad (2)$$

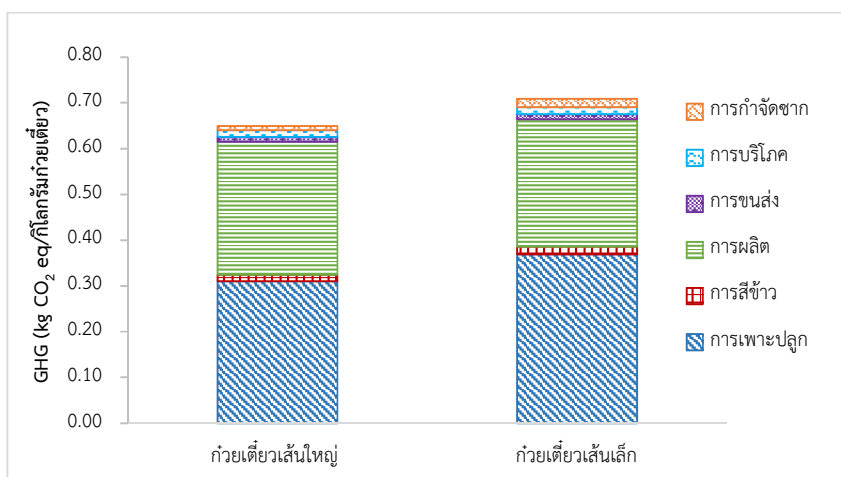
2.5 การแปลผล

เป็นการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของแต่ละขั้นตอน เพื่อระบุขั้นตอนที่มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด และจัดหาแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสด

3. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก โดยทำการศึกษารอบคลุมตั้งแต่ขั้นตอนการเพาะปลูกข้าว การสีข้าว การผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว การขนส่ง ตลอดไปจนถึงการกำจัดซาก ซึ่งรายละเอียดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนสำหรับก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กแสดงในเอกสารเพิ่มเติม ตารางที่ ก.1 - ก.8 และ ข.1 - ข.8 ตามลำดับ

รูปที่ 2 แสดงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสด จากการศึกษาพบว่า ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 0.650 และ 0.709 kg CO₂ eq ต่อ 1 กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว ซึ่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ยในแต่ละขั้นตอนเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ การเพาะปลูกข้าว (50%) การผลิต (42%) การบริโภค (2%) การสีข้าว (2%) การกำจัดซาก (2%) และการขนส่ง (2%)

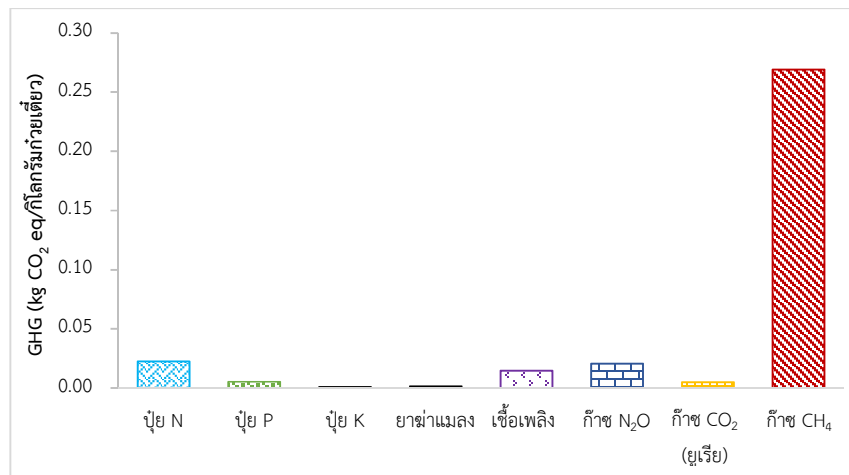


รูปที่ 2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนสำหรับก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก

ขั้นตอนการเพาะปลูกข้าวมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด โดยพบว่า กว๋ยเตี่ยวเส้นใหญ่และกว๋ยเตี่ยวเส้นเล็กมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนนี้เท่ากับ 0.310 และ 0.369 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมกว๋ยเตี่ยว โดยมีค่าเฉลี่ยคิดเป็น 50% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะขั้นตอนการเพาะปลูกข้าวเปลือก (แสดงในรูปที่ 3) พบว่า โดยเฉลี่ย 79% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนนี้มาจากการปล่อยก๊าซ CH₄ ในนาข้าว เนื่องจากการปล่อยก๊าซ CH₄ ในนาข้าวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการปล่อยและระยะเวลาเพาะปลูกข้าว [15] การใช้ปุ๋ยเคมีไนโตรเจน และการปล่อยก๊าซ N₂O ทั้งทางตรงและทางอ้อมจากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน มีผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ยอยู่ที่ 7% และ 6% ตามลำดับ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของจำนวนวันปล่อยน้ำออกจากนาข้าวที่มีต่อการปล่อยก๊าซเรือน

กระจกในขั้นตอนการเพาะปลูกข้าว โดยเลือกช่วงการปล่อยน้ำที่ไม่มีผลกระทบต่อภาระเจริญเติบโตของต้นข้าว คือ มีการปล่อยน้ำออกในช่วง 20 วันแรกของระยะข้าวเริ่มแตกกอ และระยะก่อนการเก็บเกี่ยว 10 วัน รวมทั้งหมด 30 วัน โดยใช้ค่าการปล่อยเดิมในการคำนวณ (0.189 กิโลกรัม CH₄ ต่อไร่ต่อวัน) พบว่าการปล่อยน้ำออกจากนาข้าวสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการเพาะปลูกข้าวได้ 20% หรือคิดเป็น 10% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด

ผลของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ได้จากขั้นตอนการเพาะปลูกข้าวในงานวิจัยนี้ (0.804 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมข้าวเปลือก (ไม่คิดค่าปันส่วน)) มีค่าสอดคล้องกับช่วงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตข้าวเปลือก (0.67 - 3.96 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมข้าวเปลือก) ของโครงการจัดทำฐานข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาคเกษตร [14]



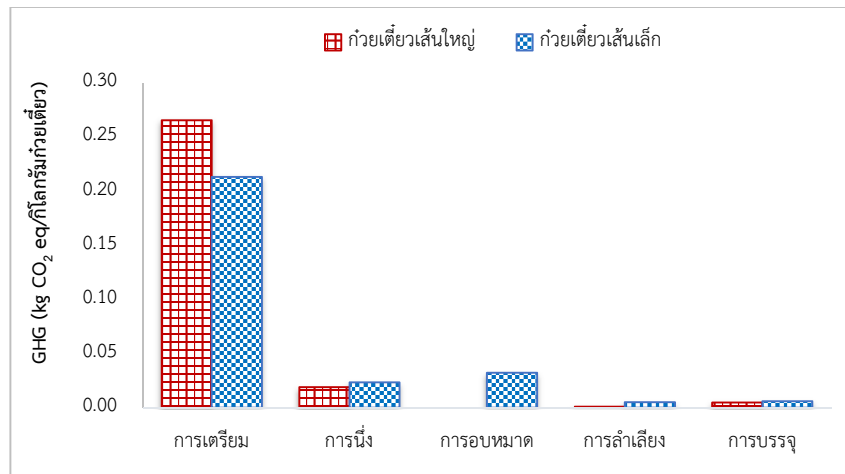
รูปที่ 3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับขั้นตอนการเพาะปลูกข้าว

ขั้นตอนการผลิตเส้นกว๋ยเตี่ยวมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากเป็นอันดับสองรองจากขั้นตอนการเพาะปลูกข้าว (แสดงในรูปที่ 2) โดยพบว่า กว๋ยเตี่ยวเส้นใหญ่และกว๋ยเตี่ยวเส้นเล็กมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนนี้เท่ากับ 0.290 และ 0.279 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมกว๋ยเตี่ยว โดยมีค่าเฉลี่ยคิดเป็น 42% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด (จากน้ำมันพืชเฉลี่ย 17% แป้งมันสำปะหลัง 15% ไฟฟ้า 4% และชีเลื่อย 3%) อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะขั้นตอนย่อยในการผลิตเส้นกว๋ยเตี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า ขั้นตอนการเตรียม

วัตถุดิบ (รวมขั้นตอนการล้างน้ำ การไม่หยาบและไม่ละเอียดย และการผสมแป้ง) มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด โดยพบว่ากว๋ยเตี่ยวเส้นใหญ่และกว๋ยเตี่ยวเส้นเล็กมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในการเตรียมวัตถุดิบเท่ากับ 0.266 และ 0.213 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมกว๋ยเตี่ยว (เฉลี่ยคิดเป็น 84%) ซึ่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่มาจากการใช้น้ำมันพืช และแป้งมันสำปะหลังเฉลี่ยเท่ากับ 0.116 และ 0.100 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมกว๋ยเตี่ยว ทั้งนี้เนื่องจากมีการใช้วัตถุดิบทั้งสองชนิดเป็นส่วนผสมในปริมาณมาก นอกจากนี้ น้ำมันพืชมีค่าการปล่อย

ก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตค่อนข้างสูง (2.282 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัม [10]) เมื่อเทียบกับวัตถุดิบหลักชนิดอื่น จึงทำให้ขั้นตอนการเตรียมมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในสัดส่วนที่สูง ในขณะที่การอบหมักเป็นขั้นตอนที่ใช้สำหรับการผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กเท่านั้น ซึ่งมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 0.032 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว (คิดเป็น 11%) โดยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่มาจากการใช้ไฟฟ้าสำหรับเครื่องอบหมัก (0.022 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว) และการใช้ชี้เลี้ยงเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ (0.009 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว) ขั้นตอนการอบหมักมีการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกขั้นตอนย่อยของการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว นอกจากนี้ ยังพบว่าโรงงานปิดตู้อบหมักไม่มิดชิดขณะเดินเครื่อง ซึ่งทำให้มีความร้อนสูญเสียและอาจส่งผล

ให้สิ้นเปลืองพลังงานทั้งจากไฟฟ้าและเชื้อเพลิง สำหรับขั้นตอนการนึ่ง ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 0.019 และ 0.023 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว (เฉลี่ยคิดเป็น 7%) โดยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมาจากการปล่อยก๊าซ CH₄ และ N₂O จากการเผาไหม้ชี้เลี้ยง ซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำสำหรับการนึ่งแผ่นแป้ง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.013 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว ขั้นตอนการลำเลียงและการบรรจุมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่นๆ โดยมีค่าเฉลี่ยคิดเป็น 1% และ 2% ตามลำดับ สาเหตุหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่มาจากการใช้ไฟฟ้า



รูปที่ 4 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับขั้นตอนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว

กล่าวโดยสรุปสำหรับขั้นตอนการผลิต ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก เนื่องจากการใช้น้ำมันพืชในปริมาณมากกว่าในขั้นตอนการเตรียม อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาการผลิตขั้นตอนอื่นๆ พบว่า ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่ เนื่องจาก 1) มีขั้นตอนการผลิตที่มากกว่า โดยมีขั้นตอนการอบหมักและการลำเลียงเพิ่มขึ้น รวมถึงมีการใช้ไฟฟ้าในการตัดเส้น 2) ใช้ระยะเวลาในการผลิตมากกว่า ซึ่งก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กใช้เวลา 1.5 ชั่วโมงในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว 218 กิโลกรัม ในขณะที่ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่ใช้เวลา 1 ชั่วโมงในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว 259 กิโลกรัม และ 3) ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก

มีปริมาณการผลิต (218 กิโลกรัม) น้อยกว่าก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่ (259 กิโลกรัม)

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากขั้นตอนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวในงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่า (ค่าเฉลี่ย 0.285 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว) งานวิจัยของรัตนาวรรณและคณะ [2] โดยรัตนาวรรณและคณะได้ทำการศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์เส้นหมี่และเส้นก๋วยเตี๋ยวแห้ง พบว่าขั้นตอนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแห้งมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 3.520 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว (คำนวณจาก 0.880 kg CO₂ eq ต่อ 250 กรัมก๋วยเตี๋ยว) [2] สาเหตุที่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากขั้นตอนการผลิตก๋วยเตี๋ยวในงานวิจัย

นี้มีค่าน้อยกว่าอาจเนื่องมาจากชนิดของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยว และขนาดของโรงงานมีความแตกต่างกัน คือ งานวิจัยนี้ศึกษาเส้นก๋วยเตี๋ยวสดในโรงงานผลิตขนาดเล็ก ซึ่งมีการใช้ปริมาณสารขาเข้าน้อยกว่า (เทียบกับ 1 กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว) โดยมีการใช้ปริมาณน้ำเฉลี่ย 0.001 ลูกบาศก์เมตร ไฟฟ้า 0.052 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และไอน้ำ 0.004 กิโลกรัม ในขณะที่รัตนาวรรณและคณะศึกษาเส้นก๋วยเตี๋ยวแห้งในโรงงานขนาดใหญ่ ซึ่งมีความต้องการใช้พลังงานปริมาณมากในการอบลดความชื้น [2, 22] โดยมีการใช้ปริมาณน้ำ 0.013 ลูกบาศก์เมตร ไฟฟ้า 4.893 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และไอน้ำ 0.560 กิโลกรัม [2] ด้วยสาเหตุนี้ จึงทำให้ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่า

ขั้นตอนการสีข้าว การบริโภคน้ำ และการกำจัดซาก มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณน้อย (แสดงในรูปที่ 2) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.015 0.015 และ 0.014 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว ตามลำดับ (เฉลี่ยคิดเป็น 2% 2% และ 2% ตามลำดับ ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด) ซึ่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากขั้นตอนการสีข้าวมาจากการใช้ไฟฟ้า ในขณะที่ขั้นตอนการบริโภคน้ำมาจากการใช้ก๊าซหุงต้ม งานวิจัยนี้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากขั้นตอนการสีข้าวน้อยกว่า (ค่าเฉลี่ย 0.015 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว) งานวิจัยของรัตนาวรรณและคณะ (0.180 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว) อาจเนื่องมาจากการใช้ค่าป้อนส่วนตามน้ำหนักของปลายข้าวที่แตกต่างกัน ขั้นตอนการขนส่งเป็นขั้นตอนที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.011 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว (เฉลี่ยคิดเป็น 2%) ซึ่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมาจากการใช้เชื้อเพลิงดีเซลในการขนส่งวัตถุดิบ

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสดสองชนิด คือ ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก โดยทำการศึกษาในโรงงานผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวจำนวน 1 โรง ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก โดยใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ขอบเขตของระบบที่ใช้คือ เครเดิลทูเกรฟ (Cradle to grave)

ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่และก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวมเท่ากับ 0.650 และ 0.709 kg CO₂ eq ต่อ กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว ตามลำดับ โดยพบว่าขั้นตอนการเพาะปลูกข้าวและขั้นตอนการผลิตเป็นขั้นตอนที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดเมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่นๆ เฉลี่ยคิดเป็น 50% และ 42% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด ตามลำดับ ส่วนขั้นตอนการสีข้าว การบริโภคน้ำ การกำจัดซาก และการขนส่ง มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ยคิดเป็น 2% 2% 2% และ 2% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดตามลำดับ

แนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสดควรให้ความสำคัญกับขั้นตอนการเพาะปลูกข้าวและขั้นตอนการผลิตเป็นหลัก สำหรับขั้นตอนการเพาะปลูกข้าวพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดคือการปล่อยก๊าซ CH₄ จากนาข้าว ดังนั้นควรเลือกช่วงการปล่อยน้ำที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวในช่วงระยะสั้นๆ เพื่อลดการปล่อยก๊าซ CH₄ จากนาข้าว ได้แก่ ระยะข้าวเริ่มแตกกอและระยะก่อนการเก็บเกี่ยว [23] และระยะก่อนข้าวออกรวงเนื่องจากเป็นช่วงที่มีการปล่อยก๊าซ CH₄ มากที่สุด [2] อย่างไรก็ตาม การปล่อยน้ำออกจากนาข้าวอาจส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมของวัชพืชในนาข้าว ซึ่งอาจทำให้ผลผลิตข้าวที่ได้น้อยลง และอาจต้องมีการจัดการวัชพืชเพิ่มเติมจากการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช [24] ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจก นอกจากนี้ ควรเลือกใช้ปุ๋ยอินทรีย์ร่วมกับปุ๋ยเคมีเพื่อเพิ่มผลผลิตข้าวและลดการปล่อยก๊าซ CH₄ และ N₂O ในนาข้าว [25] เนื่องจากการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ลงในดินจะทำให้เกิดการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ในปุ๋ย ซึ่งมีผลทำให้เกิดการปล่อยก๊าซ CH₄ มากกว่าการใช้ปุ๋ยเคมี [25, 26] และควรทำการตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนในดินก่อนทำการเพาะปลูกเพื่อจำกัดการใช้ปุ๋ยเคมีให้มีปริมาณเพียงพอกับความต้องการของพืช เนื่องจากปุ๋ยไนโตรเจนเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญในการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ซึ่งทำให้เกิดการปล่อยก๊าซ N₂O [14] สำหรับขั้นตอนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวพบว่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่มาจากการใช้วัตถุดิบจำพวกน้ำมันพืชและแป้งมันสำปะหลัง การปรับลดการใช้ น้ำมันพืชและแป้งมันสำปะหลัง

ในส่วนผสมอาจจะช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างไรก็ดี การปรับลดส่วนผสมของวัตถุดิบอาจมีผลกระทบต่อคุณภาพและปริมาณของเส้นก๋วยเตี๋ยว ทั้งนี้การตัดสินใจขึ้นอยู่กับดุลพินิจของผู้ประกอบการ นอกจากนี้ ควรปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตและการใช้พลังงาน โดยเฉพาะการใช้พลังงานจากไฟฟ้าและชีเสื่อซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการผลิต ดังนั้นการลดการสูญเสียของการใช้พลังงานอาจทำได้โดยการนำกลับซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้จากขั้นตอนการสีข้าวมาใช้เป็นพลังงานทดแทน การนำน้ำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่ การหุ้มฉนวนอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ การหุ้มฉนวนที่คู่อบและปิดคู่อบแห้งให้มีมิติชิดในขณะเดินเครื่อง [2, 22] การโบลว์ดาวน์น้ำในหม้อไอน้ำเพื่อลดการสะสมของตะกรัน [22] ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียความร้อน ลดการใช้พลังงาน และลดปริมาณการใช้น้ำ ควรปรับปรุงระบบการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้นและลดปริมาณของเสียให้เหลือน้อยลง โดยการนำน้ำที่ใช้ครั้งสุดท้ายกลับมาใช้ล้างข้าวครั้งแรก การปรับลูกกลิ้งให้เคลือบน้ำมันพืชบนแผ่นแป้งน้อยลง รวมถึงการเลือกข้าวสุกที่เหมาะสมในการทำลูกกลิ้งใบมีดของเครื่องตัดเส้นจะช่วยเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์และลดปริมาณของเสียที่ต้องกำจัด [22] นอกจากนี้ ควรมีการเรียกเก็บกระสอบพลาสติกคืนจากโรงสีข้าวเพื่อนำกลับมาใช้หมุนเวียน รวมถึงการนำเศษก๋วยเตี๋ยวไปใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบส่วนผสมในอาหารสัตว์ จะช่วยลดพื้นที่ฝังกลบขยะ และลดการปล่อยก๊าซ CH_4 จากการฝังกลบขยะได้อีกด้วย

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะประโยชน์ต่อเกษตรกรผู้เพาะปลูกข้าวตลอดจนผู้ประกอบการโรงงานผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวสด ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นประกอบการตัดสินใจในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดจนสายโซ่การผลิต เพื่อนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายจากการใช้ทรัพยากรที่ไม่เหมาะสม ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณจิตติชัย อนุวณิช เจ้าพนักงานการเกษตรชำนาญงานจากศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลกที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล และให้คำปรึกษาแนะนำเชิงลึกด้านการเพาะปลูกข้าวเจ้า

นาปี พันธุ์พิษณุโลก 2 ขอขอบคุณโรงงานผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวสด (ไม่ประสงค์ออกนาม) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย และสละเวลาในการให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวสด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] MOF. (2016). Tax clinic for noodles, Ministry of Finance (MOF). Retrieved November 26, 2016, from http://taxclinic.mof.go.th/pdf/0155882A_2754_8F5E_43D9_385B00B7D70C.pdf (in Thai)
- [2] Mungkung, R., Gheewala, S., Poovarodom, N., & Towprayoon, S. (2010). Carbon footprint analysis and management of rice products for carbon label to promote low-carbon economy for climate change mitigation. (in Thai)
- [3] Cholathat, R. (2015). Climate change and potential solutions. *Journal of Social Sciences Srinakharinwirot University*, 416-431. (in Thai)
- [4] OPM. (2016). National economic and social development plan, 12 edition 2017 - 2021, Office of the Prime Minister (OPM). (in Thai)
- [5] Curran, M. A. (2013). Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2(3), 273-277. doi: 10.1016/j.coche.2013.02.002
- [6] Fritsche, U. R., & Eberle, U. (2009). Greenhouse-gas emissions from the production and processing of food.
- [7] TGO. (2015b). Dried rice noodle for 1 kilogram. Retrieved June 12, 2018, from http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/products_approval/products_approval.pnc (in Thai)
- [8] TGO. (2018). Carbon footprint of product: Registered Company and products. Retrieved 2018, June 12, from http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/products_approval/products_approval.pnc (in Thai)
- [9] TGO. (2015a). Guideline for the assessment of carbon footprint of product. Retrieved 2017, March 14, from http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/download/ts_cb3d37071f.pdf (in Thai)
- [10] TGO. (2016). Emission factor, Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization). Retrieved March 19, 2017, from

- http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_822ebb1ed5.pdf (in Thai)
- [11] IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories.
- [12] DOAE. (2560). Rice production of Phitsanulok 2 for wet season rice in Thailand. *Department of Agricultural Extension (DOAE)*. Retrieved January 20, 2018, from http://production.doae.go.th/report/report_main_land_01_A_new2.php?report_type= (in Thai)
- [13] Phitsanulok Rice Research Center. (2012). Rice academic documents, 50-year Phitsanulok Rice Research Center: Rice Department. (in Thai)
- [14] Klein, C. D., Novoam, R., Ogle, S., Smith, K. A., Rochette, P., Wirth, T. C., . . . Williams, S. A. (2006). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 4 : Agriculture, forestry and other land use, Chapter 11: N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. from http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf
- [15] Klein, C. D., Novoam, R., Ogle, S., Smith, K. A., Rochette, P., Wirth, T. C., . . . Williams, S. A. (2006). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 4 : Agriculture, forestry and other land use, Chapter 11: N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. from http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf
- [16] JGSEE. (2012). Greenhouse gas emission database from agricultural sector *The Joint Graduate School of Energy and Environment (JGSEE)*. King Mongkut's University of Technology Thonburi. (in Thai)
- [17] Kalsirisin, R. (2002). Agricultural machinery 2. Retrieved August 3, 2017, from http://www.arda.or.th/kasetinfo/rice/rice_product/rice-product4_1.html (in Thai)
- [18] Amornchaisup, S. (2002). *Energy consumption for rice milling and cooking*. Master's thesis. King Mongkuts University of Technology Thonburi. Retrieved from <http://www.thaiscience.info/Article%20for%20ThaiScience/Article/3/10014147.pdf> (in Thai)
- [19] Ekasilp, W., Soponronnarit, S., & Therdyothin, A. (1995). Energy analysis in rice mills for cogeneration in Thailand. *Kasetsart Journal*, 29, 87-99. (in Thai)
- [20] MOE. (2016). Thailand energy balance manual, Ministry of Energy (MOE). (in Thai)
- [21] Sampattagul, S., Kongboon, R., & Prathumthong, U. (2014). *Carbon Footprint Management for Food Industry*. (in Thai)
- [22] DIW. (2003). Practice for pollution prevention (Cleaner Technology), Noodle industry *Department of Industrial Works (Diw)*. (in Thai)
- [23] Anawong, J. (2017). [Personal communication. April 3 2017]
- [24] Kohkhoo, R., Chaichana, N., Chai-arree, W., Pornprom, T., Malumpong, C., & Pakoktom, T. (2015). Methane emissions from water and weed managements in irrigated paddy rice field. *Proceedings of 53rd Kasetsart University Annual Conference: Plants, Animals, Veterinary Medicine, Fisheries, Agricultural Extension and Home Economics*. Retrieved September 9, 2018, from http://kukr.lib.ku.ac.th/proceedings/KUCON2/search_detail/download_digital_file/315145/89600 (in Thai)
- [25] Chomkaew, S. (2013). Effect of fertilizers on greenhouse gas emission in paddy field. Master's thesis. Chulalongkorn University. (in Thai)
- [26] Phraprasert, P. (2000). *Effects of rice varieties and nitrogen fertilizers on methane emission* Master's thesis, *Kasetsart University*. (in Thai)

เอกสารเพิ่มเติม:

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวสด
ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก

ข้อมูลในเอกสารเพิ่มเติมประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 ตารางแสดงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนสำหรับก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่ (ตารางที่ ก.1 – ก.8)

ส่วนที่ 2 ตารางแสดงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนสำหรับก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก (ตารางที่ ข.1 – ข.8)

ส่วนที่ 1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนสำหรับก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่

ตารางที่ ก.1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการเพาะปลูกข้าว (Basis on: 1 กิโลกรัมข้าวเปลือก)

ข้อมูล	หน่วย	ปริมาณ/Basis	ปริมาณ/FU	การปันส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก	
					(kgCO ₂ eq/Basis)	(kgCO ₂ eq/กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)
สารขาเข้า						
ปุ๋ยเคมีไนโตรเจน (ยูเรีย)	kg	0.0161	0.0258	0.2399	0.0127	0.0205
ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัส	kg	0.0080	0.0129	0.2399	0.0030	0.0049
ปุ๋ยเคมีโพแทสเซียม	kg	0.0040	0.0065	0.2399	0.0005	0.0008
ยาฆ่าแมลง	kg	0.0004	0.0006	0.2399	0.0008	0.0013
น้ำมันดีเซล	L	0.0115	0.0185	0.2399	0.0008	0.0012
สารขาออก						
CO ₂ จากการเผาไหม้ดีเซล	kg	0.0316	0.0508	0.2399	0.0076	0.0122
CO ₂ จากปุ๋ยยูเรีย	kg	0.0118	0.0190	0.2399	0.0028	0.0045
N ₂ O จากการใช้ปุ๋ย	kg	0.0002	0.0003	0.2399	0.0117	0.0189
CH ₄ จากนาข้าว	kg	0.0304	0.0488	0.2399	0.1530	0.2461
รวม					0.1929	0.3104

ตารางที่ ก.2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการสีข้าว (Basis on: 1 กิโลกรัมปลายข้าว)

ข้อมูล	หน่วย	ปริมาณ/Basis	ปริมาณ/FU	การปันส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก	
					(kgCO ₂ eq/Basis)	(kgCO ₂ eq/กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)
สารขาเข้า						
ข้าวเปลือก	kg	4.1667	1.6088	0.2399		
ไฟฟ้า	kwh	0.2340	0.0903	0.2399	0.0327	0.0126
กระสอบพลาสติก PP	kg	0.0100	0.0039	0.2399	0.0033	0.0013
ด้ายเย็บกระสอบ	kg	1.37 × 10 ⁻⁵	5.29 × 10 ⁻⁶	0.2399	2.64 × 10 ⁻⁵	1.02 × 10 ⁻⁵
สารขาออก						
ต้นข้าว	kg	1.76	0.6808	0.4232		
ปลายข้าว	kg	1.00	0.3859	0.2399		
รำ	kg	0.42	0.1639	0.1019		
แกลบ	kg	0.98	0.3782	0.2351		
รวม					0.0360	0.0139

ตารางที่ ก.3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการผลิต (Basis on: 1 กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)

ข้อมูล	หน่วย	ปริมาณ/Basis	การปันส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO ₂ eq/กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)
<i>สารขาเข้า</i>				
ปลายข้าว	kg	0.3861	1.0000	
น้ำ	m ³	0.0014	1.0000	0.0010
แป้งมันสำปะหลัง	kg	0.1931	1.0000	0.1165
แป้งข้าวโพด	kg	0.0193	1.0000	0.0115
เกลือ	kg	0.0054	1.0000	3.03 × 10 ⁻⁵
น้ำมันพืช	kg	0.0560	1.0000	0.1278
น้ำ (ผลิตไอน้ำ)	kg	0.0025	1.0000	0.0018
ซีลี้อย	kg	0.6178	1.0000	0.0126
ถุงพลาสติก PE	kg	0.0031	1.0000	0.0047
ไฟฟ้า	kwh	0.0250	1.0000	0.0146
<i>สารขาออก</i>				
ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่	kg	1.0000		
น้ำเสีย	m ³	0.0011		
น้ำคอนเดนเสท	m ³	0.0025		
รวม				0.2904

ตารางที่ ก.4 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนย่อยของการผลิต (Basis on: 1 กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)

ข้อมูล	หน่วย	ปริมาณ/Basis	การปันส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO ₂ eq/กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)
1. การเตรียม				
- การล้างน้ำ				
สารขาเข้า				
ปลายข้าว	kg	0.3861	1.0000	
น้ำ	m ³	0.0004	1.0000	0.0003
ไฟฟ้า	kwh	0.0001	1.0000	3.37 × 10 ⁻⁵
สารขาออก				
น้ำเสีย	m ³	0.0003		
- การไม่หยาบและไม่ละเอียด				
สารขาเข้า				
น้ำ	m ³	0.0008	1.0000	0.0005
ไฟฟ้า	kwh	0.0144	1.0000	0.0084
- การผสมแป้ง				
สารขาเข้า				
น้ำ	m ³	0.0003	1.0000	0.0002
ไฟฟ้า	kwh	0.0010	1.0000	0.0006
แป้งมันสำปะหลัง	kg	0.1931	1.0000	0.1165
แป้งข้าวโพด	kg	0.0193	1.0000	0.0115
เกลือ	kg	0.0054	1.0000	3.03 × 10 ⁻⁵
น้ำมันพืช	kg	0.0560	1.0000	0.1278
2. การนึ่ง				
สารขาเข้า				
น้ำ	m ³	0.0025	1.0000	0.0018
ไฟฟ้า	kwh	0.0076	1.0000	0.0044
ซีลี้อย	kg	0.6178	1.0000	0.0126
สารขาออก				
น้ำคอนเดนเสท	m ³	0.0025		
น้ำเสีย	m ³	0.0008		
3. การลำเลียง				
สารขาเข้า				
ไฟฟ้า	kwh	0.0020	1.0000	0.0012
สารขาออก				
เส้นกล้วยเดี่ยว	kg	1.0000		
4. การบรรจุ				
สารขาเข้า				
ถุงพลาสติก PE	kg	0.0031	1.0000	0.0047
รวม				0.2904

ตารางที่ ก.5 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการบริโภค (Basis on: 1 กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)

ข้อมูล	หน่วย	ปริมาณ/Basis	การปันส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO ₂ eq/กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)
สารขาเข้า				
น้ำ	m ³	0.0050	1.0000	0.0035
ก๊าซหุงต้ม	kg	0.0300	1.0000	0.0116
สารขาออก				
น้ำ	m ³	0.0048		
รวม				0.0151

ตารางที่ ก.6 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการกำจัดซากผลิตภัณฑ์ (Basis on: 1 กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)

ข้อมูล	หน่วย	ปริมาณ/Basis	การปันส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO ₂ eq/กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)
ขั้นตอนการสีข้าว				
กระสอบพลาสติก PP	kg	0.0039	0.2399	0.0021
ด้ายเย็บกระสอบ	kg	5.29 × 10 ⁻⁶	0.2399	2.54 × 10 ⁻⁶
ขั้นตอนการผลิต				
น้ำเสีย	m ³	0.0011	1.0000	1.35 × 10 ⁻⁷
น้ำคอนเดนเสท	m ³	0.0025	1.0000	3.19 × 10 ⁻⁷
ถุงพลาสติก PE	kg	0.0031	1.0000	0.0071
ขั้นตอนการบริโภค				
น้ำเสีย	m ³	0.0048	1.0000	5.97 × 10 ⁻⁷
รวม				0.0093

ตารางที่ ก.7 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการขนส่งผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์	ปริมาณ/Basis	ระยะทาง (km)	ประเภทพาหนะ	สัดส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก	
					(kgCO ₂ eq/Basis)	(kgCO ₂ eq/กิโลกรัมข้าวเดียว)
1. การขนส่งข้าวเปลือกไปโรงสีข้าว (Basis on: 1 กิโลกรัมข้าวเปลือก)						
ข้าวเปลือก	3.333	10	รถกระบะบรรทุก 6 ล้อ ขนาดเล็ก วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 8.5 ตัน	0.2399	0.0009	0.0004
ข้าวเปลือก	0.833	10	รถกระบะบรรทุก 4 ล้อ ขนาดเล็ก วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 1.5 ตัน	0.2399	0.0007	0.0003
2. การขนส่งปลายข้าวไปโรงงานผลิต (Basis on: 1 กิโลกรัมข้าวเดียว)						
ปลายข้าว	0.129	54	รถกระบะบรรทุก 6 ล้อ ขนาดเล็ก วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 8.5 ตัน	1.0000		0.0008
ปลายข้าว	0.129	8		1.0000		0.0001
ปลายข้าว	0.129	68		1.0000		0.0010
3. การขนส่งข้าวเดียวไปตลาดสดเทศบาล (Basis on: 1 กิโลกรัมข้าวเดียว)						
ข้าวเดียวเส้นใหญ่	259	9	ชาเล้ง (รถจักรยานยนต์เบนซิน 4 จังหวะ 125 cc) อัตราการสิ้นเปลือง 38.655 km/L	1.0000		0.0025
4. การขนส่งจากผลิตภัณฑ์ไปสถานที่กำจัดขยะมูลฝอย (Basis on: 1 กิโลกรัมข้าวเดียว)						
กระสอบพลาสติก PP	0.0039	45	รถบรรทุกขยะ 10 ล้อ วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 16 ตัน	0.2399		3.22 × 10 ⁻⁶
ด้ายเย็บกระสอบ	5.29 × 10 ⁻⁶	45		0.2399		4.41 × 10 ⁻⁹
ถุงพลาสติก PE	0.0031	45		1.0000		1.09 × 10 ⁻⁵
รวม						0.0051

ตารางที่ ก.8 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการขนส่งวัตถุดิบ

ผลิตภัณฑ์	ปริมาณ/Basis	ระยะทาง (km)	ประเภทพาหนะ	สัดส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก	
					(kgCO ₂ eq/Basis)	(kgCO ₂ eq/กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)
1. การขนส่งในขั้นตอนการเพาะปลูกข้าว (Basis on: 1 กิโลกรัมข้าวเปลือก)						
ปุ๋ยไนโตรเจน	0.0162	18	รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 16 ตัน	0.2399	6.11 × 10 ⁻⁶	9.84 × 10 ⁻⁶
ปุ๋ยฟอสฟอรัส	0.0080	18		0.2399	3.06 × 10 ⁻⁶	4.92 × 10 ⁻⁶
ปุ๋ยโพแทสเซียม	0.0040	18		0.2399	1.53 × 10 ⁻⁶	2.46 × 10 ⁻⁶
ยาฆ่าแมลง	0.0004	18		0.2399	1.43 × 10 ⁻⁷	2.30 × 10 ⁻⁷
2. การขนส่งในขั้นตอนการสีข้าว (Basis on: 1 กิโลกรัมปลายข้าว)						
กระสอบพลาสติก PP	0.0100	377	รถตู้บรรทุก 4 ล้อ วิ่งปกติ	0.2399	2.08 × 10 ⁻⁴	8.03 × 10 ⁻⁵
ด้ายเย็บกระสอบ	1.37 × 10 ⁻⁵	377	100% Loading บรรทุกสูงสุด 7 ตัน	0.2399	2.85 × 10 ⁻⁷	1.10 × 10 ⁻⁷
3. การขนส่งในขั้นตอนการผลิต (Basis on: 1 กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)						
แป้งมันสำปะหลัง	0.1931	121	รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 16 ตัน	1.0000		0.0021
แป้งข้าวโพด	0.0193	377		1.0000		0.0017
เกลือ	0.0054	2	รถตู้บรรทุก 4 ล้อ วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 7 ตัน	1.0000		2.36 × 10 ⁻⁶
น้ำมันพืช	0.0560	2		1.0000		2.45 × 10 ⁻⁵
ถุงพลาสติก PE	0.0031	134		1.0000		0.0001
ซีลี้อย	0.6178	11		1.0000		0.0016
รวม						0.0056

ส่วนที่ 2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนสำหรับก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก

ตารางที่ ข.1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการเพาะปลูกข้าว (Basis on: 1 กิโลกรัมข้าวเปลือก)

ข้อมูล	หน่วย	ปริมาณ/Basis	ปริมาณ/FU	การปันส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก	
					(kgCO ₂ eq/ Basis)	(kgCO ₂ eq/กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)
สารขาเข้า						
ปุ๋ยเคมีไนโตรเจน (ยูเรีย)	kg	0.0161	0.0307	0.2399	0.0127	0.0243
ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัส	kg	0.0080	0.0154	0.2399	0.0030	0.0058
ปุ๋ยเคมีโพแทสเซียม	kg	0.0040	0.0077	0.2399	0.0005	0.0009
ยาฆ่าแมลง	kg	0.0004	0.0007	0.2399	0.0008	0.0016
น้ำมันดีเซล	L	0.0115	0.0220	0.2399	0.0008	0.0011
สารขาออก						
CO ₂ จากการเผาไหม้ดีเซล	kg	0.0316	0.0604	0.2399	0.0076	0.0146
CO ₂ จากปุ๋ยยูเรีย	kg	0.0118	0.0225	0.2399	0.0028	0.0054
N ₂ O จากการใช้ปุ๋ย	kg	0.0002	0.0003	0.2399	0.0117	0.0224
CH ₄ จากนาข้าว	kg	0.0304	0.0580	0.2399	0.1530	0.2923
รวม					0.1929	0.3687

ตารางที่ ข.2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการสีข้าว (Basis on: 1 กิโลกรัมปลายข้าว)

ข้อมูล	หน่วย	ปริมาณ/Basis	ปริมาณ/FU	การปันส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก	
					(kgCO ₂ eq/Basis)	(kgCO ₂ eq/กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)
สารขาเข้า						
ข้าวเปลือก	kg	4.1667	1.9113	0.2399		
ไฟฟ้า	kwh	0.2340	0.1073	0.2399	0.0327	0.0150
กระสอบพลาสติก PP	kg	0.0100	0.0046	0.2399	0.0033	0.0015
ด้ายเย็บกระสอบ	kg	1.37 × 10 ⁻⁵	6.28 × 10 ⁻⁶	0.2399	2.64 × 10 ⁻⁵	1.21 × 10 ⁻⁵
สารขาออก						
ต้นข้าว	kg	1.76	0.8088	0.4232		
ปลายข้าว	kg	1.00	0.4585	0.2399		
รำ	kg	0.42	0.1947	0.1019		
แกลบ	kg	0.98	0.4493	0.2351		
รวม					0.0360	0.0165

ตารางที่ ข.3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการผลิต (Basis on: 1 กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)

ข้อมูล	หน่วย	ปริมาณ/Basis	การปันส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO ₂ eq/กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)
สารขาเข้า				
ปลายข้าว	kg	0.4587	1.0000	
น้ำ	m ³	0.0015	1.0000	0.0010
แป้งมันสำปะหลัง	kg	0.1376	1.0000	0.0831
แป้งข้าวโพด	kg	0.0229	1.0000	0.0137
เกลือ	kg	0.0032	1.0000	1.80 x 10 ⁻⁵
น้ำมันพืช	kg	0.0459	1.0000	0.1047
น้ำ (ผลิตไอน้ำ)	kg	0.0045	1.0000	0.0032
ซีลี้อย	kg	1.1009	1.0000	0.0224
ถุงพลาสติก PE	kg	0.0032	1.0000	0.0049
ไฟฟ้า	kwh	0.0794	1.0000	0.0462
สารขาออก				
ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก	kg	1.0000		
เศษเส้นก๋วยเตี๋ยว	kg	0.0032		
น้ำเสีย	m ³	0.0008		
น้ำคอนเดนเสท	m ³	0.0045		
รวม				0.2791

ตารางที่ ข.4 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนย่อยของการผลิต (Basis on: 1 กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)

ข้อมูล	หน่วย	ปริมาณ/Basis	การปันส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO ₂ eq/กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)
1. การเตรียม				
- การล้างน้ำ				
สารขาเข้า				
ปลายข้าว	kg	0.4587	1.0000	
น้ำ	m ³	0.0005	1.0000	0.0003
ไฟฟ้า	kwh	0.0001	1.0000	4.01 × 10 ⁻⁵
สารขาออก				
น้ำเสีย	m ³	0.0004		
- การไม่หยาบและไม่ละเอียด				
สารขาเข้า				
น้ำ	m ³	0.0009	1.0000	0.0006
ไฟฟ้า	kwh	0.0171	1.0000	0.0099
- การผสมแป้ง				
สารขาเข้า				
น้ำ	m ³	0.0001	1.0000	0.0001
ไฟฟ้า	kwh	0.0011	1.0000	0.0007
แป้งมันสำปะหลัง	kg	0.1376	1.0000	0.0831
แป้งข้าวโพด	kg	0.0229	1.0000	0.0137
เกลือ	kg	0.0032	1.0000	1.80 × 10 ⁻⁵
น้ำมันพืช	kg	0.0459	1.0000	0.1047
2. การนึ่ง				
สารขาเข้า				
น้ำ	m ³	0.0027	1.0000	0.0019
ไฟฟ้า	kwh	0.0136	1.0000	0.0079
ซีลี้อย	kg	0.6606	1.0000	0.0134
สารขาออก				
น้ำคอนเดนเสท	m ³	0.0027		
น้ำเสีย	m ³	0.0005		
3. การอบหาคัด				
สารขาเข้า				
น้ำ	m ³	0.0018	1.0000	0.0013
ไฟฟ้า	kwh	0.0372	1.0000	0.0217
ซีลี้อย	kg	0.4404	1.0000	0.0090
สารขาออก				
คอนเดนเสท	m ³	0.0018		
น้ำระเหย	m ³	0.0003		

ข้อมูล	หน่วย	ปริมาณ/Basis	การปันส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO ₂ eq/กิโลกรัมถ้วยเดียว)
4. การล้างถ้วย				
สารขาเข้า				
ไฟฟ้า	kwh	0.0083	1.0000	0.0049
สารขาออก				
เส้นถ้วยเดียว	kg	1.0000		
5. การบรรจุ				
สารขาเข้า				
ถุงพลาสติก PE	kg	0.0032	1.0000	0.0049
ไฟฟ้า	kwh	0.0020	1.0000	0.0012
สารขาออก				
เศษเส้นถ้วยเดียว	kg	0.0032		
รวม				0.2791

ตารางที่ ข.5 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการบริโภค (Basis on: 1 กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)

ข้อมูล	หน่วย	ปริมาณ/Basis	การปันส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO ₂ eq/กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)
สารขาเข้า				
น้ำ	m ³	0.0050	1.0000	0.0035
ก๊าซหุงต้ม	kg	0.0300	1.0000	0.0116
สารขาออก				
น้ำ	m ³	0.0048		
รวม				0.0151

ตารางที่ ข.6 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการกำจัดซากผลิตภัณฑ์ (Basis on: 1 กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)

ข้อมูล	หน่วย	ปริมาณ/Basis	การปันส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO ₂ eq/กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)
ขั้นตอนการลิ่ข้าว				
กระสอบพลาสติก PP	kg	0.0046	0.2399	0.0026
ด้ายเย็บกระสอบ	kg	6.28 × 10 ⁻⁶	0.2399	3.01 × 10 ⁻⁶
ขั้นตอนการผลิต				
น้ำเสีย	m ³	0.0008	1.0000	1.03 × 10 ⁻⁷
น้ำคอนเดนเสท	m ³	0.0045	1.0000	5.69 × 10 ⁻⁷
ถุงพลาสติก PE	kg	0.0032	1.0000	0.0074
เศษเส้นกล้วยเดี่ยว	kg	0.0032	1.0000	0.0081
ขั้นตอนการบริโภค				
น้ำเสีย	m ³	0.0048	1.0000	5.97 × 10 ⁻⁷
รวม				0.0181

ตารางที่ ข.7 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการขนส่งผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์	ปริมาณ/Basis	ระยะทาง (km)	ประเภทพาหนะ	สัดส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก	
					(kgCO ₂ eq/Basis)	(kgCO ₂ eq/กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)
1. การขนส่งข้าวเปลือกไปโรงสีข้าว (Basis on: 1 กิโลกรัมข้าวเปลือก)						
ข้าวเปลือก	3.333	10	รถกระบะบรรทุก 6 ล้อ ขนาดเล็ก วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 8.5 ตัน	0.2399	0.0009	0.0004
ข้าวเปลือก	0.833	10	รถกระบะบรรทุก 4 ล้อ ขนาดเล็ก วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 1.5 ตัน	0.2399	0.0007	0.0003
2. การขนส่งปลายข้าวไปโรงงานผลิต (Basis on: 1 กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)						
ปลายข้าว	0.153	54	รถกระบะบรรทุก 6 ล้อ ขนาดเล็ก วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 8.5 ตัน	1.0000		0.0010
ปลายข้าว	0.153	8		1.0000		0.0001
ปลายข้าว	0.153	68		1.0000		0.0012
3. การขนส่งก๋วยเตี๋ยวไปตลาดสดเทศบาล (Basis on: 1 กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)						
ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก	218	9	ชาเล้ง (รถจักรยานยนต์เบนซิน 4 จังหวะ 125 cc) อัตราการสิ้นเปลือง 38.655 km/L	1.0000		0.0030
4. การขนส่งจากผลิตภัณฑ์ไปสถานีกำจัดขยะมูลฝอย (Basis on: 1 กิโลกรัมก๋วยเตี๋ยว)						
กระสอบพลาสติก PP	0.0046	45		0.2399		3.83 × 10 ⁻⁶
ด้ายเย็บกระสอบ	6.28 × 10 ⁻⁶	45	รถบรรทุกขยะ 10 ล้อ วิ่งปกติ	0.2399		5.24 × 10 ⁻⁹
ถุงพลาสติก PE	0.0032	45	100% Loading บรรทุกสูงสุด 16 ตัน	1.0000		1.14 × 10 ⁻⁵
เศษเส้นก๋วยเตี๋ยว	0.0032	45		1.0000		1.14 × 10 ⁻⁵
รวม						0.0061

ตารางที่ ข.8 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการขนส่งวัตถุดิบ

ผลิตภัณฑ์	ปริมาณ/Basis	ระยะทาง (km)	ประเภทพาหนะ	สัดส่วน	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก	
					(kgCO ₂ eq/Basis)	(kgCO ₂ eq/กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)
1. การขนส่งในขั้นตอนการเพาะปลูกข้าว (Basis on: 1 กิโลกรัมข้าวเปลือก)						
ปุ๋ยไนโตรเจน	0.0161	18	รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 16 ตัน	0.2399	6.17×10^{-6}	1.17×10^{-5}
ปุ๋ยฟอสฟอรัส	0.0080	18		0.2399	3.09×10^{-6}	5.84×10^{-6}
ปุ๋ยโพแทสเซียม	0.0040	18		0.2399	1.54×10^{-6}	2.92×10^{-6}
ยาฆ่าแมลง	0.0004	18		0.2399	1.44×10^{-7}	2.73×10^{-7}
2. การขนส่งในขั้นตอนการสีข้าว (Basis on: 1 กิโลกรัมปลายข้าว)						
กระสอบพลาสติก PP	0.0100	377	รถตู้บรรทุก 4 ล้อ วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 7 ตัน	0.2399	2.08×10^{-4}	9.54×10^{-5}
ด้ายเย็บ	1.37×10^{-5}	377		0.2399	2.85×10^{-7}	1.31×10^{-7}
3. การขนส่งในขั้นตอนการผลิต (Basis on: 1 กิโลกรัมกล้วยเดี่ยว)						
แป้งมันสำปะหลัง	0.1376	121	รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 16 ตัน	1.0000		0.0015
แป้งข้าวโพด	0.0229	377		1.0000		0.0020
เกลือ	0.0032	2	รถตู้บรรทุก 4 ล้อ วิ่งปกติ 100% Loading บรรทุกสูงสุด 7 ตัน	1.0000		1.40×10^{-6}
น้ำมันพืช	0.0459	2		1.0000		2.00×10^{-5}
ถุงพลาสติก PE	0.0032	134		1.0000		0.0001
ซีล้อย	0.4404	11		1.0000		0.0012
รวม						0.0049

การกระจายของรากพืชในพื้นที่ดินถล่ม ลุ่มน้ำแม่พร่อง-แม่พูล บ้านผามูบ อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ Root Distribution in Landslide Area, Mae Phrong-Mae Phun Watershed, Uttaradit Province

มรรษมนต์ เอกจิต¹ วรากร ไม้เรียง¹ บรรพต กุลสุวรรณ^{1*} และ มณฑล แผนสทาน²
M.Akejit¹, W.Mairaing¹, B.Kulsuwan^{1*} and M.Pansatan²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

² คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus

² Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus

*Corresponding author: fengbpk@ku.ac.th

(Received: June 2, 2017 ,Revised: July 2, 2018 ,Accepted: July 11, 2018)

บทคัดย่อ

การศึกษาการกระจายของรากพืชเพื่อการเสริมแรงในดินในการรักษาเสถียรภาพของลาดดิน โดยศึกษาคุณสมบัติของรากพืชจากรูปทรงของรากพืช ระยะแผ่ของรากพืช และความหนาแน่นของรากพืช โดยมีพื้นที่ศึกษาลุ่มน้ำแม่พร่อง-แม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ สำรวจในสนามโดยวิธีสำรวจรากกำแพงแสน (RO-KPS) และจำลองรากพืชจากการสำรวจในรูปแบบ 3 มิติ จากพืช 14 ชนิด พบว่าทรงรากที่พบมากที่สุดคือ ทรงเจดีย์กว่าทั้งหมด 9 ชนิดซึ่งส่วนใหญ่เป็นกลุ่มพืชสวนและกลุ่มพืชป่า รองลงมาคือทรงถ้วยมี 3 ชนิดและทรงบาตรพระ 2 ชนิดซึ่งเป็นส่วนใหญ่เป็นพืชเบิกนำ ระยะแผ่ของรากพืชจากการศึกษาพบว่า ระยะแผ่รากมากที่สุดคือกลุ่มพืชป่า 3-5 ม.รองลงมาคือกลุ่มพืชสวน 0.9-3.7 ม.และกลุ่มพืชเบิกนำ 0.5-0.8 ม.ตามลำดับ เช่นเดียวกับความลึกของรากพืชป่ามีช่วงความลึกของรากลึกที่สุดคือ 0.8-1.6 ม.รองลงมาคือพืชสวน 0.9-1.3 ม.และพืชเบิกนำ 0.3-0.5 ม.ตามลำดับ สำหรับความหนาแน่นของรากพืชซึ่งอธิบายในรูปแบบของอัตราส่วนของรากต่อพื้นที่หน้าตัดของดิน (Root Area Ratio : RAR%) พบว่ากลุ่มพืชเบิกนำมีค่า RAR% ที่มากที่สุดอยู่ที่ความลึก 0.1 ม. อยู่ในช่วง 2.0-3.2% กลุ่มพืชสวนอยู่ในช่วง 7-17% ที่ความลึก 0.2 ม. และกลุ่มพืชป่าสวนอยู่ในช่วง 4 – 8.5% ที่ความลึก 0.1 - 0.2 และพืชที่มีคุณสมบัติเหมาะสมเพื่อป้องกันการกัดเซาะดินได้ดีคือ ต้นกาแฟเนื่องจากปริมาณรากฝอยที่มากและสานกันเป็นแพหนาซึ่งมีค่า RAR% สูง 22%-37% ที่ช่วงความลึก 0-0.6 ม. ในการประเมินการเสริมแรงของรากพืชในดินจะพิจารณาจากความต้านทานแรงดึงของรากพืชร่วมด้วยซึ่งจะทำการศึกษาต่อไป

คำสำคัญ : รูปทรงของรากพืช ระยะแผ่ของรากพืช อัตราส่วนของรากต่อพื้นที่หน้าตัดดิน การเสริมแรงของรากพืช

Abstract

Studies of root reinforcement for soil slope stability require the knowledge of root pattern, radius of root spread and root density. In Mae Phrong-Mae Pun watershed, Laplae district, Uttaradit province. The field investigation, the roots were exposed by water jetting. Then mapping of root distribution by 3D-scanner, photography were taken. Inverse Pagoda (Chedi) pattern of orchard plants and natural forest trees is the most common pattern, it is accounts 9 of 14 investigated trees found on orchard plants and natural forest tree. Then bowl and monk alms bowl pattern are the less common, they account for 3 and 2 out of 14 tree types respectively, found on pioneer plant. Natural forest tree have the largest root spread with radius of 3-5 m., then

orchard plants, 0.9-3.7 m., and pioneer plant, 0.5-0.8 m., respectively. Natural forest tree also has the deepest root depth of 0.8-1.6 m., then orchard plant is 0.9-1.3 m. and pioneer plant is 0.3-0.5 m. Root density in term of Root Area Ratio (RAR%). Pioneer Plants has maximum RAR% of 2-3.2% at 0.1 m. When orchard plants and natural forest trees have RAR of 7-17% at 0.2 m. and 4-8.5% at 0.1-0.2 m. deep respectively. Coffee tree (*Coffea robusta* Pierre ex Froehner L.) has the advantage of preventing soil surface erosion is with thickness of fibrous root, RAR% 22-37% at 0-0.6 m. Root Cohesion can be evaluated by the root density and Root Tensile Strength in further research.

Keywords: Root Pattern, Root Spread, RAR, Root Reinforcement

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เหตุการณ์ดินถล่มในพื้นที่ศึกษา อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ พ.ศ.2549 มีมูลค่าความเสียหายมากถึง 308.6 ล้านบาท [1] ซึ่งเป็นผลส่วนหนึ่งจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ที่ปริมาณพื้นที่ป่าลดลงเท่ากับพื้นที่สวนที่เพิ่มขึ้นประมาณ 8% เมื่อเทียบจากก่อนและหลังการเกิดดินถล่ม [2] มีผลให้การเสริมแรงในดินและป้องกันการกัดเซาะหน้าดินลดลง จากปริมาณที่ลดลงทั้งจำนวนและความหลากหลายของรากพืชป่า เหลือเพียงรากพืชจากการปลูกพืชเศรษฐกิจ ส่งผลให้กำลังการเสริมแรงในดินจากรากพืชลดลง [2] และเมื่อเกิดฝนตก ความชื้นในดินเพิ่มขึ้น เมื่อไม่มีรากพืชที่ช่วยลดการกัดเซาะและช่วยเสริมแรงในดินทำให้มีโอกาสเกิดการพังทลายหรือการเกิดดินถล่มได้มากขึ้น

การแก้ไขปัญหาดินถล่มโดยการใช้รากพืชซึ่งเป็นพืชท้องถิ่น ช่วยเสริมแรงและเพิ่มความแข็งแรงในดิน โดยรากพืชยังเพิ่มกำลังของลาดดินตามอายุของพืชและช่วยรักษาการกัดเซาะบริเวณหน้าดินได้อีกด้วย

การศึกษาการเสริมแรงในดินของรากพืชนั้น ส่วนสำคัญส่วนหนึ่งคือการศึกษาการกระจายของรากพืช เพื่อประเมินความแข็งแรงในการเสริมแรงในดินเนื่องจากรากพืช และยังป้องกันการกัดเซาะของน้ำบริเวณหน้าดินได้ด้วย [3,4] โดยการกระจายของรากพืชจะขึ้นอยู่กับ ชนิดพืช รูปทรงของรากพืช ระยะแผ่ของรากพืช และความหนาแน่นของรากพืช ซึ่งเป็นอัตลักษณ์ของพืชแต่ละชนิด ดังนั้นการศึกษากการเสริมแรงของรากพืชจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาอย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การสำรวจในสนามไปจนถึงการประเมินกำลังของรากพืช

โดยที่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยมีดังนี้

1. เพื่อศึกษาลักษณะรูปทรงของรากพืชชนิดต่างๆ
2. เพื่อศึกษารูปแบบการกระจายตัวของรากในพืชชนิดต่างๆ
3. เพื่อศึกษาปริมาณของรากในแต่ละพืชเด่นของพื้นที่ศึกษา

2. รากพืชและการเสริมแรงในดิน

2.1 คุณสมบัติของรากพืชในการเสริมแรงในดิน

รากพืชมีคุณสมบัติ เช่น ช่วยเพิ่มกำลังของดินได้ดี กำลังของรากพืชเพิ่มขึ้นตามอายุของพืช และยังช่วยป้องกันการกัดเซาะหน้าดินได้ [5] นอกจากนี้ยังมีข้อดีข้อเสียในด้านต่างๆซึ่งปรับปรุงและรวบรวมได้ [3-5] ดังนี้ ข้อดีคือ ดูดความชื้นจากดินและระเหยผ่านใบ ช่วยลดแรงดันน้ำในดิน, รากเกาะยึดดินเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ดิน, รากยึดเกาะพื้นดินได้ดินช่วยเสริมแรงและค้ำจุนโดยเฉพาะบริเวณที่มีความลาดชัน, รากไม้จะช่วยยึดดินช่วยลดการชะล้างหน้าดิน และค่ากำลังของพืชเพิ่มขึ้นตามอายุของพืช ข้อเสียคือ เพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำของดิน ช่วยให้น้ำซึมลงสู่ดินได้มากขึ้น

2.2 ทฤษฎีการเสริมแรงด้วยรากพืช

การเสริมแรงในดินด้วยรากพืช (τ_{sr}) จะมีค่าแรงยึดเหนี่ยวเสริมเนื่องจากรากพืช โดยจากสมการของ Mohr-Coulomb สามารถเขียนได้เป็นดัง $\tau_{sr} = c_s + c_r + \sigma \tan \phi$

โดยที่ c_s คือค่ายึดเกาะของดิน σ คือความเค้นรวมและ ϕ คือมุมเสียดทานภายใน โดยที่ค่า c_r คือความสัมพันธ์ของกำลังของแรงยึดเกาะของรากพืชกับดิน ซึ่งสมมติให้รากพืชเป็นวัสดุแบบยืดหยุ่นได้ (Elastic) จากรูปที่ 1 ความต้านทานแรงดึงของ

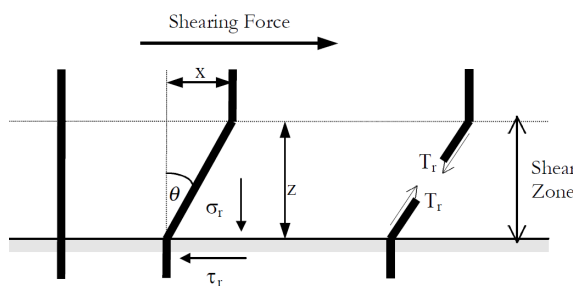
รากพืชสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือส่วนตั้งฉากกับแนว
เขื่อน $t_r \cos \theta \tan \phi$ และ ส่วนขนานกับแนวเขื่อน $t_r \sin \theta$
[6,7], จะได้สมการดังนี้ $C_r = t_r (\cos \theta \tan \phi + \sin \theta)$

โดยที่ $\cos \theta \cdot \tan \phi + \sin \theta$ มีค่าประมาณ 1.2 [8] และ t_r คือ
ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของรากพืชแต่ละสายพันธุ์ต่อหน่วย
พื้นที่ของดิน สามารถหาได้จาก ผลรวมของแรงดึงสูงสุดของราก
พืชในแต่ละราก (T_{ri}) คูณกับอัตราส่วนของรากต่อพื้นที่หน้าตัด
ของดิน (Root Area Ratio : RAR) ดังสมการ $t_r = \sum_{i=1}^n T_{ri}(RAR)$ [9,10] ซึ่งสามารถหา RAR ได้จากสมการที่
(1) ดังนี้

$$RAR = \frac{A_r}{A} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\pi d_i^2}{4} \right)}{A} \quad (1)$$

โดยที่ d คือ ขนาดของรากพืชและ A คือพื้นที่หน้าตัดดิน
โดยพิจารณาจากพื้นที่หน้าตัดรวมของรากพืชในแต่ละหน้าตัด
ดินนั้นๆ ตามการพิจารณาที่ระยะหรือความลึกต่างๆ จาก
สมการข้างต้นที่กล่าวมา ดังนั้นสมการ C_r จึงถูกนำมาปรับปรุง
เพื่อหาการยึดเกาะของรากพืชที่มีอยู่ในดิน โดยแบบจำลอง
ดังนี้ $C_r = 1.2 \sum T_{ri}(RAR)$ [11]

โดยค่า C_r จะเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความ
แข็งแรง ขนาด และความหนาแน่นของรากมากขึ้น

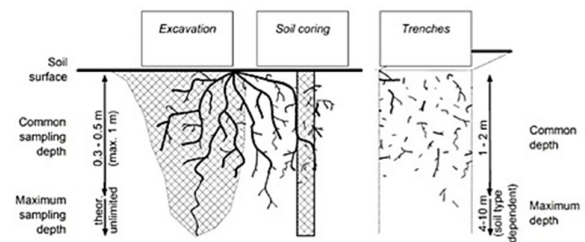


รูปที่ 1 รากที่ตัดผ่านบริเวณที่เกิดแรงเฉือนในแบบจำลองการเสริมความ
แข็งแรงด้วยรากพืช [7,11,12]

2.3 วิธีการสำรวจรากพืชในสนามในปัจจุบัน

งานวิจัยต่างๆ ได้มีการนำเทคนิคจากนักสรีรวิทยาพืชซึ่งมี
การศึกษา ทั้งทางตรงและทางอ้อม [13] ได้แสดงไว้หลายวิธี
เช่น การขุดเปิด เป็นวิธีที่มีความนิยมสูง ซึ่งในภายหลังได้มีการ
ประยุกต์ใช้จากวิธีดังกล่าวมากมาย เช่น การใช้น้ำแรงดันสูง
(High Water Pressure Technique) [14,15] โดยใช้แรงดันน้ำ

ฉีดรากทั้งต้นของพืชขนาดเล็ก และนำรากของพืชทั้งต้นมา
ถ่ายรูป เพื่อประเมินปริมาณราก และนอกจากนี้ยังมีการใช้ลม
แรงดันสูง (Air Jet Pressure : Supersonic Compressed Air)
[16] ในการสำรวจรากด้วย โดยการตั้ง 3 ขายึดลำต้น แล้วทำ
การใช้ลมแรงดันสูงเป่าดินที่อยู่พื้นที่ที่กำหนดออก โดยที่อีกฝั่ง
เป็นกระบอกช่วยดูดดินออก ให้เหลือแต่รากพืช และยังมี
วิธี Core Sampling, Trench Profile, Minirhizotron,
Framed Monolith, วิธีการวัดการใช้น้ำ (Soil Moisture
Depletion), วิธีใช้ Radioactive Isotope, วิธี Allometry,
 ฯลฯ ตัวอย่างการสำรวจโดยวิธีต่างๆดังรูปที่ 2

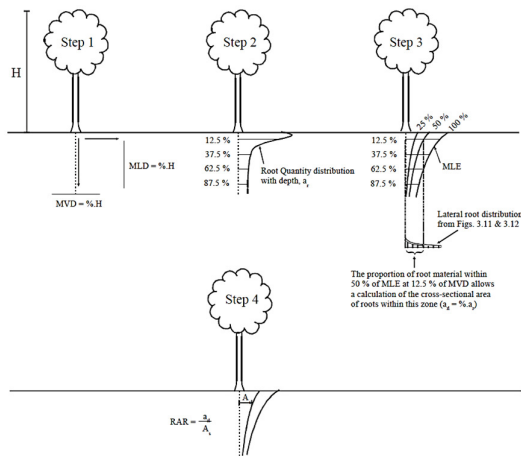


รูปที่ 2 วิธีการสำรวจรากพืชในสนาม [17]

2.4 การกระจายของรากพืชในพืชต่างๆ

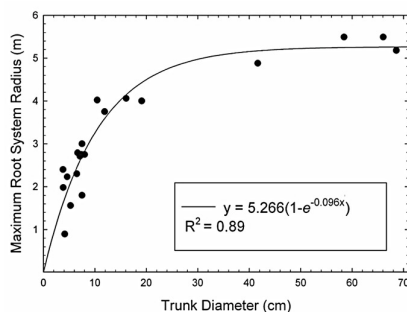
ประเมินได้จากอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่ดิน
(RAR%) งานวิจัยในอดีตได้จำลองรูปทรงของรากพืชจากระยะ
แผ่ของรากในแต่ละระดับความลึก [18] โดยแบ่งระยะแผ่ราก
และความลึกเป็นช่วงดังนี้ 12.5%, 37.5%, 62.8% และ 87%
ซึ่งคิดจากระยะแผ่รากสูงสุดและความลึกของรากสูงสุดเป็น
100% ดังรูปที่ 3 พบว่า 80% ของปริมาณรากส่วนใหญ่จะอยู่
ในความลึกไม่เกิน 15% ของความลึกของรากสูงสุด และบริเวณ
พื้นที่ใกล้กับลำต้นหรือโคนต้นก็จะเป็นบริเวณที่มี RAR%
มากกว่าบริเวณอื่นที่ไกลออกไปตามระยะแผ่ของรากนั้น [18]

อีกหนึ่งส่วนที่มีความสำคัญในการศึกษา คือ ระยะแผ่
ของรากพืชที่มีความสัมพันธ์กับส่วนต่างๆของรากพืช เพื่อนำไป
ประยุกต์ใช้ ในการทำแบบจำลองทางวิศวกรรมปฐพี ระยะแผ่
ของรากพืชนั้นเป็นสัดส่วนเส้นตรงกับขนาดของทรงพุ่มของต้น
[19] เช่น ต้นมะกอก (Green Ash: *Fraxinus Pensilvanica*)
เป็น 1.68 เท่าของขนาดทรงพุ่ม และ 3.77 เท่าในต้นแมกโน
เลีย (Magnolia: *Magnolia Grandiflora*)



รูปที่ 3 วิธีการประเมิน RAR% ตามระยะและความลึกต่างๆ ในรากพืช [18]

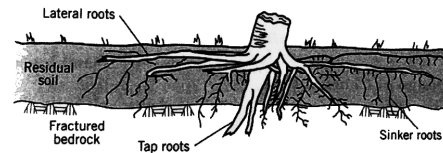
นอกจากนี้ยังมีระยะแผ่ของรากสัมพันธ์กับขนาดของลำต้น เช่น ในต้นโอ๊ค (Live Oak: *Quercus Virginiana*) เป็น 0.20 เท่าของขนาดลำต้น และ 0.53 เท่าในต้นแมกโนเลีย (*Magnolia: Magnolia Grandiflora*) [19] และในภาพรวมตั้งแต่ 6 เท่าจนถึง 18 เท่าสำหรับขนาดลำต้นจากเล็กไปใหญ่ [20] นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4 [21] ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อขนาดลำต้นที่มากกว่า 30 ซม. ระยะแผ่ของรากเริ่มที่จะคงที่



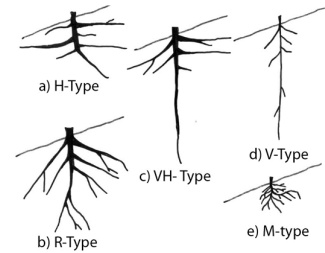
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดลำต้นและระยะแผ่ของรากพืช [21]

2.5 การจำลองลักษณะรูปทรงของรากพืช

ชนิดของรากพืชสามารถแบ่งออกเป็น รากแก้ว (Tap Root) รากแขนง (Lateral Root) รากแนวตั้งที่แตกออกมาจากรากแขนงและรากแก้ว (Sinker Root) และรากฝอย (Fibrous Root) ดังรูปที่ 5



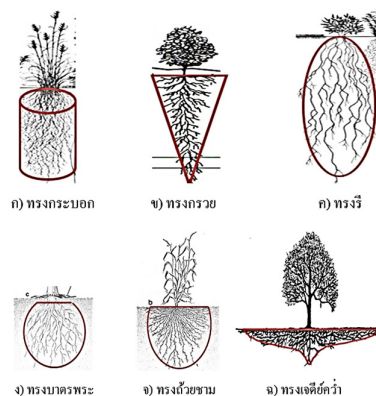
รูปที่ 5 ชนิดของรากพืชต่างๆ [4]



รูปที่ 6 ลักษณะรากพืชรูปแบบต่างๆ [22]

การจำแนกรูปแบบของราก [22] ดังรูปที่ 6 ทั้งหมด 5 รูปแบบ ได้สรุปศักยภาพของรากไม้ [23] ตามรูปแบบข้างต้นได้ดังนี้ V-Type, VH-Type และ H-Type เป็นรากลึกช่วยเสริมด้านเสถียรภาพของลาดดิน H-Type และ M-Type รากลึกปานกลางช่วยให้ดินจับตัวกันได้ดี และ R-Type, V-Type, H-Type และ VH-Type เป็นรากที่สามารถต้านทานแรงลมได้ นอกจากนี้รูปแบบรากที่เป็นประโยชน์เพื่อรักษาเสถียรภาพความลาดชันเป็นแบบ H-Type, R-Type และแบบ M-Type [24]

รูปทรงของรากพืชยังไม่ได้มีการวางรูปแบบของรูปร่างของรากพืชที่ชัดเจนในแต่ละชนิดพืช จึงได้มีการรวบรวมรากพืชที่มีอยู่ออกเป็น 6 แบบ [25] ดังรูปที่ 7

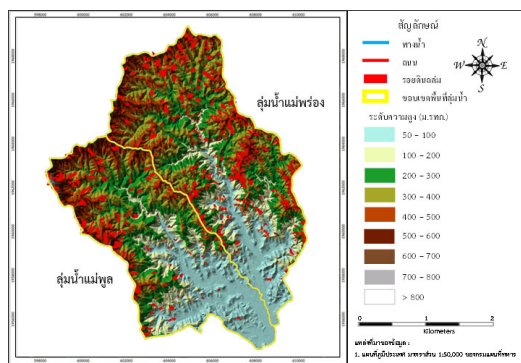


รูปที่ 7 รูปทรงของรากพืชในรูปแบบต่างๆ [25]

โดยในการวิจัยนี้ทั้งสองพื้นที่เมื่อทำการสำรวจรากพืชแล้ว รูปทรงส่วนใหญ่ที่พบคือ รูปทรงแบบถ้วยชาม, ทรงบาตรพระ และ ทรงเจดีย์คว่ำ

3. พื้นที่ศึกษาและเหตุการณ์ดินถล่มในอดีต

พื้นที่ลุ่มน้ำ แม่พ่อง-แม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ ตำแหน่งพื้นที่อยู่ทางตะวันตกเฉียงเหนือของอำเภอลับแล โดยพื้นที่ศึกษามีขอบเขตดังรูปที่ 8 และเคยเกิดดินถล่มเมื่อช่วงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2549 เนื่องจากฝนตกหนัก ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดดินถล่มในอดีต [29, 30] ทำให้มีผู้เสียชีวิตทั้งหมด 66 คน สูญหาย 37 คน บ้านเรือนและ พื้นที่ทางการเกษตรเสียหาย คิดเป็นมูลค่าความเสียหายรวม 308.6 ล้านบาท [1] ในปีที่เกิดดินถล่มนั้นพบว่าพื้นที่ป่าลดลงเช่นเดียวกับที่พื้นที่สวนเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากพื้นที่ป่าที่ลดลงและพื้นที่สวนเพิ่มขึ้น [2] จะเห็นว่าปริมาณรากพืชที่ลดลงเป็นผลส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาดินถล่มได้



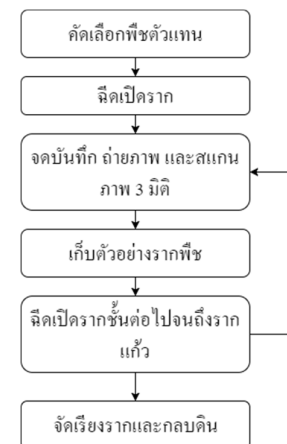
รูปที่ 8 พื้นที่ศึกษาลุ่มน้ำแม่พ่องแม่พูล [2]

4. อุปกรณ์และวิธีการ

ในการสำรวจเริ่มแรกได้เลือกใช้วิธีการขุดเปิดราก ออกที่ละชั้น ทำให้เกิดความเสียหายกับรากน้อยที่สุด โดยใช้ส้อมพรวนดิน ค้อนธรณี และแปรงปัดขนาดต่างๆ แต่วิธีนี้ใช้เวลามากและทำให้รากผุย่อยขนาดเล็กลงและบางส่วนจะขาดหาย ต่อมาจึงได้ประยุกต์ใช้เครื่องสูบน้ำทางการเกษตรมาช่วยในการขุดสำรวจ ซึ่งทำให้รายละเอียดของรากและรากผุยังคงอยู่ โดยที่อุปกรณ์มีดังนี้ เครื่องมือขุดเปิดแต่งรากพืช เช่น ส้อมพรวน แปรงปัด, เครื่องสูบน้ำแรงดันสูงขนาด 6.5 แรงม้าพร้อมปั้มน้ำขนาด 1.5 นิ้ว, สายยางทนแรงดันสูง และหัวฉีดแรงดันสูง ลำดับในการสำรวจรากพืชดังรูปที่ 9

จากรูปที่ 9 คัดเลือกตัวแทนของพืชเลือกรากจากพืชที่เป็นตัวแทนของพืชหลักในแปลงตัวแทนการใช้ประโยชน์ที่ดิน แล้ว

ฉีดเปิดราก $\frac{1}{4} - \frac{1}{2}$ ของวงแผ่ราก เพื่อให้มีผลกระทบกับรากน้อยที่สุดแต่ยังคงมีรายละเอียดของรากครบถ้วน ดังรูปที่ 10 ถ่ายรูปและสแกนภาพ 3 มิติ ดังรูปที่ 11 จัดบันทึกลำดับที่ของรากโดยใช้หลักการเช่นเดียวกับการลำดับลำน้ำ [26] บันทึกขนาด ความยาว ทิศทางการวางตัวของราก เก็บตัวอย่างรากเพื่อการทดสอบกำลังของราก โดยใส่ถุงรักษาความชื้น เพื่อนำมาทดสอบหาลำดับโดยเครื่องดึงรากซึ่งได้ทำการประยุกต์จากเครื่องกดในการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) เมื่อสำรวจเสร็จแล้วกลับดินและจัดวางรากให้ใกล้เคียงกับสภาพธรรมชาติเดิมมากที่สุด



รูปที่ 9 ลำดับขั้นตอนการสำรวจรากในสนาม

วิธีการสำรวจในสนามนี้ทางคณะวิจัยจะใช้ชื่อเรียกว่าวิธีการสำรวจรากกำแพงแสน (Root Observation-KPS:RO-KPS) ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและเหมาะสมสำหรับสำรวจในพื้นที่ศึกษาเนื่องจากใช้เวลาน้อยกว่าวิธีอื่น ไม่ต้องใช้ไฟฟ้า และสามารถใช้น้ำจากแหล่งน้ำทั่วไป พืชในแต่ละต้นที่ทำการสำรวจยังเจริญเติบโตได้ เมื่อสำรวจและบันทึกผลเสร็จแล้วก็ยังสามารถใส่ปุ๋ยให้ในรากพืชเพื่อบำรุงได้อีกด้วย แต่ในพืชที่ให้ผลบางต้นอาจจะออกผลน้อยหรือหยุดให้ผลในฤดูกาลที่ทำการสำรวจ ซึ่งในฤดูกาลถัดมาก็สามารถให้ผลได้ดังเดิม

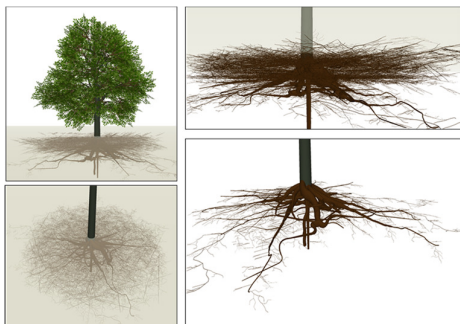


รูปที่ 10 การขุดเปิดรากเพื่อทำการสำรวจในสนาม



รูปที่ 11 เก็บรายละเอียดรากโดยวิธีสแกน แบบ 3 มิติ

หลังจากการสำรวจรากพืชในสนามโดยวิธี RO-KPS แล้วจะนำภาพถ่าย ภาพการสแกน 3 มิติ และผลการบันทึกลักษณะขนาด และทิศทาง ของรากพืชจากพืชตัวแทนมาจำลองลักษณะการแผ่กระจายของรากพืช และขนาดของรากพืช ด้วยโปรแกรมกราฟิก 3 มิติ “Google SketchUp Make” และหาปริมาณของรากพืชในแต่ละหน้าตัดของดินในระยะต่างๆ ได้อีกด้วย ดังรูปที่ 12 ซึ่งแสดงการใช้โปรแกรมกราฟิกในการสร้างภาพ 3 มิติ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์รูปร่างและความหนาแน่นของรากพืชในระยะต่างๆ



รูปที่ 12 การใช้โปรแกรมกราฟิกเพื่อสร้างภาพ 3 มิติของรากเพื่อวิเคราะห์รูปร่างและความหนาแน่น

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการสำรวจรากพืชในสนาม

พืชชนิดต่างๆ ที่ทำการศึกษาแสดงในตารางที่ 1 โดยจะจำแนกทรงรากในการสำรวจจากสนามและแสดงถึงลักษณะทางกายภาพของพืชแต่ละชนิด โดยตัวอย่างที่รากพืชที่สนใจและจะแสดงรายละเอียดดังตัวอย่างเช่น

ต้นทุเรียนเป็นพืชเศรษฐกิจหลัก ลักษณะรากทั่วไปเป็นทรงเจดีย์คว่ำ รากแขนงไม่ใหญ่มากแตกออกโดยรอบของต้นและให้เห็นได้ชัดเจนในรากชั้นบน ส่วนรากแขนงระดับสองแตกออกจากรากแก้ว ส่วนรากแก้วแตกออกมาหลายรากในแนวตั้ง ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ลักษณะของรากต้นทุเรียน



รูปที่ 14 ลักษณะของรากต้นกาแฟ

รากของต้นกาแฟ ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจ เติบโตของพื้นที่ลุ่มน้ำแม่พร่อง-แม่พูล มีรากสองชั้น รากชั้นแรกเป็นรากฝอยจำนวนมากสานกันคล้ายพรมอยู่ที่ผิวดินเป็นผืนหนาประมาณหนึ่งส่วนสี่ของความลึกรากทั้งหมด ส่วนรากแขนงจะอยู่ต่ำลงมาแตกออกจากโคนต้น มีรากแก้วในระดับลึกลงมา ดังรูปที่ 14

รากของต้นตองกง ซึ่งเป็นไม้ล้มลุกจำพวกหญ้า ลำต้นกลม เป็นปล้องมีลักษณะคล้ายต้นอ้อหรือต้นไผ่ ลักษณะรากที่สำรวจพบจะเป็นรากฝอยทั้งหมด ออกมาจากเหง้า และลำต้นส่วนโคนขนาดรากใกล้เคียงกันและความยาวรากออกมาในแนวรัศมีประมาณ 0.5 ม. จึงทำให้รูปแบบของทรงรากเป็นรูปถ้วย ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ลักษณะของรากตองกง

ตารางที่ 1 ผลการสำรวจต้นไม้ที่เป็นตัวแทนของพืชหลักในพื้นที่ศึกษา

ลำดับ	พันธุ์ไม้	ชื่อวิทยาศาสตร์	ลักษณะต้นไม้	จำนวนที่สำรวจ (ต้น)	อายุ (ปี)	ทรงพุ่ม (ม.)	ความสูง (ม.)	เส้นรอบวงลำต้น (ซม.)	ความลึกราก (ม.)	รัศมีระยะแผ่ราก (ม.)	RAR สูงสุด (%)
1	กาแฟ*	<i>Coffea Robusta</i> Pierre Ex Froehner L.	ไม้พุ่มขนาดกลาง	2	15-20	1.75	1.6-2.0	52-85	1.3	1-1.7	36.41
2	คอแลน*	<i>Casearia Grewiaefolia</i> Vent. Var. <i>Grewiaefolia</i>	ไม้ยืนต้นขนาดกลาง	1	20	2.6	4.5	47	1	3.00	3.88
3	ตะแบก*	<i>Lagerstroemia Cuspidate</i> Wall.	ไม้ยืนต้นขนาดใหญ่	1	30	2	4	53	1.5	4.00	6.33
4	ตีนนก*	<i>Vitex Pinnata</i> L.	ไม้ยืนต้นขนาดเล็ก	1	40	2.25	8	169	1.6	5.00	20.57
5	ทุเรียน*	<i>Durio Zibethinus</i> L.	ไม้ยืนต้นขนาดใหญ่	3	8-10	1	3.5-5.0	29-36	1.3	1.1-2.1	10.58
6	ปอขี้ตุ่น*	<i>Craib</i>	ไม้พุ่ม	1	8	1.75	5.5	33	0.3	0.70	2.74
7	มะนอด*	<i>Ficus Semicordata</i> J. E. Smith	ไม้ยืนต้นขนาดกลาง	1	20	3	5	88	0.8	5.00	8.23
8	เมี่ยง*	<i>Camellia Simensis</i> Ktzc.	ไม้พุ่มขนาดกลาง	1	5	0.5	1.2	35	0.9	0.90	7.26
9	ลองกอง*	<i>Lansium Domesticum</i> Corr.	ไม้ยืนต้นขนาดเล็ก	2	30	-	-	37-41	1.1	3.7-4.3	14.55
10	กล้วยป่า**	<i>Musa Acuminata</i> Colla	ไม้ล้มลุกขนาดใหญ่	1	1	1.6	2	34	0.4	0.80	7.07
11	ตองกง**	<i>Thyrsanoleana Maxima</i> Kuntze	ไม้ล้มลุกขนาดใหญ่	2	0.5	0.4	1.5-2.0	40-70	0.5	0.50	1.81
12	ไผ่**	<i>Gigantochloa Albociliata</i> (Munro) Munro	ไม้กอขนาดใหญ่	1	5	2.3	14	16	0.5	0.65	3.00
13	เนียง***	<i>Archidendron Jiringa</i> (Jack) I.C. Nielsen	ไม้ยืนต้นขนาดกลาง	1	7	0.8	4.5	42	0.9	1.60	17.42
14	มะกอมขม***	<i>Picrasma Javanica</i> Blume	ไม้ยืนต้นขนาดกลาง	1	10	1.5	3.5	44	0.4	2.50	5.54

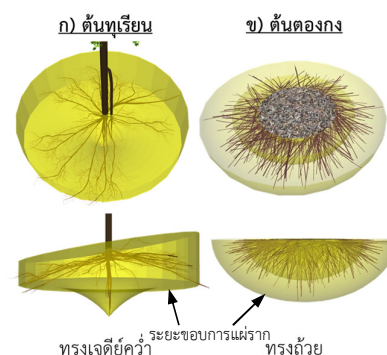
หมายเหตุ : * = ทรงรากแบบเจดีย์คว่ำ, ** = ทรงรากแบบถ้วย, *** = ทรงรากแบบบาตรพระ

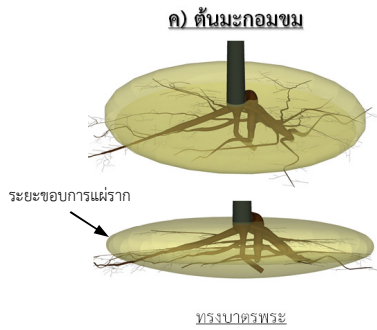
จากการสำรวจพืชลักษณะรูปทรงรากส่วนใหญ่เป็นทรงเจดีย์คว่ำ 9 พันธุ์ คือ ทุเรียน ปอขี้ตุ่น มะนอด เมี่ยง กาแฟ ลองกอง ตีนนก คอแลน และตะแบก รูปทรงถ้วยมี 3 พันธุ์ คือ ตองกง กล้วยป่า ไผ่ ส่วนรูปทรงแบบบาตรพระมี 2 พันธุ์ คือ มะกอมขม และเนียง รูปที่ 16 คือตัวอย่างรูปทรงของรากพืชในรูปทรงเจดีย์คว่ำ ทรงถ้วย และทรงบาตรพระ นอกจากนี้พืชตัวแทนที่ได้สำรวจยังแบ่งกลุ่มพืชออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

กลุ่มพืชเบิกนำ เป็นพืชที่ขึ้นภายหลังจากดินถล่มอย่างรวดเร็วจึงเจริญเติบโตได้ดี แต่จะมีอายุไม่ยืนยาวมากนักเมื่อมีไม้ยืนต้นขึ้นมาแทนจนมีร่มเงาปกคลุมก็มักจะตายไปในที่สุด พืชกลุ่มนี้ประกอบด้วย ปอขี้ตุ่น ตองกง กล้วยป่า และไผ่ ทรงรากที่พบส่วนใหญ่เป็นทรงถ้วย

กลุ่มพืชสวน ประกอบด้วย ทุเรียน เมี่ยง เนียง กาแฟ และลองกอง ซึ่งเป็นตัวแทนของพืชสวนในพื้นที่

กลุ่มพืชป่า เป็นกลุ่มที่พืชมีขนาดใหญ่และรัศมีแผ่รากมากที่สุด ประกอบด้วย มะนอด ตีนนก ตะแบก และคอแลน





รูปที่ 16 ตัวอย่างรูปทรงรากที่สำรวจพบในพื้นที่ศึกษา

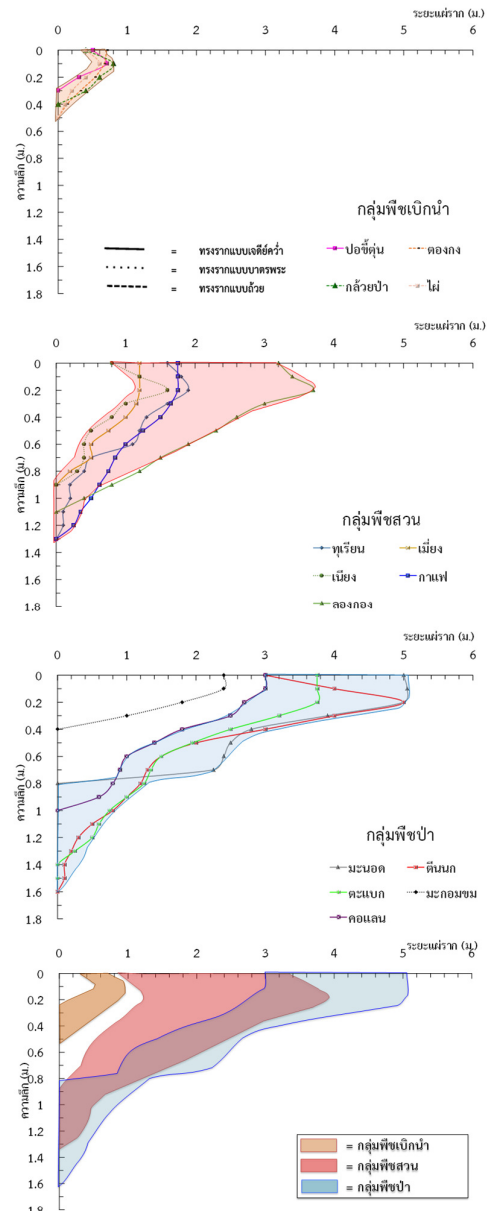
5.2 ผลการกระจายระยะแผ่ของรากพืช

การจำแนกรากของพืชขึ้นอยู่กับระยะแผ่รากและรูปทรงแบบ 3 มิติ เนื่องจากในการสำรวจรากสำรวจเพียงบางส่วนของราก ดังนั้นในการจำลองรูปทรงของราก จะจำลองให้รากพืชเป็นรูปทรงสมมาตรกันทั้งต้น และจำลองจากระยะแผ่ของรากในแต่ละระดับความลึกตลอดความลึกราก รูปที่ 17 แสดงผลการสำรวจระยะแผ่ของรากพืชในพืชชนิดต่างๆ โดยที่เส้นทึบแสดงระยะแผ่รากของพืชที่มีทรงรากแบบเจดีย์คว่ำ เส้นประเข้มคือระยะแผ่รากของพืชที่มีทรงรากแบบถั่ว และเส้นประแบบจุด คือระยะแผ่รากของพืชที่มีทรงรากแบบบาตรพระ จะเห็นว่ากลุ่มพืชที่มีทรงรากแบบเจดีย์คว่ำจะมีระยะแผ่รากและความลึกมากกว่าทรงรากแบบอื่น และเมื่อดูจากกลุ่มพืชแล้วพบว่าระยะแผ่รากมากที่สุดไปหาน้อย คือ กลุ่มพืชป่า 3.0-5.0 ม. กลุ่มพืชสวน 0.9-3.7 ม. และกลุ่มพืชเบิกนำ 0.5-0.8 ม. ส่วนความลึกรากอยู่ในช่วง 0.8-1.6 ม., 0.9-1.3 ม. และ 0.3-0.5 ม. ตามลำดับ

5.3 ผลอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดรากพืชต่อพื้นที่หน้าตัดดิน

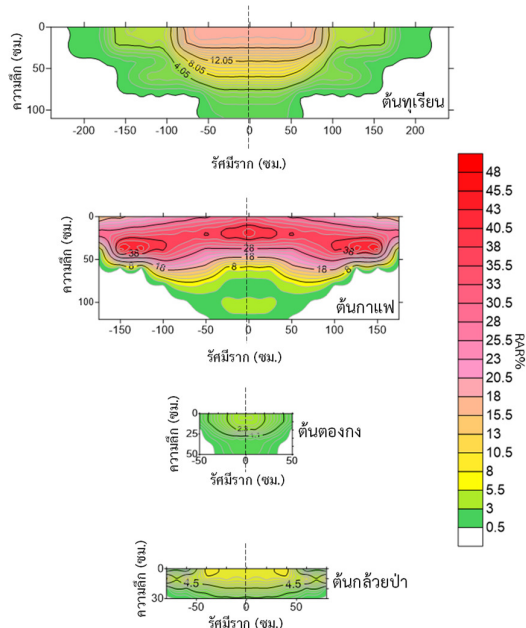
(Root Area Ratio : RAR%)

ปริมาณของรากพืชจะแสดงเป็นความหนาแน่นของรากจากอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่ดิน (RAR%) ในพื้นที่ดินที่ทุกระยะ 0.1 ม.จากลำต้นและลึกทุก 0.1 ม.จากผิวดินเป็นรูปแบบโดนัท โดยแสดงตามความเข้มของสี สีแดงคือ RAR% มีค่ามาก และสีเขียวคือ RAR% มีค่าน้อย ดังรูปที่ 18 เป็นตัวอย่างของ RAR% ของรากทุเรียน กาแฟ ทองกง และกล้วยป่า



รูปที่ 17 ระยะแผ่ของรากตามความลึกของพืชตามกลุ่มพืช

บริเวณใกล้โคนต้นของรากพืชทั้งหมด RAR% มีค่ามากและค่อยๆ ลดลงเมื่อรากได้แผ่ไกลออกไปในทุกชนิดต้น แต่วิธีนี้ไม่สะดวกในการจำลองรากพืชเพื่อประเมินความแข็งแรงของรากแต่ละชนิด และในรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินซึ่งมีพื้นที่ขนาดใหญ่ เนื่องจากจะต้องใช้เครื่องมืออย่างเช่น คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงมากระยะเวลา ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมของอุปกรณ์และระยะเวลาจึงประเมินความหนาแน่นเฉลี่ยของรากในแบบขั้นตามความลึกทุกๆ ความลึก 0.1 ม.จนตลอดความยาวของรากพืช เป็นขั้นทรงกระบอกจากระยะแผ่รากในแต่ละความลึกทุก 0.1 ม. จนตลอดความลึกของราก ดังรูปที่ 19



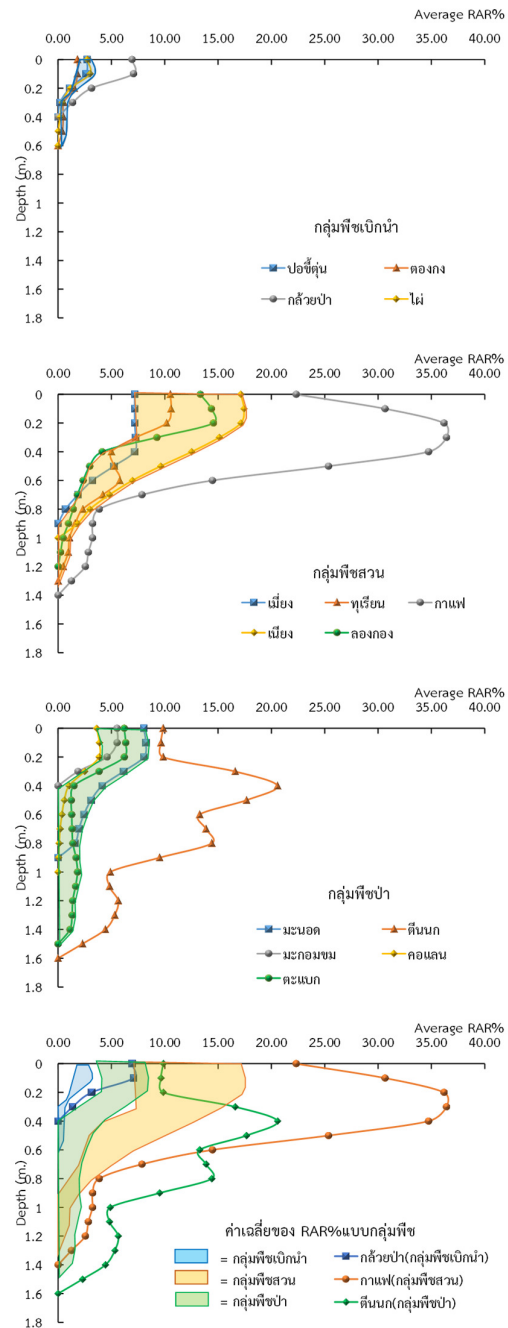
รูปที่ 18 ตัวอย่างผล RAR%ของรากพืชในรูปแบบโดนต์ตามระยะแผ่รากและความลึก โดยที่ ก) ดินทุเรียน ข) ดินกาแฟ ค) ดินตองกง ง) ดินกล้วยป่า

และจากตารางที่ 1 แสดงค่า RAR% ที่มากที่สุดของรากพืชนั้นๆในรูปแบบความลึก จะเห็นว่าพืชที่มีค่าปริมาณรากหรือ RAR% ที่มากที่สุดคือดินกาแฟซึ่งมีรากฝอยจำนวนมากและหนาอยู่ในระดับตื้นจากผิวดิน รองมาคือกลุ่มทรงรากแบบเจดีย์คว่ำซึ่งเป็นพืชประเภทไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ แล้วจึงเป็นกลุ่มทรงรากแบบบาตรพระซึ่งเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางและทรงรากแบบกล้วย ซึ่งเป็นไม้ล้มลุกและไม้กอ

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 19 พบว่าค่า RAR%สูงสุดของกลุ่มพืชเบิกนำ ซึ่งเป็นกลุ่มรากพืชที่มีทรงรากส่วนใหญ่แบบทรงกล้วย มีเพียงต้นปอชี้ต้นที่เป็นทรงเจดีย์คว่ำ มี RAR% สูงสุดอยู่ที่ความลึก 0.1 ม. โดยที่ต้นปอชี้ต้น ตองกง และไผ่ อยู่ในช่วงใกล้เคียงกันคือ 2.0-3.2% มีเพียงต้นกล้วยป่าที่มีค่าแปรปรวนคือสูงกว่าต้นอื่น โดยมีค่า RAR% สูงสุด 7.1% แต่มีความลึกของรากอยู่ระหว่าง 0.4 – 0.6 ม.

กลุ่มพืชสวนที่มีทรงรากส่วนใหญ่เป็นทรงเจดีย์คว่ำมีเพียงต้นเนียงที่มีทรงรากเป็นทรงบาตรพระ โดยกลุ่มนี้มีค่า RAR% สูงสุดอยู่ที่ความลึก 0.2 ม. มีค่า 7-17% เป็นกลุ่มของต้นทุเรียน ลองกอง เนียง และเนียง มีเพียงต้นกาแฟที่มีค่าสูงสุดคือ 37% ที่ความลึก 0.3 ม. เนื่องจากรากของต้นกาแฟในระดับ

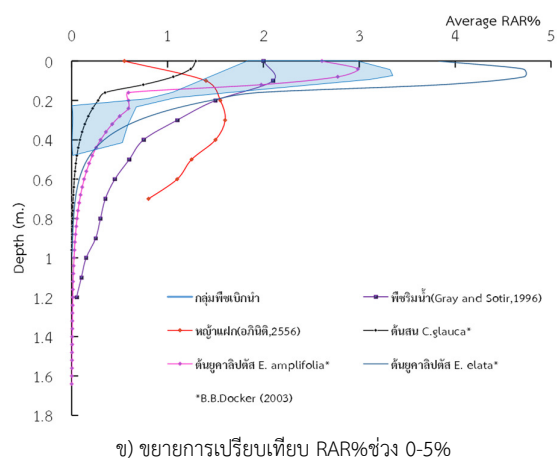
ดังกล่าวจนถึงผิวดินนั้น เป็นรากฝอยปกคลุมหนาแน่นเป็นลักษณะสานเป็นแพหนา



รูปที่ 19 อัตราส่วนพื้นที่ราก (Root Area Ratio, RAR%) ของพืชในพื้นที่แม่พรวัง-แม่พูล

กลุ่มพืชป่าเป็นกลุ่มพืชที่มีรากส่วนใหญ่เป็นทรงรากแบบเจดีย์คว่ำ มีเพียงต้นมะกอมขมเท่านั้นที่มีทรงรากเป็นทรงบาตรพระ ซึ่งกลุ่มพืชป่านี้มีค่า RAR% สูงกว่ากลุ่มพืชเบิกนำและมีค่าสูงสุดอยู่ที่ความลึก 0.1 - 0.2 ม. มีค่า 4 – 8.5% เป็นกลุ่ม

เมื่อพิจารณาเป็นค่าเฉลี่ยแบบกลุ่มพืชพบว่า พืชสวนมีค่า RAR% มากที่สุด รองลงมาคือ กลุ่มพืชป่า และกลุ่มพืชเบิกนำ ตามลำดับ จากที่กลุ่มพืชสวนมีค่า RAR% สูงสุด เนื่องจากการปลูกพืชสวนในพื้นที่ศึกษามีการกำจัดวัชพืชที่บริเวณโคนต้น และมีการเว้นระยะการปลูกออกเพื่อให้รากพืชเจริญเติบโตได้ดี ส่งผลให้ปริมาณรากมีค่ามากกว่ากลุ่มพืชชนิดอื่น โดยที่ค่าเพิ่มค่า RAR% สูงมาก ซึ่งมีปริมาณรากฝอยมากที่สุดที่ความลึก 0-0.6 ม. จากผิวดินและรากแก้วที่ลึกซึ่งเหมาะสำหรับการปลูกเสริมในพื้นที่ที่ต้องการป้องกันการกัดเซาะของหน้าดินในบริเวณที่เสี่ยงต่อการเกิดดินถล่ม



[18], [27,28]

นอกจากนี้เพื่อประเมินความแข็งแรงของรากพืชในขั้นต่อไป
นอกจากต้องพิจารณาจากค่าปริมาณ RAR% แล้วต้องพิจารณา

จากค่าความต้านทานแรงดึงของรากพืชร่วมด้วย ซึ่งจะดำเนินการในงานวิจัยในอนาคต และจะได้นำค่าความแข็งแรงของรากพืชไปประยุกต์เพื่อประเมินเสถียรภาพของลาดดินในการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทต่างๆด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการทำวิจัยจาก โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาการป้องกันแก้ไขปัญหาดินถล่มบนที่สูงชันตามแนวพระราชดำริ (มูลนิธิชัยพัฒนา) และ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Disaster Prevention and Mitigation. (2006). *Situations of Floods and Landslides*. Ministry of Interior. Retrieve from <http://www.disaster.go.th/old/news01/webddpm/test3.html>. (In Thai)66
- [2] Chaipattana Foundation (2016). Research and Development Project on Landslide Prevention and Protection by His Majesty's initiative., 7th Subproject, Final Report, Thailand. (In Thai)
- [3] S. Tansamrit. (2013). Community Involvement to Preventing Landslide by using Vetiver grasses. Paper presented at Conference of "2nd Decades of Vetiver grasses Development", Land Development Department, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand (In Thai)
- [4] D.H Gray, & R.B. Sotir. (1996). *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization*: John Wiley & Sons Inc..
- [5] A. Jotisankasa. (2013). *Soil-Bioengineering: Use of Vegetation and Soil Engineering for Erosion Control and Slope Stabilization*. Bangkok:Pre-One Limited Partnership. (In Thai)
- [6] L.J. Waldron. (1977). Shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 843-849.
- [7] T. H. Wu. (1976). *Investigation of Landslides on Prince of Wales Island*. Retrieved from Columbus, Ohio, USA. :
- [8] T.H. Wu, W.P. McKinnell, III, & D.N. Swanston. (1979). Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island. *Geotechnical Journal*, 114(12), 19-33.
- [9] W.M. Yan Flora T.Y. Leung, Billy C.H. Hau b, L.G. Tham. (2015). Root systems of native shrubs and trees in Hong Kong and their effects on enhancing slope stability. *Catena*, 125, 102-110.
- [10] Zhun Mao, Laurent Saint-André, Marie Genet, Francis Xavier Mine, Christophe Jourdan, Hervé Rey, . . . Alexia Stokes. (2012). Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: Choosing cohesion models. *Ecological Engineering*, 45, 55-69.
- [11] K.M. Schmidt, J.J. Roering, J.D. Stock, W.E. Dietrich, D.R. Montgomery, & T. Schaub. (2001). The variability of root cohesion as an influence on shallow landslides susceptibility in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 995-1024.
- [12] D.H. Gray, & H. Ohashi. (1983). Mechanics of fiber reinforcement in sand. *J. Geotech. Eng. ASCE* 109 (3), 335-353.
- [13] M.M. and R.A. Virginia Caldwell. (1989). Field Methods and Instrumentation. In I. R. W. P. e. a. (eds.) (Ed.), *Plant Physiological Ecology*. (pp. 367-398). London: Chapman and Hall.
- [14] M. Tosi. (2007). Root tensile strength relationships and their slope stability implications for three shrub species in the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*, 87, 268-283.
- [15] A. Watson, M. Marden, & D. Rowan. (1995). Tree species performance and slope stability. In D. H. Barker (Ed.), *Vegetation and Slopes* (pp. 161-171): Thomas Telford Press.
- [16] Rob Gross, & Michelle Julene. (2002). *Supersonic air jets preserve tree roots in underground pipeline installation*. Paper presented at the Proceedings of the Fifth Symposium on Oak Woodlands: Oaks in California's Changing Landscape, Pacific Southwest Research Station, Forest Service. US Department of Agriculture.
- [17] J.-L. Maeght, B. Rewald, & A. Pierret. (2013). How to study deep roots—and why it matters. *Front. Plant Sci.*
- [18] B.B.Docker. (2003). Biotechnical engineering on alluvial riverbanks of southeastern Australia: A quantified model of the earth-reinforcing properties of some native riparian trees. (Ph.D. Thesis), University of Sydney.
- [19] E.F. Gilman. (1988). Predicting root spread from trunk diameter and branch spread. *Journal of Arboriculture*, 14(4), 85-89.

- [20] R. Harris, J. Clark, & N. Matheny. (2004). Arboriculture: Integrated Management of Landscape Trees, Shrubs, and Vines. *Journal of Arboriculture*, 30(6), 579.
- [21] S.D. Day, P. Wiseman, S.B. Dickinson, & J.R. Harris. (2010). Contemporary concepts of root system architecture or urban trees. *Arboriculture & Urban Forestry*, 36(4), 149-159.
- [22] M.E. Styzcen, & R.P.C. Morgan. (1995). Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach *Engineering properties of vegetation* (pp. 5–58). London: Morgan, R.P.C., Rickson, R.J. (Eds.).
- [23] N. Tangtham. (2006). *Forest versus. Flood - Landslide*. Forestry Research Center, Faculty of Forestry, Kasetsart University. (In Thai)
- [24] Forestry Research Center. (1994). *Final report: The Study of Risk Areas Determination for Floods and Natural Disaster. In Southern Watershed, With Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning*. (In Thai)
- [25] M. Akejit, & W. Mairiang. (2013). *Tree root reinforcement for slope stability analysis*. Paper presented at the KU-NCU International Joint Symposium in Civil and Infrastructure Technology 2013, Civil Engineering Department, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus. (In Thai)
- [26] A. N. Stranhler. (1952). Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 63 (11), 1117-1142.
- [27] Habibah Lateh, Nazi Avani, & Ghasem Habibi Bibalani. (2013). Effect of Acacia mangium Root Properties on Shallow Landslide and Slope Stability. *Journal of Life Sciences and Technologies*, 1(2), 127-131.
- [28] Guillermo Tardio, Alejandro González-Ollauri, & Slobodan B. Mickovski. (2016). A non-invasive preferential root distribution analysis methodology from a slope stability approach. *Ecological Engineering*, 97(2016), 46-57.
- [29] Mairiang, W., & Kunsuwan, B. (2005). Landslide Condition and Problems in Thailand. Paper presented at the EIT – JAPAN –AIT join Workshop 2005, Geo-Risk Engineering and Management, Bangkok, Thailand. [in Thai]
- [30] Soralump, S., Pungsuwan, D., Chantasorn, M., & Inmala, N. (2010) Landslide Hazard Management in Pathong Municipality Using Geotechnical Engineering Method.

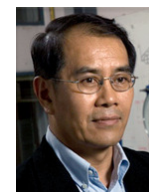
Paper presented at the 15TH National Convention on Civil Engineering, Ubon Ratchathani, Thailand. [in Thai]

9. ประวัติผู้วิจัย



นางสาวมรรษมนต์ เอกจิต

นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ประวัติการศึกษา: วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา)
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน



รองศาสตราจารย์ ดร.วรกร ไม้เรียง

ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์พิเศษประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน



นายบรรพต กุลสุวรรณ

ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน



นายมนทล แผนสท้าน

ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกรโยธา ประจำคณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

การศึกษาผลของมวลรวมหยาบชนิดต่างๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต
A study on the effect of different types of coarse aggregates on the shrinkage
behavior of concrete

ชำนาญ น้อยพิทักษ์^{1*}, สรรณกร เหมะวิบูลย์², สนธยา ทองอรุณศรี³ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล⁴
C. Noipitak, S. Hemavibool, S. Tongaroon Sri and S. Tangtermsirikul

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

³ สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก

⁴ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร

^{1,2} Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

³ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna (Tak Campus),

⁴ Construction and Maintenance Technology Research Center (CONTEC), School of Civil Engineering and Technology,
Sirindhorn International Institute of Technology (SIIT), Thammasat University

E-mail: nahn_n@hotmail.com, sontaya@rmutl.ac.th, somnuk@siit.tu.ac.th

*Corresponding author E-Mail: saranagonh@nu.ac.th

(Received: August 21, 2018, Revised: November 20, 2018, Accepted: December 7, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของมวลรวมหยาบชนิดต่างๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากภูมิภาคต่าง ๆ ในประเทศไทยจำนวน 4 ชนิด ประกอบด้วย หินบะซอลต์จากภาคตะวันออกเฉียงเหนือ หินแกรนิตจากภาคตะวันออก หินปูนจากภาคกลาง และหินกรวดแม่น้ำจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบนบริเวณพื้นที่ติดริมแม่น้ำโขง ปัจจัยที่พิจารณาในการศึกษาประกอบด้วย ความหนาแน่น ร้อยละการดูดซึมน้ำ และโมดูลัสความยืดหยุ่นของหิน จากนั้นทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตทั้งการหดตัวแบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบโดยรวม ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/b) เท่ากับ 0.35 และ 0.55 จากผลการทดสอบพบว่าชนิดของหินที่นำมาผสมคอนกรีตมีสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันและมีผลกระทบต่อการพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตทั้งแบบอโตจีนัสและแบบโดยรวม ค่าการหดตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามค่าความหนาแน่นของหินและค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ แต่ในทางกลับกันค่าการหดตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของหินมีค่าสูงขึ้น

คำสำคัญ: การหดตัวแบบอโตจีนัส การหดตัวแบบโดยรวม มวลรวมหยาบ

Abstract

This research aims to study the effect of different types of coarse aggregate on the shrinkage behavior of concrete. Four types of coarse aggregate normally used in the construction industry from various regions in Thailand were examined, including basalt from the Northeast, granite from the East, limestone from the Central

region, and river gravel from the Northeast along the Mekong river. The test parameters in this study include density, water absorption, and elastic modulus of coarse aggregate. Then, analyses were carried out on the relationship between these physical properties and the shrinkage of concrete (autogenous and total shrinkage). Ordinary Portland cement (OPC) type I was used in this study as the concrete's binder phase and the water-cement ratios (w/b) of concrete were constant as 0.35 and 0.55. The test results showed that different physical properties were presented in different types of coarse aggregate. As a result, concrete mixtures produced from different types of coarse aggregate have different shrinkage behavior (autogenous and total shrinkage). The shrinkage of hardened concrete tends to increase with an increase of the density and water absorption of coarse aggregate. On the other hand, it is likely to decrease as the modulus of elasticity of rock increase.

Keywords: Autogenous shrinkage, Total shrinkage, coarse aggregate

1. บทนำ

การหดตัวของคอนกรีตเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่มักก่อให้เกิดปัญหาการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อันส่งผลกระทบต่อความคงทน และสภาวะการใช้งานของโครงสร้าง ดังนั้น เพื่อป้องกันปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากสาเหตุการหดตัวของคอนกรีต นอกเหนือไปจากการควบคุมการก่อสร้างให้ถูกต้องเป็นไปตามหลักวิชาการและได้มาตรฐาน วิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องสามารถที่จะประเมินหรือทำนายค่าการหดตัวของคอนกรีตที่จะเกิดขึ้นเพื่อนำข้อมูลการหดตัวนี้ไปใช้ในการพิจารณาออกแบบหรือเลือกส่วนผสมของคอนกรีตที่มีค่าการหดตัวอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และลดปัญหาการแตกร้าวของโครงสร้าง ด้วยเหตุนี้มาตรฐานการออกแบบต่างๆ จึงได้มีการนำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ในการทำนายค่าการหดตัวของคอนกรีต ได้แก่ ACI 209R-92 CEB-FIP-90 Bazant B3 Gardner-Lockman 2001 และ JSCE 2002 เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าการหดตัวที่ได้จากสมการเหล่านี้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก ทั้งนี้เป็นเพราะพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการและปัจจัยที่พิจารณาโดยสมการต่าง ๆ มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ สมการส่วนใหญ่มีได้คำนึงถึงผลของมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีตที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวมีเพียงสมการของ ACI 209 เท่านั้นที่มีการคำนึงถึงผลของปริมาณมวลรวมที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต

งานวิจัยจำนวนมากในอดีตพิจารณาการหดตัวของคอนกรีตเกิดขึ้นเฉพาะในซีเมนต์เพสต์ในขณะที่มวลรวมนั้นจะพิจารณา

ว่าทำหน้าที่ในการยึดรั้งการหดตัวของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันเริ่มมีงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับผลของมวลรวมที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตและพบว่าค่าการหดตัวของคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนไปเมื่อใช้หินที่มีสมบัติแตกต่างกันในส่วนผสม [1-5] Fujiwara [2] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสมบัติของมวลรวมที่มีต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต จากผลการศึกษาพบว่าสมบัติของหินซึ่งประกอบด้วยความหนาแน่น ค่าความชื้น ปริมาตรรูพรุน และค่าการหดตัวมีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต Kwan และทีมงาน [3,4] พบว่าค่าการหดตัวของคอนกรีตในอ่างงมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณจากสมการต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณค่าการหดตัวโดยทั่วไปและสาเหตุที่ทำให้ค่าการหดตัวของคอนกรีตมีค่าที่สูงกว่านี้อาจเป็นเพราะหินแกรนิตที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตมีค่าการหดตัวค่อนข้างสูง Zhang และทีมงาน [5] ศึกษาเกี่ยวกับผลของมวลรวม (ทราย 14 ชนิด และหิน 3 ชนิด) ที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าและคอนกรีต จากผลการศึกษาพบว่าชนิดและสมบัติของหิน (ได้แก่ ค่าการหดตัว ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ ร้อยละการดูดซึ่ม และลักษณะโครงสร้างรูพรุนของหิน) มีผลต่อค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

หินที่ใช้ในงานคอนกรีตในประเทศไทยมีหลายชนิด ประกอบด้วยหินปูน หินบะซอลต์ และหินแกรนิต แหล่งหินเหล่านี้กระจายตัวอยู่แทบทุกจังหวัดภายในประเทศ สมบัติของหินที่ได้จากแต่ละแหล่งมีสมบัติที่แตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับผลของสมบัติของหินเหล่านี้ที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะทำการศึกษาผลของการใช้มวล

รวมทั้งต่างชนิดและมีสมบัติที่แตกต่างกันที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าการหดตัวของคอนกรีตให้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นต่อไป

2. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 วัสดุประสาน

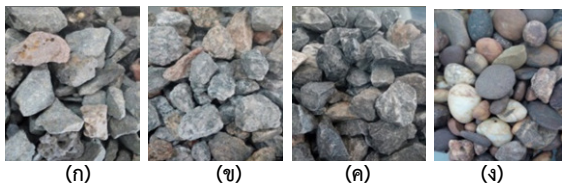
วัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ASTM Type I, Ordinary Portland Cement, OPC) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.16 ตามมาตรฐาน ASTM C188

2.2 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำได้มาจากบริเวณลุ่มน้ำปิง จังหวัดกำแพงเพชร เป็นทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร หรือตะแกรงเบอร์ 200 ทรายเหล่านี้มีค่าความถ่วงจำเพาะสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.60 และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.65

2.3 มวลรวมหยาบ

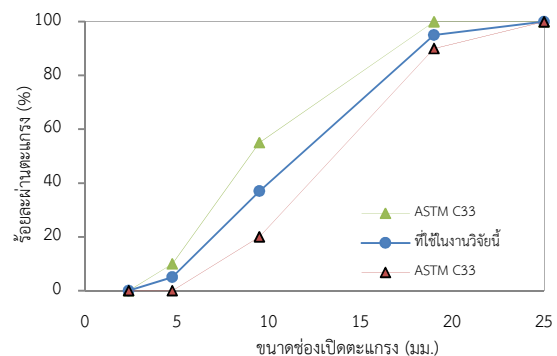
หินที่ใช้ในการผสมคอนกรีตของงานวิจัยนี้มาจากแหล่งต่าง ๆ ภายในประเทศไทยมีจำนวน 4 ชนิด คือ หินบะซอลต์ หินแกรนิต หินปูนและหินกรวดแม่น้ำ แสดงตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชนิดของหิน (ก) หินบะซอลต์ (ข) หินแกรนิต (ค) หินปูน และ (ง) หินกรวด

หินทุกชนิดจะควบคุมให้มีขนาดละเอียดเหมือนกันสำหรับในแต่ละส่วนผสมคอนกรีตและสอดคล้องตามที่แนะนำโดยมาตรฐาน ASTM C33 โดยขนาดละเอียดของหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2 สมบัติทางกายภาพของหินแต่ละชนิดประกอบด้วยค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และโมดูลัสยืดหยุ่นได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ทั้งนี้การหาค่าร้อยละการดูดซึมน้ำความหนาแน่นอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 127 ค่า

โมดูลัสยืดหยุ่นได้จากการทดสอบแท่งทดสอบหินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร



รูปที่ 2 ขนาดละเอียดของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของหินชนิดต่างๆ

ชนิดของหิน	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ ของหิน (%)	โมดูลัสยืดหยุ่นของหิน $\times 10^5$ (กก./ตร.ซม.)
หินบะซอลต์ จ.บุรีรัมย์	2,902	2.35	4.72
หินแกรนิต จ.ตาก	2,819	0.70	2.95
หินปูน จ.สระบุรี	2,758	0.95	5.47
หินกรวดแม่น้ำ	2,741	0.75	3.47
จ.หนองคาย			

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้มีจำนวน 8 ส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 และ 0.55 เพื่อศึกษาการหดตัวแบบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต อัตราส่วนระหว่างทรายต่อมวลรวมทั้งหมด (S/A) เท่ากับ 0.42 มีการควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตและอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างของมวลรวมอัดแน่น (γ) ให้มีค่าเท่ากับ 10 ± 2.5 ซม. และ 1.4 ตามลำดับ ใช้สารลดน้ำพิเศษ ประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 ชนิด Naphthalene Sulphonated based สำหรับการควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วงที่ควบคุม

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมคอนกรีตต่อลูกบาศก์เมตรที่ใช้ในการทดลอง

Mix Proportions	w/b	Type of rock	sp (%)
LR_γ1.4_W/C0.35_S/A0.42	0.35	Limestone	0.80
BR_γ1.4_W/C0.35_S/A0.42	0.35	Basalt	0.80
NR_γ1.4_W/C0.35_S/A0.42	0.35	Granite	0.80
GR_γ1.4_W/C0.35_S/A0.42	0.35	River gravel	0.80
LR_γ1.4_W/C0.55_S/A0.42	0.55	Limestone	0
BR_γ1.4_W/C0.55_S/A0.42	0.55	Basalt	0
NR_γ1.4_W/C0.55_S/A0.42	0.55	Granite	0
GR_γ1.4_W/C0.55_S/A0.42	0.55	River gravel	0

หมายเหตุ sp = สารลดน้ำพิเศษ,

ตารางที่ 3 ผลทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยหินชนิดต่างๆ

รายการ	หิน บะซอลต์	หิน แกรนิต	หิน กรวด	หิน ปูน
Final setting time (นาท)	218	283	233	248
w/c=0.35				
ค่าหดตัวแบบบอโตจีนัส	360	390	296	275
w/c=0.35				
ค่าหดตัวแบบโดยรวม	781	675	552	463
w/c=0.35				
Final setting time (นาท)	247	313	285	266
w/c=0.55				
ค่าหดตัวแบบบอโตจีนัส	276	255	205	199
w/c=0.55				
ค่าหดตัวแบบโดยรวม	836	757	606	551
w/c=0.55				

หมายเหตุ ค่าการหดตัวของคอนกรีต (หน่วย $\mu\epsilon$) วัดที่ระยะเวลา 250 วัน

3.3 วิธีการทดสอบ

3.2.1 ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต

ระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตเป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดระยะเวลาเริ่มต้นการวัดค่าการหดตัวแบบบอโตจีนัสของแท่งทดสอบคอนกรีต วิธีการทดสอบระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 403 โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการก่อตัวมีขนาด 15x15x15 เซนติเมตร ใช้จำนวน 2 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย (ผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 3)

3.3.2 การหดตัวแบบบอโตจีนัสของคอนกรีต

การทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C157 โดยวัดค่าการหดตัวของแท่งคอนกรีตขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร ในแต่ละส่วนผสมจะใช้ตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่างเพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย ในงานวิจัยนี้เริ่มวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งตัวอย่าง เมื่อคอนกรีตมีอายุ 2 ชั่วโมง หลังจากระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย ทั้งนี้เพื่อให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะถอดออกจากแบบโดยไม่เกิดความเสียหาย การหดตัวแบบบอโตจีนัสเป็นการหดตัวที่ไม่มีการสูญเสียความชื้นออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงต้องมีการหุ้มแท่งตัวอย่างด้วยเทปอลูมิเนียมหนา 5 มิลลิเมตร 2 ชั้นตามด้วยพลาสติกใส 5 ชั้นและเทปกาวใส 2 ชั้น ทำการวัดค่าการหดตัวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบว่าน้ำระเหยออกจากตัวอย่างหรือไม่ การสูญเสียน้ำหนักต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.05 ของน้ำหนักเริ่มต้น ตลอดการทดสอบแท่งตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ 28 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 5 %

3.3.3 การหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต

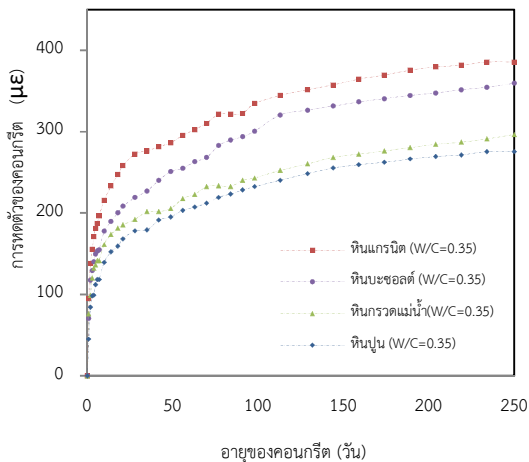
ทดสอบการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C157 ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร ใช้จำนวน 4 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ถอดแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 1 วัน แล้วบ่มในน้ำจนมีอายุครบ 7 วัน จากนั้นนำมาเก็บไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ 28 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 5 % วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง ทั้งในช่วงที่บ่มในน้ำและหลังจากขึ้นจากน้ำ ทำการวัดค่าการหดตัวพร้อมชั่งน้ำหนักจนถึงระยะเวลา 250 วัน

4. ผลการวิจัย

4.1 การหดตัวของคอนกรีตแบบบอโตจีนัส

ตารางที่ 3 รูปที่ 3 และ 4 แสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสของคอนกรีตที่ใช้หินต่างชนิดกันในแต่ละส่วนผสม จากผลการทดสอบพบว่าค่าการหดตัวของแท่งคอนกรีตมีค่าแตกต่างกันทั้งกรณี w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 คอนกรีตที่ใช้หินปูนมีค่าการหดตัวที่ต่ำที่สุดสำหรับทั้งสองกรณี แท่งทดสอบที่มีค่าการหดตัวแบบบอโตจีนัสสูงที่สุดสำหรับ

ส่วนผสมคอนกรีตที่มี w/b เท่ากับ 0.35 คือแห่งทดสอบที่ใช้หินแกรนิต

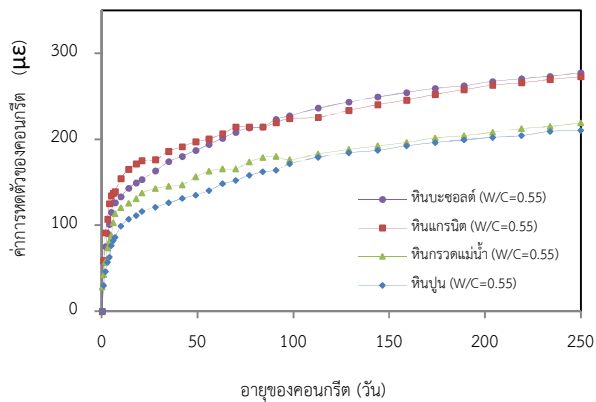


รูปที่ 3 การหาค่าการดูดน้ำของแห่งทดสอบ กรณี w/b = 0.35

สำหรับกรณีส่วนผสมคอนกรีตที่มี w/b เท่ากับ 0.55 ค่าการดูดน้ำของแห่งทดสอบกรณีผสมหินแกรนิตและกรณีผสมหินบะซอลต์มีค่าใกล้เคียงกัน (ดังที่แสดงในรูปที่ 4) โดยในช่วงประมาณ 90 วันแรกการดูดน้ำของแห่งทดสอบที่ผสมหินแกรนิตมีค่ามากกว่าเล็กน้อย แต่หลังจากนั้นแห่งทดสอบที่ใช้หินบะซอลต์เริ่มมีค่าการดูดน้ำที่มากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อลด w/b ลงเท่ากับ 0.35 กลับพบว่าคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์เป็นส่วนผสมมีค่าการดูดน้ำต่ำกว่ากรณีที่ใช้หินแกรนิตอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้หากพิจารณาสมบัติของหินในตารางที่ 1 พบว่าหินทั้งสี่ชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน ถ้าพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำของหินแต่ละชนิดพบว่าหินบะซอลต์จะมีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีหิน 3 ชนิดที่เหลือ ดังนั้น หนึ่งในปัจจัยที่เป็นสาเหตุทำให้ค่าการที่การดูดน้ำของส่วนผสมที่ใช้หินบะซอลต์มีค่าน้อยกว่ากรณีที่ใช้หินแกรนิต กรณีส่วนผสมที่มี w/b เท่ากับ 0.35 น่าจะเกิดขึ้นจากน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในหินบะซอลต์ซึ่งมีปริมาณที่มากกว่าหินอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลองเคลื่อนออกจากหินและซัดเซยน้ำบางส่วนที่สูญเสียไปเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงทำให้การดูดน้ำของบ่อโตนีของแห่งตัวอย่างดังกล่าวมีค่าลดลงทำให้มีค่าการดูดน้ำน้อยกว่ากรณีส่วนผสมที่ใช้หินแกรนิต พฤติกรรมดังกล่าวนี้เรียกว่าการบ่มภายใน (Internal curing) หากใช้สมการของ Power [6,7] ในการประเมินปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับการบ่มภายในพบว่าสำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์และมี w/b เท่ากับ

0.35 ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 11.75 กิโลกรัม ต้องการน้ำสำหรับการบ่มภายในเท่ากับ 0.74 กิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่สามารถกักเก็บไว้ในหินบะซอลต์ที่มีปริมาณเท่ากับ 0.67 กิโลกรัม พบว่ามีปริมาณใกล้เคียงกัน ดังนั้น ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในหินบะซอลต์จึงมีปริมาณที่เพียงพอ (เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณตามสมการของ Power) สำหรับการบ่มภายในและมีผลทำให้การดูดน้ำแบบบ่อโตนีมีค่าลดลง แต่สำหรับกรณีส่วนผสมที่มี w/b เท่ากับ 0.55 เนื่องจากมีปริมาณน้ำอิสระในช่องว่างคัปิลลารี (Capillary pores) เป็นจำนวนมากและเพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน [6] โดยไม่จำเป็นต้องใช้การบ่มภายใน ดังนั้น ผลของน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในหินบะซอลต์ที่มีต่อการดูดน้ำแบบบ่อโตนีของแห่งทดสอบจึงมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี w/b เท่ากับ 0.35

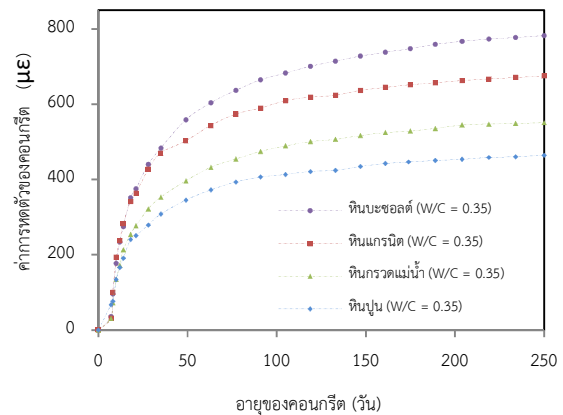
นอกเหนือจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการบ่มภายในแล้วพฤติกรรมการยึดรั้งการดูดน้ำของซีเมนต์เพสต์ของมวลรวมก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการดูดน้ำของคอนกรีต โดยทั่วไป หินที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะมีความสามารถในการยึดรั้งการดูดน้ำของซีเมนต์เพสต์ได้ดีกว่ากรณีที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำกว่า จากผลการทดสอบดังที่แสดงในตารางที่ 1 พบว่าหินทั้ง 4 ชนิดมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแตกต่างกันโดยหากเรียงลำดับชนิดหินที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากไปหาน้อยสามารถเรียงลำดับได้คือ หินปูน หินบะซอลต์ หินกรวดแม่น้ำ และหินแกรนิต ดังนั้น หนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้คอนกรีตที่ผสมหินปูนมีค่าการดูดน้ำต่ำที่สุดน่าจะเกิดขึ้นจากผลของประสิทธิภาพในการยึดรั้งการดูดน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่ดีที่สุดของหินปูนเมื่อเปรียบเทียบกับหินชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในการศึกษา และในทางกลับกันคอนกรีตที่ผสมหินแกรนิตซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำที่สุดจึงมีค่าการดูดน้ำสูงที่สุด อย่างไรก็ตามส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าหินกรวดแม่น้ำกลับมีค่าการดูดน้ำสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมกรวดแม่น้ำอย่างชัดเจน ผลดังกล่าวนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยอื่นนอกเหนือไปจากผลของการบ่มภายในและการยึดรั้งการดูดน้ำของซีเมนต์เพสต์จากมวลรวมซึ่งในประเด็นดังกล่าวนี้ควรต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต



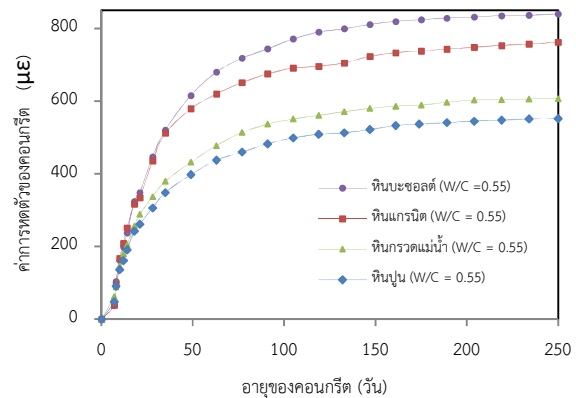
รูปที่ 4 การหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตแบบโตนีซของแท่งทดสอบ กรณี $w/b = 0.55$

4.2 การหาค่าความแข็งแรงโดยรวมของคอนกรีต

การหาค่าความแข็งแรงโดยรวมเป็นผลรวมของค่าการหาค่าความแข็งแรงของโตนีซและการหาค่าความแข็งแรงของแท่งทดสอบ โดยปัจจัยที่พิจารณาสำหรับการศึกษาคือชนิดของมวลรวมหยาบที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตที่มี w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 รูปที่ 5 รูปที่ 6 และตารางที่ 3 แสดงค่าการหาค่าความแข็งแรงโดยรวมโดยเริ่มแสดงค่าการหาค่าความแข็งแรงของแท่งทดสอบตั้งแต่ภายหลังจากการนำตัวอย่างชิ้นมาจากน้ำจนถึงระยะเวลา 250 วัน สำหรับกรณี w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าอัตราการหาค่าความแข็งแรงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเริ่มมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ชนิดของมวลรวมหยาบที่ใช้มีผลต่อค่าการหาค่าความแข็งแรงโดยรวมอย่างชัดเจนและผลที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต โดยค่าการหาค่าความแข็งแรงจากค่ามาลงมามีค่าที่น้อยที่สุดสำหรับส่วนผสมคอนกรีตทั้งสองกรณี คือ ส่วนผสมที่ใช้ หินบะซอลต์ หินแกรนิต หินกรวดแม่น้ำ และหินปูน ตามลำดับ ค่าการหาค่าความแข็งแรงโดยรวมที่อายุ 250 วันสำหรับส่วนผสมที่ใช้หินบะซอลต์มีค่าเป็น 1.69 และ 1.52 เท่าของค่าการหาค่าความแข็งแรงโดยรวมกรณีส่วนผสมที่ใช้หินปูนสำหรับ w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ตามลำดับ ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างของสมบัติของหินที่ใช้ในแต่ละส่วนผสมโดยจะได้กล่าวในรายละเอียดในหัวข้อต่อไป



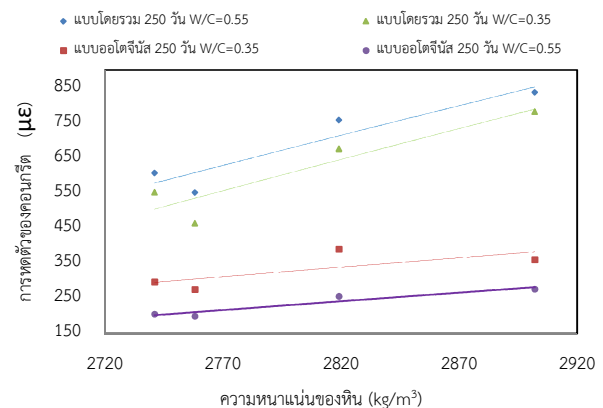
รูปที่ 5 การหาค่าความแข็งแรงโดยรวมของแท่งทดสอบคอนกรีต กรณี $w/b = 0.35$



รูปที่ 6 การหาค่าความแข็งแรงโดยรวมของแท่งทดสอบคอนกรีต กรณี $w/b = 0.55$

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของหินต่อการหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีต

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของหินกับค่าการหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีต

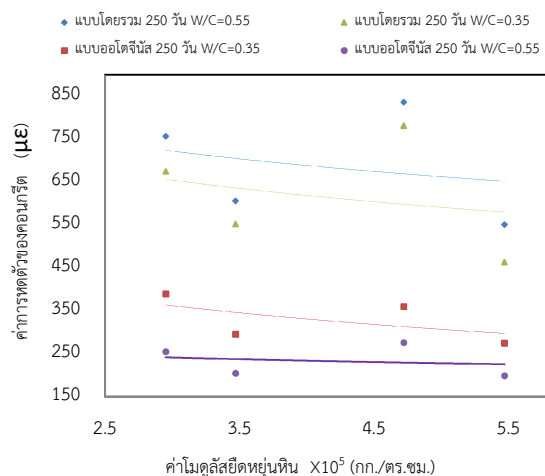


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตกับความหนาแน่นของหินชนิดต่างๆ

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของหินกับการหดตัวของคอนกรีตแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมของคอนกรีตที่ระยะเวลา 250 วัน จากผลการทดสอบพบว่าค่าการหดตัวของคอนกรีตทั้งแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมสำหรับส่วนผสมที่มี w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นของหินที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต ผลการทดลองที่ได้พบว่ามีค่าแตกต่างจากผลการศึกษาในอดีต [2] ซึ่งพบว่าค่าการหดตัวมีค่าลดลงตามค่าความหนาแน่นของหินที่ใช้ มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจาก Imamoto และ Arai [8] พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET specific surface area) ของหินที่ได้จากวิธี BET มีความสัมพันธ์กับการหดตัวของคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าค่าการหดตัวของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของหินที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่หินที่ใช้สำหรับการศึกษานี้ถึงแม้ว่าจะมีความหนาแน่นที่สูงกว่าแต่อาจมีรูพรุนที่มีขนาดเล็กมากเป็นจำนวนมากซึ่งทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่ากรณีหินที่มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าจึงทำให้ได้ผลการทดสอบมีแนวโน้มดังที่แสดงในรูปที่ 7

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของหินกับค่าการหดตัวของคอนกรีต

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหินกับค่าการหดตัวของคอนกรีต (แบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวม) ที่ระยะเวลา 250 วัน ผลการทดสอบพบว่าค่าการหดตัวของคอนกรีตมีค่าลดลงตามค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหินที่สูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [5] ผลการทดสอบที่ได้แสดงถึงผลของความสามารถของมวลรวมหยาบในการยึดรั้งการหดตัวของคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของมวลรวมหยาบที่ใช้ในส่วนผสม แต่อย่างไรก็ตามดังที่แสดงในรูปที่ 8 พบว่าข้อมูลมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง ดังนั้น โมดูลัสความยืดหยุ่นของหินที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตจึงเป็นเพียงปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของคอนกรีตต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหิน

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการใช้มวลรวมหยาบ 4 ชนิดที่มีการใช้โดยทั่วไปสำหรับงานคอนกรีตในประเทศไทยที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตทั้งแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมของคอนกรีต โดยงานวิจัยได้มุ่งเน้นในการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพของหินที่มีต่อการหดตัวของคอนกรีต จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 1) การใช้มวลรวมหยาบที่มีสมบัติแตกต่างกันมีผลต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตทั้งแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมอย่างชัดเจน
- 2) จากผลการศึกษาพบว่าการใช้มวลรวมหยาบที่มีค่าการดูดซึมน้ำและโมดูลัสยืดหยุ่นสูงในส่วนผสมคอนกรีตสามารถช่วยลดค่าการหดตัวทั้งแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมได้ อย่างไรก็ตามมีข้อยกเว้นสำหรับกรณีคอนกรีตที่ผสมหินบะซอลต์ซึ่งเป็นหินที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าการดูดซึมน้ำสูงแต่กลับมีการหดตัวของบอโตจีนัส (กรณี w/b = 0.55) และแบบโดยรวมสูงที่สุด
- 3) จากผลการทดสอบพบว่าสำหรับทุกส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินปูนมีค่าการหดตัวทั้งแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมต่ำที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tarun R. N., Rudolph N. K. and Yoon-moon C. (2006). Effect of different types of aggregates on autogenous and drying shrinkage of concrete, in: 1st International Conference on Advanced Construction Materials (147-160). Monterrey, Mexico.
- [2] Fujiwara, T. (2008). Effect of aggregate on drying shrinkage of concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 6, No. 1, 31-44.
- [3] Kwan A. K. H., Fung W. W. S. and Wong H. H. C. (2010). Reducing drying shrinkage of concrete by treatment of aggregate. Magazine of Concrete Research, 62, No. 6, 435-442.
- [4] Kwan A. K. H., Au F. T. K., Wong H. H. C. and Ng P. L. (2010). Shrinkage of Hong Kong granite aggregate concrete. Magazine of Concrete Research, 62, No. 2, 115-126.
- [5] Zhang W., Zakaria M. and Hama Y. (2013). Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. Construction and Building Materials, 49, 500-510.
- [6] Jensen O. M. and Hansen P. F. (2001). Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background. Cement and Concrete Research, Vol. 31, 647-654.
- [7] Kovler, K. and Jensen, O. M. (2005). Novel techniques for concrete curing – New method for low w/cm mixtures. Concrete International, 39-42.
- [8] Imamoto, K. and Arai, M. (2008). Simplified evaluation of shrinkage aggregate based on BET surface area using water vapor. Journal of Advanced Concrete Technology, 6, No. 1, 69-75.



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000
โทร. 055-963951 โทรสาร. 055-964000
อีเมล : nuej@nu.ac.th

Faculty of Engineering,
Naresuan University
Phitsanulok 65000, Thailand
Tel: +66 (0)55963951
Fax: +66 (0)55964000
E-mail: nuej@nu.ac.th

