



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏนครปฐม

Journal of Engineering, RMUTT

● ปีที่ 9 ● ฉบับที่ 2 ● เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม 2554 www.en.rmutt.ac.th/journal ISSN 1685-5280

การใช้สารลดน้ำพิเศษหลายครั้งและพฤติกรรมการสูญเสียความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์ Multiple dosages of superplasticizer and workability loss of mortar อัศววิญญ์ ณรงค์กุล, ปิตุสาด์ กร่ำมาตร, เฉลิมชัย วาณิชย์ล้าเลิศ, สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล	1
การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซาน Adsorption of chromium (VI) from electroplating industry wastewater by using chitosan ศิริวารินทร์ โตใหญ่, เกตุวดี วิไลพรเจริญ, ยิ่งพิศ พรพัฒน์กุล, และโกวิทย์ ปิยะมั่งคูล	9
การประยุกต์ใช้เทคนิคศูนย์ถ่วงจากน้ำหนักความเสี่ยงในการวิเคราะห์สถานที่จอดพหนะสำหรับปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉิน Application of Center of Risk Gravity in the Location Analysis for a Sitting of Emergency Medical Service Vehicles นันทพงษ์ นันทสำเร็จ	21
การลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ โดยการบูรณาการเทคนิควิศวกรรมอุตสาหกรรม Wastes Reduction in Motorcycle Part Production Line Using Integrated IE Techniques ลาทิตย์ สีนิลพันธ์, ณฐา คุปตะเขียว	31
การวิเคราะห์และออกแบบระบบการขนส่งโลหิตในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลกรณีศึกษาสำหรับศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาดไทย Analysis and Design of Blood Transportation in Bangkok Metropolitan Region A Case Study for the National Blood Centre, Thai Red Cross Society สมชาย ปฐมศิริ, ปกัสนร สุขามูรณ์	41
ออกแบบและสร้างเครื่องคั่วงาอก Design and fabrication of a germinated sesame roaster สุนัน ปานสาคร, จตุรงค์ ลังกาพันธ์, ศิริรัตน์ ทัดแก้ว, วรณิกา ชั่งอี, อวิชัย วงษ์ขมพู	51
Studies on Defect Detection and Thermal Influence in SiC Substrates Using an IR Thermal Imaging Camera Passapong Wutimakun, Karuan Chaivanich, Theerachol Mahawan Thongkam Chumpol, Winat Intarasuwan, and Chumpol Buteprongjit Chulachomklao Royal Military Academy	61

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานวิชาการและวิจัยทางด้านวิศวกรรมศาสตร์
2. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างนักวิจัยและผู้สนใจ
3. เพื่อส่งเสริมสนับสนุนให้คณาจารย์ และบุคลากร คณะวิศวกรรมศาสตร์ทำผลงานทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อสังคม
4. เป็นเอกสารรวบรวมรายงานวิจัยและบทความทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ตำบลคลองหก อำเภोधัญบุรี
จังหวัดปทุมธานี 12110
โทร. 0-2549-3400
โทรสาร 0-2577-5026

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

พิมพ์ออกเผยแพร่ราย 6 เดือน
ติดต่อขอรับเป็นสมาชิกได้
โดยตรงที่คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พิมพ์ที่ บริษัท เอสทีซี มีเดีย แอนด์ มาเก็ตติ้ง จำกัด

69 ซอยรัชดาภิเษก 66 ถนนรัชดาตัดใหม่
แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร (02) 9100813-4
โทรสาร (02) 9101431

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เป็นคณะหนึ่งที่มีการศึกษาระดับปริญญาตรี และปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตร์ โดยมีจุดประสงค์ เพื่อผลิตวิศวกรในหลักสูตรปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ) และวิศวกรในหลักสูตรปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม) สนองความต้องการในตลาดแรงงานและพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ

ส่งเสริมงานด้านวิจัย และดำเนินงานวิจัยทางอาชีวศึกษาและเทคโนโลยี

จัดอบรมและสัมมนาวิชาการให้กับครูประจำการ และอาจารย์ผู้สอนทั้งของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และเอกชนเพื่อยกระดับความรู้ทางวิชาการให้สอดคล้องกับความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี และแผนภูมิการบริหารงานคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์มีวัตถุประสงค์ที่จัดการเรียนการสอนเพื่อให้ นักศึกษามีความรู้พื้นฐานและวิชาชีพ และสามารถวิเคราะห์และสังเคราะห์ระบบและงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ได้เป็นอย่างดี เพื่อที่จะให้สำเร็จเป็นบัณฑิตที่มีความสามารถในการประกอบวิชาชีพซึ่งสอดคล้องและตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน โดยบัณฑิตจะต้องมีความรับผิดชอบและซื่อสัตย์ ควบคู่กับความรู้ทางด้านวิชาการ มีจริยธรรมควบคู่กับการมีคุณธรรมประจำใจ



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏสุรินทร์

คณะกรรมการจัดทำวารสาร
วิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏสุรินทร์

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศ.(พิเศษ) อัจฉราพร	ไคล่สุด
ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์	สมบัติสมภาพ
ศ.ดร.สุธี	อักษรกิตติ์
รศ.ดร.เท็มชัย	เหมะจันทร์
รศ.ณรงค์	บวบทอง
ผศ.ดร.สมชัย	หิรัญโรดม
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์	จิระเดชะ
ผศ.ดร.อังคณา	พันธ์หล่อ
ผศ.ธนะพงศ์	นพวงศ์ ณ อยุธยา
ดร.ชัชวาลย์	สุรัสวดี
ดร.วันชัย	ทรัพย์สิงห์
ดร.พิพัฒน์	ปราโมทย์
ดร.ปลั่งจิตต์	เดชธรรมรักษ์
อ.นิติพงศ์	ปานกลาง
อ.วิรัช	แสงสุริยฤทธิ์
อ.อรรณณ	ขึ้นคุ้ม
อ.ศุภเอก	ประมูลมาก
อ.ณัฐชา	เพ็ชรยิ้ม
อ.วิศักดิ์	หมู่เจริญ
อ.ปัทมา	วิทิศกุล

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์

เลขานุการ

นายสมชาย ตัญญูนนท์

ผู้ช่วยเลขานุการ

นางปนัดดา	เอี่ยมทัศน์
นางสาวพรทิพย์	พุ่มเหมือน
นายเสริมเกียรติ	ฉันทลาลสกุล
นางสาวอัญชลี	ลีมอ

บรรณาธิการ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏสุรินทร์ พยายามที่จะเร่งออกวารสารให้ทันตามวาระ บางฉบับอาจจะล่าช้าไปบ้างต้องขอภัยท่านผู้อ่านที่ติดตามผลงานของวารสารของเรา อย่างไรก็ตามทางกองบรรณาธิการก็ยังคงเน้นการนำเสนอสาระเนื้อหาที่เป็นบทความทางวิชาการ ผลงานวิจัยและอื่นๆ ที่จะประโยชน์ต่อแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ทั้งในปัจจุบันและอนาคต และสืบเนื่องจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ได้รับเกียรติให้เป็นประธานจัดการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554 ดังนั้น ทางกองบรรณาธิการจึงได้คัดเลือกบทความดีเด่นจากการประชุมครั้งนี้ ผ่านการอ่านทบทวนจากผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความอีกครั้งหนึ่ง เพื่อตีพิมพ์ในกรณีพิเศษดังปรากฏ โดยผู้อ่านจะพบว่ามีความน่าสนใจหลายเรื่อง อาทิเช่น การประยุกต์ใช้เทคนิคศูนย์ถ่วงจากน้ำหนักความเสี่ยงในการวิเคราะห์สถานที่จุดพาหนะสำหรับปฏิบัติการทางการแพทย์ ลูกเงิน ออกแบบและสร้างเครื่องคั่วงอก Studies on Defect Detection and Thermal Influence in SiC Substrates Using an IR Thermal Imaging Camera

ท้ายสุดทางกองบรรณาธิการ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัยทุกท่าน ที่ได้สละเวลาอันมีค่า พร้อมกับให้ความอนุเคราะห์อ่านทบทวนบทความทุกบทความตาม หลักวิชาการ อันเป็นประโยชน์อย่างมากต่อผู้อ่านที่จะนำผลงานไปใช้



กองบรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

รศ.ดร.วันชัย ธีรวัณิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.เข้มชัย เหมะจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ชิตชนก มีใจชื่อ	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.อาทิตย์ ไสตร์โยม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
รศ.ดร.ณรงค์ อยู่ถ่อนอม	รองอธิการบดีมหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผศ.ดร.จงจันต์ ผลประเสริฐ	คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.ธีระพงษ์ ว่องรัตนไพศาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.พนมกร ขาวทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.อิสสริย์ หารราชจูญโรจน์	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ณรงค์ บวบทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.เจียรนัย เล็กอุทัย	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ผศ.ดร.นาคูณ ศรีสนธิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.เวคิน ปิยรัตน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.กัณวรัช พลูปราชนุก	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ดร.สาธิต พุทธิชัยยงค์	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รศ.ดร.ปฐมทิพย์ ต้นทับทิมทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ประเทืองทิพย์ ปานบำรุง	คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รศ.ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.ก้องกิติ พุสสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.วัชรินทร์ วิทยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ดร.สมเจตน์ พัทธพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.วราวุธ วุฒินิเชย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
รศ.ดร.ธัญญา นิยมมาภา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ผศ.ดร.กานต์ พนาศุภมัตถุ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแจก	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[illegible]

ดร. ประธาน วงศ์ศรีเวหา

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (สวทช.)

การใช้สารลดน้ำพิเศษหลายครั้งและพฤติกรรม การสูญเสียความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์

Multiple dosages of superplasticizer and workability loss of mortar

อัศวินชัย ฌรงศ์กุล¹ ปิตินันต์ กร้ามาตร² เฉลิมชัย วาณิชยาล้ำเลิศ³ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการใช้สารลดน้ำต่อพฤติกรรมการสูญเสียความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงชนิดเดียว ใช้สารลดน้ำพิเศษประเภทเนพทาไลน์เป็นสารเคมีผสมเพิ่ม และทรายธรรมชาติเป็นมวลรวมละเอียด ความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์พิจารณาจากความสามารถในการเปลี่ยนรูปของมอร์ตาร์ซึ่งวัดจากพื้นที่การไหลผ่านอุปกรณ์ mini slump cone และความหนืดของมอร์ตาร์ซึ่งวัดจากความเร็วในการไหลผ่านอุปกรณ์ V-Funnel สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์นั้นมีอัตราส่วนปริมาตรซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างระหว่างมวลรวมในทุกสัดส่วนผสมคงที่เท่ากับ 1.6 และมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสม โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/c) ระหว่าง 0.27-0.41 และปริมาณสารลดน้ำพิเศษต่อวัสดุประสานระหว่างร้อยละ 0.5-2.5 โดยมีการใส่สารลดน้ำพิเศษ 2 รูปแบบคือ ใส่ครั้งเดียวตั้งแต่ต้น และใส่หลายครั้งที่เวลาต่างกันการสูญเสียความสามารถในการทำงานวัดจากความสามารถในการทำงานตั้งต้นและวัดต่อเนื่องทุก ครั้งชั่วโมงไปจนกระทั่ง 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า กรณีใส่สารลดน้ำพิเศษครั้งเดียวเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่มีพื้นที่การแผ่ตั้งต้นเท่ากัน มอร์ตาร์ที่ใช้สารลดน้ำพิเศษมากกว่าจะมีความหนืดสูงกว่า และจะสูญเสียความสามารถในการเปลี่ยนรูปช้ากว่า กรณีที่ต้องการใช้งานมอร์ตาร์เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น รูปแบบการแบ่งเติมสารลดน้ำพิเศษหลายครั้ง จะทำให้มอร์ตาร์ที่มีความสามารถในการทำงานดีกว่ารูปแบบการเติมสารลดน้ำพิเศษเพียงครั้งเดียว

คำสำคัญ : มอร์ตาร์, การให้ปริมาณน้ำยาครั้งเดียว, การให้ปริมาณน้ำยาหลายครั้ง, ความหนืด, การสูญเสียความสามารถในการทำงาน

Abstract

This research is aimed to study the effect of mode of superplasticizer introduction on workability loss behavior of fresh mortar. Ordinary Portland cement type 1 was used as the only binder in this study. Natural sand was used as the fine aggregate. Naphthelene based superplasticizer (SP) was used as the chemical admixture. The workability of mortar is the combination between deformability and viscosity. Deformability of mortar was measured by area of mortar flow spread after the mini slump cone removal, while viscosity of mortar was measured by outlet flow time through the v-funnel. Mix proportion of mortar was designed by fixing the amount of paste and aggregate (volume of paste/void

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ ดร. นักวิจัยศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

⁴ ศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

content equals to 1.6), varying water to binder ratio between 0.27-0.41, and varying superplasticizer dosage between 0.5%-2.5%. The mode of SP introduction was divided into 2 patterns; one single dosage at the beginning and multiple dosages at many elapsed times. The workability loss was considered from the initial workability of mortar at the time just after mixing and that of every 30 minutes until 2 hours after mixing. The test results were compared for the effect of SP admixing patterns on workability loss of mortar. In case of single dosage, it was found that for a certain flow spread, the mortar mixture with higher SP dosage had higher viscosity and slower workability loss. In case of long elapsed time, the mortar with multiple dosages provided better workability than the mortar with a single dosage.

Keywords : mortar, single dosage, multiple dosages, viscosity, workability loss.

1. บทนำ

ปัจจุบันงานก่อสร้างไม่ว่าขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ต่างนิยมที่จะใช้คอนกรีตผสมเสร็จ(Ready-mixed concrete) เนื่องจากมีความสะดวกและสามารถควบคุมคุณภาพของคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามการใช้คอนกรีตผสมเสร็จยังประสบกับปัญหาบางประการที่สำคัญคือการสูญเสียความสามารถในการทำงานของคอนกรีต ซึ่งเป็นปัญหาต่อการเข้าแบบและทำงานได้ยากเนื่องมาจากลักษณะการจราจรที่ติดขัดและลักษณะภูมิอากาศของประเทศไทยที่ตั้งอยู่ในเขตร้อน ทำให้คอนกรีตสดนั้นเกิดการสูญเสียน้ำประกอบกับอุณหภูมิที่สูงเป็นการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพยายามหาวิธีการที่จะยืดระยะเวลาในการทำงานของคอนกรีตให้นานขึ้นจากงานวิจัย [1, 2, 3] พบว่า การเติมสารลดน้ำพิเศษเพิ่มไปหลายครั้ง จะช่วยยืดเวลาของการสูญเสียความสามารถในการทำงานของคอนกรีตออกไปได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการเติมสารลดน้ำพิเศษเพิ่มทุก 30 นาที โดยพิจารณาถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูปและความหนืดของมอร์ตาร์เป็นหลัก

2. รายละเอียดการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 หรือ มอก.15-2532

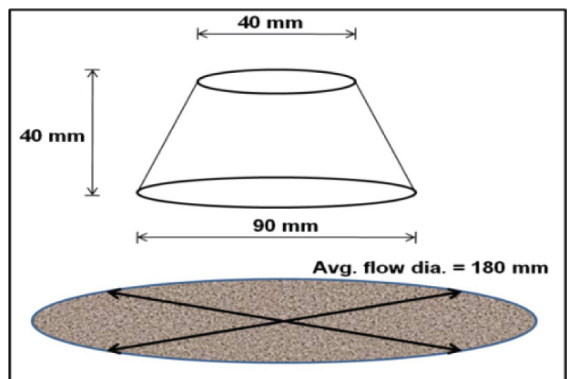
2.1.2ทรายธรรมชาติผ่านการทดสอบตามมาตรฐานASTM C 128 ASTM C 29 และ ASTM C 136

2.1.3 สารลดน้ำพิเศษ Type F ตามมาตรฐาน ASTM C 494 ประเภทแฉะพาทิน

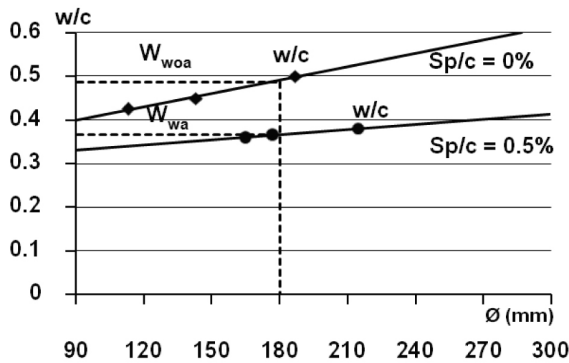
2.1.4 น้ำประปาสะอาด

2.2 ประสิทธิภาพของสารลดน้ำพิเศษ

งานวิจัยนี้ใช้สารลดน้ำพิเศษประเภทแฉะพาทินเป็นส่วนผสม และได้ทำการหาประสิทธิภาพการลดปริมาณน้ำของสารลดน้ำพิเศษ โดยใช้วิธีของ Meyer and Perenchio [4] โดยทดสอบกับซีเมนต์เพสต์ ซึ่งใช้แบบหล่อโลหะรูปกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในด้านบน 40±3 มม. ด้านล่าง 90±3 มม. และความสูง 75±3 มม. แสดงในรูปที่ 1 เป็นเครื่องมือในการทดสอบ



รูปที่ 1 แบบหล่อโลหะรูปกรวย



รูปที่ 2 การหาประสิทธิภาพของสารลดน้ำพิเศษ

วิธีการทดสอบจะเทซีเมนต์เพสต์จนเต็มแบบหล่อโลหะรูปกรวยแล้วขูดออกในแนวตั้ง ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่ของซีเมนต์เพสต์ โดยซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือแบบที่ไม่มีสารลดน้ำพิเศษ และแบบที่ใช้สารลดน้ำพิเศษเป็นส่วนผสม ในที่นี้จะใช้ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำพิเศษเป็นตัวควบคุม โดยจะทำการผสมโดยการเพิ่มหรือลดปริมาณน้ำไปจนกว่าจะได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่ 180 ± 5 มม สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของสารลดน้ำพิเศษจะกำหนดปริมาณของสารลดน้ำพิเศษไว้คงที่ แล้วเพิ่มหรือลดปริมาณของน้ำจนกว่าจะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่ 180 ± 5 มม ในรูปที่ 2 แสดงตัวอย่างในการหาประสิทธิภาพในการลดปริมาณน้ำ กำหนดให้ปริมาณน้ำของซีเมนต์เพสต์กรณีที่ไม่มีการใส่สารลดน้ำพิเศษเป็น W_{woa} สำหรับปริมาณน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่มีการใส่สารลดน้ำพิเศษเป็น W_{wa} และประสิทธิภาพในการลดปริมาณน้ำกำหนดให้เป็น φ' เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\varphi' = 1 - \frac{W_{wa}}{W_{woa}} \times 100\% \quad (1)$$

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของการลด

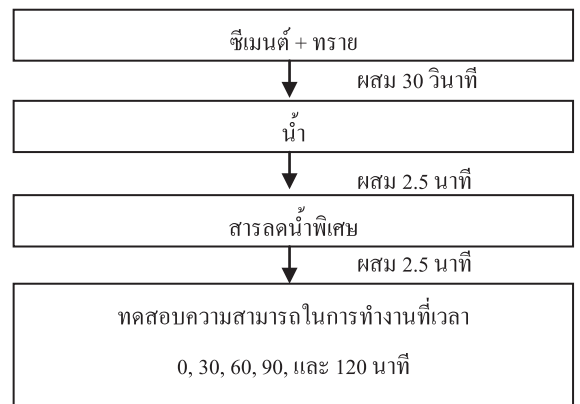
ปริมาณน้ำของสารลดน้ำพิเศษที่ใช้ในการวิจัยนี้ เท่ากับร้อยละ 25 ร้อยละ 48 และร้อยละ 60 ที่ปริมาณของสารลดน้ำพิเศษเท่ากับร้อยละ 0.5 ร้อยละ 1 และร้อยละ 2 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ตามลำดับ

2.3 การออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์

อัตราส่วนปริมาตรซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างระหว่างมวลรวมในทุกสัดส่วนมีค่าคงที่เท่ากับ 1.6 ปริมาณช่องว่างของมวลรวมที่ใช้ในการทดลองเท่ากับร้อยละ 36.37 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) มีค่าระหว่าง 0.27-0.41 ปริมาณของสารลดน้ำพิเศษตั้งต้น (sp/c) มีค่าระหว่างร้อยละ 0.5 - 2.5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ สำหรับในกรณีที่มีการใส่สารลดน้ำพิเศษเพิ่มให้ใส่เพิ่มร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ทุก 30 นาทีไปจนถึง 90 นาที

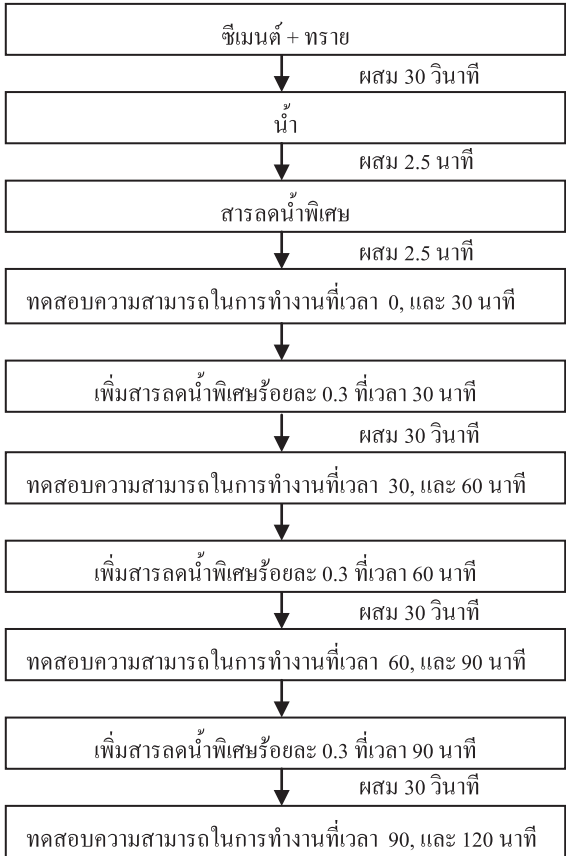
2.4 ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์

ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้กำหนดใช้ปริมาตรรวม 2 ลิตร โดยแบ่งขั้นตอนการผสมออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีที่ใส่สารลดน้ำพิเศษครั้งเดียว และวิธีที่ใส่สารลดน้ำพิเศษหลายครั้งที่เวลา 30, 60, และ 90 นาทีในปริมาณร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักซีเมนต์ดังรูปที่ 3 และ 4



รูปที่ 3 วิธีการผสมมอร์ตาร์ที่ใส่สารลดน้ำพิเศษครั้งเดียว

4 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชภัฏภูเก็ต

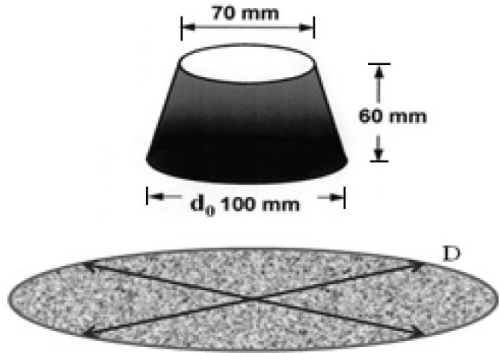


รูปที่ 4 วิธีการผสมมอร์ตาร์ที่ได้สารลดน้ำพิเศษหลายครั้ง

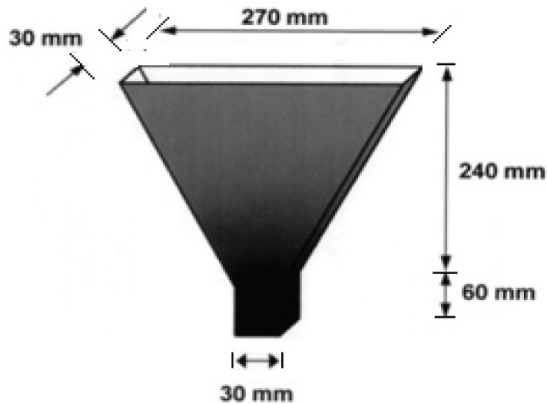
2.5 การทดสอบความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์

ความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์ (workability) ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเปลี่ยนรูป (deformability) และความหนืด (viscosity) ความสามารถในการเปลี่ยนรูปของมอร์ตาร์สามารถวัดจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผ่านอุปกรณ์ mini slump cone โดยการนำแอมอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จแล้วมาเทใส่แบบหล่อโลหะรูปกรวยตัด แล้วยกขึ้นในแนวตั้งปล่อยให้ มอร์ตาร์ไหลอย่างอิสระ แล้ววัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่ของมอร์ตาร์โดยมอร์ตาร์ที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปมากจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่มากดังรูปที่ 5 สำหรับความหนืด (viscosity) วัดได้จากความเร็วในการไหลของมอร์ตาร์

ผ่านอุปกรณ์ทดสอบ V-Funnel โดยการนำมอร์ตาร์เทใส่อุปกรณ์ทดสอบ และจับเวลาในขณะที่มอร์ตาร์ไหลผ่านอุปกรณ์ทดสอบ V-Funnel มอร์ตาร์ที่มีความหนืดมากจะใช้เวลาในการไหลนานดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 อุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการเปลี่ยนรูป Mini Slump Cone



รูปที่ 6 อุปกรณ์ทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์ V-Funnel (JSCE recommendation for self-compacting concrete,1999)

จากผลการทดสอบนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเปลี่ยนรูปและความหนืดตั้งต้นของมอร์ตาร์โดยที่แกนอนกำหนดให้เป็นพื้นที่การไหลแผ่สัมพัทธ์ (Γ_m) และ แกนตั้งกำหนดให้เป็นความเร็วในการไหลสัมพัทธ์ (R_m)

$$\Gamma_m = \left[\frac{D}{100} \right]^2 - 1 \quad (2)$$

$$R_m = \frac{10}{\text{Time(sec)}} \quad (3)$$

Γ_m = พื้นที่การไหลแผ่สัมผัส

R_m = ความเร็วการไหลสัมผัส

D = เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ (มม.)

Time = ความเร็วในการไหลของมอร์ตาร์ (วินาที)

Γ_m มีค่า มากเมื่อมอร์ตาร์มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปมาก Γ_m มีค่าน้อยเมื่อมอร์ตาร์มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปน้อย ในส่วนของความหนืด R_m มีค่ามากเมื่อมอร์ตาร์มีความหนืดน้อย R_m มีค่าน้อยเมื่อมอร์ตาร์มีความหนืดมาก

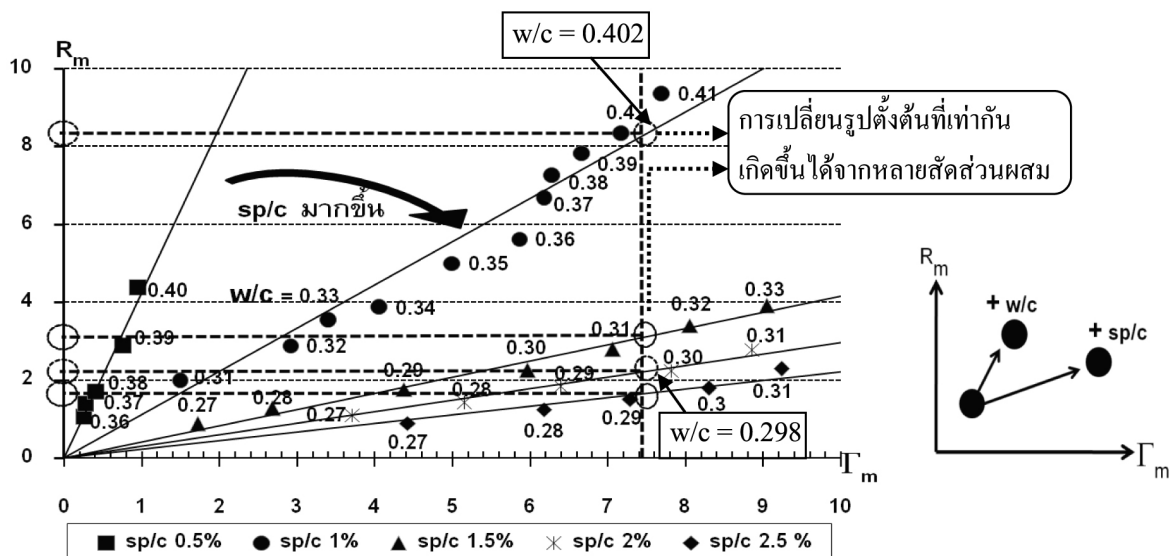
การทดสอบจะแบ่งออกเป็นสองแบบ โดยแบบที่ 1 จะมีการใส่สารลดน้ำพิเศษตั้งต้นเพียงครั้งเดียวในกรณีนี้ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเปลี่ยนรูปและความหนืดตั้งต้นของมอร์ตาร์ ดังรูปที่ 7 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.27-

0.41 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษตั้งต้น (sp/c) มีค่าร้อยละ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จากความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเปลี่ยนรูปและความหนืดตั้งต้นของมอร์ตาร์สามารถประมาณค่าความสามารถในการเปลี่ยนรูปตั้งต้น และความหนืดตั้งต้นที่มาจากสัดส่วนผสมต่างๆ ของมอร์ตาร์ได้ สำหรับแบบที่ 2 เป็นการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เวลา 30, 60 และ 90 นาที โดยเพิ่มปริมาณร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ เลือกใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และปริมาณสารลดน้ำพิเศษตั้งต้นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเปลี่ยนรูปและความหนืดตั้งต้นของมอร์ตาร์ รูปที่ 7 โดยเลือกอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.402 และ 0.298 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษตั้งต้นมีค่า ร้อยละ 1 และร้อยละ 2 ตามลำดับ

3. ผลการวิเคราะห์และอภิปราย

3.1 ปริมาณของน้ำที่มีผลต่อความสามารถในการทำงานตั้งต้นของมอร์ตาร์

จากรูปที่ 7 มอร์ตาร์ที่มีการเพิ่มปริมาณของน้ำจะส่งผลให้ความหนืดของมอร์ตาร์ลดลงมาก (R_m เพิ่มขึ้นมาก) โดยที่ความสามารถในการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเปลี่ยนรูปและความหนืดตั้งต้นของมอร์ตาร์

(Γ_m เพิ่มขึ้นเล็กน้อย) แต่มอร์ตาร์ที่มีการเพิ่มปริมาณของสารลดน้ำพิเศษจะทำให้ความหนืดลดลงเล็กน้อย (R_m เพิ่มขึ้นเล็กน้อย) โดยความสามารถในการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้นมาก (Γ_m เพิ่มขึ้นมาก)

3.2 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษต่อความสามารถในการทำงานตั้งต้นของมอร์ตาร์

จากรูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเปลี่ยนรูปและความหนืดของมอร์ตาร์จะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงโดยที่ความชันของเส้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารลดน้ำพิเศษ ความชันของเส้นจะมากเมื่อ ปริมาณของสารลดน้ำพิเศษน้อยแต่เมื่อปริมาณของสารลดน้ำพิเศษมากความชันของเส้นจะลดน้อยลงตามลำดับ

การเพิ่มปริมาณของสารลดน้ำพิเศษจะทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนรูปเพิ่มมากขึ้น แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าไม่ว่าจะมีการเพิ่มหรือลดปริมาณของน้ำโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนปริมาณของสารลดน้ำพิเศษความสามารถในการเปลี่ยนรูปและความหนืดของมอร์ตาร์ยังคงมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงโดยที่ไม่ส่งผลต่อความชันของเส้น

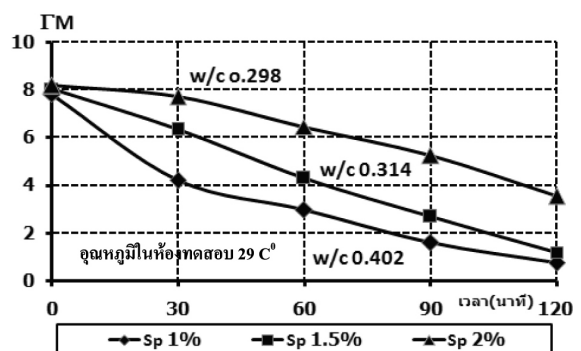
3.3 การสูญเสียความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์

จากรูปที่ 7 มอร์ตาร์ที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปตั้งต้นที่เท่ากันสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสัดส่วนผสม โดยในแต่ละสัดส่วนผสมอาจมีความหนืดที่แตกต่างกัน ซึ่งความหนืดของมอร์ตาร์เป็นองค์ประกอบสำคัญที่จะส่งผลต่อความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์ ดังนั้น การที่จะศึกษาถึงพฤติกรรมการสูญเสียความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์ ไม่ควรคำนึงถึงแต่ความสามารถในการเปลี่ยนรูปตั้งต้นเพียงอย่างเดียว ต้องคำนึงถึงความหนืดด้วย จากรูปที่ 8 และ 9 มอร์ตาร์ที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปตั้งต้นที่เท่ากันแต่มีความหนืดตั้งต้นต่างกัน จะมี การสูญเสียความสามารถในการทำงานแตกต่างกัน โดยมอร์ตาร์ที่มีปริมาณสารลดน้ำพิเศษน้อยแต่มีปริมาณของน้ำมากจะสูญเสียความสามารถในการทำงานเร็วกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปริมาณน้ำน้อยแต่มีสารลดน้ำพิเศษในปริมาณมาก

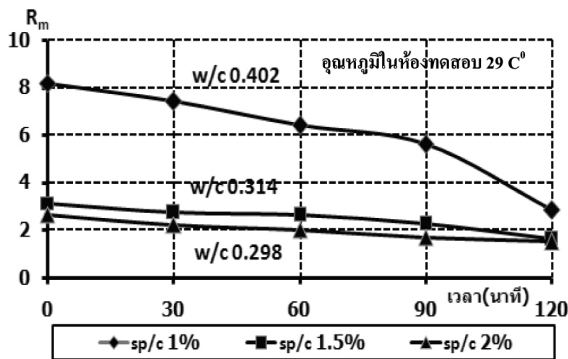
3.4 การสูญเสียความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์ที่มีการเพิ่มสารลดน้ำพิเศษ

พฤติกรรมการสูญเสียความสามารถในการเปลี่ยนรูปของมอร์ตาร์ ที่มีการเติมสารลดน้ำพิเศษเพิ่มในปริมาณร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จากรูปที่ 10 และ 11 การเติมสารลดน้ำพิเศษเพิ่มในครั้งแรกที่เวลาผ่านไป 30 นาทีจะทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนรูปของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ถ้ามีการเติมสารลดน้ำพิเศษเพิ่มต่อไปที่เวลา 60 และ 90 นาที ความสามารถในการเปลี่ยนรูปของมอร์ตาร์จะมีแนวโน้มที่ลดลง เช่นเดียวกันความหนืดของมอร์ตาร์ จากรูปที่ 12 และ 13 การเติมสารลดน้ำพิเศษเพิ่มในครั้งแรกที่เวลาผ่านไป 30 นาทีจะทำให้ความหนืดของมอร์ตาร์ลดลง แต่ถ้ามีการเติมสารลดน้ำพิเศษเพิ่มต่อไปที่เวลา 60 และ 90 นาที จะทำให้ความหนืดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มที่สูงขึ้น ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณสารลดน้ำพิเศษตั้งต้นต่างกันพฤติกรรมการสูญเสียความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์ยังคงไปในทิศทางเดียวกัน

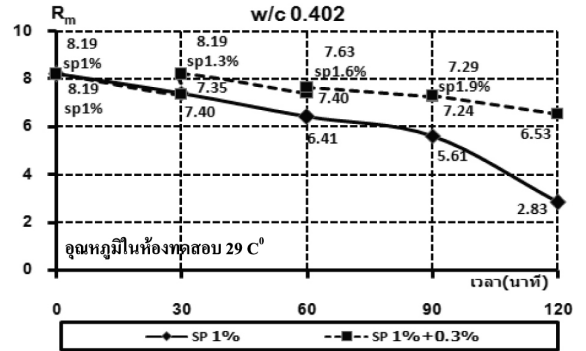
งานวิจัยในอดีตได้มีการทดสอบอัตราการไหลของซีเมนต์เพสต์ [5] พบว่าการใส่สารลดน้ำพิเศษจำนวนมากครั้งเดียวในตอนต้นไม่สามารถช่วยให้อัตราการไหลของซีเมนต์เพสต์ดีขึ้นแต่กับทำให้อัตราการไหลของซีเมนต์เพสต์มีค่าลดลง (ความหนืดเพิ่มขึ้น) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมความหนืดของมอร์ตาร์ดังรูปที่ 12 และ 13 ที่มีการใส่สารลดน้ำพิเศษหลายครั้งที่เวลาผ่านไป 30, 60, และ 90 นาที



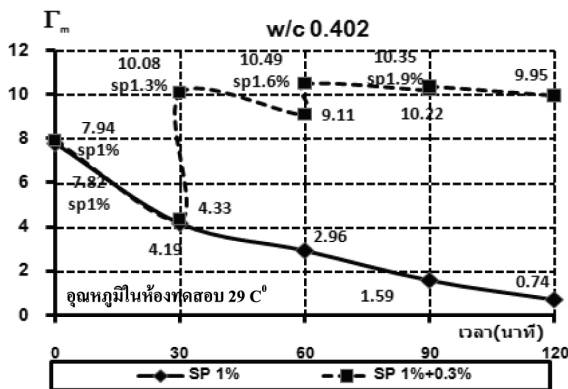
รูปที่ 8 การสูญเสียความสามารถในการเปลี่ยนรูป



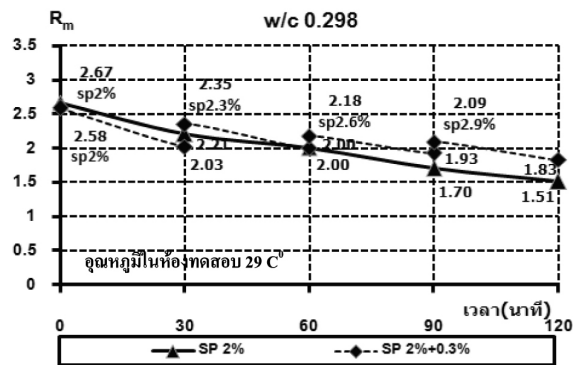
รูปที่ 9 ความหนืดของมอร์ตาร์



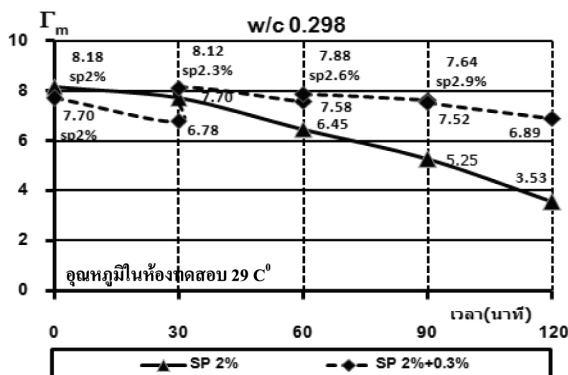
รูปที่ 12 ความหนืดของมอร์ตาร์โดยการเพิ่มสารลดน้ำพิเศษโดยมีปริมาณตั้งต้นร้อยละ 1



รูปที่ 10 ความสามารถในการเปลี่ยนรูปของมอร์ตาร์ที่มีการเพิ่มสารลดน้ำพิเศษโดยมีปริมาณตั้งต้นร้อยละ 1



รูปที่ 13 ความหนืดของมอร์ตาร์โดยการเพิ่มสารลดน้ำพิเศษโดยมีปริมาณตั้งต้นร้อยละ 2



รูปที่ 11 ความสามารถในการเปลี่ยนรูปของมอร์ตาร์โดยการเพิ่มสารลดน้ำพิเศษโดยมีปริมาณตั้งต้นร้อยละ 2

4. สรุปผล

1. การเพิ่มปริมาณของน้ำจะส่งผลให้ความหนืดของมอร์ตาร์ลดลงมากโดยที่ความสามารถในการเปลี่ยนรูปจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับมอร์ตาร์ที่มีการเพิ่มปริมาณของสารลดน้ำพิเศษจะทำให้ความหนืดลดลงเล็กน้อยแต่ความสามารถในการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้นมาก

2. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเปลี่ยนรูปและความหนืดของมอร์ตาร์ที่มีปริมาณสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.5 ร้อยละ 1 ร้อยละ 1.5 ร้อยละ 2 และร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงโดยที่ความชันของแต่ละเส้นขึ้นอยู่กับปริมาณของสารลดน้ำพิเศษ

3.เมื่อเพิ่มหรือลดปริมาณของน้ำโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนปริมาณของสารลดน้ำพิเศษ ความสามารถในการเปลี่ยนรูปและความหนืดของมอร์ตาร์ยังคงมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงอยู่โดยที่ความชันของเส้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง

4.มอร์ตาร์ที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปตั้งต้นที่เท่ากัน แต่มีความหนืดตั้งต้นต่างกันโดยมาจากสัดส่วนผสมที่ไม่เหมือนกันจะมีการสูญเสียความสามารถในการทำงานต่างกันด้วย

5.การเพิ่มสารลดน้ำพิเศษเพื่อรักษาความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์จะได้ผลที่ดีในส่วนผสมที่ใส่สารลดน้ำพิเศษตั้งต้นไม่มาก แต่ถ้ามีการเพิ่มสารลดน้ำพิเศษตั้งต้นมากขึ้น จะทำให้ความหนืดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้นส่งผลทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนรูปของมอร์ตาร์น้อยลง

เอกสารอ้างอิง

[1] Hattori, Kenichi, Experiences with Mighty Super plasticizers in Japan, Proceedings of the 1st CANMET/ACI Conference on Superplasticizers in concrete, Ottawa, Canada, V.M. Malhotra, Editor, ACI SP-62, pp. 37-66, 1979.

[2] Malhotra, V.M., Superplasticizers: Their Effect on Fresh and Hardened Concrete; Chapter 10, Progress in Concrete Technology, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, V.M. Malhotra, Editor, pp. 367-420, 1980.

[3] Vinit Chovichien, Effect of Remixing on the Compressive Strength of Concrete, Research Report, Department of Civil Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, 1982.

[4] Meyer, L.M., and Perenchio, W.F., Theory of concrete slump loss as related to the use of chemical admixtures, Concrete International, Vol. 1, No. 1, pp. 36-43, 1979.

[5] ปิยะ ประสพแสง, อำนวย พานิชกุลพงศ์ และ คมสัน มาลีสี, 2550. อิทธิพลของสารผสมเพิ่มที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่แบ่งน้ำออกเป็นสองส่วน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, หน้า NCCE12-Volume 5 (MAT)-Page 99 – NCCE12- Volume 5 – Page 105.

การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซาน

Adsorption of chromium (VI) from electroplating industry wastewater by using chitosan

ศิริวารินทร์ โตใหญ่¹ เกตุวดี วิไลพรเจริญ¹ ยิ่งพิศ พรพัฒน์กุล² และโกวิทย์ ปิยะมั่งคณา²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเป็นตัวดูดซับ ทำการทดลองแบบแบตช์โดยศึกษาผลของปริมาณไคโตซานและความเป็นกรด-เบส ของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ พบว่าการเพิ่มปริมาณไคโตซานมีผลทำให้ร้อยละการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ไคโตซานปริมาณ 1.0 กรัม ที่ pH 2.7 มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 115.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ไอโซเทอมของการดูดซับศึกษาโดยใช้สมการแลงเมียร์ ฟรุนดลิช บิอิตีและเทมเค็น พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับแบบฟรุนดลิช จลนพลศาสตร์การดูดซับศึกษาโดยใช้สมการ Pseudo-first order และ Pseudo-second order พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second order อัตราเร็วการดูดซับเริ่มต้นและครึ่งเวลาของการดูดซับมีค่าเท่ากับ 4.0 มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที และ 29.1 นาที ตามลำดับ กลไกของการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน โดยการแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ

คำสำคัญ : การดูดซับ, โครเมียม (VI) , ไคโตซาน.

Abstract

Adsorption of chromium (VI) from electroplating wastewater using chitosan as adsorbent was studied. Batch experiments were carried out as a function of the quantity of chitosan used and pH of electroplating wastewater. The experimental results show that the percentage of adsorption increased with increasing the amount of chitosan. The adsorption capacity of electroplating wastewater on 1.0 g of chitosan at pH 2.7 was 115.0 mg/g. The Langmuir, Freundlich, Brunauer-Emmett-Teller and Temkin adsorption isotherms were applied to describe the chromium (VI) up-taking behavior. It was shown that the adsorption phenomena could be well described by Freundlich adsorption model. The pseudo-first order and pseudo-second order were employed to determine the adsorption kinetics. It was found that the kinetic of adsorption could be elucidated by pseudo-second order. The initial rate of adsorption and half-adsorption time were 4.0 mg/g-min and 29.1 minutes, respectively. The adsorption process occurred in 2 steps. The film diffusion was the rate limiting step.

Keywords : Adsorption, Chromium (VI), Chitosan.

¹นักศึกษาคณะวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

²อาจารย์ประจำภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1. บทนำ

โครเมียมมีรากศัพท์มาจากภาษากรีกว่าโครมา (Chroma) ซึ่งตรงกับคำว่าสี (Color) ในภาษาอังกฤษ เนื่องจากสามารถให้สีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบโครเมียม เช่น Lead (II) chromate (PbCrO_4) และ Chromium (III) oxide (Cr_2O_3) ให้สารประกอบสีเหลืองและสีเขียว ตามลำดับ โครเมียม (Chromium, Cr) ในทางเคมีจัดเป็นโลหะ มีเลขอะตอมและมวลอะตอมเท่ากับ 24 และ 51.996 กรัมต่อโมล ตามลำดับ โครเมียมในธรรมชาติโดยส่วนใหญ่มีเลขออกซิเดชันอยู่ 3 ค่า ได้แก่ โครเมียม (II), โครเมียม (III) และโครเมียม (VI) โดยโครเมียม (II) พบน้อยมากและเป็นสารที่ไม่เสถียร สามารถสลายตัวได้ง่าย ในขณะที่โครเมียม (III) และโครเมียม (VI) มีความเสถียรค่อนข้างสูง เกิดเป็นไอออนได้หลายชนิด ได้แก่ $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$, $\text{Cr}(\text{OH})_3$ หรือ $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ สำหรับโครเมียม (III) และ CrO_4^{2-} , HCrO_4^- หรือ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ สำหรับโครเมียม (VI) เป็นต้น

การได้รับโครเมียม (III) ในปริมาณ 50 - 200 ไมโครกรัมต่อวัน จะเป็นประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ โดยโครเมียม (III) จะไปลดระดับปริมาณน้ำตาลในกระแสเลือดสำหรับคนที่ เป็นโรคเบาหวาน นอกจากนั้นยังสามารถลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือด โดยค่อยๆ ลดระดับความเข้มข้นของลิโปโปรตีนในเลือดลง [1] ในขณะที่การได้รับโครเมียม (III) ในปริมาณที่มากเกินไปจะมีความเป็นพิษต่อมนุษย์ ในทางตรงกันข้าม การได้รับโครเมียม (VI) ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานแม้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย อาจทำให้เกิดความผิดปกติต่อร่างกายมนุษย์ ได้แก่ ผิวหนังอักเสบ ระบบการทำงานของตับและไตผิดปกติ ตลอดจนถึงการเป็นมะเร็งปอด [2]

เนื่องจากโครเมียมเป็นโลหะหนักที่มีอันตรายค่อนข้างสูง ในหลายประเทศจึงมีการกำหนดให้โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยโครเมียมลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ในระดับที่แตกต่างกัน ประเทศอินเดีย กำหนดให้โรงงานอุตสาหกรรมสามารถปล่อยโครเมียม (VI) ลงในแหล่งน้ำสาธารณะได้ไม่มากกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร [3] ประเทศ

สเปนกำหนดให้ปล่อยโครเมียม (VI) ลงในแหล่งน้ำได้อยู่ในช่วง 0.1 - 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร [4] ในขณะที่ประเทศไทย โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งที่โรงงานอุตสาหกรรมสามารถปล่อยโครเมียม (III) และโครเมียม (VI) ลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะไว้ไม่มากกว่า 0.75 และ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการปล่อยโครเมียม (VI) จากโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศอินเดียกับประเทศไทยจะเห็นได้ว่าข้อกำหนดของประเทศอินเดีย มีความเข้มงวดมากกว่าประเทศไทย 2.5 เท่า

โรงงานอุตสาหกรรมสามารถกำจัดโครเมียม (VI) ให้เหลืออยู่ในระดับที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยกระบวนการตกตะกอนโดยใช้สารเคมี กระบวนการตกตะกอนทางเคมี-ไฟฟ้า กระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่น ตลอดจนถึงกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและกระบวนการดูดซับ เมื่อพิจารณาในส่วนของการดูดซับเปรียบเทียบกับการตกตะกอนอื่นๆ ในการกำจัดโครเมียม (VI) พบว่ามีข้อดี ได้แก่ ไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงไป ในน้ำเสีย ใช้เงินลงทุนน้อย ใช้เวลาในการบำบัดไม่นานนัก ใช้สถานที่ไม่มากนัก สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ [5] ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโครเมียม (VI) ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ [6] วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร [7] ในทางปฏิบัติพบว่า การใช้ถ่านกัมมันต์และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร อาจไม่เหมาะสมมากนัก เนื่องจากการเตรียมถ่านกัมมันต์ยังมีราคาค่อนข้างแพง นอกจากนั้นยังพบปัญหาในเรื่อง การฟื้นฟูสภาพภายหลังการดูดซับทำได้ยาก

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคติน เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ พบในเปลือกนอกของสัตว์ทะเลพวกกระดองปู แกนหมึกหรือเปลือกกุ้ง ไคโตซานสามารถใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักได้หลายชนิด ได้แก่ ตะกั่ว (II) พรอท (II) และแคดเมียม (II) [8] โครเมียม (VI) และซิลิเนียม (VI) [9] ทองแดง (II) [10] ตลอดจนโลหะมีค่าได้แก่ เงิน (I) [11] และทอง (III) [12] เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิล ($\text{OH}-$) และหมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการ

ศึกษาไอโซเทอม จลนพลศาสตร์และกลไกการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเป็นตัวดูดซับ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 สารเคมี

ผงไคโตซานซื้อจากบริษัท Sea Fresh (ประเทศไทย) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ซื้อจากบริษัท BDH (ประเทศอังกฤษ) ตลอดจนการทดลองใช้น้ำกลั่นในการเตรียมสารละลาย

2.2 การวิเคราะห์ปริมาณรูพรุน ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวไคโตซาน

ทำการให้ความร้อนไคโตซานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไคโตซานทั้งก้อนและหลังการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ มาวิเคราะห์หาปริมาณรูพรุน ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง BET (Brunauer-Emmett Teller; BEL JAPAN, INC; Model Belsorp-mini)

2.3 ผลของปริมาณไคโตซาน

ผลของปริมาณไคโตซานทำโดยชั่งไคโตซานน้ำหนัก 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่บรรจุน้ำเสียโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปรับความเป็นกรด-เบส จาก pH 1.7 ให้เป็น pH 2.7 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (TUV Product Service; Model GFL 1092) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที โดยเก็บน้ำเสียตัวอย่างโครเมียม (VI) ที่ผ่านการบำบัดทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม (VI) ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Varian Spectra-A 20) ที่ความยาวคลื่น 520.8 นาโนเมตร นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ตามสมการที่ 1

$$\% \text{ Adsorption} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_0 หมายถึง ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ C_t หมายถึง ความเข้มข้นของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.4 ผลความเป็นกรด-เบส ของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

ชั่งไคโตซานปริมาณ 1.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมน้ำโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ที่ความเป็นกรด-เบส เริ่มต้น (pH 1.7) และปรับค่าความเป็นกรด-เบส ให้เท่ากับ pH 2.7 และ 3.1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมน้ำลงในขวดรูปชมพู่ในปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นดำเนินการทดลองตามข้อ 2.3 คำนวณความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ตามสมการที่ 2

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{W} \quad (2)$$

เมื่อ q_t หมายถึง ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) V หมายถึง ปริมาตรของน้ำเสียโรงงานชุบโลหะซึ่งมีโครเมียม (VI) เป็นองค์ประกอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร) และ W หมายถึง ปริมาณของไคโตซาน (กรัม)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

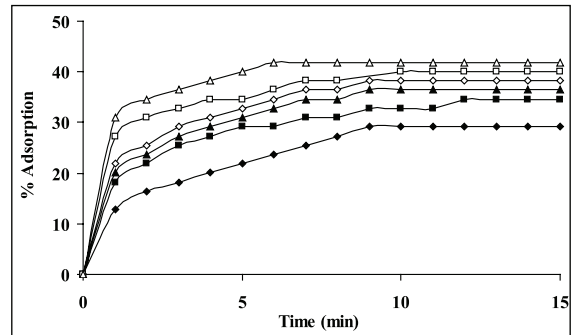
3.1 ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของไคโตซาน

เดชา ฉัตรศิริเวช [13] จำแนกรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ออกเป็น 3 ขนาดดังนี้ โพรงเล็ก (Micropore) มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร โพรงกลาง (Mesopore) มีขนาดอยู่ระหว่าง 2 - 50 นาโนเมตร และ

โพรงใหญ่ (Macropore) มีขนาดมากกว่า 50 นาโนเมตร จากการวิเคราะห์ไอโดซานก่อนการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยเครื่อง BET พบว่าปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวมีค่าเท่ากับ 4.71×10^{-4} ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม 1.86 นาโนเมตร และ 1.01 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ รูพรุนของไอโดซาน จัดอยู่ในขนาดโพรงเล็ก ในขณะที่ภายหลังการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ พบว่ามีค่าเท่ากับ 4.00×10^{-4} ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม 1.76 นาโนเมตร และ 0.99 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยไอโดซานภายหลังการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะมีปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวลดลง เนื่องจากการเกาะติดผิวของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะบนตัวดูดซับไอโดซาน

3.2 ผลของปริมาณไอโดซาน

ผลการทดลองนำไอโดซานปริมาณ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 กรัม ดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าปริมาณไอโดซาน 1.0 กรัม สมดุลการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ใช้เวลา 6 นาที มีร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเท่ากับ 42 เมื่อลดปริมาณไอโดซานเป็น 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 และ 0.5 กรัม มีร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะลดลงเป็น 40, 38, 36, 35 และ 30 ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณไอโดซานที่มากขึ้น มีผลทำให้ร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไอโดซานจะทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมีมากขึ้น ร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะจึงเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ Baral และคณะ [14] ที่ใช้ผงบ็อกไซต์ (Bauxite) ดูดซับโครเมียม (VI) ปริมาณไอโดซาน 1.0 กรัม มีร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ไอโดซานปริมาณ 1.0 กรัม ศึกษาผลความเป็นกรด-เบส



รูปที่ 1 ร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ: ปริมาณไอโดซาน ◆ 0.5, ■ 0.6, ▲ 0.7, ◇ 0.8, □ 0.9 และ △ 1.0 กรัม

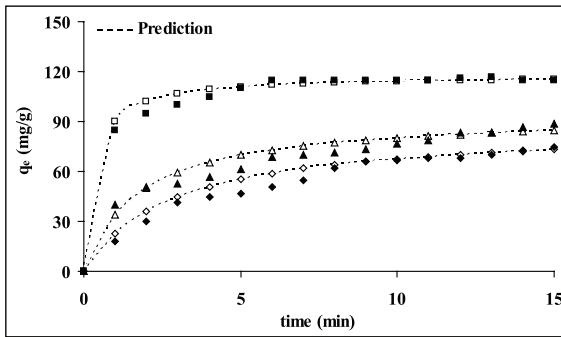
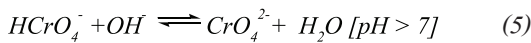
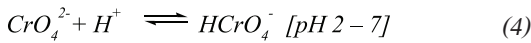
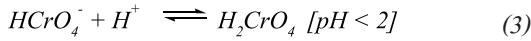
3.3 ผลความเป็นกรด-เบส ของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 1.7, 2.7 และ 3.1 แสดงในรูปที่ 2 พบว่าที่สมดุลการดูดซับไอโดซานมีความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเท่ากับ 75.0, 115.0 และ 89.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเกิดขึ้นได้ดีที่ pH 2.7 เนื่องจากโครเมียม (VI) จะอยู่ในรูปไฮโดรเจนโครเมต (HCrO_4^-) ในขณะที่ไอโดซานจะมีประจุที่ผิวเป็นบวกที่ pH_{PZC} 7.6 [5] เป็นผลทำให้ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเกิดได้ดี

ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเป็นกรด-เบส จาก pH 2.7 เป็น pH 3.1 เนื่องจากการเพิ่ม pH มีผลทำให้ประจุบวกที่ผิวของไอโดซานมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นการเพิ่ม pH ของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ จึงมีผลทำให้ไอโดซานมีความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะลดต่ำลง

ที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 1.7 ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของไอโดซานลดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับ pH 2.7 เนื่อง-

จากการเพิ่มความเป็นกรด สมดุลของสมการที่ 3 จะเลื่อนไปทางขวา นั่นคือเกิดเป็นกรดโครมิกมากขึ้น ไคโตซานดูดซับกรดโครมิกได้น้อยกว่าไฮโดรเจนโครเมตไอออนเป็นผลให้ไคโตซานดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะลดต่ำลง โครเมียม (VI) ในสารละลายสามารถแสดงได้หลายประเภท ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบส ของสารละลาย ดังแสดงในสมการที่ 3 ถึง 5



รูปที่ 2 ความสามารถในการดูดซับและการทำนายตามสมการที่ 20 ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ: ที่ pH ♦ 1.7, ■ 2.7 และ ▲ 3.1

3.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล กับความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ณ ที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ เมื่อนำมาเขียนเป็นรูปภาพจะมีประโยชน์สำหรับวิเคราะห์การดูดซับ ไอโซเทอมที่นิยมใช้ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) แบบฟรุนดิช (Freundlich) แบบบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller) และแบบเทมเค็น (Temkin)

ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ แสดงดังสมการที่ 6

$$q_e = \frac{q_{m,L} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (6)$$

เมื่อ $q_{m,L}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับสูงสุดตามสมการแลงเมียร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ K_L หมายถึง ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

สมการที่ 6 จัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงเพื่อหาค่า $q_{m,L}$ และ K_L แสดงได้ดังสมการที่ 7

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{m,L} K_L} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{m,L}} \quad (7)$$

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช แสดงได้ดังสมการที่ 8

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (8)$$

เมื่อ K_F หมายถึง ค่าคงที่ของฟรุนดิช แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)(ลิตรต่อมิลลิกรัม)^{1/n} และ n หมายถึง ค่าแฟกเตอร์ความแตกต่างพื้นผิวตัวดูดซับ (Heterogeneity factor) (ไม่มีหน่วย)

สมการที่ 8 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงเพื่อหาค่า K_F และ $1/n$ แสดงได้ดังสมการที่ 9

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (9)$$

ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที แสดงได้ดังสมการที่ 10

$$q_e = \frac{q_{m,B} K_B C_e}{(C_0 - C_e) \times \left(1 + \left((K_B - 1) \times \frac{C_e}{C_0} \right) \right)} \quad (10)$$

เมื่อ $q_{m, B}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับสูงสุดตามสมการบีอีที (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ K_B หมายถึง ค่าคงที่การดูดซับแบบบีอีที (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

สมการที่ 10 จัดให้อยู่ในรูปเส้นตรงเพื่อหาค่า $q_{m, B}$ และ K_B แสดงได้ดังสมการที่ 11

$$\frac{C_e}{q_e (C_0 - C_e)} = \frac{1}{q_{m, B} K_B} + \frac{(K_B - 1)}{q_{m, B} K_B} \left(\frac{C_e}{C_0} \right) \quad (11)$$

ไอโซเทอมการดูดซับแบบเทมเค็น แสดงได้ดังสมการที่ 12

$$q_e = B_1 \ln (K_T C_e) \quad (12)$$

เมื่อ B_1 หมายถึง ความร้อนของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) [ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{RT}{b}$ โดยที่ R หมายถึง ค่าคงที่ของก๊าซ = 8.314 (จูลต่อโมล-เคลวิน) T หมายถึง อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน) b หมายถึง ค่าคงที่ (จูล-กรัม-เคลวินต่อมิลลิกรัม-โมล)] และ K_T หมายถึง ค่าคงที่ของเทมเค็น (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

สมการที่ 12 จัดให้อยู่ในรูปเส้นตรงเพื่อหาค่า B_1 และ K_T แสดงได้ดังสมการที่ 13

$$q_e = B_1 \ln K_T + B_1 \ln C_e \quad (13)$$

เมื่อนำข้อมูลสมการที่ 7, 9, 11 และ 13 มาเขียนกราฟเส้นตรงตามไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ แบบฟรุนดิช แบบบีอีทีและแบบเทมเค็น ดังแสดงในรูปที่ 3 (a), (b), (c) และ (d) ตามลำดับ พบว่าโคโคซานดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9552, 0.9598, 0.9779 และ 0.9615 ตามลำดับ ค่า $q_{m, L}$, K_L , $1/n$, K_F , $q_{m, B}$, K_B , B_1 และ K_T ของไอโซเทอมทั้ง 4 แบบ แสดงในตารางที่ 1 ความถูกต้องของไอโซเทอม พิจารณาจากค่า

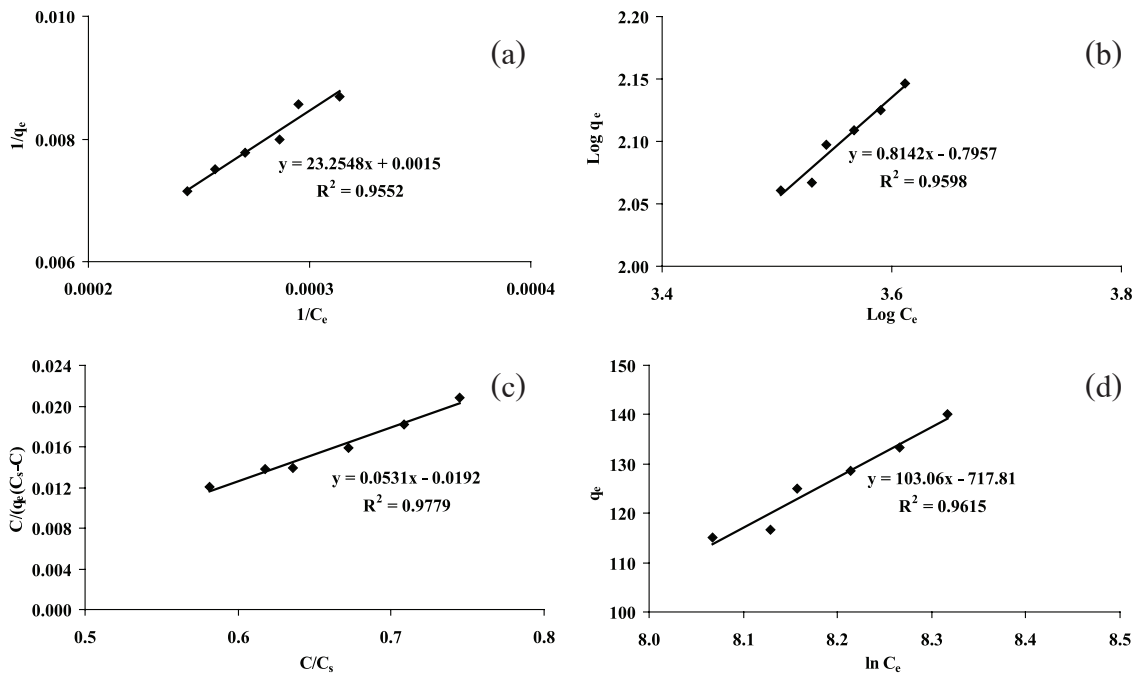
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ และค่า Chi-square (χ^2) ค่า Chi-square เขียนได้ดังสมการที่ 14

$$\chi^2 = \sum \frac{(q_{e, \exp} - q_{e, \text{cal}})^2}{q_{e, \text{cal}}} \quad (14)$$

เมื่อ $q_{e, \exp}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่สถานะสมดุลที่ได้จากผลการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ $q_{e, \text{cal}}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่สถานะสมดุลที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

ไอโซเทอมของการดูดซับเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่าสอดคล้องกับแบบบีอีทีมากกว่าแบบเทมเค็น ฟรุนดิชและแลงเมียร์ ตามลำดับ Kenned Oubagaranadin และคณะ [15] อธิบายถึงการพิจารณาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียงอย่างเดียว ในการอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับอาจมีความผิดพลาดเนื่องจาก สมการเส้นตรงมีการจำแนกได้ยาก จึงควรใช้สมการไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear) ร่วมด้วยในการพิจารณาไอโซเทอมของการดูดซับ

เมื่อพิจารณาจากค่า Chi-square พบว่าการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของโคโคซานมีไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องกับแบบฟรุนดิชมากกว่าแบบแลงเมียร์ แบบเทมเค็น และแบบบีอีที ตามลำดับ นอกจากนั้น ผลการคำนวณความสามารถในการดูดซับที่ได้จากแบบฟรุนดิชมีค่าเท่ากับ 114.0 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 115.0 มิลลิกรัมต่อกรัม มากกว่าแบบแลงเมียร์ แบบเทมเค็น และแบบบีอีที ซึ่งมีค่าเท่ากับ 113.8, 113.7 และ 119.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังนั้นจึงลงความเห็นว่า การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะมีไอโซเทอมสอดคล้องกับแบบฟรุนดิช อธิบายได้ว่าการดูดซับเกิดบนพื้นผิวตัวดูดซับที่มีหลากหลายหมู่ฟังก์ชัน



รูปที่ 3 ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของไคโดซาน: (a) แบบแลงเมียร์ (b) แบบฟรุนดิช (c) แบบบีอีที และ (d) แบบเทมกิน

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้สมการแลงเมียร์ ฟรุนดิช บีอีทีและเทมกิน

	Langmuir		Freundlich		BET		Temkin	
	$q_{m,L}$	K_L	$1/n$	K_F	$q_{m,B}$	K_B	B_1	K_T
	666.67	0.000065	0.8142	0.1601	29.50	-1.77	103.06	0.000944
R^2	0.9552		0.9598		0.9779		0.9615	
$q_{e,exp}$	115.0		115.0		115.0		115.0	
$q_{e,cal}$	113.8		114.0		119.0		113.7	
χ^2	0.013		0.008		0.135		0.016	

3.5 จดณพลศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

จดณพลศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโดซาน ศึกษาจากสมการ Pseudo-first order และ Pseudo-second order Pseudo-first order แสดงดังสมการที่ 15

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (15)$$

เมื่อ k_1 หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที) และ t หมายถึง เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

อินทิเกรตสมการที่ 15 ที่สภาวะ $t = 0$ ถึง t ($q_t = 0$ ถึง q_t) สมการเส้นตรงของ Pseudo-first order แสดงดังสมการที่ 16

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log } q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (16)$$

Pseudo-second order แสดงดังสมการที่ 17

$$= k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (17)$$

เมื่อ k_2 หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

อินทิเกรตสมการที่ 17 ที่เวลา $t = 0$ ถึง t และ $q_t = 0$ ถึง q_t สมการเส้นตรง Pseudo-second order แสดงดังสมการที่ 18

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (18)$$

ความถูกต้องของจลนพลศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของไคโตซาน พิจารณาจาก ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ความสามารถในการดูดซับที่เปรียบเทียบจากผลการทดลองและผลจากการคำนวณ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, S.D.) เขียนได้ดังสมการที่ 19

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum \left[\frac{(q_{t,\text{exp}} - q_{t,\text{cal}})^2}{q_{t,\text{exp}}} \right]}{n - 1}} \quad (19)$$

เมื่อ S.D. หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) $q_{t,\text{exp}}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ เป็นผลจากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม) $q_{t,\text{cal}}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ ที่เป็นผลจากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ n หมายถึง จำนวนจุดของข้อมูล

นำข้อมูลการศึกษาความเป็นกรด-เบส การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ มาเขียนกราฟเส้นตรงตามสมการ Pseudo-first order แสดงในรูปที่ 4 (a) พบว่าที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 1.7, 2.7 และ 3.1 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9397, 0.9244 และ 0.9113 ตามลำดับ ค่าคงที่ k_1 และค่า $q_{e,\text{cal}}$ แสดงในตารางที่ 2 ในขณะที่กราฟเส้นตรงตามสมการ Pseudo-second order แสดงในรูปที่ 4 (b) พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9558, 0.9991 และ 0.9768 ตามลำดับ ค่าคงที่ k_2 และ $q_{e,\text{cal}}$ แสดงในตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการ Pseudo-second order มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าสมการ Pseudo-first order ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสมการ Pseudo-second order มีค่าน้อยกว่าสมการ Pseudo-first order นอกจากนั้นความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ คำนวณจากสมการ Pseudo-second order มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าคำนวณจากสมการ Pseudo-first order ดังนั้นจึงลงความเห็นว่า การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยไคโตซาน เกิดจากแรงทางเคมี (Chemisorption) ที่มีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างหมู่อะมิโนของไคโตซาน และไฮโดรเจนโครเมต [16] เนื่องด้วยการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของไคโตซานสอดคล้องกับ Pseudo-second order ดังนั้นการทำนายความสามารถในการดูดซับ โดยใช้ค่าคงที่อัตราเร็วของ Pseudo-second order เขียนได้ดังสมการที่ 20

$$q_t = \frac{t k_2 q_e^2}{1 + t k_2 q_e} \quad (20)$$

ผลการทำนายความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ แสดงในรูปที่ 2 พบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่ได้จากการทำนายมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง

ครึ่งเวลาของการดูดซับ (Half-adsorption time) หมายถึง เวลาที่ต้องใช้เพื่อดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะให้ได้ครึ่งหนึ่งจากปริมาณเริ่มต้นคำนวณได้จากสมการที่ 21

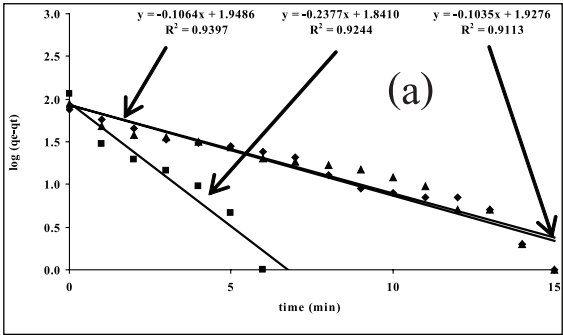
$$t_{1/2} = \frac{1}{k_2 q_e}$$

(21)

เมื่อ $t_{1/2}$ หมายถึง ครึ่งเวลาของการดูดซับ (นาที)
อัตราเร็วการดูดซับเริ่มต้น (h) เมื่อ q_t/t เข้าใกล้ศูนย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 22

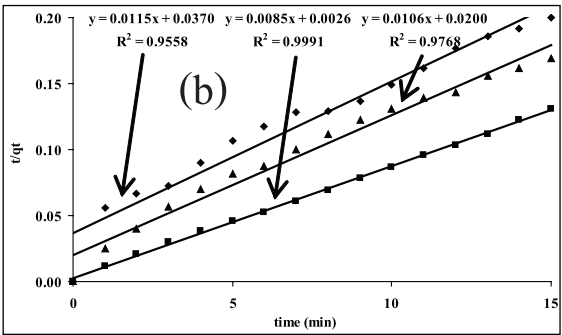
$$h = k_2 q_e^2$$

(22)



เมื่อ h หมายถึง อัตราเร็วการดูดซับเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที)

ที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 2.7 ครึ่งเวลาของการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะใช้เวลา 29.1 นาที เมื่อความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 1.7 และ 3.1 ครึ่งเวลาของการดูดซับมีค่าเท่ากับ 27.9 และ 13.6 นาที ตามลำดับ ในขณะที่อัตราเร็วการดูดซับเริ่มต้นที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 1.7, 2.7 และ 3.1 มีค่าเท่ากับ 3.1, 4.0 และ 6.9 มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 4 จลนพลศาสตร์ความเป็นกรด-เบส ของการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของ (a) Pseudo-first-order และ (b) Pseudo-second-order ที่ pH: ♦ 1.7, ■ 2.7 และ ▲ 3.1

ตารางที่ 2 ค่าคงที่อัตราเร็ว Pseudo-first order, Pseudo-second order และ Intraparticle diffusion ของการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

pH	$t_{1/2}$	h	$q_{e,exp}$	Pseudo-first order				Pseudo-second order				Intraparticle diffusion	
				$q_{e,cal}$	k_1	R^2	SD	$q_{e,cal}$	k_2	R^2	SD	$k_{i,1}$	$k_{i,2}$
1.7	27.9	3.1	75.0	88.8	0.245	0.9397	0.0461	87.0	0.0004	0.9558	0.0399	21.90	9.97
2.7	29.1	4.0	115.0	69.3	0.547	0.9244	0.0993	117.6	0.0003	0.9991	0.0058	20.05	1.52
3.1	13.6	6.9	89.5	84.6	0.238	0.9113	0.0136	94.3	0.0008	0.9768	0.0135	16.38	-

3.6 กลไกการดูดซับ

Hu และคณะ [17] อธิบายกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นจากตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นรูพรุน การดูดซับเกิดขึ้นหลายขั้นตอนต่อเนื่องกันดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 การถ่ายโอนมวลของตัวดูดซับไปยังบริเวณชั้นฟิล์มภายนอกตัวดูดซับ ขั้นตอนที่ 2 การดูดซับที่ผิวภายนอกตัวดูดซับ และขั้นตอนที่ 3 การแพร่ของตัวดูดซับไปยังรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งในขั้นตอนที่ 3 นี้ การดูดซับอาจเป็นการแพร่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (Pore diffusion) หรือการแพร่ที่ผิวรูพรุนของตัวดูดซับ (Surface diffusion)

สมการที่ใช้ศึกษากลไกการดูดซับ การแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion) แสดงดังสมการที่ 23

$$q_t = k_{i,d} t^{0.5} \quad (23)$$

$k_{i,d}$ หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่โครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเข้าไปภายในรูพรุนของโคโคซาน (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที่^{0.5})

เมื่อนำข้อมูลการศึกษาความเป็นกรด-เบส ของการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ศึกษากลไกการดูดซับดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 1.7 และ 2.7 กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ในขณะที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 3.1 มีกลไกการดูดซับเกิดขึ้นเพียงขั้นตอนเดียว โดยขั้นตอนแรกแสดงถึงการถ่ายโอนมวลที่บริเวณผิวภายนอกตัวดูดซับหรือการแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับ (External mass transfer or film diffusion) ในขณะที่ขั้นตอนที่สองแสดงถึงการแพร่ภายในอนุภาค มีค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ทั้ง 2 ขั้นตอนเท่ากับ $k_{i,1}$ และ $k_{i,2}$ ดังแสดงในตารางที่ 2

Khambhaty และคณะ [18] อธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้นมากกว่า 1 ขั้นตอนว่า การแพร่ภายในอนุภาคไม่ได้เป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ (Rate limiting steps) ตลอดช่วงเวลาของการดูดซับ

ผลการทดลองความเป็นกรด-เบส ของการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ นำมาวิเคราะห์

อีกครั้ง เพื่อหาขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับเกิดขึ้นจากการแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับหรือการแพร่ภายในอนุภาค ดังแสดงในสมการที่ 24

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2} e^{-B_b t} \quad (24)$$

เมื่อ B_b หมายถึง ค่าคงที่ และ F หมายถึง สัดส่วนการเข้าถึงสมดุลที่เวลาใด ๆ ซึ่งค่า F หาได้จากสมการที่ 25

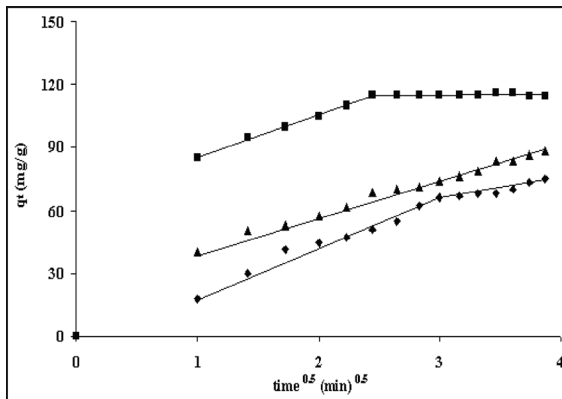
$$F = \frac{q_t}{q_e} \quad (25)$$

แทนค่าสมการที่ 25 ลงในสมการที่ 24 จะได้สมการที่ 26

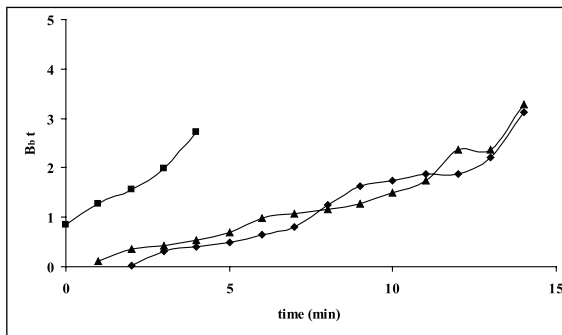
$$B_b t = -0.4977 - \ln \left(1 - \frac{q_t}{q_e} \right) \quad (26)$$

นำค่า $B_b t$ มาเขียนความสัมพันธ์กับเวลา (t) ลักษณะของเส้นตรงสามารถจำแนกขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ ระหว่างการแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับและการแพร่ภายในอนุภาค ดังนี้ หากเป็นเส้นตรงและผ่านจุดกำเนิด อธิบายว่า การแพร่ภายในอนุภาคเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ หากการเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวเกิดในลักษณะตรงกันข้าม อธิบายว่าการแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ [19]

การจำแนกขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับของการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ โดยโคโคซานดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าเส้นที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $B_b t$ กับเวลา ไม่มีลักษณะเป็นเส้นตรงและไม่ผ่านจุดกำเนิด ดังนั้นจึงอธิบายได้ว่า การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยโคโคซาน การแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ



รูปที่ 5 กลไกการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของไคโตซาน: ที่ pH $\blacklozenge$ 1.7, $\blacksquare$ 2.7 และ $\blacktriangle$ 3.1



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง B_t กับเวลา: ที่ pH $\blacklozenge$ 1.7, $\blacksquare$ 2.7 และ $\blacktriangle$ 3.1

4. สรุป

ไคโตซานก่อนการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะมีปริมาณรูพรุน ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวเท่ากับ 4.71×10^{-4} ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม 1.86 นาโนเมตร และ 1.01 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ภายหลังจากการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะไคโตซานมีปริมาณรูพรุน ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวลดลง เนื่องจากการเกาะติดผิวของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะบนไคโตซาน การเพิ่มปริมาณไคโตซานจาก 0.5 – 1.0 กรัม มีผลทำให้ร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวในการดูดซับมีมากขึ้น การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำ

เสียโรงงานชุบโลหะเกิดขึ้นได้ดีที่ pH 2.7 เนื่องจากโครเมียม (VI) จะอยู่ในรูปไฮโดรเจนโครเมต ในขณะที่ไคโตซานจะมีประจุที่ผิวเป็นบวก ไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องกับแบบฟรุนดลิช จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับ Pseudo-second order กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอนและการแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มจพ. ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือสำหรับทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mohan, D. and Pittman Jr, C.U., 2006. "Activated Carbon and Low Cost Adsorptions for Remediation of Tri- and Hexavalent Chromium from Water," **Journal of Hazardous Materials**. 137, 2 (September) : 762-811.
- [2] Cieślak-Golonka, M., 1995. "Toxic and Mutagenic Effects of Chromium (VI)," **Polyhedron**. 15, 21, (August) : 3667-3689.
- [3] Gary, V.K., Gupta, R., Kumar, R. and Gupta, R.K., 2004. "Adsorption of Chromium from Aqueous Solution on Treated Sawdust," **Bioresource Technology**. 92, 1 (March) : 79-81.
- [4] Álvarez-Ayuso, E., García-Sánchez, A. and Querol, X., 2007. "Adsorption of Cr(VI) from Synthesis Solutions and Electroplating Wastewater on Amorphous Aluminium Oxide," **Journal of Hazardous Materials**. 142, 1-2 (April) : 191-198.
- [5] โกวิทช์ ปิยะมั่งคลา, จารุวรรณ ตาพวัฒน์, ปิยะวัฒน์ โพธิ์มั่งคลกุล และ ฉัฐรัส คงสมภักดิ์, 2551. "จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเรซิน," **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**. 18, 1 (มกราคม - เมษายน) : 68-79.

- [6] ทรเทศ ศรีสถิตย์ และ รัชชชัย สิงห์ศิริ, 2549. “การใช้ ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) และกะถินเทพา (*Acacia mangium* Willd.) เพื่อกำจัดโครเมียมและนิกเกิล จาก น้ำเสียสังเคราะห์,” **วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ไทย**. 20, 3 : 25-37.
- [7] Dakiky, M., Khamis, M., Manassra, A. and Mer'eb, M., 2002. “Selective Adsorption of Chromium (VI) in Industrial Wastewater Using Low-cost Abundantly Available Adsorbents,” **Advances in Environmental Research**, 6, 4 (October) : 533-540.
- [8] Debbaudt, A.L., Ferreira, M.L. and Gschaidner, M.E., 2004. “Theoretical and Experimental Study of M²⁺ Adsorption on Biopolymers. III. Comparative Kinetic Pattern of Pb, Hg and Cd,” **Carbohydrate Polymers**. 56, 3 (July) : 321-332.
- [9] Qian, S., Huang, G., Jiang, J., He, F. and Wang, Y., 2000. “Studies of Adsorption Behavior of Crosslinked Chitosan for Cr(VI), Se(VI),” **Journal of Applied Polymer Science**. 77, 14 (September) : 3216-3219.
- [10] Li, N. and Bai, R., 2005. “Copper Adsorption on Chitosan-cellulose Hydrogel Beads: Behaviors and Mechanisms,” **Separation Purification Technology**. 42, 3 (April) : 237-247.
- [11] Lasko, C.L. and Hurst, M.P., 1999. “An Investigation into the Use of Chitosan for the Removal of Soluble Silver from Industrial Wastewater,” **Environmental Science & Technology**. 33, 15 (October) : 3622-3626.
- [12] Donia, A. M., Atia, A. A. and Elwakeel, K. Z., 2007. “Recovery of Gold (III) and Silver (I) on a Chemically Modified Chitosan with Magnetic Properties,” **Hydrometallurgy**. 87, 3-4 (July) : 197-206.
- [13] เดชา นัตรศิริเวช, 2552. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพมหานคร:สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, : 38-44.
- [14] Baral, S. S., Das, S. N., Rath, P. and Chaudhury, G. R., 2007. “Chromium (VI) Removal by Calcined Bauxite,” **Biochemical Engineering Journal**. 34, 1 (April) : 69-75.
- [15] Kenned Oubagaranadi, J.U., Sathyamurihy, N. and Murthy, Z.V.P., 2007. “Evaluation of Fuller’s Earth for the Adsorption of Mercury from Aqueous Solution: A Comparative Study with Activated Carbon,” **Journal of Hazardous Materials**. 142, 1-2 (April) : 165-174.
- [16] Wan Ngah, W. S., Kamari, A. and Koay, Y. J., 2004. “Equilibrium and Kinetics Studies of Adsorption of Copper (II) on Chitosan and Chitosan/PVA Beads,” **International Journal of Biological Macromolecules**. 34, 3 (June) : 155-161.
- [17] Hu, X.-J., Wang, J.-S., Liu, Y.-G., Li, X., Zeng, G.-M., Bao, Z.-L., Zeng, X.-X. Chen, A.-W. and Long, F., 2011. “Adsorption of Chromium (VI) by Ethylenediamine-modified Cross-linked Magnetic Chitosan Resin: Isotherm, Kinetics, and Thermodynamics,” **Journal of Hazardous Materials**, 185, 1 (January) : 306-314.
- [18] Khambhaty, Y., Mody, K., Basha, S. and Jha, B., 2009. “Kinetics, Equilibrium and Thermodynamic Studies on Bisorption of Hexavalent Chromium by Dead Fungal Biomass of Marine *Aspergillus niger*,” **Chemical Engineering Journal**. 145, 3 (January) : 489-495.
- [19] Mohan, D. and Singh, K. P., 2002. “Single- and Multi- Component Adsorption of Cadmium and Zinc Using Activated Carbon Derived from Bagasse-an Agricultural Waste,” **Water Research**, 36, 9 (May) : 2304-2318.

การประยุกต์ใช้เทคนิคศูนย์ถ่วงจากน้ำหนักความเสี่ยงในการวิเคราะห์สถานที่จอดพาหนะ สำหรับปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉิน

Application of Center of Risk Gravity in the Location Analysis for a Sitting of Emergency Medical Service Vehicles

นัทพงศ์ นันทสำเริง¹

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสถานที่จอดยานพาหนะสำหรับปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นโดยใช้เวลาน้อยที่สุดไปยังจุดเกิดเหตุเพื่อทำการปฐมพยาบาลผู้ได้รับบาดเจ็บจากอุบัติเหตุหรือผู้ป่วยฉุกเฉินในพื้นที่ให้บริการของหน่วยปฏิบัติการนั้นๆ โดยงานวิจัยเริ่มจากการเก็บข้อมูลการให้บริการของหน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินในพื้นที่ตัวอย่างจำนวน 172 ราย แบ่งเป็นอุบัติเหตุ 96 ราย และผู้ป่วยฉุกเฉิน 76 ราย ระหว่างเดือนตุลาคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2554 และกำหนดพิกัดของจุดเกิดเหตุดังกล่าวลงบนแผนที่กูเกิ้ล จากนั้นจึงประเมินความเสี่ยงโดยประยุกต์ใช้รูปแบบของการวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ ซึ่งระดับความเสี่ยงจะคำนวณจากค่าความรุนแรง โอกาสในการเกิด และการตรวจจับและการป้องกันที่มีอยู่ เมื่อได้ค่าความเสี่ยงแล้วจึงนำไปคำนวณพิกัดของจุดศูนย์ถ่วงสำหรับสถานที่จอดยานพาหนะสำหรับปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินโดยการถ่วงน้ำหนักด้วยระดับความเสี่ยงของแต่ละกรณี ผลการศึกษาพบว่าสถานที่จอดยานพาหนะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดจอดปัจจุบันโดยห่างจากจุดเดิม 1.1 กิโลเมตร และสถานที่จอดยานพาหนะแห่งใหม่สามารถลดระยะทางในการเดินทางไปถึงผู้รับบริการได้ 20.26% เมื่อคิดระยะทางแบบระยะขจัด

คำสำคัญ : การเลือกทำเลที่ตั้ง, วิถีจุดศูนย์ถ่วง, ยานพาหนะสำหรับปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉิน, รถกู้ชีพ, ปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉิน

Abstract

The purpose of this research article was to find an optimal location for Emergency Medical Service (EMS) vehicle. The optimal location is the location where EMS vehicle can reach to patients or accident victims as fast as possible to save the patient's life. This research began with collection of EMS data in area of study 172 cases including 96 accident cases and 76 emergency cases during October 2010 to April 2011. Then, we defined geometric coordinate of each case by using Google Map. After that, risk assessment was applied for weighting of each node. In this research, we applied failure modes and effects analysis technique for risk assessment which risk score obtained from severity, frequency and detection. Risk score of each case were calculated coordination optimal location for EMS vehicle by using center of gravity technique. Results of the study revealed that optimal location of EMS vehicle was different from traditional location 1.1 kilometers. Moreover, an improved location reduced the euclidean distance 20.26% from sitting location to patients.

¹ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

Keywords : location analysis, center of gravity technique, emergency medical service vehicles, emergency medical operations.

1. บทนำ

การเจ็บป่วยฉุกเฉินและอุบัติเหตุเป็นสาเหตุการตายอันดับหนึ่งของโลก จากข้อมูลในรายงาน World Health Statistic 2011 ขององค์การอนามัยโลกระบุว่า ร้อยละ 29.4 ของการตายทั้งหมดในโลกมีสาเหตุมาจากโรคหัวใจและหลอดเลือด และอีกร้อยละ 2.1 มาจากอุบัติเหตุทางท้องถนน [1] ซึ่งสร้างภาระค่าใช้จ่ายทางสุขภาพอย่างมาก มีมูลค่าความเสียหายปีละกว่า 3,600 ล้านบาท จากข้อมูลบริการการแพทย์ฉุกเฉินในประเทศไทยพบว่าการบาดเจ็บจากอุบัติเหตุมีสัดส่วนน้อยกว่าการเจ็บป่วยฉุกเฉิน ร้อยละ 18.2 ต่อ 65.9 [2]

การให้บริการผู้ป่วยฉุกเฉินหรือผู้บาดเจ็บก่อนถึงโรงพยาบาลเป็นขั้นตอนหนึ่งในการรักษาพยาบาลที่มีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งผู้ได้รับบาดเจ็บจากอุบัติเหตุรุนแรงหรือผู้ป่วยฉุกเฉินจำเป็นต้องได้รับการนำส่งไปยังโรงพยาบาล โดยหากมีการดูแลรักษาเบื้องต้นอย่างถูกต้องและมีกระบวนการนำส่งที่มีประสิทธิภาพจะช่วยให้อัตราการรอดชีวิตเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [3]

อย่างไรก็ตามระบบบริการการแพทย์ฉุกเฉินและระบบส่งต่อผู้ป่วยของประเทศไทยยังประสบปัญหาทั้งในด้านการขาดแคลนกำลังคน เครื่องมือ อุปกรณ์การแพทย์ที่จำเป็นต่อการให้บริการ การปฏิบัติการทางการแพทย์ รวมถึงการบริหารจัดการยานพาหนะสำหรับปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินหรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า “รถกู้ชีพ” ซึ่งยังขาดประสิทธิภาพ [4]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดจอดยานพาหนะสำหรับปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อเหตุฉุกเฉินที่เกิดขึ้นโดยใช้เวลาน้อยที่สุดในการไปยังจุดเกิดเหตุเพื่อทำการปฐมพยาบาลและรักษาชีวิตของผู้ได้รับบาดเจ็บจากอุบัติเหตุหรือผู้ป่วยฉุกเฉินในพื้นที่ให้บริการของหน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินนั้นๆ ซึ่งในที่นี้จะใช้ข้อมูลในพื้นที่รับผิดชอบของหน่วย

ปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย เทศบาลตำบลปทุม อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานีเป็นกรณีศึกษาและประยุกต์ใช้เทคนิคจุดศูนย์ถ่วงในการหาจุดจอดที่เหมาะสมที่สุดเพียงหนึ่งจุด จากนั้นจึงหารือร่วมกับบุคลากรของหน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉิน เทศบาลตำบลปทุมเพื่อปรับปรุงคำตอบที่ได้และทดลองนำไปปฏิบัติในสถานที่จริง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการทบทวนวรรณกรรม

ระบบบริการการแพทย์ฉุกเฉิน หมายถึงระบบการให้บริการที่ปฏิบัติการต่อบุคคลในกรณีที่ได้รับบาดเจ็บหรือเจ็บป่วยกะทันหันซึ่งเป็นอันตรายต่อการดำรงชีวิตหรือการทำงานของอวัยวะสำคัญ จำเป็นต้องได้รับการประเมิน จัดการ และบำบัดรักษาอย่างทันทั่วทั้งที่เพื่อป้องกันการรุนแรงขึ้นของการบาดเจ็บหรืออาการป่วยของโรคนั้นๆ [5]

ในอดีตการบริการทางการแพทย์ฉุกเฉินกระทำโดยองค์กรการกุศลต่างๆ จนกระทั่งได้มีการจัดตั้งศูนย์เรนทรขึ้นเพื่อรับผิดชอบงานบริการการแพทย์ฉุกเฉินโดยเฉพาะแต่ยังจำกัดอยู่เฉพาะโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุขต่อมาสำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติได้สนับสนุนให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นเข้ามามีบทบาทในการร่วมจัดบริการการแพทย์ฉุกเฉิน และมีการตั้งศูนย์สั่งการพร้อมกับการจัดอบรมเจ้าหน้าที่กู้ชีพเป็นระยะๆ จากนั้นจึงได้ถ่ายโอนภารกิจมาให้สถาบันการแพทย์ฉุกเฉินแห่งชาติดำเนินการต่อ โดยในปัจจุบันมีหน่วยกู้ชีพทั้งภาครัฐและเอกชนรวมกันกว่า 7,000 แห่งทั่วประเทศ ซึ่งประกอบด้วยหน่วยกู้ชีพขั้นสูง (Advance Life Support: ALS) หน่วยกู้ชีพขั้นพื้นฐาน (Basic Life Support: BLS) และหน่วยกู้ชีพชุมชน (First Responder: FR) [2]

วารณี โสไกร และพรณวดี ยศทวี [3] ได้ทำการวิจัยเชิงปฏิบัติการเปรียบเทียบผลการดำเนินงานของการ

นำส่งและส่งต่อผู้ป่วยอุบัติเหตุในจังหวัดแพร่ระหว่างรูปแบบใหม่และรูปแบบเดิม ซึ่งเงื่อนไขหนึ่งในรูปแบบใหม่ที่ได้นำมาศึกษานั้นมีการกำหนดให้หน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินต้องออกปฏิบัติงานได้หลังจากได้รับการแจ้งเหตุจากศูนย์สั่งการภายใน 3-5 นาที และต้องถึงจุดเกิดเหตุภายใน 10-15 นาทีในเขตรัศมี 10 กิโลเมตร หากไกลกว่านั้นคิด 1.5 นาทีต่อกิโลเมตรโดยไม่เกิน 30 นาที ซึ่งผลจากการกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวทำให้สามารถยกระดับคุณภาพในการบริการตามมาตรฐานเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 85

จะเห็นได้ว่าจุดจอตลอดที่เหมาะสมจะช่วยให้สามารถเข้าถึงผู้ป่วยได้รวดเร็วและนำไปสู่อัตราการรอดชีวิตได้อีก ทั้งยังเป็นการยกระดับคุณภาพของการบริการทางการแพทย์ฉุกเฉินอีกด้วย

อย่างไรก็ตามทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวกับจุดจอตลอดบริการทางการแพทย์ฉุกเฉินอาจแบ่งได้เป็นสองกลุ่มคือ (1) การหาจำนวนจุดจอตลอดของหน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินที่เหมาะสม และ (2) การหาสถานที่จอตลอดของหน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉิน

การหาจำนวนจุดจอตลอดที่เหมาะสมนิยมใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า ปัญหาของการครอบคลุมเซต (Set covering model) โดยแบบจำลองดังกล่าวสามารถอธิบายเกี่ยวกับจำนวนผู้ให้บริการที่น้อยที่สุดที่สามารถครอบคลุมความต้องการทั้งหมดได้โดยพิจารณา กลุ่มประชากรที่จะได้รับบริการเมื่อมีการตั้งจุดบริการที่มีระยะทางไกลที่สุดจากผู้รับบริการ ซึ่งปัญหาในลักษณะนี้อาจมีชื่อเรียกที่ต่างกัน เช่น ปัญหาการหาสถานที่ตั้งที่ครอบคลุมผู้รับบริการมากที่สุด (Maximal covering location problem: MCLP) [6] ปัญหาการหาสถานที่ตั้งที่พร้อมให้บริการมากที่สุด (Maximum availability location problem) [7] เป็นต้น

ฉัตรพันธ์ กังวานสุระ และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการหาจำนวนจุดจอตลอดของหน่วยบริการทางการแพทย์ฉุกเฉินที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา โดยใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ของปัญหาการหาสถานที่ตั้งจุดจอตลอดที่ครอบคลุมผู้รับบริการมากที่สุดและทำการแก้ปัญหาด้วยซอฟต์แวร์สำเร็จรูป LINGO® version 11 และ WinQSB® version 1.00 ซึ่งพบว่าจำนวนจุดจอตลอดที่เหมาะสมคือ 5 จุดจอตลอด แต่หากลดจำนวนลงเหลือ 3 จุดจอตลอดที่เป็นอยู่ในปัจจุบันแต่หาตำแหน่งจอตลอดใหม่ที่เหมาะสมจะพบว่ามีประชากรที่อาจไม่ได้รับบริการครอบคลุมถึงร้อยละ 6.15

สำหรับการหาสถานที่จอตลอดนั้นจะประยุกต์ใช้หลักการของปัญหาการหาสถานที่ตั้ง (Location allocation problem) ซึ่งโดยทั่วไปจะหมายถึงการวางตำแหน่งของสิ่งปลูกสร้างในพื้นที่ที่กำหนดไว้แห่งใดแห่งหนึ่ง ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาการหาสถานที่ตั้งเชิงปริมาณจะมีหลายวิธีการ เช่น วิธีจุดศูนย์ถ่วงแบบทางตรง (Exact center-of-gravity approach) วิธีแบบกริด (The grid method) และวิธีเซนทรอยด์ (The centroid method) เป็นต้น [9]

ธนกร จันทร์ทอง และ ระพีพันธ์ ปิตาโคโส [10] ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคศูนย์ถ่วงในการหาทำเลที่ตั้งโรงงานเอทานอลจากมันสำปะหลังและอ้อยในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง จากนั้นจึงวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องโดยใช้เทคนิคเดลฟายผสมผสานกับเกณฑ์ตามคู่มือประเมินความเหมาะสมของสถานที่ตั้งโรงงานเอทานอล ซึ่งผลการวิจัยสามารถระบุตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมของโรงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความน่าเชื่อถือ และมีความเป็นไปได้จริง

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การเก็บข้อมูลสถิติการให้บริการทางการแพทย์ฉุกเฉิน

ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เก็บจากบันทึกการให้บริการของหน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย เทศบาลตำบลปทุม อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี ระหว่างเดือนตุลาคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2554 โดยมีรายการให้บริการจำนวน 172 ราย แบ่งเป็นอุบัติเหตุ 96 ราย และป่วยฉุกเฉิน 76 ราย

3.2 การกำหนดพิกัดของจุดเกิดเหตุ

การกำหนดพิกัดดำเนินการผ่านเว็บไซต์กูเกิ้ลแผนที่ (Google map) โดยได้รับความร่วมมือจากเจ้าหน้าที่ของหน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินซึ่งมีความคุ้นเคยกับสภาพพื้นที่ ในการระบุจุดเกิดเหตุอย่างหายบแล้วจึงใช้อุปกรณ์ Garmin ® GPSmap รุ่น 60CSx ในการระบุพิกัด ณ จุดเกิดเหตุจริงอีกครั้งหนึ่ง

3.3 การประเมินความเสี่ยง

การประเมินความเสี่ยงในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์ห้การขัดข้องและผลกระทบ (Failure Modes and Effects Analysis: FMEA) ซึ่งเป็นการประเมิน

ความเสี่ยงจากความเสี่ยงรุนแรงของเหตุฉุกเฉิน (Severity) โอกาสในการเกิด (Occurrence) และการตรวจจับและการป้องกัน (Detection) โดยค่าความเสี่ยง (Risk Priority Number: RPN) จะเกิดจากการคูณกันของปัจจัยทั้งสามตัวข้างต้น ดังแสดงในสมการที่ 1

RPN = Severity x Occurrence x Detection (1)

โดยผู้วิจัยได้ออกแบบเกณฑ์ในการให้คะแนนความเสี่ยงรุนแรงของเหตุฉุกเฉิน โอกาสในการเกิด และการตรวจจับและป้องกันโดยประยุกต์จากหลักการประเมินความเสี่ยงในอุตสาหกรรมยานยนต์ [11] ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 เกณฑ์การให้คะแนนความเสี่ยงรุนแรง

ระดับความเสี่ยงรุนแรง	ความเสี่ยงรุนแรงของการบาดเจ็บ/อุบัติเหตุ (A)	ความเสี่ยงรุนแรงของการป่วยฉุกเฉิน (E)	คะแนน
สูงมาก	มีอาการหมดสติปลุกไม่ตื่น มีบาดแผลลึกขนาดเลือดออกมาก มีการช่วยหายใจช่วยฟื้นคืนชีพ นอนโรงพยาบาล	มีอาการหมดสติปลุกไม่ตื่น การช่วยหายใจช่วยฟื้นคืนชีพ นอนโรงพยาบาล	5
สูง	มีอาการหมดสติปลุกตื่น หายใจไม่สม่ำเสมอ กระตุกหัก มีการช่วยหายใจการตามกระตุก นอนโรงพยาบาล	มีอาการหมดสติปลุกตื่น หายใจไม่สม่ำเสมอ มีการช่วยหายใจ นอนโรงพยาบาล	4
ปานกลาง	มีบาดแผลลึกขนาด มากกว่า 2 ซม. หายใจช้า	หมดสติปลุกตื่น หายใจช้า เป็นลม	3
ต่ำ	ซึม หายใจปกติ มี-บาดแผลลึกขนาดน้อยกว่า 2 ซม.	รู้สึกตัวดี หายใจปกติ เหนื่อย อ่อนเพลีย	2
ต่ำมาก	รู้สึกตัวดี หายใจปกติ มีแผลถลอก	รู้สึกตัวดี หายใจปกติ	1

ตารางที่ 2 เกณฑ์ในการให้คะแนนโอกาสในการเกิด

ระดับโอกาส	โอกาสของการเกิดการบาดเจ็บ/อุบัติเหตุ (A)	โอกาสของการเกิดการป่วยฉุกเฉิน (E)	คะแนน
สูงมาก	มากกว่า10 ครั้งหรือร้อยละ 10	มากกว่า 8 ครั้งหรือร้อยละ10	5
สูง	8 ครั้ง หรือ ร้อยละ 8	6 ครั้ง หรือ ร้อยละ 8	4
ปานกลาง	6 ครั้ง หรือ ร้อยละ 6	4 ครั้ง หรือ ร้อยละ 6	3
ต่ำ	4 ครั้ง หรือ ร้อยละ 4	3 ครั้ง หรือ ร้อยละ 4	2
ต่ำมาก	น้อยกว่า 2 ครั้งหรือร้อยละ 2	น้อยกว่า 2 ครั้ง หรือร้อยละ 2	1

ตารางที่ 3 เกณฑ์การให้คะแนนการตรวจจับ

ระดับการตรวจจับ	การตรวจจับ/การป้องกันอุบัติเหตุ (A)	การตรวจจับ/การป้องกันการป่วยฉุกเฉิน (E)	คะแนน
ต่ำมาก	ไม่มีการตรวจจับ	ไม่มีการตรวจจับ	5
ต่ำ	มีป้ายเตือน	มีการตรวจสอบสภาพชุมชน หรือการเฝ้าระวังโรค อย่างน้อยปีละครั้ง	4
ปานกลาง	มีป้ายเตือน มีไฟส่องสว่าง	มีการตรวจสอบสภาพชุมชน การเฝ้าระวังโรค อย่างน้อย 6 เดือนต่อครั้ง	3
สูง	มีสัญญาณไฟจราจร และมีไฟส่องสว่าง	มีการตรวจสอบสภาพชุมชน หรือการเฝ้าระวังโรค อย่างน้อย 3 เดือนต่อครั้ง	2
สูงมาก	มีสัญญาณไฟจราจร มีป้ายเตือน และมีไฟส่องสว่าง	มีการตรวจสอบสภาพชุมชน หรือการเฝ้าระวังโรคอย่างน้อยเดือนละครั้ง	1

3.4 การคำนวณจุดศูนย์กลาง

การคำนวณจุดศูนย์กลางจะใช้การคำนวณตามสมการที่ 2 และ 3 ดังแสดงข้างล่างนี้ [10]

$$X_{c.g} = \frac{\sum (m_i X_i)}{\sum m_i} \tag{2}$$

$$Y_{c.g} = \frac{\sum (m_i Y_i)}{\sum m_i} \tag{3}$$

- โดย $X_{c.g}$ แทนพิกัดทางภูมิศาสตร์ X ของจุดศูนย์กลาง
 $Y_{c.g}$ แทนพิกัดทางภูมิศาสตร์ Y ของจุดศูนย์กลาง
 X_i แทนพิกัดทางภูมิศาสตร์ X ของจุด i
 Y_i แทนพิกัดทางภูมิศาสตร์ Y ของจุด i
 m_i แทนค่าน้ำหนักของจุดศูนย์กลางที่จุด i

ในงานวิจัยนี้ค่าน้ำหนักของจุดศูนย์กลางจะใช้ค่าระดับความเสี่ยงที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งแต่ละจุดเกิดเหตุจะมีน้ำหนักความเสี่ยงที่แตกต่างกัน

3.5 การประเมินผลจุดจอดยานพาหนะ

การประเมินผลของจุดจอดยานพาหนะที่คำนวณมาได้จะประเมินในสองลักษณะคือ (1) จำนวนจากระยะ

ขจัดรวมทั้งหมดของการเดินทางจากจุดจอดรถไปยังจุดเกิดเหตุ และ (2) จำนวนจากระยะทางจริงของการเดินทางจากจุดจอดรถไปยังที่เกิดเหตุ

การคำนวณระยะขจัดจะใช้หลักการหาระยะห่างระหว่างจุดสองจุดดังสมการที่ 4

$$d = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2} \tag{4}$$

- โดย d แทนระยะขจัดจากจุด i ไปยังจุด j
 X_i แทนพิกัด X ณ จุด i
 X_j แทนพิกัด X ณ จุด j
 Y_i แทนพิกัด Y ณ จุด i
 Y_j แทนพิกัด Y ณ จุด j

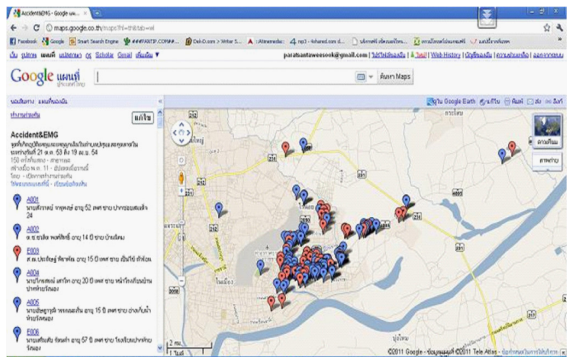
ส่วนระยะทางจริงของการเดินทางจากจุดจอดรถไปยังที่เกิดเหตุจะใช้ฟังก์ชันการหาระยะทางบนเว็บไซต์กูเกิ้ลแผนที่

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการกำหนดพิกัดบนแผนที่กูเกิ้ล

ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลการให้บริการทางการแพทย์ฉุกเฉินของหน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินเทศบาล

ตำบลปทุม ในระหว่างเดือนตุลาคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2554 โดยมีรายการให้บริการจำนวน 172 ราย แบ่งเป็นอุบัติเหตุ 96 ราย และป่วยฉุกเฉิน 76 ราย ซึ่งสามารถกำหนดพิกัดได้ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยหมุดสีน้ำเงินจะเป็นตัวแทนของการเกิดอุบัติเหตุ และหมุดสีแดงจะเป็นตัวแทนของผู้ป่วยฉุกเฉิน



รูปที่ 1 จุดเกิดเหตุในพื้นที่ให้บริการซึ่งได้ปักหมุดในแผนที่กูเกิ้ล

4.2 ผลการคำนวณค่าความเสี่ยงและค่าพิกัดถ่วงน้ำหนัก

ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณค่าคะแนนความเสี่ยงตามสมการที่ (1) จากนั้นจึงนำค่าคะแนนความเสี่ยงของแต่ละจุดคูณกับพิกัด X และพิกัด Y ของแต่ละจุด จากนั้นจึงนำมาสรุปเป็นตารางดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวอย่างค่าคะแนนความเสี่ยงและพิกัดความเสี่ยง

	ละติจูด (X_i)	ลองจิจูด (Y_i)	RPN (m)	$X_i m_i$	$Y_i m_i$
A 001	15.2438	104.8917	12	182.92	1258.70
A 002	15.2619	104.8905	5	76.31	524.45
E 003	15.2605	104.8932	8	122.08	839.14
A 004	15.2425	104.8904	18	274.36	1888.03
A 005	15.2444	104.8801	12	182.93	1258.56
E 006	15.2425	104.8903	8	121.94	839.12

4.3 ผลการคำนวณจุดจอตลอดใหม่โดยใช้วิธีจุดศูนย์กลาง

จุดจอตลอดยานพาหนะสำหรับปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินแห่งใหม่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3) ซึ่งพบว่าจุดใหม่จะอยู่ที่พิกัด $X_{c.g.} = 15.248182$ และพิกัด $Y_{c.g.} = 104.889082$ โดยจุดจอตลอดใหม่จะอยู่บริเวณถนนชลประทาน ใกล้ปากซอยเอกประสงค์ และอยู่ห่างจากจุดจอตลอดเดิมเป็นระยะทาง 1.6 กิโลเมตร

อย่างไรก็ตาม เมื่อได้หารือร่วมกับเจ้าหน้าที่ของหน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินเทศบาลตำบลปทุม แล้วพบว่าพื้นที่จอตลอดใหม่ที่คำนวณได้เป็นพื้นที่เอกชน ซึ่งไม่สามารถนำรถของหน่วยบริการทางการแพทย์ฉุกเฉินไปจอดได้ จึงได้มีการพิจารณาจุดจอตลอดที่เป็นไปได้ในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งจุดที่น่าจะเป็นไปได้คือบริเวณโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพประจำตำบลปทุมซึ่งอยู่ห่างจากจุดที่คำนวณได้ 500 เมตร และอยู่ห่างจากจุดจอตลอดเดิม 1.1 กิโลเมตร

4.4 ผลการคำนวณระยะขจัดของการเดินทางไปยังจุดเกิดเหตุ

ระยะขจัดของการเดินทางไปยังจุดเกิดเหตุจะคำนวณโดยใช้สมการที่ (4) โดยเมื่อคิดระยะทางจากจุดจอตลอดไปยังจุดเกิดเหตุแต่ละจุดเรียบร้อยแล้วจะนำมาหาค่าระยะขจัดสูงสุด ค่าระยะขจัดต่ำสุดและค่าระยะขจัดเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบระยะขจัดระหว่างสองจุดจอตลอด

	จุดจอตลอดเดิม	จุดจอตลอดใหม่
ระยะขจัดสูงสุด (กม.)	9.93	9.25
ระยะขจัดต่ำสุด (กม.)	0.02	0.00
ระยะขจัดเฉลี่ย (กม.)	1.41	1.12
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.38	1.26

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าจุดจอตลอดใหม่ที่กำหนดขึ้นสามารถลดระยะขจัดของการเดินทางได้ทั้งระยะสูงสุด ระยะต่ำสุด และระยะเฉลี่ย

4.5 ผลการหาระยะทางของการเดินทางไปยังจุดเกิดเหตุ

ผู้วิจัยได้ทดลองหาระยะทางจริงที่วัดจากการเดินทางบนถนนโดยใช้ฟังก์ชันหาระยะทางบนเมนูขอเส้นทางของเว็บไซต์กูเกิ้ลแผนที่ โดยเมื่อทำการหาระยะทางจากจุดจอดรถไปยังจุดเกิดเหตุแต่ละจุดเรียบร้อยแล้วจะนำมาหาระยะทางสูงสุด ค่าระยะทางต่ำสุดและค่าระยะทางเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบระยะทางระหว่างสองจุดจอดรถ

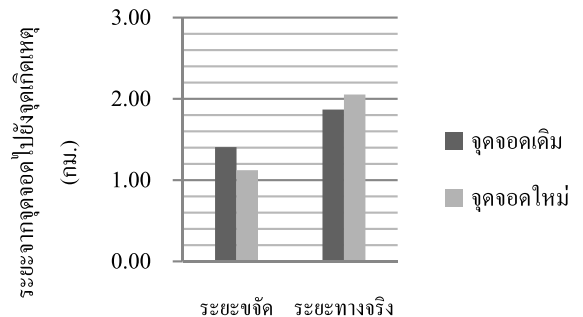
	จุดจอดรถเดิม	จุดจอดรถใหม่
ระยะทางสูงสุด (กม.)	11.10	10.60
ระยะทางต่ำสุด (กม.)	0.02	0.00
ระยะทางเฉลี่ย (กม.)	1.87	2.05
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.71	1.98

จากตารางที่ 6 จะเห็นว่าผลที่ได้จะแตกต่างจากผลการคำนวณด้วยระยะขจัด โดยแม้ว่าระยะทางสูงสุดและระยะทางต่ำสุดของจุดจอดรถใหม่จะมีค่าต่ำกว่าจุดเดิม แต่ระยะทางเฉลี่ยกลับเพิ่มมากขึ้น

5. สรุปและอภิปรายผล

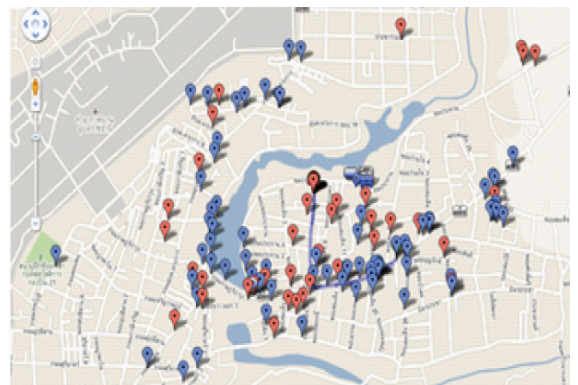
จากผลการทดลองหาที่จอดยานพาหนะสำหรับหน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉิน งานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย เทศบาลตำบลปทุม อำเภอเมืองจังหวัดอุบลราชธานี ด้วยเทคนิคการหาสถานที่ตั้งด้วยวิธีจุดศูนย์กลางจากน้ำหนักความเสี่ยงจากข้อมูลผู้รับบริการ ในระหว่างเดือนตุลาคม พ.ศ. 2553 ถึง เมษายน พ.ศ. 2554 จำนวน 172 ราย พบว่าได้จุดจอดรถจากการคำนวณซึ่งห่างจากจุดจอดรถเดิม 1.6 กิโลเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์และปรับเปลี่ยนจุดจอดให้เหมาะสมและเป็นไปได้ในทางปฏิบัติจะพบว่าจะได้จุดจอดรถใหม่ อยู่ในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลปทุม ซึ่งอยู่ห่างจากจุดจอดเดิม 1.1 กิโลเมตร

ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบระยะขจัดและระยะทางจากจุดจอดรถเดิมและจุดจอดรถที่กำหนดขึ้นมาใหม่พบว่าผลที่ได้มีความแตกต่างกัน โดยระยะขจัดเฉลี่ยจากจุดจอดรถใหม่ไปยังจุดเกิดเหตุจะมีระยะที่น้อยกว่าเดิมถึง 20.26% ในขณะที่หากคิดที่ระยะทางจะมีระยะเพิ่มขึ้นจากจุดจอดรถเดิม 9.93% ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณที่แตกต่างกัน

เหตุผลสำคัญที่ทำให้ผลที่ได้มีความแตกต่างกันเมื่อเปลี่ยนวิธีคิดระยะทางนั้นเกิดจากสภาพทางภูมิศาสตร์ของตำบลปทุม ซึ่งหากพิจารณาแผนที่ของตำบลปทุมดังแสดงในรูปที่ 3 จะพบว่ามีหนองน้ำขนาดใหญ่อยู่ในพื้นที่ซึ่งทำให้ในบางกรณีที่เกิดเหตุอยู่ใกล้จุดจอดรถใหม่แต่มีหนองน้ำกีดขวาง การเดินทางไปรับผู้ป่วยจึงต้องเดินทางอ้อมหนองน้ำนั้นไป ส่งผลให้ระยะทางจริงมีค่ามาก แต่ระยะขจัดมีค่าน้อย



รูปที่ 3 หนองน้ำ “ห้วยวังนอง” ซึ่งอยู่ในพื้นที่ตำบลปทุม

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะระยะทางจริงที่ใช้ในการเดินทางของรถกู้ชีพ จะพบว่าระยะทางสูงสุดและระยะทางต่ำสุดที่ได้จากการเปลี่ยนจุดจอดรถก็จะมีค่าน้อยลง โดยระยะทางที่ไกลที่สุดจะลดลง 4.50%

6. การนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้รวบรวมและกำหนดพิกัดในแผนที่กูเกิ้ลและผลการคำนวณและเปรียบเทียบระยะทางของจุดจอดรถทั้งเก่าและใหม่เข้าประชุมและหารือร่วมกับคณะทำงานของหน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉิน เทศบาลตำบลปทุม ซึ่งพบว่าจุดจอดรถที่คำนวณขึ้นมาใหม่นั้นเคยใช้เป็นจุดจอดรถมาก่อน แต่ด้วยนโยบายของเทศบาลตำบลปทุม ที่ต้องการให้ประชาชนสามารถเห็นการทำงานของเจ้าหน้าที่และเป็นการประชาสัมพันธ์หน่วยงานไปด้วยในตัว จึงได้ย้ายจุดจอดมาไว้ ณ จุดจอดปัจจุบันซึ่งอยู่ริมถนนสายหลัก ดังนั้นการย้ายจุดจอดไปยังจุดที่ได้คำนวณไว้จึงไม่สามารถดำเนินการได้ในทางปฏิบัติ

อย่างไรก็ตาม ทางคณะทำงานของหน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินตำบลปทุม ได้สังเกตเห็นจากแผนที่กูเกิ้ลว่าบริเวณทางแยกบายพาสทางไปตำบลลูกลาดมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นหนาแน่น และเมื่อวิเคราะห์รายละเอียดทางสถิติของอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นแล้วพบว่า อุบัติเหตุมักเกิดในช่วงเวลาเช้า ๆ คือเวลา 7.30 น. ถึง 8.30 น. และ 16.30 ถึง 18.30 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการจราจรคับคั่ง ดังนั้นทางหน่วยปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินเทศบาลตำบลปทุมจึงได้ขอความร่วมมือไปยังหน่วยกู้ชีพของมูลนิธิเอกชนแห่งหนึ่งเพื่อให้รถกู้ชีพพร้อมเจ้าหน้าที่มาจอดเพื่อเตรียมความพร้อม ณ บริเวณทางแยกบายพาสดังกล่าว

ภายหลังจากที่มีการดำเนินการตามนโยบายดังกล่าวแล้วพบว่าสามารถเยียวยาผู้ประสบอุบัติเหตุได้ในเวลาอันรวดเร็ว โดยเมื่อเปรียบเทียบการทำงานแบบเดิมและแบบใหม่จะพบว่าลดระยะเวลาลงได้ 10 นาทีต่อกรณี โดยได้จากการลดเวลาการรับวิทยุสื่อสาร การใช้เวลาในการแต่งตัวเพื่อออกปฏิบัติหน้าที่ และลดเวลาเดินทางจากจุดจอดรถไปยังจุดเกิดเหตุ

7. ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในครั้งต่อไป

เนื่องจากงานวิจัยในครั้งนี้เป็นเพียงการทดลองประยุกต์ใช้หลักการและวิธีการในการหาตำแหน่งที่ตั้งสำหรับปัญหาด้านการจัดการระบบการบริการทางการแพทย์ฉุกเฉิน จึงใช้ข้อมูลในพื้นที่ให้บริการขนาดเล็ก ซึ่งในอนาคตผู้ที่สนใจอาจทำการพัฒนาต่อยอดในแนวทางต่างๆ ต่อไปนี้

1) ขยายขนาดของปัญหาออกเป็นการหาจำนวนยานพาหนะและจุดจอดที่เหมาะสมในพื้นที่ของทั้งจังหวัด โดยอาจประยุกต์ใช้รูปแบบปัญหาการครอบคลุมที่มากที่สุดร่วมกับรูปแบบของปัญหาแบบพีมีเดีย (p-median problem) และพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อนำมาแก้ปัญหาดังกล่าว

2) พัฒนาสมการวัตถุประสงค์เป้าหมาย (Objective function) จากเดิมที่สนใจเพียงเวลาในการเดินทางไปยังจุดเกิดเหตุให้ครอบคลุมถึงเวลาในการตอบสนองต่อเหตุฉุกเฉิน (Response time)

3) ศึกษาความเป็นไปได้ในการจัดทำโครงข่ายศูนย์ปฏิบัติการทางการแพทย์ฉุกเฉินระดับชุมชนให้เชื่อมโยงและสามารถประสานงานความร่วมมือระหว่างแต่ละหน่วยปฏิบัติการของแต่ละชุมชนในการตอบสนองต่อเหตุฉุกเฉิน โดยเฉพาะกรณีที่เกิดเหตุหลายกรณีในช่วงเวลาเดียวกันซึ่งจำเป็นต้องมีการใช้ยานพาหนะในการปฏิบัติการมากกว่า 1 คัน

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณวัฒนพล ชาคะริเวช, คุณพรวิสนทวิสุข, คุณเอกภพ คำชู และเจ้าหน้าที่งานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลตำบลปทุมทุกท่าน ซึ่งให้ข้อมูลและช่วยอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลตลอดจนระบุพิกัดของจุดเกิดเหตุในแต่ละจุด

เอกสารอ้างอิง

[1] World Health Organization, 2011. **World Health Statistics 2011**. World Health Organization Press, France.

- [2]สำนักงานวิจัยเพื่อการพัฒนาหลักประกันสุขภาพไทย. ระบบบริการการแพทย์ฉุกเฉิน: ยังคล้าทางทิศในการพัฒนา. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : [http://www.hisro.or.th/main/?name=knowledge &file=readknowledge&id=15](http://www.hisro.or.th/main/?name=knowledge&file=readknowledge&id=15) (11 ธ.ค. 2552)
- [3]วราณี โสไกร และ พรรณวดี ยศทวี, 2554. การเปรียบเทียบผลการพัฒนาระบบนำส่งและส่งต่อผู้ป่วยอุบัติเหตุ จังหวัดแพร่. การประชุมวิชาการการแพทย์ฉุกเฉินระดับชาติ ประจำปี 2554, นนทบุรี, 7-9 มีนาคม 2554.
- [4]เกษร เหมะหมาย, 2554. ปัญหาและอุปสรรคในการปฏิบัติงานของอาสาผู้ชี้นำในการช่วยเหลืออุบัติเหตุจราจรใน อ.เมืองสุรินทร์. การประชุมวิชาการการแพทย์ฉุกเฉินระดับชาติ ประจำปี 2554, นนทบุรี, 7-9 มีนาคม 2554.
- [5]สถาบันการแพทย์ฉุกเฉินแห่งชาติ, 2552. มาตรฐานและหลักเกณฑ์เกี่ยวกับระบบการแพทย์ฉุกเฉินฉบับที่ 1. กรุงเทพฯ:สถาบันการแพทย์ฉุกเฉินแห่งชาติ.
- [6]ReVelle, C., Scholssberg,M., and Williams, J. , 2008. "Solving the maximal covering location problem with heuristic concentration." **Computers & Operations Research**. 35:427-435.
- [7]ReVelle, C., Marianov, V., 1996. "The Queuing Maximal availability location problem: A model for the sitting of emergency vehicles." **European Journal of Operational Research**. 93:110-120.
- [8]อิรพันธ์ กังวานสุระ และคณะ, 2553. การหาจำนวนจุดจอดรถของหน่วยบริการการแพทย์ฉุกเฉินที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, อุบลราชธานี, 13-15 ตุลาคม 2553.
- [9]นันทพงศ์ นันทสำเร็จ, ระพีพันธ์ ปิตาคะโส และบรรชา นุดดาดี, 2552. "การแก้ปัญหาการเลือกสถานที่ตั้งแบบหลายวัตถุประสงค์และหลายลำดับขั้น: กรณีศึกษาโรงงานผลิตเอทานอลจากชานอ้อยในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ." **วารสารวิจัย มข.** 14, 3:291-301.
- [10]ธนกร จันทร์ทอง และระพีพันธ์ ปิตาคะโส, 2553. การใช้เทคนิคศูนย์ถ่วงในการหาที่ตั้งโรงงานเอทานอลจากมันสำปะหลังและอ้อยในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, อุบลราชธานี, 13-15 ตุลาคม 2553.
- [11]กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2551. FMEA การวิเคราะห์หาการขัดข้องและผลกระทบ. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.

การลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ โดยการบูรณาการเทคนิควิศวกรรมอุตสาหกรรม

Wastes Reduction in Motorcycle Part Production Line Using Integrated IE Techniques

สาทิพย์ สีนิลพันธ์¹ ณฐา คุปต์เจียร²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อลดความสูญเปล่าในสายการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบเครื่องยนต์ โดยจัดสมดุลสายการผลิตและลดงานที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม (Non-value Added) ต่อตัวผลิตภัณฑ์ อาทิเช่น ความสูญเปล่า การเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น (Motion Loss) การเคลื่อนไหวที่เกินจำเป็น (Excess Motion) ความสูญเปล่าเนื่องจากงานเสีย (Defect) เป็นต้น ซึ่งสาเหตุที่กล่าวมานี้ทำให้โรงงานตัวอย่างมีต้นทุนการผลิตสูงขึ้นเนื่องจากชั่วโมงงานที่เพิ่มมากขึ้น งานวิจัยชิ้นนี้มุ่งเน้นการแก้ปัญหาโดยวิธีการบูรณาการเทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหกรรม ผลจากการปรับปรุงสายการผลิต ชิ้นส่วนฝาครอบเครื่องยนต์ พบว่ารอบเวลาการผลิต (Cycle Time) ของผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 318.32 วินาทีต่อชิ้น เหลือ 278.07 วินาทีต่อชิ้น คิดเป็น 12.64% จำนวนพนักงานในสายการผลิตลดลงจาก 10 คนเหลือ 8 คนคิดเป็น 20% ในด้าน เครื่องมือและเครื่องจักรสามารถเพิ่มความเร็วรอบของเครื่องจักรจาก 6,500 rpm เพิ่มขึ้นเป็น 7,500 rpm และลดจำนวนใบมีด ต่อเครื่องมือตัด(Face Milling) จาก 6 ใบ เหลือ 4 ใบ ดังนั้นชี้วัดความสามารถของกระบวนการเพิ่มขึ้นจาก 1.14 เป็น 1.41 คิดเป็น 19.48%

คำสำคัญ : การจัดสมดุลสายการผลิต, ความสูญเปล่า, รอบเวลาการผลิต, ความสามารถของกระบวนการ

Abstract

The purpose of this research was to reduce wastes in motorcycle engine cover production line by balancing line and reducing non-value added work such as motion loss, excess motion and defect. These causes led to higher cost production due to longer working hour. The research methodology included integrated IE techniques. The result showed a decrease of cycle time from 318.32 seconds per piece to 278.07 seconds per piece which accounted for 12.68 percent. The number of operators in production line was decreased from 10 persons to 8 persons which equaled 20 percent. For machine and tools, engine speed was able to increase from 6,500 rpm to 7,500 rpm. The number of blades per งานมิลลิ่ง could be decreased from 6 pieces to 4 pieces. Moreover, the process performance index increased from 1.14 to 1.41 which accounted for 19.48 percent.

Keywords : Line Balancing, Wastes, Cycle Time, Process Capability

¹ นักศึกษาภาควิชาภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นฐานการผลิต รถจักรยานยนต์และมีการขยายตัวอย่างมากโดยในไตรมาสแรกของปี พ.ศ. 2553 เทียบกับช่วงเดียวกันของปี พ.ศ. 2552 โดยเพิ่มมากขึ้น ร้อยละ 24.88 [1] จากการแข่งขันที่รุนแรงในอุตสาหกรรมรถจักรยานยนต์ ส่งผลให้มีการขยายกำลังการผลิตรถจักรยานยนต์ที่เพิ่มมากขึ้น โรงงานตัวอย่างมีความจำเป็นที่ต้องเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อรองรับการขยายตัวที่เกิดขึ้นดังกล่าว ให้ทันตามความต้องการของลูกค้า ทำให้ผู้บริหารโรงงานตัวอย่างสนใจในเรื่องการปรับปรุงสายการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายการผลิต โดยการขจัดงานที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า ซึ่งพบมากในโรงงาน ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้นโดยไม่จำเป็น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อจัดทำเวลามาตรฐานในการทำงานของสายการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบรถจักรยานยนต์
- 2) เพื่อจัดสมดุลสายการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบเครื่อง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการบูรณาการเทคนิคทางด้านวิศวกรรมอุตสาหการซึ่งประกอบด้วยทฤษฎีต่างๆ ดังนี้

2.1 การศึกษาเวลาโดยตรง (Direct Time Study)

การศึกษาเวลา คือ การหาเวลามาตรฐานในการทำงาน ใช้ในการวัดผลงานเพื่อนำมาใช้ในการวางแผนและควบคุมการผลิตเพื่อให้สามารถทำงานหรือวางแผนการปฏิบัติงานให้ตรงตามเวลาที่ใช้อย่างจริง [2] และนำเวลาเผื่อ (Allowances) ปรับค่ากับเวลาที่ศึกษามาได้เพื่อสร้างเหมาะสมกับการทำงานของพนักงาน [3] โดยขั้นตอนการศึกษาเวลาโดยตรง ประกอบด้วย การศึกษาขั้นตอนการทำงาน การหาขอบเวลาการทำงาน (Cycle Time) และเวลาการทำงานที่มากที่สุดของกระบวนการ (Takt Time) การหาเวลามาตรฐานและเวลาเผื่อในการทำงาน และการคำนวณเวลามาตรฐานในการทำงานแต่ละขั้นตอน

2.2 เครื่องมือควบคุมคุณภาพทั้ง 7 (7 QC Tools)

เครื่องมือคุณภาพ คือ เครื่องมือที่ใช้ช่วยการแก้ไข

ปัญหาทางด้านคุณภาพและประยุกต์ใช้การแก้ปัญหากระบวนการทำงาน ซึ่งช่วยศึกษาสภาพทั่วไปของปัญหา การเลือกปัญหา การสำรวจสภาพปัจจุบันของปัญหา การวิเคราะห์และค้นหาสาเหตุการเกิดปัญหาที่แท้จริง เพื่อการแก้ไขได้อย่างถูกต้องและช่วยจัดทำมาตรฐานและควบคุมติดตามผลอย่างต่อเนื่อง เครื่องมือควบคุมคุณภาพทั้ง 7 โดยงานวิจัยนี้นำเครื่องมือ แผนผังพาเรโต (Pareto Diagram) กราฟ (Graph) แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause & Effect Diagram) แผนภูมิควบคุม (Control Chart) [4,5] มาใช้งานวิจัยฉบับนี้

2.3 การจัดสมดุลสายการผลิต (Line Balancing)

การจัดสมดุลสายการผลิตเป็นการกำหนดงานให้กับหน่วยผลิต สำหรับสายการผลิตสินค้าปริมาณมากและค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยสายการผลิตจะถูกแบ่งออกเป็นสถานีงาน (Work Station) หลายสถานีต่อเนื่องกันหลักการจัดสมดุลสายการผลิตที่สำคัญ คือ การคำนวณรอบเวลาการทำงาน (Cycle Time) สามารถใช้บังคับจุดที่เป็นคอขวดของกระบวนการ (Bottle Neck) คือ สถานีทำงานที่ใช้เวลานานที่สุดเป็นตัวกำหนดกำลังการผลิตและประสิทธิภาพของสายการผลิต โดยคำนวณจากสมการที่ 1

$$\left[\frac{\text{ผลรวมเวลาของทุกกระบวนการ}}{(\text{เวลาที่สูงสุดของกระบวนการ} \times \text{จำนวนสถานีงาน})} \right] \times 100 \quad (1)$$

โดยทั่วไปเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสายการผลิตควรอยู่ที่ 85% ขึ้นไป [6]

2.4 ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability)

การศึกษาความสามารถของกระบวนการเป็น การศึกษาความสามารถของกระบวนการในการตอบสนองความต้องการของลูกค้าซึ่งอาจแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ของเสียที่อยู่นอกเหนือจากข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ (Out of Specifications) หรือแสดงโดยใช้ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ เช่น ค่า C_p หรือ C_{pk} โดยคำนวณจากสมการที่ (2) และ (3) [7]

Cp = (USL - LSL) / (6σ) (2)

Cpk = min [(USL - μ) / (3σ), (μ - LSL) / (3σ)] (3)

โดย
USL = Upper Specification Limit ขีดจำกัดค่าสูงของข้อกำหนด
LSL = Lower Specification Limit ขีดจำกัดค่าต่ำของข้อกำหนด
μ = Computed Population Process Mean
โดยค่าดัชนีความเชื่อมั่นของกระบวนการโดยทั่วไปเป็นไปตามตารางที่ 1 [7]

ตารางที่ 1 การแปลผลความสามารถกระบวนการ
โดยค่าดัชนี Cp

ค่าดัชนี Cp	ลำดับความสามารถ
≥2.00 = Cp	ดีเยี่ยม
1.67 ≤ Cp < 2.00	ดีมาก
1.33 ≤ Cp < 1.67	ดี
1.00 ≤ Cp < 1.33	พอใช้
0.67 ≤ Cp < 1.00	แย่
Cp < 0.67	แย่มาก

2.5 ความสูญเสียในกระบวนการผลิต

ความสูญเสียที่ซ่อนตัวอยู่ในกระบวนการผลิตเป็นสาเหตุที่ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงกว่าที่ควรจะเป็นและส่งผลกระทบถึงการสูญเสียเวลาในการทำงานและเกิดการรอกงานในสายการผลิต โดยความสูญเสียเปล่าแบ่งเป็น 7 ประการ (7 Wastes) ประกอบด้วย 1.ความสูญเสียเนื่องจากการผลิตมากเกินไป (Over Production) 2.ความสูญเสียเนื่องจากการเก็บวัสดุคงคลังที่ไม่จำเป็น (Unnecessary Stock) 3.ความสูญเสียเนื่องจากการขนส่ง (Transportation) 4.ความสูญเสียเนื่องจากการผลิตของเสีย/แก้ไขงานเสีย

(Defect/Rework) 5.ความสูญเสียเนื่องจากกระบวนการผลิตที่ขาดประสิทธิภาพ (Non-effective Process) 6.ความสูญเสียเนื่องจากการรอกคอย (Delay Time) 7.ความสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนไหว (Motion Loss)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

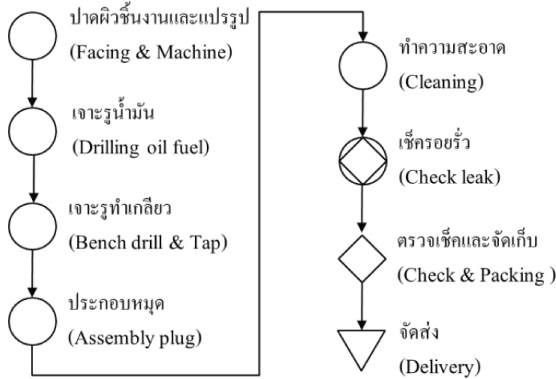
ในกลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อาหารและอุตสาหกรรมผลิตตู้เย็น ได้นำวิธีการศึกษาการทำงาน (Work study) และการจัดสมดุลสายการผลิต โดยการศึกษากระบวนการทำงานและจัดสมดุลสายการผลิตพบว่า มีขั้นตอนกระบวนการและจำนวนพนักงานที่เกินความจำเป็น เครื่องมือและเครื่องจักรเป็นปัญหาคอขวดของกระบวนการผลิต ผลจากการวิจัยพบว่า การจัดงานใหม่และการปรับเปลี่ยนเครื่องจักรใหม่ ช่วยลดรอบเวลาของสายการผลิตลง และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 41.34% เพิ่มขึ้นเป็น 75.70% และจาก 72.90% เพิ่มขึ้นเป็น 83.09% ตามลำดับ[6], [8] กลุ่มอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นำการวิเคราะห์ปัจจัยและผลกระทบของสายการประกอบมอนิเตอร์ (Monitor) และนำผลลัพธ์มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายการประกอบระหว่างการจัดสมดุลการผลิตแบบเดี่ยว (Single-model line balancing) การจัดสมดุลสายการผลิตแบบผสม (Multi-model line balancing) ด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยการทดลองกำหนด 3 ปัจจัยคือ การจัดสมดุลสายการผลิต ความเร็วของสายพานลำเลียง และจำนวนสถานีงาน ผลจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์พบว่า การจัดสมดุลสายการผลิตแบบผสม มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสายการผลิตแบบเดี่ยว [9]

3. วิธีดำเนินการงานวิจัย

3.1 ศึกษาสภาพทั่วไปของแผนกแปรรูปสายการผลิต A (Machine Line A) ของโรงงานตัวอย่างในปัจจุบัน

หน้าที่ของแผนกแปรรูปสายการผลิต A (Machine Line A) คือ หน้าที่ในการแปรรูปชิ้นงานฝาครอบเครื่องรถจักรยานยนต์ที่ได้มาจากการฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม และผ่านการตกแต่งนำครีบทึบที่เกิดจากขั้นตอนการฉีด แล้วทำ

การแปรรูปตามขั้นตอนให้ได้ตามที่ลูกค้ากำหนด โดยขั้นตอนและกระบวนการของสายการผลิตทั้งหมดจะใช้เครื่องจักรและคนร่วมกันในการแปรรูปชิ้นส่วนฝาครอบเครื่อง โดยมีขั้นตอน 8 ขั้นตอนดังรูปที่ 1

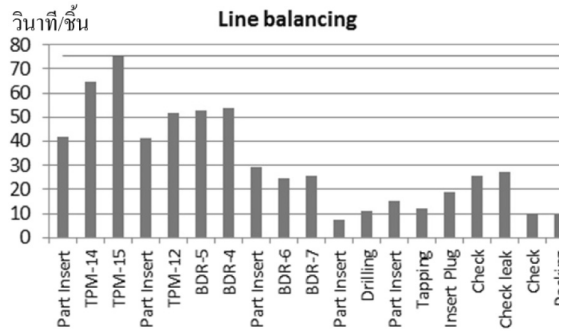


รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบเครื่อง

3.2 เก็บรวบรวมข้อมูลก่อนการปรับปรุงและศึกษา

ผลกระทบ

การเก็บรวบรวมข้อมูลเริ่มจากการศึกษาขั้นตอนการปฏิบัติงานและการศึกษาเวลาโดยตรง เข้ามาทำการเก็บข้อมูลพื้นฐานการปฏิบัติงานและเวลาที่ใช้ในการทำงานของแต่ละกระบวนการ นำเวลาที่บันทึกขั้นตอนการทำงานในสภาวะการทำงานปกติของพนักงานมาจัดสมดุลสายการผลิต ดังรูปที่ 2 จากกราฟแห่งการจัดสมดุลสายการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบเครื่องรถจักรยานยนต์พบว่า มีขั้นตอนการทำงาน 8 ขั้นตอน โดยใช้เครื่องจักร 11 เครื่อง พนักงาน 10 คน รอบเวลาการทำงาน เท่ากับ 318.32 วินาที/ชิ้น ขั้นตอนที่ใช้เวลาการทำงานมากที่สุดในกระบวนการคือ ขั้นตอนการ ปาดหน้าและแปรรูปโดยใช้เวลา 135 วินาที/ชิ้น ส่วนเวลาการทำงานที่มากที่สุดของกระบวนการจะเท่ากับ 75 วินาทีต่อชิ้น เนื่องจากการผลิตด้วยเครื่องจักร 2 เครื่องพร้อมกันโดยใช้พนักงาน 1 คนควบคุม



รูปที่ 2 เวลาและขั้นตอนการผลิตชิ้นงานฝาครอบเครื่องรถจักรยานยนต์

จากการคำนวณประสิทธิภาพตามสมการ (1) ประสิทธิภาพของสายการผลิตอยู่ที่ 52% เป็นเหตุให้ชั่วโมงการทำงานปกติที่มีอยู่ไม่สามารถผลิตชิ้นส่วนฝาครอบเครื่องรถจักรยานยนต์ได้ตามแผนที่วางไว้ ส่งผลให้มีการเพิ่มชั่วโมงการทำงานล่วงเวลา (Over time) เพื่อผลิตชิ้นงานให้ได้ตามแผนในแต่ละวัน ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นโดยวัดค่าความสามารถของกระบวนการ $Cpk=1.14$

3.3 วิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุความสูญเสียของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบเครื่องรถจักรยานยนต์

จากการศึกษาขั้นตอนการผลิตของสายการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบเครื่องรถจักรยานยนต์พบว่าสายการผลิตไม่สามารถผลิตชิ้นงานได้ตามแผน มีชั่วโมงการทำงานที่สูงเมื่อเทียบกับชั่วโมงการทำงานที่วางแผนผลิต ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์สาเหตุโดยการวิเคราะห์วิธีการทำงานของแต่ละขั้นตอนและแผนผังแสดงเหตุและผล โดยวิเคราะห์ปัจจัยหลัก 4 ประการ คือ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วัตถุดิบ (Material) และวิธีการปฏิบัติงาน (Method) ด้วยวิธีการเสนอความคิดของสมาชิกกลุ่มเพื่อให้ทราบถึงปัญหาที่แท้จริง และค้นหาความสูญเสียที่เกิดขึ้นกับสายการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบเครื่องรถจักรยานยนต์ รถจักรยานยนต์สายการผลิต A และหาแนวทางการแก้ไขและป้องกัน

3.4 เสนอวิธีการปรับปรุง

ผู้วิจัยนำเสนอวิธีการเพื่อลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตฝาคอบเครื่องรถจักรยานยนต์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อประสิทธิภาพและผลผลิตที่เพิ่มมากขึ้น โดยปัจจุบันการทำงานของพนักงานยังไม่มีมาตรฐานในการปฏิบัติงานและหน้าที่รับผิดชอบที่ชัดเจน ผู้วิจัยได้จัดทำมาตรฐานการทำงานและกำหนดหน้าที่ความรับผิดชอบขึ้นมาใหม่และให้พนักงานปฏิบัติงานจริง ส่วนเครื่องจักรและเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตพบว่าเครื่องจักรที่ใช้ในการปาดหน้าและขึ้นรูปชิ้นงานจำนวน 5 เครื่องมีเวลาการทำงานที่ไม่ใกล้เคียงกันรวมทั้งประสิทธิภาพของเครื่องจักรยังต่ำกว่ามาตรฐาน ทำให้ต้องมีการปรับปรุงเครื่องจักรเพื่อให้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นรวมถึงปรับเวลาการทำงานของเครื่องจักรให้ใกล้เคียงกันแล้วนำผลการปรับปรุงเปรียบเทียบกับขั้นตอนการปฏิบัติงานแบบเดิม

3.5 ยืนยันผลการปรับปรุง ยืนยันผลการปฏิบัติงานโดย

มาตรฐานการทำงานแบบใหม่กับวิธีการทำงานแบบเดิมและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร โดยการวัดความสามารถของกระบวนการให้มีเป้าหมายค่า $Cpk \geq 1.33$ โดยใช้การคำนวณและประสิทธิภาพการทำงานโดยการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การจัดสมดุลสายการผลิต

3.6 ทดลองนำไปใช้งานจริง

นำมาตรฐานการทำงานแบบใหม่ไปใช้งานจริงเพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นหลังจากใช้มาตรฐานการทำงานแบบใหม่โดยวิธีการแบ่งงานใหม่และการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องจักร ว่าสามารถลดความสูญเปล่าและเพิ่มผลผลิตในสายการผลิตชิ้นส่วนฝาคอบเครื่องรถจักรยานยนต์สายการผลิต A

3.7 เก็บข้อมูลหลังจากการปรับปรุงสายการผลิตในโรงงานตัวอย่าง

ทำการเปรียบเทียบรอบเวลาการผลิตต่อชิ้นส่วนของชิ้นงาน ฝาคอบเครื่องรถจักรยานยนต์ของสายการผลิต A และประสิทธิภาพการทำงานก่อนและหลังการ

ปรับปรุงว่ารอบเวลาการผลิตต่อชิ้นลดลงและประสิทธิภาพสายการผลิตชิ้นส่วนฝาคอบเครื่องรถจักรยานยนต์เพิ่มขึ้น

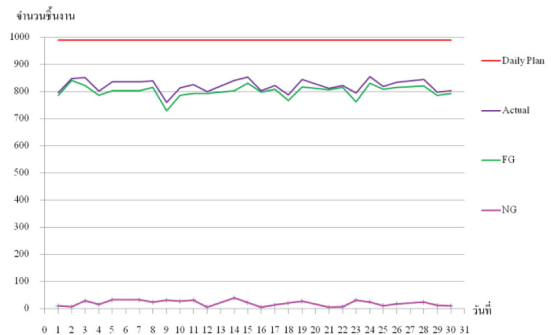
3.8 นำเสนอมาตรฐานการปฏิบัติงานแบบใหม่

ผู้วิจัยนำเสนอมาตรฐานการทำงานแบบใหม่ต่อแผนกแปรรูปชิ้นส่วนฝาคอบเครื่องรถจักรยานยนต์สายการผลิต A เพื่อนำไปใช้งานจริงในโรงงานตัวอย่าง

4. ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 ผลวิเคราะห์สาเหตุของความสูญเปล่าของ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์โดยสมดุลสายการผลิตตามรูปที่ 2 และแผนการผลิตประจำวัน (Daily Plan) ดังรูปที่ 3 พบว่าการผลิตชิ้นงานฝาคอบเครื่องรถจักรยานยนต์ของสายการผลิต A ยังไม่สามารถผลิตชิ้นงานได้ตามแผนวางไว้ในแต่ละวัน เนื่องมาจากรอบเวลาการผลิตต่อชิ้นยังสูงกว่าเวลาที่วางแผน

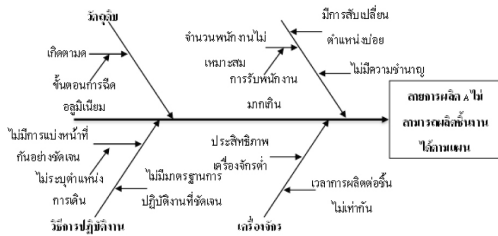


หมายเหตุ : MC คือ ยอดการผลิตจริง
Target คือ เป้าหมายแผนการผลิต
NG คือ จำนวนของเสีย

รูปที่ 3 แผนการผลิตประจำวันของชิ้นงานฝาคอบเครื่องรถจักรยานยนต์

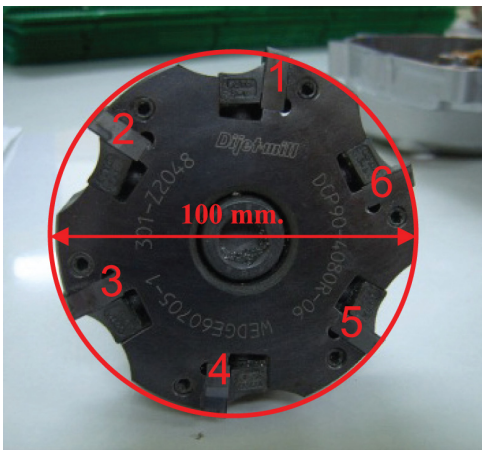
4.1.2 ผลการวิเคราะห์สาเหตุโดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล ดังรูปที่ 4 พบว่าการปฏิบัติงานของพนักงานไม่มีแบบแผนการเดินและขาดการกำหนดหน้าที่ความรับผิดชอบในแต่ละขั้นตอนที่ชัดเจน การใช้พนักงานที่มากเกินไปเมื่อเทียบกับขั้นตอนการผลิตในส่วนเครื่องจักร เวลาการทำงานของเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปไม่ใกล้เคียงกัน

ส่งผลให้สายการผลิต A ไม่สามารถผลิตชิ้นงานฝาครอบ-เครื่องจักรยานยนต์ได้ตามแผนการผลิตประจำวันที่วางไว้

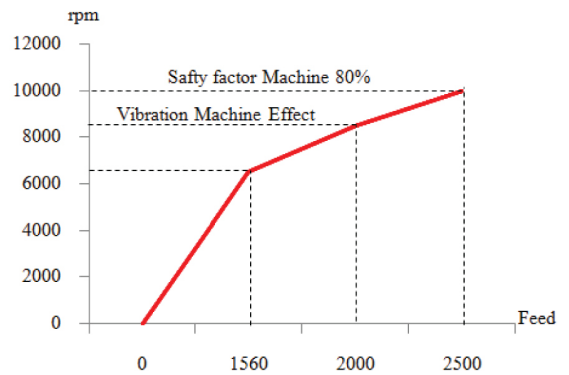


รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ด้วยแผนผังเหตุและผล

4.1.3 การวิเคราะห์การใช้เครื่องมือตัดงานมิลลิ่ง (Milling & Tools) จากการวิเคราะห์พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของงานมิลลิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ใช้ใบมีด 6 ใบ/งานมิลลิ่งครั้งรูปที่ 5 ส่วนพื้นที่หน้ากว้างของชิ้นงานมีขนาด 5 มิลลิเมตร ทำให้เกิดการเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของเครื่องมือตัด และพบปัญหาการสั่นของเครื่องจักรที่ความเร็ว 6,600 rpm ซึ่งเกินค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ที่ 6,500 rpm ดังรูปที่ 6 ทำให้เครื่องจักรทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และยังพบการใช้จำนวนใบมีดเกินความจำเป็นเมื่อเทียบกับความกว้างของชิ้นงาน เวลาการเปลี่ยนใบมีดต่อชุดจำนวน 6 ใบใช้เวลาการเปลี่ยน 20 วินาทีต่อใบ งานมิลลิ่ง 1 ชุดใช้ใบมีด 6 ใบใช้เวลาการเปลี่ยน 120 วินาที จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเครื่องใช้เวลางานไม่เท่ากัน



รูปที่ 5 เครื่องมือตัดงานมิลลิ่งแบบ 6 ใบมีด



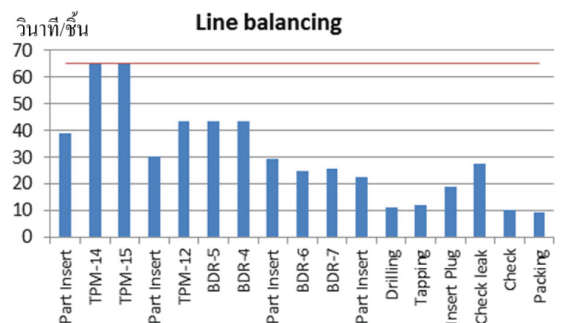
รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและอัตราการตัดเนื้อ

มีผลมาจากการใช้ งานมิลลิ่งเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรและใบมีดที่ใช้งานเนื่องจากต้องปรับให้สามารถใช้งานได้กับเครื่องจักรแต่ละเครื่อง ทางผู้วิจัยจึงนำเสนอการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้เล็กลงและลดการใช้ใบมีดของ งานมิลลิ่งลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรและลดค่าใช้จ่ายในการผลิต โดยปรึกษากับทางผู้ผลิตเพื่อทำการออกแบบและส่งตัวอย่างชุดงานมิลลิ่งมาทดสอบที่โรงงานตัวอย่าง

4.2 ผลจากการใช้วิธีการปรับปรุง

4.2.1 การแบ่งงานย่อยแบบใหม่

วิธีการที่จะทำให้ประสิทธิภาพของสายการผลิตเพิ่มขึ้นโดยให้ขจัดความสูญเปล่าจากการปฏิบัติงานให้เกิดน้อยที่สุดในกระบวนการผลิต โดยการแบ่งงานย่อยใหม่ ทั้งนี้ตำแหน่งและความรับผิดชอบอ้างอิงแสดงตามรูปงานย่อยรูปที่ 7



รูปที่ 7 เวลาและขั้นตอนการผลิตหลังปรับปรุง

เมื่อเปรียบเทียบการปฏิบัติงานย่อยก่อนการปรับปรุงดังรูปที่ 2 พบว่ารอบเวลาการผลิตของชิ้นส่วนฝาครอบเครื่องลดลงจาก 318.32 วินาทีต่อชิ้นเหลือ 278.07 วินาทีต่อชิ้น โดยที่มีการลดลงถึง 40.24 วินาทีต่อชิ้น

4.2.2 ผลการปรับปรุงด้านปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย (4M)

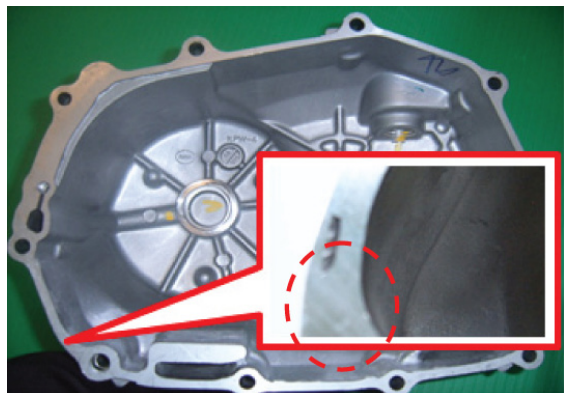
ทำการเปรียบเทียบด้านปัจจัยหลักดังนี้

1) คน จำนวนพนักงานหลังจากแบ่งงานย่อยและจัดสมศุลสายการผลิตพบว่าสามารถลดพนักงานประจำสายการผลิตจาก 10 คนเหลือ 8 คนและจัดทำมาตรฐานการปฏิบัติงานประจำจุดขึ้นมาใหม่ ใช้พนักงานที่เป็นพนักงานรายเดือนแทนพนักงานรายวันในจุดปฏิบัติงานกับเครื่องจักรขึ้นรูปชิ้นงาน มีผลให้ลดการลาออกของพนักงานประจำเครื่องจักรแปรรูป

2) เครื่องจักร ทำแผนการปรับปรุงเครื่องจักรโดยแผนกซ่อมบำรุง ทำการการเปลี่ยนชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อนพร้อมเปลี่ยนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานใหม่

3) วิธีการปฏิบัติงานเปรียบเทียบโปรแกรมให้เครื่องจักรแปรรูปโดยลดคำสั่งบางคำสั่งที่ไม่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานทำให้เวลาการแปรรูปชิ้นงานของเครื่องจักรลดลงจาก 134 วินาทีต่อชิ้น เหลือ 128 วินาทีต่อชิ้น

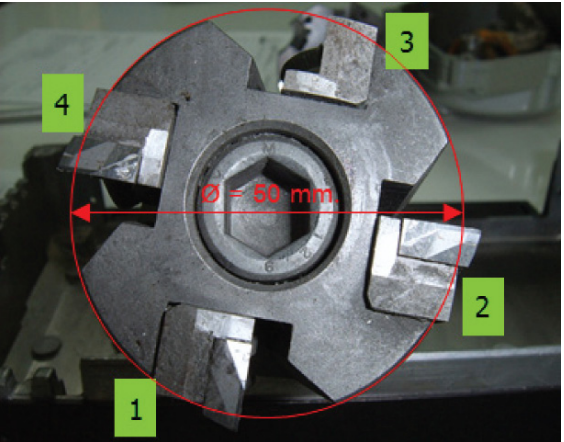
4) วัตถุดิบ ชิ้นงานเมื่อผ่านการแปรรูปแล้วพบปัญหาดังรูปที่ 8 ทำให้เกิดความสูญเสียเปล่าในการผลิตชิ้นทางผู้วิจัยได้เสนอวิธีการควบคุมการฟอกเตาเพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ตกค้างภายในเตาหลอม



รูปที่ 8 ชิ้นงานเกิดปัญหาตามดหลังแปรรูป

4.3 ผลการปรับปรุงเครื่องมือตัด

เปรียบเทียบเครื่องมือตัดงานมิลลิ่งก่อนและหลังพบว่าจำนวนใบมีดลดลงจาก 6 ใบ เหลือ 4 ใบต่องานมิลลิ่งแต่ละงานดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เครื่องมือตัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม.

การหาค่าความเร็วรอบของเครื่องจักรจากสมการที่ (4) โดยที่อัตราความเร็วป้อนอยู่ที่ 1,500 มิลลิเมตรต่อนาที

$$vf = fz \times z \times n \tag{4}$$

หมายเหตุ : vf = Table Feed
fz = Feed per Tooth
z = No. of Flutes
n = Spindle Speed

จากการคำนวณความเร็วรอบของเครื่องมือตัดหลังการปรับปรุงอยู่ที่ 7,500 rpm หลังจากการปรับปรุงเครื่องมือตัด งานมิลลิ่งสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการปรับปรุง

	เครื่องมือตัดแบบเก่า	เครื่องมือตัดแบบใหม่
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางO Face Milling (mm.)	100 mm.	50 mm.
จำนวนใบมีดต่อชุด	6	4
ความเร็วรอบ(RPM)	6,500 RPM	7,500 RPM
อัตราป้อน(mm./min.)	1,500 mm./min.	1,500 mm./min.
เวลาที่ใช้(วินาที)	79 วินาที	79 วินาที
เวลาการเปลี่ยนใบมีดต่อชุด(วินาที)	150 วินาที	100 วินาที
ราคา Face Milling ต่อชุด(บาท)	23,980 บาท	15,400 บาท

4.4 การวัดผลความสามารถของกระบวนการและเครื่องจักร

ทำการเปรียบเทียบผลการดำเนินการปรับปรุงสายการผลิตด้วยการวัดดัชนีความเชื่อมั่นของกระบวนการผลิต (C_p , C_{pk}) การวัดค่าความสามารถของกระบวนการหลังจากการปรับปรุงเครื่องมือและเครื่องจักรแล้วทำการเก็บผลหลังการปรับปรุงจำนวน 30 ชุดข้อมูลโดยการวัดค่าของชิ้นงานโดยเครื่องมือวัด CMM (Coordinate Measuring Machine) ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 เครื่องมือวัด CMM

โดยบันทึกค่าลงในใบบันทึกข้อมูลและนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณด้วยโปรแกรม Excel โดยใช้สมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับสามารถคำนวณค่าความสามารถของกระบวนการ $C_p = 1.46$ และค่าความเชื่อมั่นของกระบวนการ $C_{pk} = 1.416$ นำผลที่ได้เทียบกับตารางการแปลผลความสามารถของกระบวนการโดยค่าดัชนี C_p และ C_{pk} ดังตารางที่ 1 จากผลค่าความสามารถของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบเครื่องจักรยานยนต์ที่สามารถคำนวณได้อยู่ในเกณฑ์ระหว่าง 1.33 - 1.67 อยู่ในเกณฑ์ดีซึ่งเป็นผลที่น่าพอใจในการปรับปรุง

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการ

จัดสมดุลสายการผลิตและปรับปรุงอุปกรณ์เครื่องจักรก่อนการปรับปรุงสายการผลิต พบว่า รอบเวลาการผลิตของผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 318.32 วินาทีต่อชิ้น เหลือ 278.07 วินาทีต่อชิ้น คิดเป็น 12.64% จำนวนพนักงานในสายการผลิตลดลงจาก 10 คนเหลือ 8 คนคิดเป็น 20% สามารถเพิ่มความเร็วรอบของเครื่องจักรจาก 6,500 rpm เพิ่มขึ้นเป็น 7,500 rpm และลดจำนวนใบมีดต่อเครื่องมือตัดงานมีลึงจาก 6 ใบ เหลือ 4 ใบ ทำให้สามารถประหยัดเงินได้ 8,580 บาทต่อชุด และดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการเพิ่มขึ้นจาก 1.14 เป็น 1.41 อยู่ในเกณฑ์ดี เป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นการจัดสมดุลการผลิตแบบใหม่นั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิตและสามารถลดความสูญเสียเปล่าในสายการผลิต

หลังจากการปรับปรุงกระบวนการผลิตแล้ว ผู้วิจัยพบว่าความสูญเสียจากการผลิตชิ้นงานเสีย จากปัญหาดามดหลังจากแปรรูป ควบคุมคุณภาพป้องกันการผิดชิ้นงานและการบำรุงรักษาแม่พิมพ์ตามระยะเวลาที่กำหนด และจัดผังโรงงานใหม่ (Re-Layout) เพื่อให้เหมาะกับกระบวนการผลิต

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. **สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมไตรมาสที่ 1** เข้าถึงได้จาก : <http://www.ryt9.com/s/oie/912305> (มกราคม - มีนาคม)
- [2] วันชัย ธิวัณนิช, 2550. **การศึกษาเวลา**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พิมพ์ครั้งที่ 5
- [3] ชนิดวัชรณ์ ตรีวิทยาภูมิ, **เวลาเพื่อ(Allowance)** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เข้าถึงได้จาก : <http://www.ismed.or.thSME/src/upload/knowledge/11812011974667b32d31ec9.pdf>
- [4] ศิริพร ขอฟกรกลาง, 2544. **การควบคุมคุณภาพ**
- [5] Eugene L. Grant and Richard S. Leavenworth, 1999. **Statistical Quality Control**. 7th McGraw-Hill. New York.

- [6] ภาวิณี อาจปฐ และ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน, 2551. การลดความสูญเสียเปล่าในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เบรกเกอร์, วารสารรามคำแหง.
- [7] S.T. Foster,Jr. 2001. **Managing Quality An Integrative Approach**. Under Saddle River, New Jersey 07458. pp.374-377.
- [8] รศ.สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร, นายนิพนธ์ บุญอุปสพ, 2547. การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตด้วยวิธีการมอบหมายงานเพื่อการสมดุลบนสายการผลิต. การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงาน. Int. J. Sc.Tech.,Vol. 9, No. 2.
- [9] Parames Chutima and Haruetai Suphapruksapongse. 2004. **Practical Assembly-Line Balancing in a Monitor Manufacturing Company**, Tharnmasat Int. J. Sc.Tech.,Vol. 9, No. 2.

การวิเคราะห์และออกแบบระบบการขนส่งโลหิตในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล
กรณีศึกษาสำหรับศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาดไทย

Analysis and Design of Blood Transportation in Bangkok Metropolitan Region
A Case Study for the National Blood Center, Thai Red Cross Society

สมชาย ปทุมศิริ¹ ปกัสน์ สุขานูรณ์²

บทคัดย่อ

ในแต่ละวัน มีความต้องการใช้โลหิตจำนวนมากสำหรับการรักษาชีวิตมนุษย์ การได้รับโลหิตอย่างรวดเร็วและปลอดภัย จะช่วยให้การรักษาของแพทย์มีประสิทธิภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ต้นทุนการกระจายโลหิตก็เป็นสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึง สำหรับในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลนั้น โรงพยาบาลแต่ละแห่งที่ต้องการใช้โลหิตจะต้องส่งรถไปรับโลหิตเองโดยตรงที่ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาดไทย โดยเฉลี่ยแล้วแต่ละวันจะมีโรงพยาบาล 74 แห่งส่งรถนานาชนิดมาขอรับโลหิตจากศูนย์ฯ วันละหลายเที่ยว แต่ละเที่ยวได้รับโลหิตไประหว่าง 1 ถึง 300 ถุง ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายจำนวนมาก อันเนื่องมาจากการวิ่งไปแล้ววิ่งกลับทันที รถแต่ละคันบรรทุกโลหิตได้น้อยมากเมื่อเทียบกับความจุของรถงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา วิเคราะห์ปัญหาการขนส่งโลหิตที่เกิดขึ้น และทำการออกแบบระบบขนส่งเสียใหม่ โดยอาศัยหลักการบริหารศาสตร์และแนวคิดด้านโลจิสติกส์จำลองปัญหาเป็นการจัดระบบเส้นทางการขนส่ง ประยุกต์ใช้วิธีฮิวริสติกของ Clark and Wright ในการแก้ปัญหา ผลการทดสอบด้วยข้อมูลจริงพบว่าระบบที่เสนอสามารถช่วยให้การขนส่งโลหิตในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลลดจำนวนเที่ยวและระยะทางการขนส่งได้ มีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งให้สูงขึ้นอีก 68.53% ซึ่งทำให้ต้นทุนการกระจายโลหิตลดต่ำลง นอกจากนี้ยังได้เสนอแนะแนวทางเพื่อการลงทุนที่เหมาะสมอีกด้วย

คำสำคัญ : ขนส่ง, การกระจาย, โลหิต, ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ, ฮิวริสติก

Abstract

Everyday, the demand for blood is enormous in order to save lives. Quick and safe blood service is crucial for the efficiency of medical treatment. However, distribution cost of blood should be of important as well. In Bangkok Metropolitan Region, the individual hospital needs to send its vehicle to pick up the requested blood at the National Blood Center (NBC), Thai Red Cross Society. On average, there are approximately 74 hospitals sent various kinds of vehicles to wait and pick up blood between 1 – 300 units from the NBC. With the current individual pick-up system, the transportation cost is excessive due to too many empty trips. This research paper presents the results from the study and analysis of the current blood transportation system. The new design is proposed based on the management science and business logistics

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

² ผู้ช่วยวิจัยและนักศึกษาปริญญาโทสาขาวิศวกรรมและการจัดการโลจิสติกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

concept. The problem is modeled as the vehicle routing problem (VRP) and solved by the Clarke and Wright's heuristic method. By testing with the real data, the results show that a lot of trips and total distance can be saved. Potentially, the transport efficiency could be increased by 68.53%. The paper also discusses about the business model for implementing such concept at the NBC.

Keywords : Transportation, distribution, blood, supply chain, National Blood Center, heuristic

1. บทนำ

โลหิตเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการดำรงอยู่ของชีวิตมนุษย์ ในแต่ละวันสังคมไทยมีความต้องการใช้โลหิตจำนวนมากสำหรับช่วยเหลือผู้ป่วย ผู้ประสบอุบัติเหตุ การผ่าตัดและเก็บสำรองไว้ใช้ในยามฉุกเฉินในโรงพยาบาลต่างๆ ทั้งของรัฐบาลและเอกชน การจัดหาโลหิตให้เพียงพอกับความต้องการใช้ เป็นภาระหน้าที่ความรับผิดชอบโดยตรงของศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาดไทย (National Blood Center, Thai Red Cross Society) ซึ่งเป็นองค์กรอิสระไม่หวังผลกำไร

ศูนย์ฯ ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของห่วงโซ่อุปทานโลหิตเชื่อมโยงรับโลหิตจากผู้บริจาค (Donor) ทางด้านต้นน้ำ (Upstream) ของห่วงโซ่ ทำการคัดกรอง ตรวจสอบคุณภาพให้ได้มาตรฐานความปลอดภัยสูงสุดในระดับสากล คัดแยกจัดเก็บโลหิตเป็นอย่างดี ก่อนที่จะทำการขนส่งไปถึงผู้ป่วยในโรงพยาบาลที่ปลายน้ำ (Downstream) โดยเฉลี่ยศูนย์ฯ ต้องการรับบริจาคโลหิตวันละ 1,500 ถุง สำหรับใช้ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล และสนับสนุนโรงพยาบาลในส่วนภูมิภาค

ตลอดความยาวของห่วงโซ่อุปทานโลหิต มีกิจกรรมโลจิสติกส์เกิดขึ้นมากมาย การขนส่งโลหิตออกจากศูนย์ฯ ไปถึงผู้ป่วยที่โรงพยาบาลปลายทางเป็นกิจกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญมาก การขนส่งโลหิตสามารถแบ่งเป็นสองส่วนตามพื้นที่และลักษณะการขนส่ง ได้แก่ 1) ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล และ 2) ในส่วนภูมิภาค [1] ในส่วนแรกนั้น หน้าที่การขนส่งโลหิตเป็นของโรงพยาบาลที่ร้องขอใช้โลหิตจะต้องเป็นผู้จัดรถมารับโลหิตที่ศูนย์ฯ เอง สำหรับการขนส่งในส่วนหลัง เป็นภาระหน้าที่ของศูนย์ฯ

ที่จะต้องขนส่งโลหิตไปยังยังภาคบริการโลหิตและโรงพยาบาลตามภูมิภาคต่างๆ ของประเทศ [1, 2]

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาระบบการขนส่งโลหิตโดยศูนย์ฯ ในเขตพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นจากมุมมองด้านโลจิสติกส์ และทำการออกแบบปรับปรุงระบบขนส่งโลหิตตามหลักการบริหารศาสตร์ (Management Science) ให้มีความรวดเร็วและประหยัด เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้สูงขึ้น โดยไม่ทำให้คุณภาพและมาตรฐานด้านความปลอดภัยด้อยลง

2. ทบทวนงานวิจัย

2.1 ห่วงโซ่อุปทานโลหิต

ห่วงโซ่อุปทานโลหิต เป็นขั้นตอนหรือกิจกรรมเชื่อมต่อกันตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ คือ เริ่มตั้งแต่โลหิตของผู้บริจาคโลหิตไปจนถึงผู้รับโลหิตขั้นสุดท้าย [3] ในห่วงโซ่อุปทานมีบุคลากรจำนวนมากเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ผู้บริจาคโลหิต แพทย์ พยาบาล เภสัชกร นักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ฝ่ายต่างๆ กว่าที่โลหิตจะถูกนำไปใช้งานได้จริงต้องผ่านกรรมวิธีต่างๆ มากมายหลายขั้นตอน ได้แก่ การเจาะเก็บโลหิต การคัดกรอง การแยกส่วนประกอบของโลหิต การตรวจคุณภาพ การจัดเก็บ และการจ่ายโลหิต แม้กระนั้น เมื่อโลหิตถูกส่งไปถึงโรงพยาบาลแล้ว ต้องตรวจสอบอีกขั้นหนึ่งว่าสามารถเข้ากันได้ (Cross-match) กับโลหิตของผู้ป่วยหรือไม่ จึงจะนำไปให้ผู้ป่วยได้ การทำงานในห่วงโซ่อุปทานโลหิตจึงมีความสลับซับซ้อนมากกว่าผลิตภัณฑ์ทั่วไปเป็นอย่างมาก [4] ต้องอาศัยความปราณีต ละเอียด รอบคอบสูงสุด เพราะความผิดพลาดอาจหมายถึงความเป็นความตายของผู้ป่วย

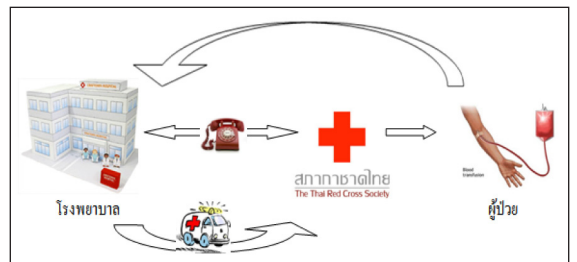
การบริหารจัดการระบบขนส่งโลหิตเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจมากในต่างประเทศ สภาวิชาชีพของประเทศไทยทำการศึกษาวิเคราะห์การขนส่ง โดยใช้การจำลองสถานการณ์สำหรับจัดตารางเวลาของรถฉุกเฉิน [5] ขณะที่ประเทศอังกฤษจะส่งรถออกไปรับบริจาคตามบริษัทหรืออุตสาหกรรม จากนั้นนำกลับมาตรวจสอบที่สภาวิชาชีพ ถ้าโลหิตและผลิตภัณฑ์จากโลหิตนั้น มีคุณภาพดีก็จะนำมาเก็บไว้ที่ธนาคารเลือดของศูนย์บริการโลหิตด้วยวิธีเข้าก่อน-ออกก่อน (First-In First-Out, FIFO) จนกระทั่งมีการร้องขอโลหิต จากโรงพยาบาล จึงนำไปกระจาย การขนส่งโลหิตจะมีแบบแผนประจำโดยอาศัยหลักการบริหารศาสตร์ที่เรียกว่า Milk Runs และการส่งด้วยรถฉุกเฉินเพื่อความเร็ว โดยมีดัชนีชี้วัดเป็นของเสีย/การหมดอายุ การขาดแคลน ด้านคุณภาพ และด้านการขนส่ง [6] เมื่อแนวโน้มความต้องการโลหิตเพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดปัญหาโลหิตขาดแคลน นักวิจัยพยายามพัฒนาตัวแบบจำลองคณิตศาสตร์ เช่น Logistic Regression Model ในการพยากรณ์จำนวนผู้บริจาค [7] การบริหารจัดการโลหิตคงจะมีการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้งาน เช่น Barcode, RFID เป็นต้น ช่วยในการติดตามข้อมูลและรายงานอุณหภูมิ มีการแจ้งเตือนอัตโนมัติเมื่อมีความผิดปกติของอุณหภูมิเกิดขึ้นที่ถุงโลหิต เพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพของโลหิตระหว่างการขนส่งไปให้โรงพยาบาล และการส่งโลหิตผิดปกติให้กับผู้ป่วย ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติของประเทศไทยก็มีการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการทำงานโลหิตให้ทันสมัยและมีประสิทธิภาพตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิชาการด้านการแพทย์และสุขภาพ แต่สำหรับการบริหารจัดการด้านโลจิสติกส์แล้ว ยังมีจุดอ่อนอยู่บ้าง

2.2 การกระจายโลหิตโดยศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ

ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภาวิชาชีพไทย จัดตั้งขึ้นเพื่อรับผิดชอบงานบริการโลหิตของประเทศ โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อจัดหาโลหิตไว้สำหรับช่วยเหลือผู้ป่วย ผู้ประสบอุบัติเหตุและเก็บสำรองไว้ใช้ในโรงพยาบาลต่างๆ

ทั้งของรัฐบาลและเอกชน พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลเป็นแหล่งจัดหาโลหิตที่สำคัญที่สุดของประเทศ ทั้งนี้เพราะว่าอัตราการบริจาคโลหิตของคนในกรุงเทพและปริมณฑลสูงกว่าจังหวัดอื่นๆ หลายเท่าตัว แต่ละปีศูนย์จัดส่งโลหิตประมาณ 43% ของที่ได้รับบริจาคทั้งหมดไปสนับสนุนภาคบริการโลหิตและโรงพยาบาลต่างๆ ในส่วนภูมิภาค [8] โรงพยาบาลที่ต้องการใช้โลหิตจากศูนย์ฯ จะต้องสมัครเป็นสมาชิกในเครือข่ายเสียก่อน

เมื่อใดก็ตามที่มีผู้ป่วยต้องการใช้โลหิต แพทย์จะทำการสั่งโลหิต โรงพยาบาลต้นสังกัดจะส่งเอกสารร้องขอใช้โลหิตไปยังศูนย์ฯ [2] สำหรับพื้นที่บริการในเขตพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล โรงพยาบาลจะต้องส่งรถไปรับโลหิตเองที่ศูนย์ฯ ซึ่งอยู่บริเวณถนนอังรีดูนังต์ รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการติดต่อขอใช้โลหิตจากศูนย์ฯ



รูปที่ 2 ขั้นตอนการขอใช้โลหิตจากศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ



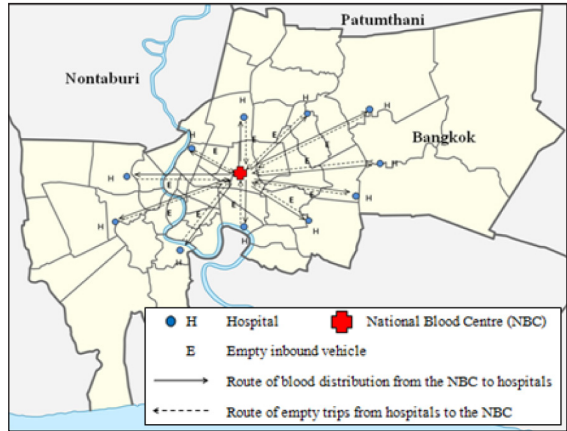
รูปที่ 3 รถที่มาจอดรอรับโลหิต ณ ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ



รูปที่ 4 เจ้าหน้าที่จากโรงพยาบาลที่รื้อรับโลหิตหน้าเคาน์เตอร์จ่ายโลหิตในศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ

ในแต่ละวันศูนย์ฯ ได้รับการร้องขอใช้โลหิตเป็นจำนวนมากจากโรงพยาบาลเครือข่ายในพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล สภาพที่เห็นอยู่เป็นประจำ ณ บริเวณห้องจ่ายโลหิตก็คือ รถจำนวนมากจากโรงพยาบาลซึ่งถูกส่งมารับโลหิต (รูปที่ 3) คนขับรถจำนวนมากที่รอคอยหน้าเคาน์เตอร์จ่ายโลหิต (รูปที่ 4) และเจ้าหน้าที่ของศูนย์ฯ ไม่กี่คนที่ต้องคอยให้บริการลูกค้าจำนวนมากในเวลาเดียวกัน

เมื่อพิจารณาจากมุมมองด้านโลจิสติกส์ จะพบว่าระบบการขนส่งที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันไม่อาจเรียกได้ว่ามีประสิทธิภาพอย่างที่ควรจะเป็น รูปที่ 5 เป็นตัวอย่างง่ายๆ สำหรับอธิบายความไม่มีประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น ในรูปนี้สมมติว่า มีโรงพยาบาลที่ต้องการใช้โลหิตเพียง 11 แห่ง โรงพยาบาลแต่ละแห่งจะต้องส่งรถไปรับโลหิตเอง ทำให้มีรถวิ่งไปที่ศูนย์ฯ ทั้งสิ้น 11 คัน และต้องวิ่งเป็นจำนวน 11 เส้นทาง (ตามเส้นประ) รถเหล่านี้เกือบทั้งหมดจะเป็นรถเปล่ามิได้บรรทุกอะไรทั้งสิ้น (ตัวอักษร E) เมื่อได้รับโลหิตแล้ว จากกลับจึงบรรทุกโลหิตกลับไปยังโรงพยาบาล ดังนั้นทุกครั้งที่วิ่งไปรับโลหิตจะมีเที่ยวเปล่าเกิดขึ้นหนึ่งเที่ยวเสมอ ส่วนการวิ่งรถจากกลับนั้นก็เป็นการวิ่งรถเกือบจะเที่ยวเปล่าเช่นกัน เนื่องจากบรรทุกโลหิตจำนวนเพียงน้อยนิดเมื่อเทียบกับความจุและปริมาตรของรถขนส่ง โดยรวมแล้วจึงมีจำนวนเที่ยววิ่งรถที่สูญเปล่ามากถึง 11 เที่ยว



รูปที่ 5 ลักษณะการกระจายโลหิตโดยศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ

ในสภาวะความเป็นจริง อาจจะมีโรงพยาบาลขอใช้โลหิตจากศูนย์มากถึง 100 แห่งต่อวัน ความสิ้นเปลืองที่เกิดขึ้นจริงจะมากกว่าในตัวอย่างนี้หลายเท่าตัว โดยค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นมาจากค่าใช้จ่ายในการใช้รถ ค่าจ้างพนักงานขับรถ ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง และค่าเสียโอกาส [2] ที่สำคัญคือรถขนส่งเหล่านี้ส่วนมากเป็นรถพยาบาล ซึ่งมีคุณค่ามากกว่ารถขนส่งสินค้าทั่วไปดังนั้นเพื่อช่วยปรับปรุงระบบการกระจายโลหิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์และออกแบบระบบการขนส่งโลหิตเสียใหม่ อาศัยหลักการบริหารศาสตร์และแนวคิดทางธุรกิจผสมผสาน เปลี่ยนแนวคิดจากการมารับ (Pick-up) โลหิตที่ศูนย์ฯ เป็นการไล่เวียนไปส่ง (Delivery) โลหิตให้กับโรงพยาบาลทุกแห่งที่อยู่ตามเส้นทางร่วมกัน โดยศูนย์ฯ จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระจายโลหิต (Distribution Center, DC) เพื่อเป็นการลดเที่ยวการขนส่งให้น้อยลง และลดความแออัดของลานจอดรถที่ศูนย์ฯ และความคับคั่งของบริการหน้าเคาน์เตอร์ห้องจ่ายโลหิต เป็นการประหยัดทรัพยากรและยกระดับคุณภาพการให้บริการโลหิต

2.3 แนวทางวิเคราะห์ออกแบบการขนส่งโลหิต

สภาพปัญหาที่เกิดขึ้นกับการขนส่งโลหิตของศูนย์ฯ

มีลักษณะคล้ายคลึงมากกับปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง (Vehicle Routing Problem, VRP) ซึ่งสามารถเขียนเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้ แต่การแก้ปัญหาก็เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ไม่อาจทำได้ หรือถ้าแก้ได้บ้างก็ต้องใช้เวลานานมาก ไม่ทันต่อการใช้งาน ทางเลือกที่จำเป็นและยอมรับกันอย่างแพร่หลายคือ การหาคำตอบแบบประมาณ (Approximation Methods) ด้วยวิธีฮิวริสติก (Heuristic) แบบต่างๆ ซึ่งถึงแม้ว่าจะไม่ได้รับคำตอบที่ดีที่สุด แต่ก็ช่วยให้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด (Near Optimal Solution) ในเวลาอันรวดเร็ว ทำให้การทำงานดำเนินต่อไปได้อย่างไม่ติดขัด วิธีฮิวริสติกเป็นวิธีที่ขาดมุมมองที่กว้างไกล เนื่องจากมุ่งหวังที่จะแก้ปัญหาเฉพาะหน้าเป็นหลัก ดังนั้นในทางปฏิบัติวิธีฮิวริสติกบางอย่าง ก็ไม่สามารถแก้ปัญหาให้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดได้ เนื่องจากมีข้อด้อย เช่น วิธี Sweep Approach จะไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ดี หากศูนย์กระจายสินค้าไม่ได้ตั้งอยู่ใจกลางกลุ่มลูกค้า [9]

วิธี Nearest Neighborhood เมื่อจัดเส้นทางจนถึงจุดส่งสุดท้ายแล้วก็ต้องเชื่อมเส้นทางกลับมายังที่ศูนย์ ซึ่งในบางครั้งระยะทางช่วงสุดท้ายนี้ยาวไกลมากจนทำให้คำตอบที่ได้ไม่มีคุณภาพ สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีฮิวริสติกที่เรียกว่า Saving Algorithm ซึ่งเสนอโดย Clarke and Wright [10] เนื่องจากเป็นวิธีการจัดเส้นทางขนส่งที่เรียบง่ายใช้ได้ผลดีกับปัญหาขนาดใหญ่มีจำนวนลูกค้ามาก (โรงพยาบาล) เช่นงานวิจัยนี้ ใช้เวลาในการประมวลผลหาคำตอบน้อย ได้รับความนิยมนยอมรับกันอย่างแพร่หลายมาเป็นระยะเวลานานสามารถนำไปเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ไม่ยาก จึงมีความสะดวกและสามารถประยุกต์ใช้งานได้จริง

3. เปรียบวิธีวิจัย

3.1 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษา วิเคราะห์และออกแบบระบบการขนส่งโลหิตของศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ กับโรงพยาบาลเครือข่ายภายในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

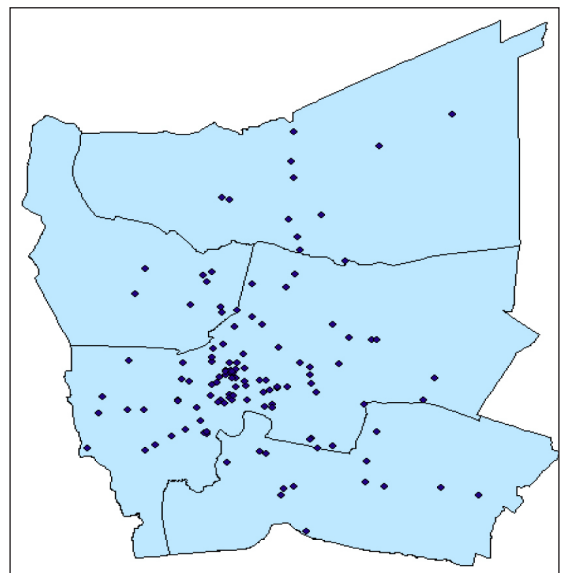
ซึ่งมีสมาชิกโรงพยาบาลทั้งหมด 131 แห่งรูปที่ 6 แสดงการกระจายของตำแหน่งโรงพยาบาลในเครือข่ายบนแผนที่ดิจิทัลของระบบภูมิศาสตร์สารสนเทศ

3.2 ข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) ข้อมูลปฐมภูมิ ได้แก่ ลักษณะของบรรจุภัณฑ์โลหิต วิธีการขนส่ง ประเภทและชนิดของยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งโลหิต ซึ่งบ่งบอกถึงขีดความสามารถในการบรรทุก และอัตราการใช้พลังงานเชื้อเพลิง ที่ตั้งของโรงพยาบาลที่ร้องขอใช้โลหิต เส้นทางขนส่ง พฤติกรรมการขนส่ง เช่น เวลาการเข้ารับบริการ ความหนาแน่น แหล่งของข้อมูลส่วนมากได้มาจากการสังเกตเอง และการสอบถามจากเจ้าหน้าที่ของศูนย์ฯ และผู้ที่มารับโลหิต

2) ข้อมูลทุติยภูมิ ได้แก่ ลักษณะเนื้อหาในแบบฟอร์มขอใช้โลหิต สถิติการขอใช้โลหิต รายชื่อโรงพยาบาล สมาชิกแผนที่ดิจิทัล แหล่งของข้อมูลได้มาจากการรวบรวมวารสาร หนังสือ เว็บไซต์ รายงานวิจัย บทความวิชาการทั้งในและต่างประเทศ คู่มือการทำงาน และหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 6 ตำแหน่งโรงพยาบาลเครือข่ายภายในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

3.3 ตัวแบบคณิตศาสตร์และวิธีการแก้ปัญหา

การออกแบบระบบการขนส่งโลหิตโดยการจัดเส้นทางขนส่งให้มีเที่ยววิ่งน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เป็นปัญหา VRP ที่น่าสนใจมาก ปัญหาลักษณะนี้สามารถประยุกต์กับงานจริงมากมายในทางธุรกิจ และเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าเป็นปัญหาคณิตศาสตร์ที่ยากมากต่อการแก้ปัญหาให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีฮิวริสติก Saving Algorithm ของ Clarke and Wright [10] ในการหาคำตอบ

Saving Algorithm พยายามรวมลูกค้า(โรงพยาบาล) หลายๆ รายให้เข้ามาอยู่ในเส้นทางเดียวกันให้มากที่สุด ครอบคลุมเท่าที่รถยังสามารถบรรทุกได้ การตัดสินใจว่าควรจะรวมเอาโรงพยาบาลหนึ่งๆ เข้ามาในเส้นทางเดียวกันหรือไม่ พิจารณาเปรียบเทียบต้นทุนรวม (ระยะทาง) ระหว่างการแวะไปส่งโลหิตให้กับโรงพยาบาลเพิ่มขึ้น กับการวิ่งกลับมายังศูนย์โดยทันทีหากพบว่าการแวะส่งโลหิตทำให้ต้นทุนรวมลดลง (Saving) ก็ให้รวมโรงพยาบาลดังกล่าวเข้าในเส้นทางขนส่งเดียวกัน Saving Algorithm จึงเป็นการเชื่อม 2 โรงพยาบาลเข้าสู่เส้นทางเดียวกันให้ได้มากที่สุดแทนการแยกกันส่งคนละเส้นทาง (หรือคนละเที่ยวนั่นเอง) หลักการคำนวณของ Saving Algorithm มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

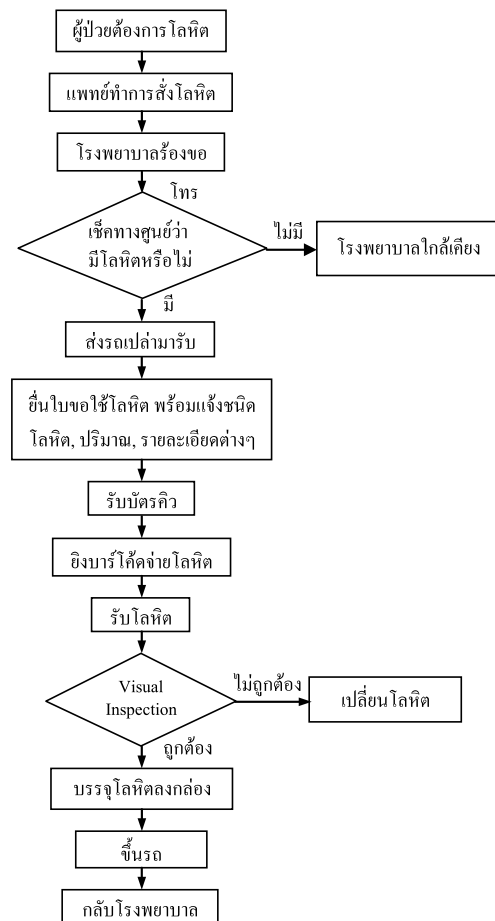
- 1) เลือกตำแหน่งที่เป็นศูนย์กลางกระจายโลหิต (Distribution Center) แล้วกำหนดเป็นจุดส่งที่ 0 ในที่นี้คือ ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาตินั่นเอง
- 2) คำนวณค่าการประหยัดที่จะผนวกเป็นเส้นทางเดียวกันของคู่โรงพยาบาล i ใดๆ ไปยังโรงพยาบาล j ใดๆ (S_{ij}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $C_{oi} + C_{oj} - C_{ij}$ ทั้งนี้ C หมายถึง ต้นทุนค่าขนส่ง
- 3) เรียงลำดับค่าการประหยัด (S_{ij}) ที่คำนวณได้จากมากไปน้อย
- 4) เลือกค่าการประหยัดมากที่สุดจากคู่โรงพยาบาล i และ j โดยที่ i และ j ต้องไม่ซ้ำกัน จากนั้นสร้างเส้นทางย่อยโดยเชื่อมโรงพยาบาล i และ j เข้าด้วยกัน
- 5) ทำการคำนวณตามข้อ 3) และ 4) ซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งครบทุกโรงพยาบาลที่มาขอรับโลหิต

ในที่สุดจะได้ผลลัพธ์เส้นทางขนส่งซึ่งครอบคลุมทุกโรงพยาบาลตามที่ต้องการ

4. ผลการวิจัย

4.1 ปริมาณความต้องการใช้โลหิต

กระบวนการกระจายโลหิตนั้น เริ่มจากผู้ป่วยมีความต้องการใช้โลหิต แพทย์จึงทำการสั่งโลหิตผ่านทางโรงพยาบาลต้นสังกัดให้ร้องขอโลหิตไปยังศูนย์ฯ ตามแบบฟอร์มที่กำหนด ศูนย์ฯ ทำการตรวจสอบกับคลังว่ามีโลหิตเพียงพอให้เบิกจ่ายหรือไม่ หากมีพอ โรงพยาบาลจะจัดส่งรถไปยังศูนย์ฯ เพื่อรับโลหิตที่ห้องจ่ายโลหิต ผู้ที่มารับโลหิตจะยื่นเอกสารใบขอใช้โลหิต จากนั้นรอกวีเรียกชื่อ รูปที่ 7 แสดงขั้นตอนทั้งหมดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 7 ขั้นตอนการรับ - จ่ายโลหิตของศูนย์ฯ และโรงพยาบาลเครือข่าย

เมื่อถึงคิว ผู้ที่มารับโลหิตจะนำภาชนะมาบรรจุ โดยเจ้าหน้าที่ของศูนย์ฯ จะจัดเตรียมโลหิต และยิงบาร์โค้ดจ่ายให้กับผู้ที่มารับ จากนั้นตรวจสอบว่าได้รับโลหิต และผลิตภัณฑ์ของโลหิตตรงตามที่ขอมาหรือไม่ พร้อมทั้งตรวจสอบทางกายภาพ เช่น จำนวนโลหิต การรั่วของถุง เป็นต้น โลหิตที่ได้รับไปแต่ละครั้งอาจจะไม่เพียงพอกับความต้องการหรือเท่ากับยอดโลหิตที่ร้องขอมา เนื่องจากศูนย์ฯ ต้องสำรองไว้สำหรับโรงพยาบาลอื่นๆ หรือในกรณีฉุกเฉิน ขึ้นอยู่กับการพิจารณาของเจ้าหน้าที่จ่ายโลหิตของศูนย์ฯ เมื่อได้รับโลหิตเรียบร้อยแล้ว นำโลหิตกลับไปยังโรงพยาบาลต้นสังกัด เพื่อใช้รักษาผู้ป่วยต่อไป

ตารางที่ 1 ปริมาณความต้องการโลหิต

วัน/เดือน/ปี	จำนวนโรงพยาบาล	จำนวนเที่ยว	จำนวนโลหิต (ถุง)	ระยะทาง (กม.)
06/07/53	72	75	2,324	1,957
07/07/53	84	94	2,453	2,520
08/07/53	83	92	2,465	2,599
09/07/53	80	89	2,417	2,534
10/07/53	69	75	1,577	1,884
11/07/53	54	62	1,176	1,317
12/07/53	78	87	2,824	2,224
รวม	520	574	15,236	15,035
เฉลี่ย	74	82	2,176	2,148

ในแต่ละวัน มีรถจำนวนมากจากโรงพยาบาล เครือข่ายมารับโลหิตที่ศูนย์ฯ และมีจำนวนเที่ยวไม่เท่ากัน โรงพยาบาลบางแห่งอาจส่งรถมารับโลหิตมากกว่าหนึ่งเที่ยวต่อวัน จากการเก็บข้อมูลระหว่างวันที่ 6 – 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2553 สรุปได้ว่าจำนวนโรงพยาบาล จำนวนเที่ยวรถ และปริมาณความต้องการใช้โลหิตเป็นไปตามตารางที่ 1 ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้ว ในแต่ละวันจะมีโรงพยาบาล 74 แห่งขอใช้โลหิต คิดเป็น 82 เที่ยววิ่ง ศูนย์ฯ ต้องจ่ายโลหิต 2,176 ถุง นอกจากนี้ ยังทำการบันทึกเวลารอคอยรับโลหิต ซึ่งพบว่าโดยเฉลี่ยต้องรอนานถึง 56 นาที/คัน หรือรวมทั้งสิ้น

4,592 นาทีต่อวัน (ประมาณ 82 ชั่วโมง) การออกแบบระบบขนส่งที่ดี จะสามารถช่วยลดความสูญเสียนี้ได้มาก

4.2 การออกแบบปรับปรุงระบบการขนส่งโลหิต

Saving Algorithm ต้องการข้อมูลป้อนเข้า 4 ประการ ได้แก่ ตำแหน่งของศูนย์กลางการกระจาย (ในที่นี้ คือ ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ) ระยะทางระหว่างศูนย์ฯ และโรงพยาบาลทั้งหลาย หรือ Travel Distance Matrix ปริมาณความต้องการใช้โลหิต และความจุของรถงานวิจัยนี้ใช้ฐานข้อมูลแผนที่ดิจิทัลจากชุดข้อมูลพื้นฐานเชิงพื้นที่ด้านเส้นทางคมนาคม (Transport Fundamental Geographic Data Set, TFGDS) ของสำนักงานปลัดกระทรวงคมนาคม เมื่อกำหนดข้อมูลรายละเอียดตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์ฯ และโรงพยาบาลเครือข่ายทั้งหมดลงบนแผนที่ดิจิทัลแล้ว สามารถคำนวณ Travel Distance Matrix, d_{ij} ได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ระบบภูมิสารสนเทศ (Geographic Information System, GIS) ArcMap รุ่น 9.3 ผลลัพธ์ที่ได้ คือ ระยะทางที่สั้นที่สุดตามโครงข่ายถนนระหว่างจุด (ศูนย์ฯ หรือโรงพยาบาล) i และ j ใดๆ ตารางที่ 2 แสดงลักษณะตัวอย่างของผลลัพธ์ โดยการสมมุติว่าต้นทุนค่าขนส่ง C แปรผันตามระยะทางในที่นี้จึงใช้ d_{ij} เป็นตัวแทนของต้นทุนค่าขนส่ง C

ตารางที่ 2 ระยะทางตามโครงข่ายถนนระหว่างศูนย์ฯ และโรงพยาบาลในเครือข่าย (หน่วยเป็นเมตร)

d_{ij}	ปลายทาง	0	1	..	131
เริ่มต้น	สถานที่	ศูนย์ฯ	001001	:	104206
0	ศูนย์ฯ	0	163	..	18,870
1	001001	377	0	..	18,930
..	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	..
131	104206	18,863	19,134	..	0

โดยกำหนดให้

ศูนย์ฯ = ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ (0)

001001 = โรงพยาบาลที่ 1

001101 = โรงพยาบาลที่ 2

...

104206 = โรงพยาบาลที่ 131

สำหรับข้อมูลปริมาณความต้องการใช้โลหิตของแต่ละโรงพยาบาลได้มาจากการสำรวจภาคสนามและสรุปไว้ในตารางที่ 1 ในการวิเคราะห์จะกำหนดให้ใช้รถตู้เป็นรถขนส่งต้นแบบ ซึ่งสามารถบรรทุกโลหิตได้ไม่เกิน 600 ถัง

ข้อมูลทั้งหมดถูกบันทึกเป็นฐานข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Access ในส่วนของการพัฒนา Saving Algorithm นั้น เขียนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษา Visual Basic 2008 ออกแบบให้มีส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (User Interface) ที่เข้าใจง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน ลักษณะของโปรแกรมที่ออกแบบแสดงไว้ในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นหน้าจอของโปรแกรมสำหรับการป้อนข้อมูลพื้นฐานก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ห่ออกแบบจัดเส้นทางขนส่ง ในหน้าจอนี้ผู้ใช้สามารถเลือกโรงพยาบาลที่ต้องการกระจาย

โลหิต กำหนดปริมาณความต้องการและข้อจำกัดต่างๆ เช่น ระยะทางขนส่งไกลที่สุดของแต่ละเส้นทาง ข้อจำกัดด้านน้ำหนักบรรทุกทุก จำนวนจุดส่งตลอดเส้นทาง ได้ตามต้องการ ทำให้มีความยืดหยุ่นมากต่อการใช้งาน

เมื่อใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้คำนวณมูลค่าการประหยัด S_{ij} ซึ่งวัดในหน่วยของระยะทาง (d) จะได้ผลลัพธ์ตามตัวอย่างที่แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการคำนวณค่าการประหยัด, เมต

คู่ โรงพยาบาล	d_{oi} (เมตร)	d_{jo} (เมตร)	d_{ij} (เมตร)	S_{ij} (เมตร)
$S_{1,2}$	913	4,780	3,153	2,540
$S_{1,3}$	913	4,016	3,259	1,670
..	..	..	..	..
..	..	..	..	..
..	..	..	..	..
$S_{131,129}$	19,751	28,557	33,130	15,178
$S_{131,130}$	19,751	41,997	47,832	13,916

โปรแกรมจัดเส้นทางการขนส่งโลหิต

ไฟล์ข้อมูล | แก้ไขข้อมูล | บันทึกการตั้งค่าการแก้ไข | สถานะบันทึก Saving Time

เลือกโรงพยาบาล | ไม่เลือกทั้งหมด

เลือก	Demand	รหัสโรงพยาบาล	รหัส	ชื่อโรงพยาบาล
☐		001001	1	โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์
☐		001101	2	โรงพยาบาลบำรุงราษฎร์
☐		001102	3	โรงพยาบาลพญาไท 1
☐		001103	4	โรงพยาบาลพญาไท 2
☐		001104	5	โรงพยาบาลรามาธิบดี 1
☐		001105	6	โรงพยาบาลสมิติเวช สุขุมวิท
☐		001106	7	โรงพยาบาลกรุงเทพ
☐		001107	8	โรงพยาบาลเปาโล พหล
☐		001108	9	โรงพยาบาลเซนต์หลุยส์
☐		001109	10	โรงพยาบาลศิริเวียง

Delivery Constraints

Maximum distance 100 km.

Loading capacity 100 units

Number of hospital 131 stops

Distribution Expense

Per unit 10 bath/unit

Per distance 10 bath/km.

คำนวณ

รูปที่ 8 โปรแกรมการจัดเส้นทางขนส่งโลหิต

ตัวอย่างของการจัดเส้นทางรถขนส่งโลหิตสำหรับวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2553 โดยวิธีฮิวริสติก Saving Algorithm แสดงไว้ในตารางที่ 4 ซึ่งสรุปได้ว่าหากนำระบบขนส่งที่ออกแบบนี้ไปใช้งานในวันดังกล่าว จะต้องขนส่งโลหิตทั้งสิ้นเพียง 17 เที่ยว ระยะทางขนส่งรวม 793 กม. กลุ่มของโรงพยาบาลบนเส้นทางต่างๆ แสดงไว้อย่างละเอียดในตาราง

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์การจัดเส้นทางรถขนส่งโลหิต

เส้นทางที่	เส้นทาง	ระยะทางรวม (เมตร)
1	0-105-114-104-109-47-0	98,444
2	0-65-56-73-63-46-0	57,588
3	0-78-106-107-110-57-0	98,821
4	0-121-124-128-116-126-0	96,895
5	0-35-58-36-61-115-0	44,770
6	0-11-38-86-50-66-0	60,632
7	0-102-100-99-31-0	52,434
8	0-30-58-124-122-28-0	36,700
9	0-17-103-97-24-82-0	61,646
10	0-13-52-40-123-39-0	56,066
11	0-6-22-19-30-0	19,077
12	0-120-93-16-91-74-0	29,538
13	0-76-79-70-68-4-0	13,511
14	0-85-84-33-83-0	32,491
15	0-81-3-92-2-0	10,929
16	0-14-69-25-0	6,119
17	0-71-20-10-9-0	17,665
ระยะทางรวม		793,326

หากเปรียบเทียบกับสภาพการขนส่งที่เกิดขึ้นจริงเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2553 ซึ่ง 84 โรงพยาบาล ในเครือข่าย (จากตารางที่ 1) ต้องส่งรถมายังศูนย์ฯ เพื่อรับโลหิต ระยะทางการวิ่งรถทั้งหมดสูงถึง 2,520 กม. เมื่อเทียบกับระบบขนส่งที่มีการจัดเส้นทางเสียใหม่ เห็นได้ชัดเจนว่ามีความประหยัดกว่ามาก จำนวนเที่ยววิ่งรถน้อยลงไป 67 เที่ยว ประหยัดระยะทางการขนส่งได้มากถึง

1,727 กม. หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการทำงานที่เพิ่มขึ้น 68.53% เห็นได้ชัดว่าหากมีการวิเคราะห์ออกแบบระบบขนส่งโลหิตเสียใหม่ จะสามารถช่วยลดต้นทุนการขนส่งโลหิตได้อย่างมาก และช่วยให้ประเทศชาติประหยัดพลังงานในภาคการขนส่งอีกด้วย

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาโซ่อุปทานโลหิตของศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาดไทย พบว่าระบบการขนส่งโลหิตที่ปฏิบัติกันอยู่ในปัจจุบันยังสามารถปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้อีกมาก การที่แต่ละโรงพยาบาลต้องวิ่งรถเที่ยวเปล่ามารอรับโลหิตไปจากศูนย์ฯ เสียทั้งเงิน เวลา และโอกาสในการนำรถขนส่งซึ่งส่วนมากเป็นรถพยาบาลไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น งานวิจัยนี้ใช้ความรู้ด้านบริหารศาสตร์และแนวคิดทางธุรกิจโลจิสติกส์มาออกแบบระบบขนส่งโลหิตให้มีจำนวนเที่ยวการขนส่งน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แทนที่แต่ละโรงพยาบาลจะต้องส่งรถมารับโลหิตเอง เปลี่ยนเป็นการกระจายโลหิตออกจากศูนย์กลางไปให้โรงพยาบาลต่างๆ ที่อยู่ตามเส้นทางร่วมกัน โดยจำลองปัญหาการขนส่งที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาการจัดเส้นทางและวิเคราะห์ด้วยวิธีฮิวริสติก Saving Algorithm ผลการทดสอบด้วยข้อมูลจริงพบว่าสามารถลดจำนวนเที่ยววิ่งขนส่งได้เป็นจำนวนมากถึง 67 เที่ยว ระยะทางขนส่งรวมลดลง 1,727 กม. เมื่อนำไปใช้งานจริงย่อมสามารถลดต้นทุนการขนส่งได้อย่างแน่นอน

6. ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ มุ่งมั่นที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของกิจกรรมต่างๆ ตลอดห่วงโซ่อุปทานโลหิตฯ ได้ดำเนินการไปหลายแผนงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่เป็นกิจกรรมโลจิสติกส์ภายในองค์กร เช่น การจัดเก็บ การควบคุมคุณภาพ ซึ่งศูนย์ฯ สามารถบริหารจัดการได้อย่างมีมาตรฐาน ส่วนหนึ่งคงเป็นเพราะว่าบุคลากรมีความรู้ความสามารถตรงกับลักษณะงานที่เกี่ยวข้องกับด้านการแพทย์และวิทยาศาสตร์สุขภาพ อย่างไรก็ตาม

สำหรับงานด้านการขนส่งโลหิตนั้น เป็นศาสตร์ที่ต้องเรียนรู้เพิ่มทำให้การพัฒนาเป็นไปอย่างช้าๆ ประกอบกับภาระหน้าที่ความรับผิดชอบขนส่งโลหิตในเขตพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑลนั้น เป็นของโรงพยาบาลในเครือข่าย ค่าใช้จ่ายมิได้เกิดกับศูนย์ฯ โดยตรง ความเร่งรีบในการปรับปรุงจึงอาจจะไม่มากเท่าที่ควร เนื่องจากความประหยัดที่เกิดขึ้นไม่ได้ติดอยู่กับศูนย์ฯ แต่เป็นของโรงพยาบาล ศูนย์ฯ เองก็ไม่มีบุคลากรที่เกี่ยวข้องด้านการขนส่ง ดังนั้นแนวทางในการลงทุนจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ ทางออกที่ดีที่สุด อาจจะเป็นการให้โรงพยาบาลในเครือข่ายร่วมกันรับผิดชอบมูลค่าการลงทุนในระบบที่ออกแบบไว้ และว่าจ้างบริษัทขนส่งหรือโลจิสติกส์ที่มีความชำนาญรับไปดำเนินการ ซึ่งหากเป็นเช่นนี้ ศูนย์ฯ ก็ไม่จำเป็นต้องรับภาระค่าใช้จ่ายในการลงทุน และทำให้ระบบที่ออกแบบไว้มีความเป็นไปได้สูงในการนำไปปฏิบัติ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจาก สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และมหาวิทยาลัยมหิดล ภายใต้โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ขอบพระคุณแพทย์หญิงสร้อยสอางค์ พิภูสสดี ผู้อำนวยการ นาวาโท แพทย์หญิง อุบลวัฒน์ จรูญเรืองฤทธิ์ รองผู้อำนวยการ และเจ้าหน้าที่ของศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาดไทยทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและความร่วมมือเป็นอย่างดีซึ่งระหว่างการทำวิจัยรวบรวมข้อมูลภาคสนาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] พรชนก โพธิ์บัณฑิตย์, สมชาย ปฐมศิริ, 2554. การวิเคราะห์รูปแบบและต้นทุนการกระจายโลหิตในประเทศไทย. **การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการแห่งชาติ 2010**. 16 – 17 ธันวาคม 2553.
- [2] ปกัสนร สุชาบุรณ์, สมชาย ปฐมศิริ, 2554. ประเด็นปัญหาและแนวคิดในการปรับปรุงประสิทธิภาพการกระจายโลหิตในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล กรณีศึกษาของศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาดไทย. **การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการแห่งชาติ 2010**. 16 – 17 ธันวาคม 2553.
- [3] Ryttila, J.S., Spens, K.M., 2006. Using simulation to increase efficiency in blood supply chain. **Management Research News**, 29 (12): 801-819.
- [4] Sime S.L., 2005. Strengthening the service continuum between transfusion providers and suppliers: enhancing the blood services network. **Transfusion**, 45 (October): 206 – 223.
- [5] Koch, O., Weigl, H., 2003. Modeling ambulance service of the Austrian Red. **Proceeding of the 2003 Winter Simulation**. [online] Available: <http://www.informs-sim.org/wsc03papers/217.pdf> (1 December 2011).
- [6] Katsaliaki K., 2008. Cost-effective practices in the blood service sector. **Health Policy**, 86: 276 – 287.
- [7] Bosnes V., Aldrin M., Heier H.E., 2005. Predicting blood donor arrival. **Transfusion**, 45 (February): 162 – 170.
- [8] Nuchprayoon, C., 2010. National Blood Centre: Dream and reality, **National Annual Scientific Conference on Transfusion Medicine**, (March): 1 - 9.
- [9] Laporte G., Gendreau M., Potvin J., Semet F., 2000. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. **International Transactions in Operational Research**, 7: 285 – 300.
- [10] Clarke, G., and J. W. Wright (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. **Operations Research** 4 (12): 568 - 581.

ออกแบบและสร้างเครื่องคั่วงอก

Design and fabrication of a germinated sesame roaster

สุนัน ปานสาคร¹ จตุรงค์ ลังกาพินธุ์¹ ศิริรัตน์ ทัดแก้ว² วรรณิกา ชั่งฮี² ธวัชชัย วงษ์ชมพู²

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ออกแบบและสร้างเครื่องคั่วงอกแบบถังหมุนความจุ 1 กิโลกรัม ตัวเครื่องประกอบด้วย ถังคั่วทรงกระบอก แบบสองชั้นภายในกรุด้วยฉนวนใยหินกันความร้อน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.4 เซนติเมตร และยาว 35.5 เซนติเมตร แหล่งพลังงานความร้อนเป็นฮีตเตอร์แบบครีป ขนาด 1,000 วัตต์ จำนวน 2 หลอด ติดตั้งฝังตรงข้าม เพื่อการกระจายพลังงานนอกจากนี้ภายในติดตั้งตะแกรงคั่วขึ้นรูปทรงกระบอกทำจากสแตนเลสขนาดรูตะแกรง 0.5 มิลลิเมตร ขั้นตอนการออกแบบเครื่องคั่วงอกมีพื้นฐานจากการทดลองคั่วงอกในกระทะให้ความร้อนก่อน และทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องคั่วงอก โดยพิจารณาคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและโภชนาการของเมล็ดงอกที่ได้ ซึ่งพบว่าเครื่องคั่วสามารถสร้างความร้อนได้มากกว่า 100 °ซ และสามารถควบคุมอุณหภูมิของเมล็ดงอกในขณะที่ทำการคั่วที่ระดับต่างๆ ให้มีความสม่ำเสมอได้ ตัวตะแกรงคั่วสามารถปรับความเร็วรอบได้ตั้งแต่ 1- 21 รอบต่อนาที ความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการคั่วเมล็ดงอกคือ 16 รอบต่อนาที กรณีการทดสอบการคั่วเมล็ดงอกที่ระดับอุณหภูมิ 100 °ซ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้สุกพอดี เมล็ดเต่ง และมีกลิ่นหอม นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการคั่วให้นานขึ้นส่งผลต่อการลดลงของความชื้น ค่าความขาว ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a-value) ค่าความเป็นสีเหลือง (b-value) และค่าความเป็นสีน้ำตาล (Browning index) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง หากพิจารณาปริมาณสาร GABA พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการคั่วสูงขึ้นและเวลานาน อย่างไรก็ตามบนพื้นฐานของกระบวนการคั่วพบว่า ปริมาณสาร GABA ในเมล็ดงอกหลังการคั่ว ยังคงสูงกว่าเมล็ดงอกที่ไม่ผ่านการคั่ว

คำสำคัญ : เครื่องคั่วงอก งอก สารกาบา การคั่ว

Abstract

This research is to design and fabrication of a germinated sesame rotary roaster which has a capacity of 1 kg. The roaster is constructed using double wall cylindrical chamber and wrapped with rockwool. The outer dimensions of the roaster are 38.4 cm diameter and 35.5 cm length. Two 1000 Watt are using for the energy source and installed opposite of the rotary roaster. In addition, cylindrical material chamber is fabricated by stainless wire mesh of 0.5 mm diameter. Ideally, the roaster concept was prior estimated using conventional criterion based on pan roasting which is considering of the physical and nutrition properties of germinated sesame seed. The results are shown that, the roaster could be heated up over 100°C and the temperature could be also controlled at steady state during roasting process. The rolling speed could be adjusted at the range of 1-21 rpm. It was noted that the best speed of the roasted germinated

¹ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

sesame was 16 rpm. Regarding the experiment at 100°C of the roasting temperature, germinated sesame seeds provided a good quality and flavor. Besides, the moisture content and whiteness values were decreased with roasting time increased, while color value (a-value and b-value) and browning index (BI) of germinated sesame seeds were no difference. The trend of GABA content of germinated sesame seeds was declined with higher and longer of roasting temperature and time, respectively. However, the GABA content of the germinated sesame seeds was higher than sesame seeds without germination.

Keywords : Sesame roasting machine, Germinated sesame seeds, GABA, Roasting

1. คำนำ

ปัจจุบันกระแสความนิยมเกี่ยวกับการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพเพิ่มมากขึ้นซึ่งหนึ่งในนั้น คือ “ข้าวกล้องงอก” ในข้าวกล้องงอกจะมีคุณค่าทางอาหารสูง มีสารต้านอนุมูลอิสระ และยังมีกรดกาบาหรือสารกาบา ซึ่งจะช่วยในการป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง และโรคเบาหวาน เป็นต้น [1-3] ถึงแม้กระแสการบริโภคข้าวกล้องงอกกำลังเป็นที่นิยม แต่มีข้อพิพาทหนึ่งที่ไม่ควรมองข้าม และน่าจะมาทดแทนข้าวกล้องงอกได้เป็นอย่างดี นั่นคือ “งา” งาเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญสามารถปลูกได้ทุกภาคของประเทศไทย [4] นอกจากนี้ยังเป็นพืชที่มีขนาดเมล็ดเล็กมากอุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการ เช่น วิตามินบี ธาตุเหล็ก ไอโอดีน สังกะสี ทองแดง แคลเซียม ฟอสฟอรัส โปตัสเซียม โยอาหาร ที่สำคัญปริมาณแคลเซียมในงามีสูงกว่านมถึง 3 เท่า เมื่อเทียบในปริมาณที่เท่ากัน [5] การบริโภคงาจะช่วยในการป้องกันโรคคอพอกบำรุงเลือดบำรุงผิวหนังและบำรุงกระดูกและฟัน เป็นต้น รวมถึงในเมล็ดมีน้ำมันเป็นส่วนประกอบประมาณ 45-50 % [6,7]

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผลของกระบวนการงอกของเมล็ดธัญพืชสามารถช่วยเพิ่มคุณค่าทางอาหารมากขึ้น เช่น การเพิ่มของสารกาบาในข้าวกล้องงอก รวมถึงเมื่อเมล็ดธัญพืชผ่านกระบวนการงอกแล้วยังส่งผลดีในแง่ของคุณลักษณะทางกายภาพที่ดีขึ้น [8,9] ดังนั้นนักวิจัยจึงได้ทดลองผลิตงาออกขึ้น ซึ่งการบริโภคของคนไทยนิยมนำมาคั่วก่อนเพื่อเพิ่มความหอมและเมล็ด

เต่งน่ารับประทาน หรือการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ [10] ซึ่งการคั่วมักใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงอาจส่งผลต่อคุณค่าทางอาหารของเมล็ดงาออก โดยทั่วไปแล้วเมื่อนำเมล็ดงาไปคั่วมักจะพบปัญหาเรื่องเมล็ดงาสุกไม่พร้อมกัน ทั้งนี้จึงต้องมีการคน หรือพลิกกลับเมล็ดงาตลอดเวลา ดังนั้นหากใช้แรงงานคนในการคั่วจะพบปัญหาเรื่องความเมื่อยล้า และจะคั่วได้ครั้งละไม่มาก หากคั่วโดยใช้ไฟแรงจะพบปัญหาเมล็ดงาบางส่วนสุก บางส่วนไม่สุก บางส่วนไหม้ และยังทำให้คุณค่าทางอาหารที่อยู่ในงาตกลงไปด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและสร้าง เครื่องคั่วงาออกขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว รวมถึงเพื่อให้เหมาะสมกับตัวผลิตภัณฑ์งาออก และคาดหวังว่าเมล็ดงาออกที่ผ่านการคั่วนั้นจะยังคงคุณค่าทางอาหารเช่นกัน

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เนื่องจากเมล็ดงาออกมีลักษณะที่ค่อนข้างแตกต่างจากเมล็ดงาที่ไม่ผ่านการงอก ดังนั้นการออกแบบและสร้างเครื่องคั่วงาออกนี้จึงต้องทดสอบพื้นฐานการคั่วงาออกโดยการทดลองคั่วงาออกในกระทะให้ความร้อนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมเบื้องต้นและนำมาเป็นพื้นฐานในการออกแบบเครื่องคั่วงาออกต่อไป

2.1 วัสดุทดสอบ

งาที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นงาคั่วแดงพันธุ์พื้นเมืองมีความชื้นเริ่มต้น 6.95 ± 0.15 %wb. ก่อนการทดสอบนำ

เมล็ดงาทำความสะอาดโดยแยกเมล็ดลิบและเศษสิ่งสกปรกต่างๆออก และเก็บรักษาในตู้เย็น ($4 \pm 1^{\circ}\text{C}$) จนกว่าจะนำไปใช้ ขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างงาออกโดยนำเมล็ดงาออกจากตู้เย็นวางไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 4-5 ชั่วโมง หลังจากนั้นแช่เมล็ดงาในน้ำที่อุณหภูมิห้อง ($27 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $60 \pm 5\%\text{RH}$) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ร่วมกับการบ่ม 22 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเดิม จะได้เมล็ดงาที่มีรากงอกออกมาประมาณ 2 มิลลิเมตร นำตัวอย่างงาออกที่ได้จากการทดลองนี้ ทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าสี และปริมาณกรดแกมมาแอมิโนบิวทิริก (GABA) ก่อนนำไปทดสอบกระบวนการคั่วต่อไป

2.2 การทดสอบปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์งาออกในกระบวนการคั่ว

ในการออกแบบเครื่องคั่วงาออกพบว่าปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ คือ อุณหภูมิเวลาในการคั่ว และที่สำคัญความสม่ำเสมอของงาในระหว่างการคั่ว ดังนั้นจึงได้ทดสอบเบื้องต้นโดยการนำงาออกที่ได้จากข้อ 2.1 ทำการคั่วในกระทะที่อุณหภูมิการทดสอบ 70 100 และ 130°C เวลา 25 และ 30 นาที ตามลำดับ หลังการคั่วทำการทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น การเปลี่ยนแปลงค่าสี การเปลี่ยนแปลงกรดแกมมาแอมิโนบิวทิริก (GABA) และลักษณะปรากฏของเมล็ดงาออกหลังการคั่วเปรียบเทียบกับงาก่อนคั่วและงาที่ไม่ผ่านกระบวนการงอก

2.3 การออกแบบและสร้างเครื่องคั่วงาออก

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการคั่วงาออกจากขั้นตอนที่ 2.2 นำข้อมูลดังกล่าวมาเป็นพื้นฐานในการออกแบบโดยการควบคุมปริมาณการคั่ว อุณหภูมิการคั่ว เวลาของการคั่ว และความสม่ำเสมอในการคั่ว ดังนั้นองค์ประกอบหลักของเครื่องคั่วงาออกดังแสดงในรูปที่ 1-2 ประกอบด้วย (1) ตะแกรงขึ้นรูปทรงกระบอกสำหรับใส่ตัวอย่างงาออก โดยการขึ้นรูปเป็นลอนเพื่อช่วยในการกลับหรือพลิกตัวอย่างระหว่างการคั่ว (2) แหล่งพลังงาน

ในที่นี้คือ ฮีตเตอร์ขนาด 1000 วัตต์ จำนวน 2 หลอด วางในตำแหน่งตรงข้ามเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอในการให้ความร้อน (3) ชุดควบคุม ซึ่งจะเป็นการควบคุมอุณหภูมิขณะคั่วว่า ความเร็วรอบของการหมุนถึงคั่วและเวลาในการคั่ว

2.4 การทดสอบเครื่องคั่วงาออกบนพื้นฐานปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทดสอบในเบื้องต้นจนกระทั่งเกิดการออกแบบและสร้างเครื่องคั่วงาออกดังรูปที่ 1-2 พบว่าการใช้อุณหภูมิในการทดสอบที่ต่ำเกินไปจะทำให้ใช้เวลานานในการคั่ว หรือการใช้อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้งาไหม้ก่อนที่จะสุก ดังนั้นในการทดสอบเครื่องคั่วงาจึงเลือกใช้การทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ที่น้ำหนัก ความเร็วรอบ และเวลาการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3

2.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณค่าทางโภชนาการ

2.5.1 ปริมาณความชื้น (Moisture content) ตัวอย่างเมล็ดงาชั่งน้ำหนัก 2 กรัม อบที่อุณหภูมิ 105°C 16 ชั่วโมง [11]

2.5.2 ค่าสี (Color) เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าสีคือ Color Difference Meter (Model JC801, Tokyo, Japan) รายงานผลออกมาในรูปของ L, a, b ซึ่งค่าทั้ง 3 ค่าเป็นการแสดงการวัดค่าสีเฉพาะเจาะจง ซึ่งสามารถรายงานผลด้วยค่า Browning index (BI) ซึ่งเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมทั้งหมด โดยใช้สมการ

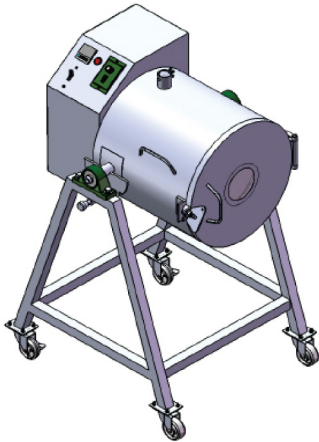
$$BI = \frac{[100(x-0.31)]}{0.17} \quad (1)$$

$$\text{โดยที่ } x = \frac{(a+1.75L)}{(5.645L+a-3.012b)} \quad (2)$$

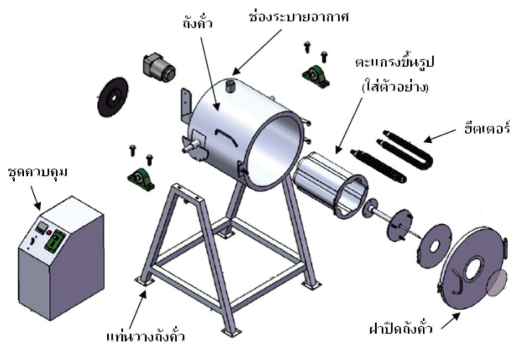
2.5.3 ปริมาณสาร GABA อ้างอิงกระบวนการทดสอบจากมาตรฐาน [12] ตัวอย่างเมล็ดงาบดด้วยเครื่องบดความละเอียด 0.5 มิลลิเมตร ก่อนนำมาสกัดด้วยแอลกอฮอล์ 50%, 50°C นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องเหวี่ยงความเร็วสูง (1350g) 20 นาที แยกส่วนใสที่ได้วิเคราะห์ค่า GABA ด้วยเครื่อง GC (Gas chromatography)

2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ระดับความแตกต่างทางสถิติ 95% (One-way analysis of variance (ANOVA)) และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธีของ Duncan New's Multiple Range Test (DMRT)



รูปที่ 1 เครื่องคั่วงาออก

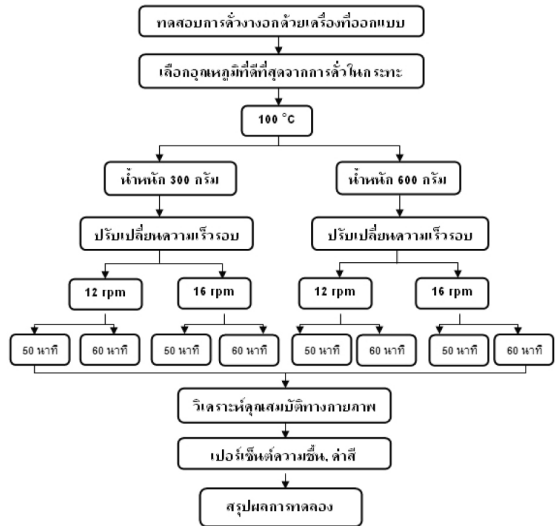


รูปที่ 2 องค์ประกอบเครื่องคั่วงาออก

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

เครื่องคั่วงาออกนี้เป็นเครื่องต้นแบบทดสอบขนาดเล็กที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับอุตสาหกรรมในครัวเรือนที่มีกำลังการผลิตประมาณ 1000 กรัม ของเมล็ดงาออกสดต่อครั้งในการคั่ว ดังนั้นการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องสามารถทำได้โดยการพิจารณาคุณภาพของผลิตภัณฑ์งาออกที่ได้หลังการคั่วด้วยเครื่องดังกล่าว ซึ่งให้ผลการ

ทดลองดังปรากฏด้านล่างนี้



รูปที่ 3 แผนการทดสอบการคั่วงาออกด้วยเครื่องคั่วงาที่สถานะต่างๆ

3.1 ผลการทดสอบผลิตภัณฑ์งาออกหลังการคั่วในกระเพาะ

การคั่วงาออกในกระเพาะ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการนำไปออกแบบเครื่องคั่วงาออก และแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 1 พบว่าเมล็ดงาออกมีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นลดลงเมื่อผ่านการคั่วที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ซึ่งที่อุณหภูมิการคั่วสูงส่งผลต่อการลดลงของความชื้น [13] และจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์งาคั่วตามแบบ มผช. งาที่ผ่านการคั่วแล้วควรมีความชื้นไม่เกิน 5%wb. ดังนั้น การคั่วงาออกที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °ซ นานกว่า 25 นาทีสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้ในช่วง 1-5%wb. ได้ ในขณะที่อุณหภูมิการคั่ว 70 °ซ เวลาการคั่วในช่วง 25-30 นาที ค่าความชื้นยังสูงกว่าค่ามาตรฐาน นอกจากนี้อุณหภูมิและเวลาในการคั่วยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความขาว (L-value) และค่าสีของเมล็ดงาออก (a-value, b-value) โดยพบว่า ค่าความขาวของเมล็ดงาออกคั่วที่อุณหภูมิ 70 °ซ เวลา 25-30 นาที ให้ค่าต่ำสุดในช่วง 24-26 และไม่แตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) เช่นเดียวกับค่าความขาวที่การคั่วอุณหภูมิ 100 °ซ เวลา 25-30 นาที พบว่าไม่แตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) เช่นกัน อย่างไรก็ตาม

ก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าความขาวของงาอกหลังคั่ว และงาอกก่อนคั่ว พบว่าการคั่วส่งผลให้ค่าความขาวลดลง และเมื่อพิจารณาค่าความเป็นสีแดง (a-value) พบว่าในทางสถิติไม่พบความแตกต่าง ($P>0.05$) ของงาทั้งก่อนและหลังคั่ว อย่างไรก็ตามค่า b-value หรือค่าความเป็นสีเหลืองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการคั่ว พิจารณาค่า BI (Browning index) มีค่าในช่วง 175-184 ที่อุณหภูมิการคั่ว 70-100 °ซ เป็นเวลา 25-30 นาที ซึ่งพบว่าในทางสถิติแล้วไม่แตกต่างกัน ($P>0.05$) นั่นคืออุณหภูมิ

ที่ใช้ทดสอบการคั่วไม่แตกต่างกันมากนักและเวลาในการคั่วไม่นานมากจนก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ดงาอกมากนักเอง อย่างไรก็ตามการคั่วที่อุณหภูมิสูง (130 °ซ) ให้ค่าสีของเมล็ดงาอกที่ค่อนข้างคล้ำ และเมล็ดงาเริ่มมีกลิ่นเหม็นไหม้ ดังนั้นที่อุณหภูมินี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการคั่วงาอก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าสีของเมล็ดงาหลังจากการคั่วขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล และการย่อยสลายของฟอสโฟลิพิดในเมล็ดงาเป็นสำคัญ [14]

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกระบวนการคั่วงาอกด้วยกระทะที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

สภาวะการทดสอบ		ค่าสี				ความชื้น
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°ซ)	L	a	b	BI	% wb.
งาไม่ผ่านการงอก		29.20 ^{bc} ±0.35	7.50 ^{ab} ±0.36	8.23 ^b ±0.15	167.72 ^{bc} ±2.03	6.95 ^c ±0.15
		34.07 ^a ±1.16	5.80 ^b ±0.35	10.07 ^{ab} ±0.40	166.41 ^c ±0.59	44.86 ^a ±0.35
25	70	24.43 ^d ±1.99	7.47 ^{ab} ±1.70	8.50 ^b ±1.56	183.82 ^{ab} ±9.53	8.11 ^b ±0.19
	100	27.27 ^{bcd} ±1.18	7.47 ^{ab} ±0.71	8.47 ^b ±0.87	174.47 ^{bc} ±5.06	4.32 ^d ±0.71
	130	30.53 ^b ±1.36	9.10 ^a ±1.83	12.13 ^a ±1.07	195.25 ^a ±6.38	2.85 ^c ±0.03
30	70	25.83 ^{cd} ±3.35	7.80 ^{ab} ±2.29	9.13 ^b ±2.60	184.37 ^{ab} ±15.78	5.14 ^d ±0.67
	100	27.90 ^{bc} ±2.38	8.13 ^{ab} ±1.19	9.80 ^{ab} ±1.91	183.96 ^{ab} ±9.96	3.26 ^c ±0.11
	130	29.60 ^b ±1.22	8.40 ^{ab} ±1.04	10.37 ^{ab} ±1.78	183.66 ^{ab} ±11.26	1.35 ^f ±0.01

^{abc} อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดย DMRT (mean ± SD)

3.2 ผลการทดสอบเครื่องคั่วงาอก

หลังจากการทดสอบการคั่วงาอกในกระทะ จนกระทั่งนำมาซึ่งการออกแบบและสร้างเครื่องคั่วงาอกดังรูปที่ 1 และ 2 รวมถึงได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการคั่วงาอกเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์งาอกที่มีคุณภาพทั้งด้านโภชนาการและคุณสมบัติทางกายภาพจึงได้วางแผนการทดสอบเครื่องคั่วงาอกดังรูปที่ 3 จากผลการทดสอบพบว่า การคั่วงาอกที่อุณหภูมิ 100°ซ ปริมาณงาอกสดเริ่มต้นที่ 300 และ 600 กรัม เวลาในการคั่ว 50-60 นาที ที่ความเร็วรอบในการหมุนของถังคั่ว 12-16 รอบต่อนาที

นั้นให้ผลการทดสอบแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดสอบการคั่วในกระทะนั้นคือ ค่าความขาวลดลงอยู่ในช่วง 16-21 เมื่อเทียบกับงาอกสดก่อนคั่ว (34.07±1.16) และยังมีแนวโน้มลดลง [15,16] มากกว่าการคั่วในกระทะ ทั้งนี้เนื่องมาจากเวลาการคั่วที่นานขึ้น เมื่อพิจารณาค่า a-value และค่า b-value พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อเปรียบเทียบที่สภาวะการคั่วต่างๆ แต่ค่า b-value ของเมล็ดงาอกหลังคั่วมีค่าลดลงและแตกต่างทางสถิติ ($P<0.05$) กับเมล็ดงาอกก่อนคั่ว อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าความเป็นสีน้ำตาล (Browning index) หรือ

ค่าสีโดยรวมพบว่าไม่ว่าที่สภาวะการทดสอบใดไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) ระหว่างงอกก่อนคั่วและงอกหลังคั่ว นอกจากนี้ตัวแปรที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งคือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นพบว่าการคั่วงอกที่ปริมาณน้ำหนัก 600 กรัม นั้นค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นหลังการคั่วอยู่ในช่วงประมาณ 5-9%wb. ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานแต่หากลดปริมาณน้ำหนักลงที่ 300 กรัม พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมีค่าต่ำกว่า 5%wb. ทั้งนี้เนื่องมาจากการคั่วมีการระบายความชื้นออกจากเมล็ดงอกมากขึ้น มีการพลิกตัวของเมล็ดงอกได้อย่างทั่วถึงอันเนื่องมาจากพื้นที่ในการระบายมากขึ้น ไม่อัดแน่นมากเกินไป รวมถึงการเพิ่มความเร็วยรอบของการหมุนของถังคั่วงา

ยังส่งผลต่อการลดลงของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยเช่นกัน [15]จากการทดสอบการคั่วงอกด้วยเครื่องพบว่าจะใช้เวลานานกว่าการคั่วในกระทะ ทั้งนี้เนื่องมาจากการคั่วในกระทะนั้นเมล็ดงาสัมผัสโดยตรงกับผิวกระทะให้ความร้อนจึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การคั่วโดยใช้เครื่อง เมล็ดงาไม่ได้สัมผัสโดยตรงกับแหล่งพลังงานความร้อน ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงาน จึงใช้เวลานานขึ้นเพื่อให้ได้ความชื้นและคุณภาพของเมล็ดงอกที่เท่าเทียมกัน [17] อย่างไรก็ตามอาจเกิดข้อบกพร่องขึ้นได้ในส่วนของค่าความขาวของเมล็ดงอกมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกระบวนการคั่วงอกด้วยเครื่องคั่วงาที่อุณหภูมิการทดสอบ 100 °C

สภาวะการทดสอบ			ค่าสี				ความชื้น
น้ำหนักงอก (กรัม)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	เวลา (นาที)	L	a	b	BI	(% wb.)
งอกสดก่อนคั่ว			34.07 ±1.16	5.80 ±0.35	10.07 ±0.40	167.72 ±2.03	44.75 ±0.95
300	12	50	17.90 ^c ±1.44	4.23 ^c ±0.60	5.53 ^b ±0.42	172.69 ^a ±4.94	2.87 ^d ±0.52
		60	19.13 ^{bc} ±0.86	4.53 ^{bc} ±0.58	5.53 ^b ±0.42	168.93 ^a ±7.59	1.58 ^c ±0.11
	16	50	18.87 ^{bc} ±1.66	4.90 ^{bc} ±0.30	5.80 ^b ±1.67	175.94 ^a ±27.68	2.23 ^{dc} ±0.11
		60	21.00 ^b ±1.15	5.23 ^{ab} ±0.47	6.70 ^b ±0.50	175.27 ^a ±3.49	1.45 ^c ±0.06
600	12	50	18.50 ^c ±1.48	4.77 ^{bc} ±0.47	5.50 ^b ±1.10	172.46 ^a ±18.08	9.25 ^b ±0.36
		60	19.47 ^{bc} ±1.20	4.67 ^{bc} ±0.30	6.90 ^b ±1.95	185.32 ^a ±30.04	4.62 ^c ±0.06
	16	50	20.20 ^{bc} ±1.05	4.93 ^{bc} ±0.15	5.93 ^b ±1.06	170.23 ^a ±13.33	9.29 ^b ±0.56
		60	19.07 ^c ±1.25	5.27 ^{bc} ±0.55	6.40 ^b ±0.78	173.11 ^a ±24.26	4.97 ^c ±0.56

^{abc} อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($P<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดย DMRT (mean± SD)

3.3. ผลการทดสอบปริมาณกรดแกมมาเอมิโนบิวทิริก (GABA)

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4 พบว่าการงอกของเมล็ดงาส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสาร GABA จาก 5.85

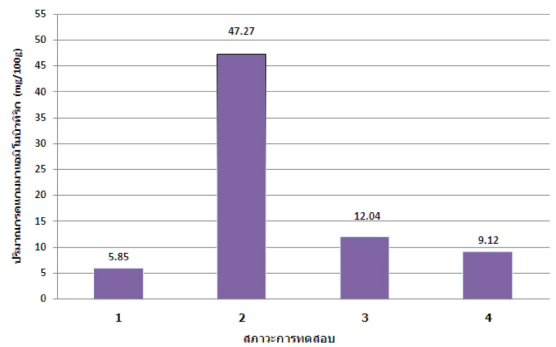
เป็น 47.27 มิลลิกรัม/100 กรัม ของเมล็ดงาก่อนงอกและหลังงอกตามลำดับ ซึ่งสาร GABA เป็นกรดอะมิโนที่ผลิตจากกระบวนการ decarboxylation ของกรดกลูตามิก [1] สารGABA ทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาท โดยจะทำ

หน้าที่รักษาสมดุลในสมองที่ได้รับการกระตุ้นซึ่งจะช่วยทำให้สมองเกิดการผ่อนคลายและนอนหลับสบาย ลดความดันโลหิต และช่วยให้ระบบขับถ่ายดีขึ้นและที่สำคัญลดอัตราการเสี่ยงต่อโรคมะเร็ง นอกจากนี้ GABA ยังช่วยควบคุมอาการโรคพิษสุราเรื้อรัง [1- 3] อย่างไรก็ตาม สาร GABA มักสูญเสียไปเมื่อได้รับความร้อนที่สูง ดังนั้นการคั่วจึงต้องคำนึงถึงจุดนี้ และจากการทดลองการคั่วในกระทะให้ความร้อนที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าที่อุณหภูมิการคั่วสูงและเวลานาน (130 °ซ, 30 นาที) ส่งผลต่อการลดลงของสาร GABA อย่างรวดเร็วและมีค่าน้อยกว่าค่าเริ่มต้นของงาที่ไม่ผ่านการคั่ว ในขณะที่หากอุณหภูมิในการคั่วต่ำ (70-100 °ซ) พบว่าเมล็ดงายังสามารถคงปริมาณของสาร GABA แต่ยังคงลดลงเมื่อเทียบกับค่าสาร GABA ในเมล็ดงาก่อนคั่ว

นอกจากนี้หากพิจารณาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดงา ทั้งสี ความหอม และความแข็งของเมล็ดดังปรากฏในรูปที่ 6 พบว่าที่อุณหภูมิ 100 °ซ ให้ผลดีที่สุด หากพิจารณาปริมาณสาร GABA ในเมล็ดงาก่อนหลังการคั่วด้วยเครื่องคั่วงาที่อุณหภูมิ 100 °ซ เวลา 60 นาที พบว่าคงเหลือ 9.12 มิลลิกรัม/100 กรัม เมื่อเทียบกับงาก่อนคั่ว (47.27 มิลลิกรัม/100 กรัม) แต่ยังมีค่ามากกว่าการคั่วที่อุณหภูมิสูง (130 °ซ)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่สนับสนุนทุนวิจัย เพื่อการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ ในการดำเนินโครงการวิจัยครั้งนี้ และสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่เพื่อการวิจัย

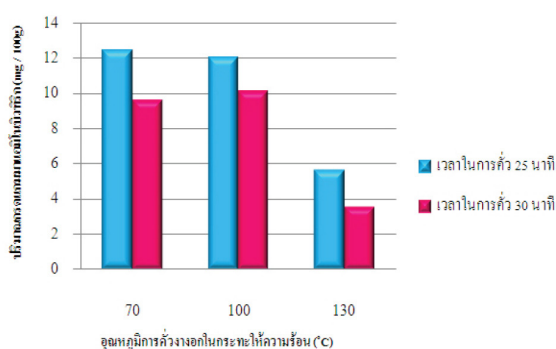


รูปที่ 4 ปริมาณกรดแกมมาแอมิโนบิวทีริก (GABA) ในระหว่างขั้นตอน (1) งาสด (2) งาอบสด (3) งาอบคั่วในกระทะ (100 °ซ-25 นาที) (4) งาอบคั่วในเครื่อง (100 °ซ-60 min)

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่าเมล็ดธัญพืชเมื่อผ่านกระบวนการอบจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของคุณค่าทางโภชนาการ ซึ่ง “งา” เป็นเมล็ดธัญพืชที่น่าสนใจในการนำมาพัฒนาเพื่อการเพิ่มมูลค่า นอกจากนี้การคั่วยังเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญอย่างยิ่งก่อนที่จะนำเมล็ดงามาบริโภค ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องคั่วงาแบบถาดหมุนรูปทรงกระบอก ให้ความร้อนโดยฮีตเตอร์ ขนาด 1,000 วัตต์ จำนวน 2 หลอด ขนาดความจุ 1 กิโลกรัม โดยขั้นตอนการออกแบบมีพื้นฐานจากการทดลองคั่วงาอบในกระทะ และทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องคั่วงา โดยพิจารณาสมบัติทั้งทางกายภาพและโภชนาการของเมล็ดงาที่ได้ ซึ่งพบว่าเครื่องคั่วสามารถสร้างความร้อนได้มากกว่า 100 °ซ และสามารถควบคุมอุณหภูมิของเมล็ดงาในขณะทำการคั่วที่ระดับต่างๆ ให้มีความสม่ำเสมอได้ ตัวตะแกรงสามารถปรับความเร็วรอบได้ตั้งแต่ 1 - 21 รอบต่อนาที ความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการคั่วเมล็ดงา คือ 16 รอบต่อนาที และการทดสอบคั่วเมล็ดงาที่ระดับอุณหภูมิ 100 °ซ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้สุกพอดี เมล็ดเต่ง และมีกลิ่นหอม

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการคั่วให้นานขึ้นส่งผลต่อการลดลงของความชื้น ค่าความขาว ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a-value) ค่าความเป็นสีเหลือง (b-value) และค่าความเป็นสีน้ำตาล (Browning index) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามหากพิจารณาค่าสาร GABA พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการคั่วสูงขึ้นรวมถึงเวลาในการคั่วนานขึ้นถึงกระนั้นค่าสุดท้ายของปริมาณสาร GABA ในเมล็ดงอกหลังการคั่ว ยังคงสูงกว่าเมล็ดงอกที่ไม่ผ่านการคั่ว



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของสาร GABA ระหว่างการคั่วเมล็ดงอกในกระทะ



รูปที่ 6 (ก) งาสด (ข) งาอบสด (ค) งาอบคั่วในกระทะ (100°C-25 นาที) (ง) งาอบคั่วในเครื่อง (100°C-60 นาที)

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kawabata, K., Tanaka, T., Murakami, T., Okada, T., Murai, H., Yamamoto, T., Hara, A., Shimizu, M., Yamada, Y., Matsunaga, K., Kuno, T., Yoshimi, N., Sugie, S., and Mori, H. 1999. Dietary prevention of azoxymethane-induced colon carcinogenesis with rice-germ in F344 rats. *Carcinogenesis (Lond.)*, 20: 2109–2115.
- [2] Komatsuzaki, N., Tsukahara, K., Toyoshima, H., Suzuki, T., Shimizu, N., and Kimura, T. 2003. Effect of soaking and gaseous phase sprout processing on the GABA content of pre-germinated brown rice. *The American Society of Agricultural and Biological Engineer*. Paper number: 036073.
- [3] Oh, S.H., Soh, J.R., and Cha, Y.S. 2003. Germinated brown rice extract shows a nutraceutical effect in the recovery of chronic alcohol-related symptoms. *Journal Medicinal Food*. 6:115-121.
- [4] Hemalatha, K.P.J. and Prasad, D.S. 2003. Changes in the metabolism of protein during germination of sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds. *Plant Foods for Human Nutrition*. 58:1-10.
- [5] Anonymous. 1998. Sesame Seeds : <http://homecooking.about.com/library/archive/blspice18.htm>
- [6] พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์. 2549. เครื่องสกัดน้ำมันงา *วิศวกรรมสาร มข.* ปีที่ 33 ฉบับที่ 5 หน้า 565-576 จำนวน 12 หน้า.
- [7] Sirato, Y.S., Katsuta, M., Okuyama, Y., Takahashi, Y., and Ide, T. 2001. Effect of sesame seeds rich in sesamol on fatty acid oxidation in rat liver. *Journal Agricultural Food Chemistry*. 49(5): 2647-2651.

- [8] Hahm, T.S., Park, S.J., and Lo, Y.M. 2009. Effects of germination on chemical composition and functional properties of sesame (*Sesamum indicum* L.) Seed. **Bioresource Technology**. 100:1643-1647.
- [9] Kyauk, H., Hopper, N.W. and Brigham, R.D. 1995. Effect of temperature and presoaking on germination, root length and shoot length of sesame (*Sesamum indicum* L.). **Environmental and Experimental Botany**. 35(3): 345-351.
- [10] El-Adaway, T.A., and Mansour, E.H. 2000. Nutritional and physicochemical evaluations of tahina (sesame butter) prepared from heat-treated sesame seeds. **Journal of Science of Food and Agricultural**. 80: 2005-2011.
- [11] AOAC. 1990. Official Methods of Analyses of the Association of Official Analytical Chemists. 15th ed. **Association of Official Analytical Chemists**.
- [12] Mustafa, A., Aman, P., Andersson, R., and Kamal, E.A. 2007. Analysis of free amino acid in cereal products, *Food Chemistry*. 105(1): 317-324.
- [13] Aralan, N., and Togrul, H. 2005. Moisture sorption isotherms for crushed chillies. **Biosystems Engineering**. 90: 47-61.
- [14] Hussain, S.R., Terao, J., and Mathuushita, S. 1986. Effect of browning products of phospholipids on autoxidation of methyl linoleates. **Journal of American oil Chemist Society**. 63:1457-1560.
- [15] Kahyaoglu, T., and Kaya, S. 2006. Modeling of moisture, color and texture changes in sesame seeds during the conventional roasting. **Journal of Food Engineering**. 75: 167-177.
- [16] Avila, I.M.L.B., and Silva, C.L.M. 1999. Modeling kinetics of thermal degradation of colour in peach puree. **Journal of Food Engineering**. 39:161-166.
- [17] อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์ และ พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล. 2552. เครื่องคั่วงา. **วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น**, มีนาคม 2552. 14(3): 275-282.

Studies on Defect Detection and Thermal Influence in SiC Substrates Using an IR Thermal Imaging Camera

Passapong Wutimakun*, Karuan Chaivanich, Theerachol Mahawan
Thongkam Chumpol, Winat Intarasuwan, and Chumpol Buteprongjit
Chulachomklao Royal Military Academy

Abstract

A long-wavelength infrared thermal imaging camera was applied to visually evaluate the thermal influence of defects in SiC substrates. Defects in substrates were rapidly and effectively detected by IR camera observation, and the dependence of the temperature on the defect size could be observed precisely. IR camera was applied to show clearly the change in heat propagation in areas of defects in SiC substrates by observation of temperature distribution images in real time. Consequently, the IR camera can be considered as an effective technique for evaluating the thermal influence of defects.

Keywords : SiC, IR camera, defect, heat propagation, temperature distribution image.

1. Introduction

Silicon carbide (SiC) is a promising material for the next generation of semiconductors because of its ability to operate at high temperature, high frequency and high power. [1] SiC is expected to serve as a substrate material for high-frequency devices based on GaN. [2, 3] Recently, very low-defect density SiC substrates have been developed to meet these requirements. [4, 5] However, characterization of the thermal influence of defects in these substrates is still important before such substrates can actually be applied in high frequency devices.

To detect the defects that present in SiC substrate, scanning laser microscopes [6, 7] light-scattering tomography [8, 9], polarized optical microscope [10, 11], X-ray topography [12, 13] and photoluminescence mapping [14] have been used. Although these methods

can effectively detect defects, they cannot visually show the thermal influence of defects in SiC substrate for the same time. Therefore, in this study, a long-wavelength infrared thermal imaging camera (IR camera) that is considered as effective technique for evaluating the defects and the thermal influence of defects in SiC single crystal was proposed.

Attempts to measure the thermal diffusivity of solids using IR camera technology have recently been reported, [16, 17] and such a camera has been used to investigate the operating characteristics of a heat sink structure. [18] IR cameras are widely applied to determine the thermal properties of materials. In this study, IR camera evaluation technology was applied to perform a non-destructive defect detection in SiC crystals and to examine the thermal influence of defects.

* Department of Industrial Engineering, Chulachomklao Royal Military Academy

2. Experiments

2.1. Sample Fabrications

The samples used in this study were commercial 6H-SiC single crystals grown using the conventional sublimation method; the seed temperature and the pressure were kept at 2100–2300 °C and 1.3 kPa (10 Torr) to 2.6 kPa (20 Torr), respectively, during crystal growth. Samples were cut with a size of 5×25×1 mm³ perpendicular to the [0001] axis from two different 6H-SiC wafers. In this experiment, sample A was cut from 6H-SiC wafer that had the quality of crystal better than sample B. The sample surfaces were mirror polished.

2.2. Methods

Firstly, we observed and classified the defects in each sample using an IR camera (NEC Avio, TH 9100 MR) as shown in Fig.1. An IR camera detects and visualizes infrared light radiated from materials. If a substrate contains defects or distortions, the thermal properties of these areas will be changed compared with the periphery. Therefore, these areas show a different temperature. Using the intensity of infrared radiation, one can detect defects and distortions in a substrate conveniently and accurately. The intensity of infrared radiation can be described by Stefan–Boltzmann law as follows:

$$E = \sigma T^4 \quad (1)$$

Where E is the intensity of infrared radiation per unit area (W/m²), σ is the Stefan–Boltzmann constant (equal to 5.6704×10⁻⁸ W/m²K⁴), and T is the absolute temperature (K) [15]. A long-wavelength IR camera was used with an uncooled 2D microbolometer array as a detector and measurement range of -20 to 250 °C. The thermal sensitivity and spectral range of this camera were 0.02 K at 303 K and 8–14 μm, respectively. A 25 μm close-up lens (WI-259D) was used, where the

minimum detection range was 25×25 μm. The samples were heated by an electric heating plate (AS ONE, ND-1) and observed on a flat copper plate. To decrease the background noise, the sample and camera were enclosed in a shielding box. The resulting images were cleaned up by image-processing software (NEC Avio, NS 9200). The differences in temperature between the defect areas and the periphery could be detected directly, as the IR emissivity of the copper plate was much lower than that of the SiC.

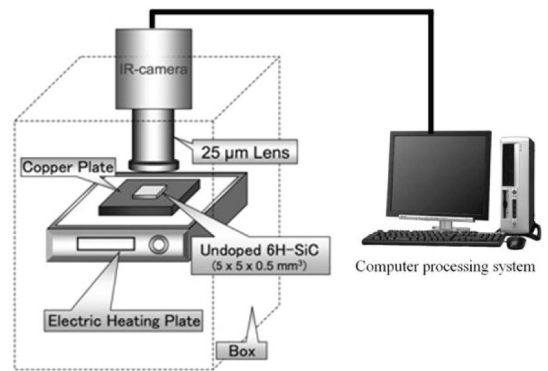


Fig.1. Schematic diagram of the IR camera observations.

The use of an IR camera is a rapid and effective technique for the detection of defects, but it cannot observe the shapes of defects in detail. Therefore, we zoomed in on the defect areas in the IR camera images to estimate the defect shapes using scanning laser microscopy (SLM) [6, 7] and three-dimensional light-scattering tomography (3D-LST), [6, 9] as described later.

Finally, an experimental study of heat propagation in the samples was performed. The conditions were similar to those in the defect detection studies. For the heating system, a deposited one-dimensional heater was used, where a width of about 0.5 mm of Ni was

deposited at one end of each sample. The Ni-deposited samples were heat-treated for 3 min at 1050 °C in an Ar atmosphere. A DC power supply (Kenwood, PA18-3A) was used, to obtain a clear image. The power supply was set to 6.00 V and 0.10 A for observing the behavior of heat propagation in the samples. The entire samples were observed for 4 s, and 20 observations of the temperature distribution image were made at 0.2 s intervals. In addition, the thermal diffusivity of the samples was also evaluated by a differential photopyroelectric (PPE) method [7] compared to the results of IR camera.

3. Results and discussion

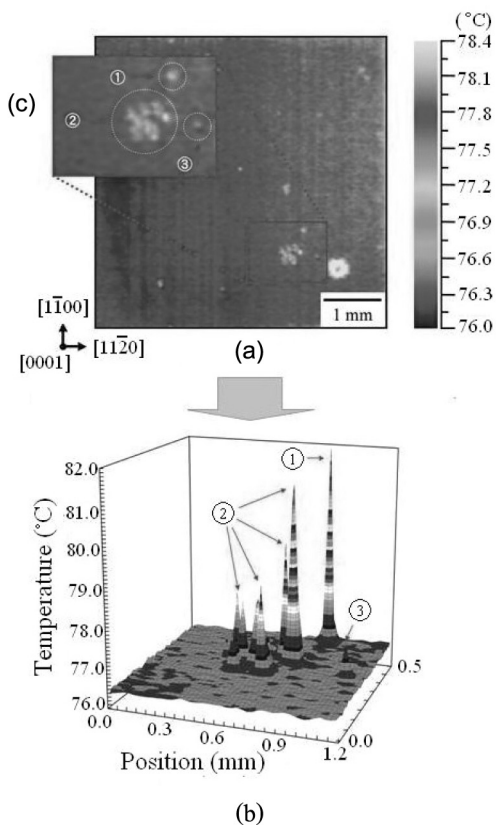


Fig.2.Temperature distribution image of sample B
obtained with IR camera

Sample A shows an almost uniform color, which means a uniform temperature. However, sample B, shown in the two-dimensional IR camera image of Fig. 2(a), shows various colors, which means a nonuniform temperature. The white points in the image of sample B are defects, and the high temperatures around the defects are considered to be a result of the thermal influence of the defects.

We could confirm that the defects in sample B were more numerous than those in sample A. To further investigate the temperature distribution around the defects detected in the IR camera images, the temperature profile of the surface of the samples was analyzed by the use of image-processing software. By this method, we could study the temperature around each defect in detail. The temperature resolution and the detection range were set to 0.1 K and 25×25 μm², respectively. The images of samples B was analyzed as shown in Figs. 2(b). The temperature distributions in the 3D image of sample B in the defect areas shown as points 1, 2, and 3 in Fig. 2(b) were clearly different from that in the normal area, and each defect area also had a temperature distribution that was different from that of the others in terms of scale and maximum temperature. These differences in the temperature distribution in sample B were caused by differences in defect size. [16]

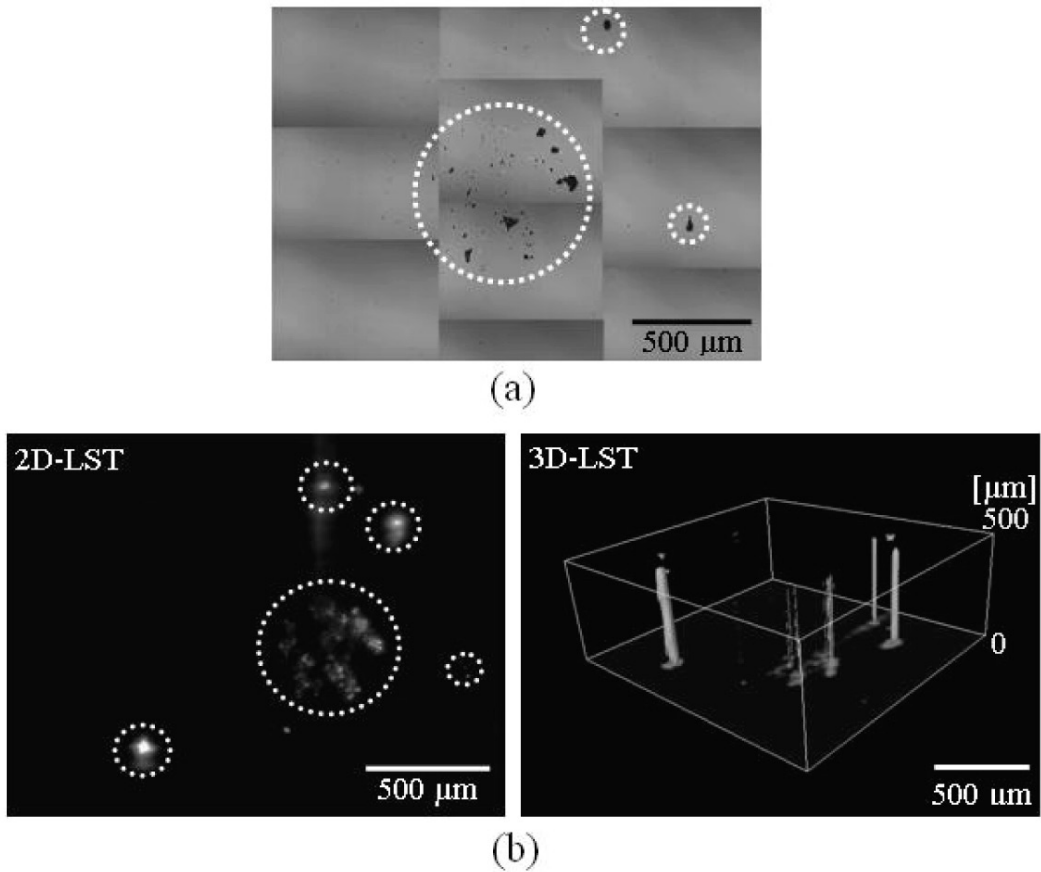


Fig. 3. Observation of the shape of defects on the surface using SLM and LST in the IR camera image of Fig. 2(c). (a) SLM image; (b) 2D- and 3D-LST images.

Next, we zoomed in on the defect area in sample B shown in Fig. 2(c) to observe the shapes of the defects on the surface using SLM and LST. The results are shown in Figs. 3(a) and (b), respectively. The irregular black spots in Fig. 3(a) were considered to be micropipes and clusters of impurities. The size of the defects was calculated from the SLM image ($600 \times 800 \mu\text{m}^2$) and was found to be $5\text{-}10 \mu\text{m}$. We also applied 3D-LST to observe the depth distribution of the defects. The results showed that the defects observed in sample B were not only located on the substrate surface but also continued into the substrate, as shown in Fig. 3(b).

The large point-like and rod-like scattering patterns were considered to be the outlines of defects decorated by impurity precipitates and of hollow defects such as micropipes, respectively. [19] The results confirmed that the presence of defects can affect the nonuniformity of the temperature in SiC. Since the thermal conductivity in a defect area is smaller than that in the surrounding area, the amount of infrared radiation in the IR camera observation is different, and this shows as a nonuniform temperature distribution in the IR camera image. [16]

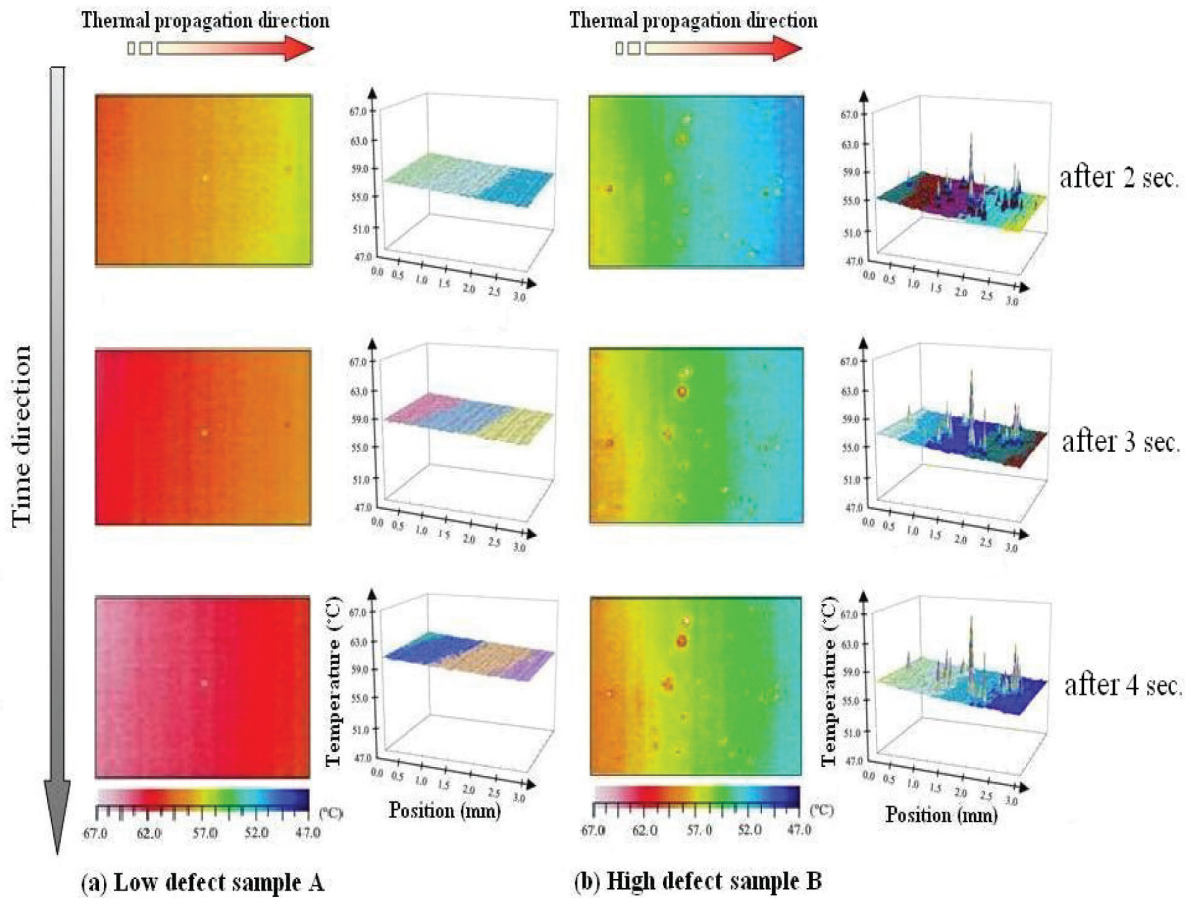


Fig.4. the Ni electrode was heated at the end of each sample for 4 s to visually observe heat propagation in the samples with the IR camera in real time.

Finally, the Ni electrode was heated at the end of each sample for 4 s to visually observe heat propagation in the samples with the IR camera in real time. 2D and 3D IR camera images of each sample are shown in Fig. 4. In the low-defect sample A, as shown in Fig. 4(a), the temperature range was 56–60 °C after 2 s of heating, 60–63 °C after 3 s, and 63–67 °C after 4 s. The thermal behavior in the 3D images showed a smooth propagation. In contrast, the temperature range in sample B was 51–56 °C after 2 s, 53–54 °C after 3 s, and 54–58 °C after 4 s. At the same heating times, the

heat propagation behavior of sample B, as shown in Fig. 4(b), was rather poor in comparison with that of sample A. Furthermore, 3D images of sample B showed that the variable scatter of the heat propagation was caused by a change in the thermal conductivity around the defect areas. [20, 21] The thermal diffusivity of the samples was also evaluated by a differential photopyroelectric (PPE) method [7] to support the results of the heat propagation studies as shown in table 1. These values corresponded with the results obtained from IR camera observation. As the above results indicate, the IR

camera observation is an effective method to examine the thermal property in 6H-SiC.

Table 1 Comparison of thermal diffusivity of the samples between the PPE method and the IR camera observation.

Sample	Thermal diffusivity (cm ² /s)	
	IR camera	PPE method
Sample A	1.62	1.61
Sample B	1.25	1.25

4. Conclusion

In this study, we have shown that defect detection in semi-insulating 6H-SiC substrates can be performed with a wide viewing range using an IR camera, and it is expected that all defects in a 4-inch SiC wafer could be detected within a few minutes. Furthermore, IR camera observation provides a nondestructive, rapid and effective method for defect detection in SiC substrates. In particular, we have successfully used an IR camera to visually show the changes in heat propagation due to defects in semiinsulating 6H-SiC substrates, by recording temperature distribution images in real time. The results in this study prove that defects in SiC substrates have a harmful influence on the thermal properties of the substrate. This is important information for the development of the semi-insulating 6H-SiC substrates that are expected to serve as a substrate material for GaN high-frequency devices.

Acknowledgments

This research was financially supported by Prof. Dr. Jun Morimoto (National Defense Academy, Japan)

References

- 1) H. Matsunami: Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) 6835.
- 2) V. Kumar, D. H. Kim, A. Basu and I. Adesida: IEEE Electron Device Lett. **29** (2008)18.
- 3) A. L. Corrion, C. Poblentz, F. Wu and J. S. Speck: J. Appl. Phys. **103** (2008) 093529.
- 4) C. Longeaud, J. P. Kleider, P. Kaminski, R. Kozlowski and M. Miczuga: J. Phys.: Condens. Matter **21** (2009) 045801.
- 5) L. Ning, Z. Feng, Y. Wang, K. Zhang, Z. Feng and X. Xu: J. Mater. Sci. Technol. **25** (2009) 102.
- 6) P. Wutimakun, C. Buteprongjit and J. Morimoto: J. Cryst. Growth **311** (2009) 3781.
- 7) P. Wutimakun, H. Miyazaki, Y. Okamoto, J. Morimoto, T. Hayashi and H. Shiomi: Mater. Sci. Forum **600** (2009) 521.
- 8) L. Taijing, K. Toyoda, N. Nango and T. Ogawa: J. Cryst. Growth **114** (1991) 64.
- 9) P. Wutimakun, T. Mori, H. Miyazaki, Y. Okamoto and J. Morimoto: Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 5576.
- 10) X. Ma and T. Sudarshan: J. Electro. Mater. **33** (2004) 450
- 11) P. Wutimakun and J. Morimoto: to be published in Jpn. J. Appl. Phys.
- 12) X. Ma, M. Dudley, W. Vetter and T. Sudarshan: Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) L1077.
- 13) H. Yamaguchi and H. Matsuhata: J. Electron. Mater. **39** (2010) 715.
- 14) G. Fenga, J. Suda and T. Kimoto: Physics B **404** (2009) 4745.
- 15) I. Montvay and E. Pietarinen: Physics Lett. B **110** (1982) 148.
- 16) K. Lee, H. Miyazaki, Y. Okamoto and J. Morimoto, Mater. Sci. Forum **645** (2010) 559.

- 17) K. Lee, H. Miyazaki, Y. Okamoto, J. Morimoto and K. Toda: to be published in Jpn. J. Appl. Phys.
- 18) R. Boukhanouf , A. Haddad, M. T. North and C. Buffone, Appl. Therm. Eng. **26** (2006) 2148.
- 19) B.G. Vainer, G.N. Kamaev and G.L. Kurishev, J. Cryst. Growth **210** (2000) 351.
- 20) J. Morikawa and T. Hashimoto, 15th Symposium on Thermophysical Properties, 2003, p. 578.
- 21) S. Wu, P. Geiser, J. Jun, J. Karpinski and R. Sobolewski : Phys. Rev. B **76** (2007) 085210.

รูปแบบของบทความสำหรับ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลชัยบุรี

Manuscript Preparation Guidelines for the Papers Submitted to Journal of Engineering, RMUTT

ชวลิต แสงสวัสดิ์¹ สมชัย หิรัญวโรดม² และอภิชาติ สนธิสมบัติ³

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับรูปแบบและวิธีการส่งบทความเพื่อเสนอต่อกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลชัยบุรี ผู้ส่งบทความจะต้องยึดรูปแบบตามบทความนี้อย่างเคร่งครัด บทความใดที่มีรูปแบบไม่ถูกต้อง จะถูกส่งคืนและไม่พิจารณาอีก บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ แต่ภาษาควรมีเพียงย่อหน้าเดียว และความยาวไม่เกิน 25 บรรทัด

คำสำคัญ : วิธีการส่งบทความ, รูปแบบบทความ, ขนาดตัวอักษร, รูปแบบตัวอักษร, การเว้นบรรทัด

Abstract

This article describes a submission procedure and a format of the manuscript for the Journal of Engineering, RMUTT. Authors are required to strictly follow the guidelines provided here : otherwise, the manuscript will be rejected immediately and not be considered again. A good abstract should have only one paragraph. Both Thai and English abstracts are required, the length of each should not exceed 25 lines.

Keywords : submission procedure, manuscript format, font side, font style and blank line.

1. ข้อกำหนดทั่วไป

บทความต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับต่อไปนี้คือ ชื่อเรื่องภาษาไทย ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ ชื่อผู้เขียนบทความ สถาบัน ที่อยู่สถาบันอย่างละเอียด บทคัดย่อภาษาไทย บทคัดย่อภาษาอังกฤษ เนื้อเรื่อง แบ่งเป็น บทนำ เนื้อความหลัก สรุป กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) เอกสารอ้างอิง ภาคผนวก (ถ้ามี)

2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

2.1 คำแนะนำทั่วไป

บทความที่เสนอจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือ ภาษาอังกฤษ ตามรูปแบบที่กำหนด ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลท เพื่อพิมพ์ออฟเซตได้ทันที

การพิมพ์ให้พิมพ์ลงบนกระดาษ A4 โดยพิมพ์เป็นสองคอลัมน์ตามรูปแบบบทความนี้ ขนาดของคอลัมน์เป็นไปตามที่กำหนด จะต้องพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi.

ให้พิมพ์โดยไม่เว้นบรรทัด เมื่อจะขึ้นหัวข้อใหม่ ให้เว้นบรรทัด 1 บรรทัด และจะต้องพิมพ์ให้เต็มคอลัมน์ก่อนที่จะขึ้นคอลัมน์ใหม่ หรือขึ้นหน้าใหม่ ห้ามเว้นที่เหลือไว้ว่างเปล่า

¹ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลชัยบุรี

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลชัยบุรี

³ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลชัยบุรี

การลำดับหัวข้อในส่วนของเนื้อเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ก็ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 2.1 เป็นต้น

ให้ใส่เลขเรียงลำดับหน้าด้วยดินสอไว้ที่มุมขวาบนของกระดาษทุกหน้า

2.2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะ

พิมพ์บทความภาษาไทยด้วยตัวอักษรรูปแบบ “Angsana New”

ชื่อเรื่องบทความให้ใช้ตัวอักษรขนาด 16 พอยน์ต์ตัวพิมพ์

ชื่อผู้เขียน สถาบันให้ใช้ตัวอักษรขนาด 14 พอยน์ต์ตัวพิมพ์

ชื่อหัวข้อย่อยให้ใช้ตัวอักษรขนาด 14 พอยน์ต์ตัวพิมพ์

บทคัดย่อและเนื้อความต่างๆ ให้ใช้ตัวอักษรขนาด 14 พอยน์ต์ตัวพิมพ์

สมการต่างๆ ให้ใช้ตัวอักษรขนาด 14 พอยน์ต์หรือตัวอักษร Angsana New 14 พอยน์ต์

การเว้นระยะบรรทัดห่างในแนวตั้งแบบ exactly 16 พอยน์ต์

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิดซ้ายและขวาอย่างสวยงาม

2.3 ชื่อเรื่อง ชื่อผู้แต่ง และชื่อหัวข้อ

การพิมพ์ชื่อเรื่อง ให้วางตำแหน่งกลางหน้ากระดาษแบบคอลัมน์เดียว

ชื่อผู้เขียนให้พิมพ์ไว้ได้ชื่อเรื่องและอยู่กลางหน้ากระดาษแบบคอลัมน์เดียว

ไม่ต้องระบุตำแหน่งวิชาการ หรือสถานะของนักศึกษาใดๆ ทั้งสิ้น

ชื่อหัวข้อย่อยต่างๆ ให้ วางตำแหน่งชิดขอบซ้าย

2.4 การจัดทำรูปภาพ

รูปภาพจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 81 มม. เพื่อ

ให้ลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือกรณีจำเป็นจริงๆ เพื่อรักษารายละเอียดในภาพ อาจยอมให้ความกว้างได้เต็มหน้ากระดาษ(กว้าง 168 มม.)

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาดใหญ่สามารถอ่านได้สะดวก และต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยายใต้ภาพ หมายเลขและคำบรรยายรวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด

คำบรรยายใต้ภาพห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่น ห้ามเขียนว่า “รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง..” ที่ถูกต้องควรเป็น “รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง..”

รูปลายเส้นจะต้องเป็นเส้นหมึกดำ ส่วนรูปถ่ายควรจะเป็นรูปขาวดำที่มีความคมชัด รูปสีอนุโลมให้ใช้ได้รูปภาพควรมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็นเท่านั้น เช่น ภาพถ่ายรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปที่ปรากฏให้เป็นเฉพาะจอภาพเป็นต้น และเพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือรูปภาพ 1 บรรทัดและเว้นใต้คำบรรยาย 1 บรรทัด

2.5 การเขียนสมการ

สมการทุกสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่ในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง ควรใช้ตัวพหุคูณะเอียดแสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการ ตำแหน่งของหมายเลขสมการจะต้องอยู่ชิดขอบด้านขวาของคอลัมน์ เว้นหนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการและเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียนสมการ จัดให้สมการอยู่ตรงกลางคอลัมน์ ดังตัวอย่างนี้

$$a + b = c \quad (1)$$

เริ่มเขียนคำอธิบายตั้งแต่บรรทัดนี้

2.6 การจัดการทำตาราง

ตัวอักษรในตารางจะต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง ควรตีเส้นกรอบตารางด้วยหมึกดำให้ชัดเจน

ตารางทุกตารางจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยายกำกับเหนือตาราง หมายเลขกำกับและคำบรรยายนี้รวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด คำบรรยายเหนือตารางห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่นเดียวกับกรณีรูปภาพ

เพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือตาราง 1 บรรทัด และเว้นบรรทัดใต้คำบรรยายรูปภาพ 1 บรรทัด

2.7 การอ้างอิงและเอกสารอ้างอิง

การอ้างอิงเอกสารในบทความ ให้ใช้ระบบตัวเลข (Numerical System) โดยใส่ตัวเลขของเอกสารอ้างอิงไว้ในวงเล็บ เช่น [1] ที่ท้ายข้อความที่อ้างอิงถึง

2.8 ความยาวของบทความ

เมื่อรวมทุกส่วนแล้ว แต่ละบทความมีความยาวดังนี้ บทความทั่วไปมีความยาว 10 หน้ากระดาษ A4 บทความรับเชิญมีความยาวไม่เกิน 12 หน้ากระดาษ A4

3. กรณียกบทความภาษาอังกฤษ

ผู้พิมพ์บทความเป็นภาษาอังกฤษ กรุณาแนะนำวิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษที่แนบมาด้วย

4. การส่งบทความ

ส่งต้นฉบับ 3 ชุด พร้อมแผ่น CD และแบบฟอร์มส่งบทความ มายังกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหลวง อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

5. สรุป

ผู้เขียนบทความกรุณาตรวจสอบบทความอย่างรอบคอบโดยใช้เวลาอย่างเพียงพอก่อนส่งให้คณะกรรมการพิจารณา จะทำให้บทความของท่านมีคุณภาพสูงและผ่านการพิจารณาง่ายขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้เขียนบทความทุกท่านที่ให้ความร่วมมือรักษาระเบียบการเขียนบทความอย่างเคร่งครัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์. พลังงานทดแทน. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://dede.go.th/dede/index.php> (30 มีนาคม 2552).
- [2] จีวีวรรณ รมยานนท์, 2545. เขียนแบบเทคนิค 2. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [3] ถาวร รัตนพรประดิษฐ์, 2551. ศึกษาความเป็นไปได้ของการเมอร์เซอร์ไรส์กังกง เปรียบเทียบกับการเมอร์เซอร์ ไรส์ผืนผ้าเดนิม. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาสิ่งทอ. มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [4] ส.วงศ์ศรีตระกูล, 2552. “วช.หนุนแม่โจ้สร้างฟาร์มกังหันลมผลิตไฟฟ้าในเขตภาคเหนือตอนล่าง,” **Engineering Today**, 7,75 (มีนาคม) : 51-56.

Manuscript Preparation Guidelines for the Papers Submitted to Journal of Engineering, RMUTT

C.Sangswasd¹, S.Hiranvarodom², and A.Sonthisombat³

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi,

Abstract

Your manuscript will appear in A4 sized photocopy exactly the same as it is received. Please follow the guideline explicitly. English papers should begin with the English abstracts. No Thai abstract is required. The abstract should include a concise statement of objectives and a summary of important results.

Keywords : submission procedure, manuscript format, font size, font style, blank line

1. General Introduction

Contributed papers are limited to 6 pages including all figures and tables. Invited papers have an 8 pages limit. Each manuscript typically contains the following sections: Title, Authors name (Noacademic position is required.) Address in details (Give phone and Fax. Numbers, if available.), Abstract, Text, Acknowledgment (If preferred), References.

2. Style and format

2.1 General

Manuscripts are typed single space except for headings. Font type should mimic Angsana New #10 (shown here). Right – hand justification is recommended.

Type your manuscripts on A4 (21 cm x 29.7 cm) sheets. The sheet should be divided into a two – column width of 81 mm with a space between columns of 6 mm (a total width of 168 mm). This permits side margin of 21 mm each. The top and bottom margins should be 29 mm.

2.2 Title Block

The title should appear in upper and lower case without underlining, centered across both columns. Type the author's name and affiliation also in upper and lower case letters centered under the title. In case of multi-authorship, group the authors and identify each author by superscript numbers corresponding to the organization which should be grouped below authors.

2.3 Headings and Subheadings

Heading and subheadings are in upper and lower case bold letter without underlining, if available. They should appear with sequential numbers, left – hand justified in the column.

2.4 Equations

Equations are to be numbered consecutively throughout the text. The equation number should be placed in parenthesis and flushed with the right – hand margin of the column. Italic alphabets are recommended for equation parameters.

¹ Department of chemical and Materials Engineering Faculty of Engineering , Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

³ Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

$$a + b = c \quad (1)$$

Leave a blank line before and after equations.

A long equation should appear across the columns by interrupting the opposite column with column-termination and column-initiation bars.

3. References

References are to be listed and numbered at the end of the papers. Refer to them in the text as [1].

4. Illustrations

Figures, tables and line drawings should be positioned within the text. They may conform to either a one-column or two-column width and must be black ink or high contrast black-and-white reproductions. They must include captions.

5. Submission of Your Manuscripts

Please submit three original manuscripts, one CD and a paper submitting form to JERMUTT, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Rangsit – Nakhonnayok Rd. Klong 6. Thanyaburi Pathumthani Thailand 12110.

6. Conclusions

Your paper should be carefully checked.

7. Acknowledgment

Thank you for your good cooperation.

References

[1] Crawford, R.J. 2005. **Plastics Engineering**. 3rd ed. Oxford : Elsevier Butterworth-Heinemann.

[2] Samuel Forest, 2008 “Micromorphic Approach for Gradient Elasticity Viscoplasticity, and Damage ,” **Journal of Engineering Mechanics**. 135,3 (March) : 117-131.

[3] Somjate Patcharaphun, 2008. “Numerical and Experimental validation of Skin and Core Material Distribution in Sandwich Injection Moldings”, **Journal of Research in Engineering and Technology**. 5, 4 (October - December) : 433-444.

[4] Thaworn Rattanaphornpradit, 2551. **Feasibility Study of Mercerized Denim Garmen Versus Mercerized DenimFabric**. Master of Art’s Thesis. Rajamangala University of Technology Thanyaburi

[5] Wikipedia. **Technology**. [Online] Available : <http://Wikipedia.org> (30 March 2009).

**แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ
เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลชัยบุรี**

ข้าพเจ้า ☐ นาย ☐ นาง ☐ นางสาว ☐ อื่นๆ (โปรดระบุ)

ชื่อ-สกุล.....

(ภาษาอังกฤษ).....

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

อื่นๆ(โปรดระบุ).....

ที่อยู่ (ที่ติดต่อได้).....

.....

โทรศัพท์ที่ทำงาน..... โทรศัพท์มือถือ.....

โทรสาร..... อีเมล.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง:

ชื่อผลงาน (ภาษาไทย)

.....

ชื่อผลงาน (ภาษาอังกฤษ).....

.....

พร้อมกันนี้ ได้แนบเอกสาร ☐ ต้นฉบับบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร จำนวน 3 ชุด

☐ แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ จำนวน 1 ชุด

☐ ซีดีบันทึกข้อมูลการพิมพ์บทความในรูปแบบไฟล์ Microsoft Word จำนวน 1 แผ่น

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุไว้ในบทความจริง และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และข้าพเจ้าจะไม่นำส่งบทความนี้ไปพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน นับจากวันที่ข้าพเจ้าส่งบทความ

ลงนาม.....

(.....)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.



สมาชิกเลขที่

.....

ใบสมัครสมาชิกวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ
ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล
เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์
โทรศัพท์ โทรสาร e-mail

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี ปี

1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท (สำหรับบุคคลทั่วไป)
80 บาท (สำหรับนักศึกษา)

ต่ออายุสมาชิก ปี

1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท (สำหรับบุคคลทั่วไป)
80 บาท (สำหรับนักศึกษา)

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน บาท

จำนวนเงินตัวอักษร

ชำระเงินโดยวิธี

ธนาคาร สังกัด

ตัวแลกเงินไปรษณีย์ สังกัด

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร ชื่อบัญชี เลขที่บัญชี

- หมายเหตุ
1. กรุณาส่งสำเนาใบเข้าบัญชี (pay-in-slip) หรือโทรสารมายังสำนักงานคณะวิศวกรรมศาสตร์ พร้อมเขียนชื่อ – นามสกุล และหมายเลขสมาชิก (ถ้ามี)
 2. นักศึกษาที่สมัครทางไปรษณีย์ กรุณาส่งสำเนาบัตรประจำตัวนักศึกษาแนบมาด้วย

ลงชื่อ ผู้สมัคร
(.....)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ 0-2549-3493 โทรสาร 0-2549-3479 www.en.rmutt.ac.th/journal e-mail: varasan_rmutt@hotmail.com

วิสัยทัศน์

“มุ่งผลิตวิศวกรเชิงปฏิบัติการ เชี่ยวชาญเทคโนโลยี
มีมาตรฐานสากล บนพื้นฐานคุณธรรมและจริยธรรม”

พันธกิจ

1. ผลิตวิศวกร สร้างงานและสิ่งประดิษฐ์ที่มีคุณภาพได้มาตรฐานสากลสอดคล้องกับความต้องการของประเทศและสังคมโลก
2. พัฒนาคณะฯ สู่วิชาการเป็นเลิศด้านวิชาและเทคโนโลยีที่ยั่งยืน
3. ให้บริการงานวิชาการและบูรณาการองค์ความรู้จากผลงานวิชาการ ถ่ายทอดสู่นักศึกษาและสังคมอย่างมีประสิทธิภาพ
4. ทำนุบำรุงศิลปวัฒนธรรมและรักษาสืบสานวัฒนธรรม
5. บริหารจัดการเชิงธรรมาภิบาล บุคลากรทุกคนมีส่วนร่วมในการพัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ที่ตั้ง ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก

อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทร. 0-2549-3400 โทรสาร 0-2577-5026

www.en.rmutt.ac.th/journal