

The Journal of Manufacturing & Management Technology

วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม - ธันวาคม 2565

ISSN : 2821-9597 (Online)

บทความวิจัย / บทความทางวิชาการ

- การประเมินผลกระทบของแอนไอโซทรอปีที่ส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูปและการดัดตัวกลับของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ
ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ พงศกร หัตถะกุล และคมกริช ละวรรณวงษ์
- การใช้เทคนิค ECRS เพื่อปรับปรุงกระบวนการบรรจุน้ำผึ้ง
วรพจน์ ศิริรักษ์ นิวัติชัย ใจคำ อมรรัตน์ ปิ่นชัยมูล ธวัชชัย คล่องดี และศรัญญา ศิริแสน
- สมบัติของกระดาษจากเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพด
มนตรี ขาวสุข และธัญญ์ศ สมใจ
- การวิเคราะห์อิทธิพลของการหล่อเย็นที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก
พีชิต อ่อนปรนงค์
- Design of 2.4 GHz E-Textile Monopole Antenna for Wearable Technology
Shanin Harnnarong Praphat Annmanee and Pitchanun Wongsiritori
- Investigating of Mixture Ratio of 925 Sterling Silver Compound for the Metal Injection Molding Process
Sasitorn Pramakhamo Siritra Chaekrathok Surat Wannasri Somlak Wannarumon Kiarova Nararak Budchar Rungwasun Kraiklang Haruetai Maskong Supattra Singnisai Sinmahat Phailouie and Witthaya Daodon
- ศึกษาความสามารถของการเชื่อมมิกเดินตามด้วยการเชื่อมฟลักซ์คอร์ของรอยต่อฉากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง
ณัฐ แก้วสกุล เรืองศักดิ์ ภูธรธราช ัญญารัตน์ สอนสนาม กาวิน อ่างบุญตา และสุภารัตน์ บุตรไชย
- การวิเคราะห์ฮิวริสติกสำหรับการประยุกต์ในการจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียน
จารุพงษ์ บรรเทา ปวีณา อาสาชาติ และสุจิตรา สรภูมิ
- การเลือกใช้อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับท่อเหล็กคาร์บอน STKM 13A และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC
ธีรวัฒน์ เชื้อแก้ว ชูดี หมอรักษา ประจักษ์ จิตกุล ธัญญาลักษณ์ มะปะเช สุริยศรี แสงสว่าง เกริกฤกษ์ ดาวศิริ และวิทยา อินทร์สอน

การประเมินผลกระทบของแอนไอโซทรอปิกที่ส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูปและการตัด ตัวกลับของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ Anisotropic Evaluating Effect to Bendability and Springback of Advanced High Strength Steel Sheet โดย : ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ พงศกร หลีตระกูล และ คมกริช ละวรรณวงษ์	1
การใช้เทคนิค ECRS เพื่อปรับปรุงกระบวนการบรรจุน้ำผึ้ง ECRS technique using for honey filling process improvement โดย : วรพจน์ ศิริรักษ์ นิวัติชัย ใจคำ อมรรัตน์ ปิ่นชัยมูล ธวัชชัย คล่องดี และ ศรีญญา ศิริแสน	11
สมบัติของกระดาษจากเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพด Properties of Paper from Mixed Fiber of Bamboo Sprout Coat and Corn Husk โดย : มนตรี ขาวสุข และ ธณัฐยศ สมใจ	21
การวิเคราะห์อิทธิพลของการหล่อเย็นที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก Investigate the Effect of Cooling on the Shrinkage of Plastic Injection Part โดย : พิชิต อ่อนปรางค์	31
Design of 2.4 GHz E-Textile Monopole Antenna for Wearable Technology โดย : Shanin Harnnarong Praphat Anmanee and Pitchanun Wongsiritorn	51
Investigating of Mixture Ratio of 925 Sterling Silver Compound for the Metal Injection Molding Process โดย : Sasitorn Pramakhamo Siritra Chaekrathok Surat Wannasri Somlak Wannarumon Kielarova Nararak Budchar Rungwasun Kraiklang Haruetai Maskong Supattra Singnisai Sinmahat Phailouie and Witthaya Daodon	63
ศึกษาความสามารถของการเชื่อมมิกเดินตามด้วยการเชื่อมฟลักซ์คอร์ของรอยต่อฉากเหล็กกล้า ความแข็งแรงสูง Study of Weldability of MIG Welding Tandem FCAW on Fillet Joint of High Strength Steel โดย : ณัฐ แก้วสกุล เรืองศักดิ์ ภูธรธราช อัญญารัตน์ สอนสนาม ภาวินี อ่างบุญตา และ สุภารัตน์ บุตรไชย	72

การวิเคราะห์ฮิวริสติกส์สำหรับการประยุกต์ในการจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียน

85

An Analysis Heuristics for Application in School Bus Routing

โดย : จารุพงษ์ บรรเทา ปวีณา อาสาชาติ และ สุธิตรา สรภูมิ

การเลือกใช้อิเล็กโทรดล่างสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับ

96

ท่อเหล็กคาร์บอน STKM 13A และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC

Selection of Lower Electrode for Single-Sided Resistance Spot Welding of

Carbon Steel Tube STKM 13A and Cold Rolled Carbon Steel Sheet SPCC

โดย : ธีรวุฒิ เชื้อนแก้ว ฐิติ หมอรักษา ประจักษ์ จัตกุล ธีญญลักษณ์ มะปะเช และ สุริเยศร์ แสงสว่าง



คณะกรรมการจัดทำวารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนินท์ มีมนต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิศิษฐ์ แสง-ชูโต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

รองศาสตราจารย์ธรรม์ณชาติ วันแต่ง

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย
ราชภัฏเพชรบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภเอก ประมูลมาก

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญส่ง จงกลณี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพร ใจดำรงค์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทโชติ อุดมศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิสิษฐ์ ศรีน้อย

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทสายัน นราพินิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์นทีชัย ผัสดี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยิ่งยศ ทิพย์ศรีราช

โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จันทบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ มูแก้ม

คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วังไกลกังวล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนชนะ ศรีสระคู

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

ดร.มนตรี แสงสุริยันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม

ดร.สุรเชษฐ์ เกื้อนแก้วสิงห์

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ขอนแก่น

เลขานุการ

ดร.กั้วหน้า จงวัฒนารักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



Journal of Manufacturing and Management Technology

Editorial Team

Editor-in-Chief

Asst. Prof. Dr. Anin Memon

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Editorial Board

Asst. Prof. Pisit Sang-Xuto

Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

Assoc. Prof. Tannachart Wantang

Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University

Asst. Prof. Supaaek Pramoonmark

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Asst. Prof. Boonsong Chongkolnee

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Asst. Prof. Jatuporn Jaidumrong

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

Asst. Prof. Dr. Nonthachoti Udomsri

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

Asst. Prof. Pisit Srinoi

Faculty of Argo-Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus

Asst. Prof. Puttasayan Narapinij

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

Asst. Prof. Nateechai Passadee

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

Asst. Prof. Yingyos Tipsrirach

Establishment Project Faculty of Integrated Engineering and Technology, Chantaburi Campus, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok

Asst. Prof. Dr. Niwat Mookam

Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kang Won Campus

Asst. Prof. Dr. Poontana Sresracoo

Faculty of Industrial Technology, Buriram Rajabhat University

Dr. Montri Saengsuriyan

Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University

Dr. Surached Thuankaewsing

Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus

Secretary

Dr. Kaona Jongwuttanaruk

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

บทบรรณาธิการ

วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ฉบับนี้เป็นการตีพิมพ์ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนกรกฎาคม - ธันวาคม ปีพุทธศักราช 2565 จำนวนบทความตีพิมพ์ 9 บทความ โดยวารสารมีวัตถุประสงค์ที่จะรับตีพิมพ์บทความคุณภาพสูงสำหรับ นักศึกษาด้านเทคโนโลยี นักวิจัย และผู้ปฏิบัติงาน ให้เข้าใจและสามารถประยุกต์ใช้ทฤษฎีพัฒนาการปฏิบัติงานให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น วารสารรับตีพิมพ์บทความวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทัศน์ทั้งที่เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษซึ่งไม่เคยตีพิมพ์ที่ไหนมาก่อน โดยทางวารสารตีพิมพ์ 2 ฉบับต่อปี ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม ซึ่งในฉบับนี้มีเนื้อหาทั้งทางด้านวิศวกรรมการผลิต กระบวนการผลิต การจัดการการผลิต และการดำเนินงาน วัสดุศาสตร์และการประยุกต์ใช้งาน และ โซ่อุปทานและโลจิสติกส์

กระบวนการพิจารณาบทความของวารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ บทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่าน ตามประกาศของ ก.พ.อ เรื่องหลักเกณฑ์และวิธีการพิจารณาแต่งตั้งบุคคลให้ดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ และศาสตราจารย์ (ฉบับที่ 4) ปีพุทธศักราช 2564 ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิและผู้แต่งตั้งแต่ละท่านจะไม่มีมีการเปิดเผยชื่อกันและกันตลอดกระบวนการตรวจสอบบทความ (Double-blind review)

กองบรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ขอขอบคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ผู้เขียน และผู้อ่านทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความฉบับที่สองของทางวารสาร หวังเป็นอย่างยิ่งว่า ทุก ๆ ท่านจะมีสุขภาพ พลานามัยที่แข็งแรง ปลอดภัยจากการแพร่ระบาดของไวรัส COVID-19 รวมถึงปราศจากการโรคร้ายต่าง ๆ และยังคงติดตามการเผยแพร่ผลงานของวารสารฯ ต่อไป



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนินท์ มีมนต์

บรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุขฎี บุญธรรม	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล อธิธิผลิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพชร ชาทะวิณี	คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นราธิป ภาวะรี	คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฟ้าใส วิวัฒน์วงศ์วนา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ พิพัฒน์หัตถกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูไฮดี สนิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.ศุภวัฒน์ ชูวารี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฐิติ หมอรักษา	โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี วิทยาเขตจันทบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ดร.ประจักษ์ จิตกุล	โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี วิทยาเขตจันทบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยิ่งยศ ทิพย์ศรีราช	โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี วิทยาเขตจันทบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ดร.ภูริพัส แสนพงษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย เหลาหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พันธุ์พงษ์ คงพันธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ปานรวี รุ่งสกุลโรจน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Reviewers

Asst.Prof.Dr.Dussadee Buntam	Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University
Asst.Prof.Dr.Mongkon Ittiphalin	Faculty of Engineering and Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok Rayong
Asst.Prof.Dr.Pachara Chatavithree	Faculty of Economics, Khon Kaen University
Asst.Prof.Naratip Pawaree	Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University
Asst.Prof.Dr.Fasai Wiwatwongwana	Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology
Asst.Prof.Dr.Manop Pipathattakul	Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology
Asst.Prof.Suhaidee Sani	Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya
Dr.Suppawat Chuvaree	Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep
Asst.Prof.Thiti Mhoraksa	Establishment Project Faculty of Integrated Engineering and Technology, Chantaburi Campus, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok
Dr.Prajak Jattakul	Establishment Project Faculty of Integrated Engineering and Technology, Chantaburi Campus, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok
Asst.Prof.Yingyos Thipsrirach	Establishment Project Faculty of Integrated Engineering and Technology, Chantaburi Campus, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok
Dr.Puripat Saenpong	Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus
Asst.Prof.Dr.Chanchai Laoha	Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus

Asst.Prof.Dr.Phanphong Kongphan

Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Thanyaburi

Dr.Panrawee Rungskunroch

Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Thanyaburi

การประเมินผลกระทบของแอนไอโซทรอปิกที่ส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูปและการตีด ตัวกลับของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ

Anisotropic Evaluating Effect to Bendability and Springback of Advanced High Strength Steel Sheet

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ^{1*}, พงศกร หลีตระกูล¹, คมกริช ละวรรณวงษ์¹

¹สาขาวิศวกรรมวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

Natthasak Pornputsiri^{1*}, Pongsakorn Leetrakul¹, Komgrit Lawanwong¹

¹Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Industry and Technology,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kang Won Campus, Huahin,
Prachubkhirikhan, 77110

*Corresponding author Email: natthasak.por@rmutr.ac.th

(Received: November 21, 2022; Revised: December 13, 2022; Accepted: December 14, 2022)

บทคัดย่อ

ความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนโลหะแผ่นที่มีรัศมีขนาดเล็กและความแม่นยำในการทำขนาดมุดดัดตัวกลับหลังการขึ้นรูป เป็นเงื่อนไขสำคัญในการออกแบบเครื่องมือ การควบคุมกระบวนการดัดขึ้นรูป การประเมินความแม่นยำของขนาดและรูปร่างของชิ้นงานสำเร็จชนิดโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ ทั้งนี้เงื่อนไขเกี่ยวกับทิศทางการรีดหรือค่าแอนไอโซทรอปิกและเลขชี้กำลังค่าความเครียดแข็งของวัสดุส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจ จุดเน้นของบทความวิจัยนี้คือ การกำหนดแนวทางพื้นฐานในการผสมผสานข้อมูลเพื่อประกอบการประเมินผลพฤติกรรมการตีดตัวกลับและความสามารถในการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ โดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิกและเลขชี้กำลังค่าความเครียดแข็งของวัสดุ เพื่อพัฒนาแนวทางในการทำนายเชิงเปรียบเทียบจากผลของแรงดัดขึ้นรูป ขนาดมุดดัดตัวกลับ และความสามารถในการดัดขึ้นรูปจากการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวและความเสียหายบนพื้นผิวการดัดของโลหะแผ่น ทำการทดสอบด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบอิสระตามมาตรฐาน ISO 7438 : 2010 ที่มุมการดัดทุก 15° ตั้งแต่ 15° – 75° กับวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษเกรด SPFC 980 ซึ่งถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของรถยนต์อย่างแพร่หลาย ผลการทดลองพบว่าค่าแรงดัดขึ้นรูปจะแปรผันตามค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุ ส่วนขนาดมุดดัดตัวกลับจะขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ ในการดัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบแบบขวางแนวการรีดซึ่งมีค่าแข็งแรงดึงสูงสุดมากกว่าจะมีขนาดของมุดดัดตัวกลับสูงกว่า ส่วนการดัดขึ้นรูปแบบตามแนวการรีดซึ่งมีค่าแข็งแรงดึงสูงสุดต่ำกว่าและมีความสามารถในการยืดตัวสูง จะมีขนาดมุดดัดตัวกลับน้อยกว่า ทั้งนี้ขนาดมุดดัดตัวกลับจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้น ส่วนลักษณะพื้นผิวการดัดของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะและทิศทางของแรงกระทำ โดยค่าความหยาบพื้นผิวจะเพิ่มสูงขึ้นและขนาดของรอยแตกร้าวจะมีขนาดใหญ่และกว้างขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้น

คำสำคัญ: การขึ้นรูปโลหะแผ่น ความสามารถในการดัด การตีดตัวกลับ พื้นผิวการดัด เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ

Abstract

The formability of sheet metal part with smaller radius and prediction of the springback angle size after forming. It is an important condition in tool design, controlling the bending process and assessing the size and shape accuracy of high-strength steel sheet finished part. The conditions regarding the rolling direction or anisotropic value (R) and strain hardening exponent (n) of sheet metal also affected the bendability of sheet metal which interested. The purpose of this research is determining a fundamental approach to data integration for evaluating the springback behavior and bendability of high-strength steel sheet by experimental method to study the effects of anisotropic properties and strain hardening exponents of materials for developed a guideline for comparative prediction with the effect of bending forces, springback angle size and the bendability due to changes in surface roughness and damage on the bending surface of sheet metal. The Air-bending tests method were performed in accordance with ISO 7438 : 2010 at every 15° bending angle from 15° to 75° with high strength sheet metal material SPFC 980 grade which is widely used as a car component. The experiment results showed that the bending force varies with the ultimate tensile strength of the material. The size of springback angle depends on the ultimate tensile strength and total elongation. The bending test specimens on the transverse rolling direction with higher ultimate tensile strength, that has a higher springback angle. The bending test on the rolling direction, which has a lower ultimate tensile strength and higher elongation, has a smaller springback angle. However, the springback angle tends to decrease as the bending angle increases. The characteristics of bending surface will depend on the nature and direction of the bending force. The bending surface roughness is increased and the crack size becomes significantly larger and wider as the bending angle is increased.

Keywords: Sheet metal forming, Bendability, Springback, Bending surface, High strength steel

1. บทนำ

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษมีแนวโน้มถูกนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมยานยนต์เพิ่มมากขึ้นจากความโดดเด่นด้านความแข็งแรงและความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี จึงเหมาะสำหรับการนำไปสร้างเป็นชิ้นส่วนหลักของรถยนต์และชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงสูง [1] ทั้งนี้พบว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษชนิดเฟสคู่ เป็นชนิดที่ถูกนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมยานยนต์มากที่สุด เนื่องจากมีความโดดเด่นในแง่ของคุณสมบัติทางกลคือ มีค่าความแข็งแรงสูงแต่มีความเค้นครากค่อนข้างต่ำ สามารถเปลี่ยนรูปได้ต่อเนื่องและมีคุณสมบัติด้านความเครียดแข็งแรงสูง [2] จึงมีคุณสมบัติที่ผสมผสานกันระหว่างความสามารถในการขึ้นรูปและมีค่าความแข็งแรงสูง [3] คุณสมบัติด้านความแข็งแรงที่โดดเด่นของเหล็กกล้าชนิดนี้ เกิดจากองค์ประกอบของโครงสร้างจุลภาคซึ่งประกอบด้วย 2 เฟสหลักคือ เฟสชนิดมาเทนไซต์ (martensitic phase) ที่เกิดกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (ferrite matrix) ทำให้เหล็กกล้าชนิดนี้มีคุณสมบัติที่โดดเด่นด้านความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีและความแข็งแรงสูง [4] จึงเหมาะสำหรับการใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนประกอบหลักของรถยนต์เพื่อให้มีน้ำหนักเบา ซึ่งจะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมจากการลดอัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันเชื้อเพลิงและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า ส่วนข้อเสียของเหล็กกล้าชนิดนี้ คือใน

ระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรัศมีขนาดเล็กหรือมีรูปทรงที่ซับซ้อนมักจะเกิดความเสียหายได้ง่าย โดยความเสียหายจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวการตัดจากค่าความเค้นดึงที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญในการขึ้นรูป และพฤติกรรมการติดตัวกลับที่เกิดขึ้นสูงเป็นอีกหนึ่งปัญหาที่สำคัญในการขึ้นรูปเหล็กกล้าชนิดนี้ [5]

ความสามารถในการดัดขึ้นรูปของวัสดุ หมายถึง ข้อจำกัดของความเครียดหรือสถานะความเค้นที่อนุญาตให้เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการดัดขึ้นรูปโดยไม่เกิดความเสียหายกับแผ่นวัสดุ [6] ซึ่งสามารถประเมินผลความสามารถในการดัดได้โดยการทดสอบการดัดขึ้นรูปจากพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงและความเสียหายของผิวด้านนอกบริเวณการดัดโค้ง โดยจะทำการดัดโค้งขึ้นทดสอบด้วยรัศมีและมุมตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ซึ่งข้อจำกัดในการดัดขึ้นรูปหมายถึง ปริมาณของความเครียดสูงสุดที่อนุญาตให้เกิดขึ้นได้กับขึ้นทดสอบในบริเวณการดัดขึ้นรูป โดยที่ไม่ทำให้ขึ้นทดสอบมีความเสียหายหรือรอยแตกร้าวเกิดขึ้น [7] ซึ่งจะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจากค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นซึ่งมักเกิดขึ้นกับที่รัศมีการดัดขนาดเล็ก นอกจากนี้สาเหตุดังกล่าวอาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะรูปร่างเครื่องมือ คุณสมบัติของวัสดุ ความหนาแน่นโลหะ พื้นผิวและเงื่อนไขของแผ่นวัสดุเป็นต้น [8] จึงมีความจำเป็นในการศึกษาถึงพฤติกรรมด้านความสามารถในการขึ้นรูปที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรในสภาวะที่รุนแรง [9-12] เพื่อช่วยให้มีความเข้าใจที่ดีถึงค่าความสามารถในการดัด กลไกความเสียหาย และพัฒนาการความเสียหายที่เกิดขึ้นในระหว่างการดัดขึ้นรูป ซึ่งคือจุดประสงค์ที่สำคัญในการศึกษาค้นคว้า

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ให้เกิดผลประโยชน์กับอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะมากที่สุด โดยมุ่งทำการศึกษาลงถึงผลกระทบของคุณสมบัติจากกระบวนการผลิตของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษที่ส่งผลต่อความสามารถในกระบวนการดัดขึ้นรูป ลักษณะและคุณภาพชิ้นงานที่ได้ รวมทั้งความเสียหายหรือข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นบนชิ้นงานสำเร็จด้วยการทดสอบการดัดขึ้นรูปที่มีลักษณะการเปลี่ยนรูปที่รุนแรงจากการใช้รัศมีการดัดต่ำ โดยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ (air-bending) ที่ขนาดมุมเพิ่มขึ้นทุกๆ 15° เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์พฤติกรรมการติดตัวกลับและความสามารถในการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นขึ้นทดสอบ โดยจะทำการวิเคราะห์ผลจากผลของแรงในการดัดขึ้นรูป (bending force) ค่าความหยาบผิว (surface roughness) ขนาดมุมติดตัวกลับ (springback angle) และความเสียหายบนพื้นผิวการดัด (bending surface) หลังการดัดขึ้นรูป ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับการขึ้นรูปโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษที่เหมาะสม สำหรับการผลิตชิ้นงานให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด หลีกเลี่ยงความเสียหายหรือข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ศึกษาความสามารถในการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ภายในประเทศเกรด SPFC 980 ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร ก่อนการทดสอบการดัดจะนำโลหะแผ่นไปทำการทดสอบแรงดึงในทิศทางการรีดต่างๆ คือ ตามแนวการรีด (0°) ทำมุม (45°) กับแนวรีด และขวางแนวการรีด (90°) โดยผลการทดสอบแรงดึงแสดงดังตารางที่ 1

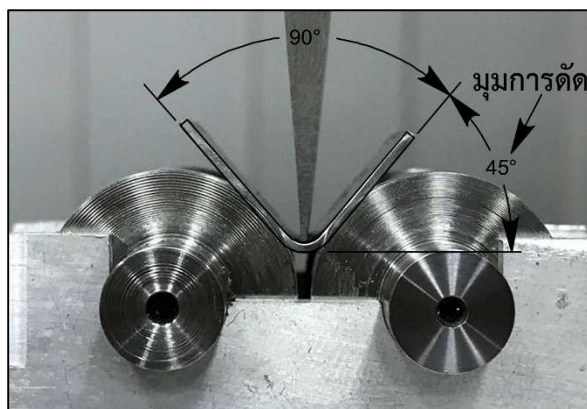
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของขึ้นทดสอบในทิศทางการรีดต่างๆ ของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ SPFC 980

Rolling Direction	Yield Stress (MPa)	Ultimate Tensile Stress (MPa)	Total Elongation (%)
0°	765	1050	16
45°	740	1020	14
90°	758	1035	12

2.2 การออกแบบการทดลอง ทำการทดสอบการดัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปแบบอสิระ (air-bending die) ดังรูปที่ 1 โดยมีข้อกำหนดและรายละเอียดการทดลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดและรายละเอียดการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอสิระเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ SPFC 980

ข้อกำหนด	รายละเอียด	เครื่องมือ
ลักษณะการทดสอบการดัด	การดัดขึ้นรูปแบบอสิระ (air-bending)	
มาตรฐานการทดสอบ	ISO 7438:2010	แม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปแบบอสิระ
รัศมีลูกกลิ้งรองรับ (R)	10 มิลลิเมตร	(air-bending die)
รัศมีหัวกด (r)	0.25 มิลลิเมตร	
ขนาดมุมการดัด (α)	15°, 30°, 45°, 60° และ 75°	เครื่องทดสอบแบบเอนกประสงค์
ความเร็วในการดัด	120 มิลลิเมตร/นาที	(universal testing machine)
การบันทึกผลการทดลอง	ค่าความหยาบผิวของพื้นผิวการดัด	เครื่องวัดค่าความหยาบผิว
	ขนาดมุมขึ้นงาน	กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ
	ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวการดัด	(optical microscope)



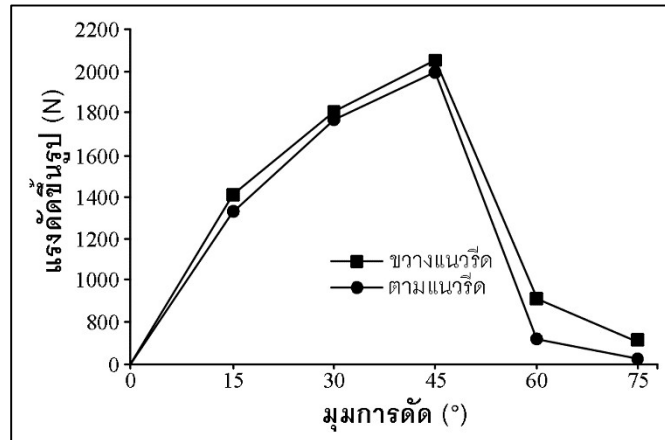
รูปที่ 1 แม่พิมพ์สำหรับการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอสิระ (air-bending die)

3. ผลการทดลอง

จากการทดสอบการดัดขึ้นรูปเพื่อการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษเกรด SPFC 980 ที่มีขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร โดยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบอสิระ (air-bending) ซึ่งจะทำให้การประเมินผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบเปรียบเทียบที่มุมการดัดทุก ๆ 15° โดยจะทำการประเมินผลและวิเคราะห์ผลความสามารถในการดัดขึ้นรูปจากแรงดัดขึ้นรูป ขนาดมุมดัดตัวกลับ ค่าความหยาบผิว และลักษณะความเสียหายบนพื้นผิวการดัด ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

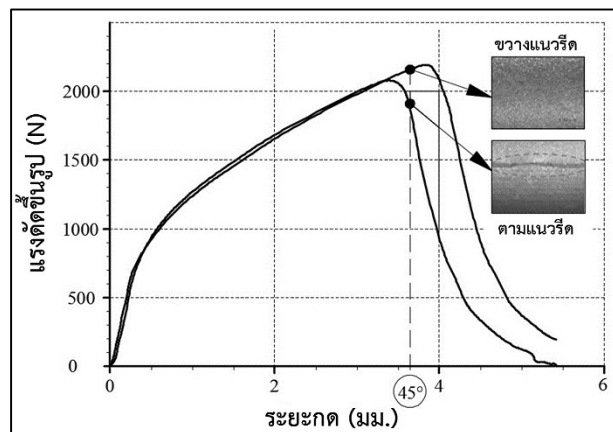
3.1. แรงดัดขึ้นรูปขึ้นงาน (bending force) ทำการทดสอบการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษเกรด SPFC 980 ขนาดความกว้าง 12 มิลลิเมตร x ความยาว 30 มิลลิเมตร x ความหนา 1 มิลลิเมตร ทำการดัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปแบบอสิระที่อุณหภูมิห้องและไม่ใช้สารหล่อลื่น โดยผลการเปรียบเทียบค่าแรงในการดัดขึ้นรูปจะแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งผลการทดลองการดัดขึ้นรูปพบว่า การดัดขึ้นรูปในทิศทางขวางแนวการรีดจะใช้แรงในการดัดขึ้นรูปสูงกว่าการดัดขึ้นรูปตามแนวรีดเล็กน้อย โดยการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดที่มุมการดัด 15° ใช้แรงดัดขึ้นรูป 1420.25 N และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

โดยแรงดัดจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่มุมการดัด 45° ซึ่งใช้แรงในการดัด 2180.5 N จากนั้นแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากมีรอยแตกงอเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบ ส่วนการดัดขึ้นรูปตามแนวการรีดซึ่งใช้แรงในการดัดขึ้นรูปต่ำกว่าพบว่ามีมุมการดัด 15° ใช้แรงดัดขึ้นรูป 1380.65 N และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยแรงดัดเพิ่มขึ้นสูงสุดที่มุมการดัด 45° ซึ่งใช้แรงในการดัด 1960.75 N จากนั้นแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดรอยแตกงอที่บริเวณพื้นผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าแรงกดดัดแผ่นวัสดุในทิศทางการรีดที่ต่างกัน

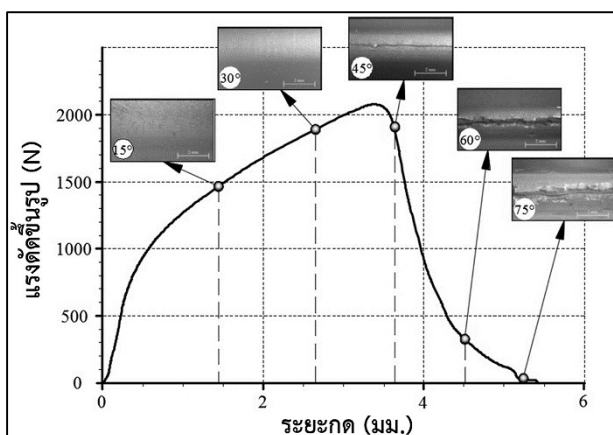
จากผลการทดลองที่กล่าวมาแล้วสรุปได้ว่าการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษแบบขวางแนวการรีดใช้แรงในการขึ้นรูปสูงกว่าซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกลซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึงในทิศทางตามแนวการรีด ซึ่งมีค่าความเค้นครากและค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าการดึงแบบขวางแนวการรีด และเห็นได้ชัดจากการเปรียบเทียบผลการดัดขึ้นรูปที่มุมการดัด 45° ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบแรงดัดขึ้นรูปที่มุมการดัด 45° ของวัสดุด้วยทิศทางการดัดที่ต่างกัน

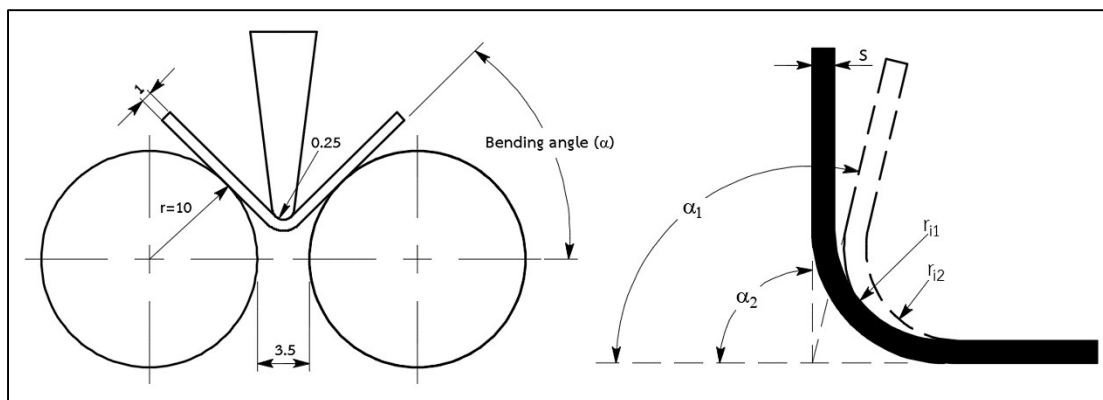
จากผลการทดสอบการดัดขึ้นรูปดังรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการดัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบที่ขนาดมุม 45° เท่ากันจะพบว่าการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดใช้แรงในการดัดขึ้นรูปสูงกว่าและไม่ปรากฏรอยแตกงอหรือความเสียหายใด ๆ บนพื้นผิวดัด ขณะผลการดัดขึ้นรูปแบบตามแนวการรีดพบว่าที่มุมการดัด 45° จะมีขนาดแรงดัดต่ำกว่าเนื่องจากผลของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ต่ำ

กว่าและการเกิดรอยแตกร้าวบนพื้นผิวการตัด ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของแรงตัดและการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวชั้นทดสอบจะเห็นได้ชัดเจนดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแรงตัดขึ้นรูปและการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวการตัดชั้นทดสอบจากการตัดขึ้นรูปแบบตามแนวการรีดจะพบว่าขนาดแรงตัดขึ้นรูปจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อขนาดมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้นจนถึงขนาดมุมการตัด 45° แรงตัดจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเนื่องจากปรากฏรอยแตกเกิดขึ้นบนพื้นผิวการตัด จากนั้นแรงตัดขึ้นรูปจะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะของรอยแตกที่มีความรุนแรงหรือมีความกว้างเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อมุมการตัดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าค่าแรงในการตัดจะแปรผันตามค่ามุมในการตัดขึ้นรูป คือ เมื่อมุมการตัดเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ต้องใช้ค่าแรงในการกดตัดสูงขึ้นและแรงตัดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปรากฏรอยแตกร้าวบนพื้นผิวการตัด ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงตัดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นหลัก

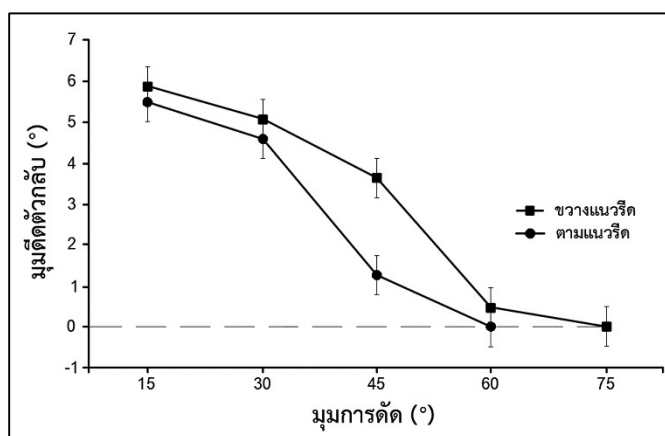


รูปที่ 4 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงตัดขึ้นรูปและการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวการตัด

3.2 มุมตีตัวกลับ (spring back angle) ภายหลังการตัดขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ขนาดมุมการตัดต่างๆ โดยการกำหนดระยะการกดตัดตามที่คำนวณไว้ จากนั้นจะนำชิ้นทดสอบมาถ่ายภาพ และวัดเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของมุมขึ้นงาน เพื่อคำนวณหาขนาดมุมการตีตัวกลับของชิ้นทดสอบซึ่งแสดงดังรูปที่ 5 โดยผลการวัดขนาดขนาดมุมตีตัวกลับของชิ้นทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งผลการทดลองพบว่าการตัดขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ SPFC590 แบบขวางแนวการรีดมีขนาดมุมตีตัวกลับสูงกว่าการตัดขึ้นรูปแบบตามแนวรีดซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกลที่ได้จากผลการทดสอบแรงดึงแบบตามแนวการรีด ซึ่งพบว่ามีค่าความเค้นครากและค่าความเค้นแรงดึงสูงกว่า อีกทั้งยังพบว่าการทดสอบการตัดขึ้นรูปที่ขนาดมุมการตัดน้อยจะมีขนาดมุมตีตัวกลับสูงและเมื่อขนาดมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดมุมตีตัวกลับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการตัดขึ้นรูปที่มุมการตัดน้อย ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณมุมการตัดมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุไม่มากนักทำให้มีความยืดหยุ่นตกค้างบริเวณดังกล่าวสูง จึงส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการตีตัวกลับสูงที่สุด และเมื่อมุมการตัดเพิ่มมากขึ้นค่าความเค้นจึงเพิ่มสูงขึ้น และเข้าสู่ช่วงของการเปลี่ยนรูปถาวรมากขึ้นส่งผลทำให้ค่าความยืดหยุ่นตกค้างลดน้อยลง จึงส่งผลให้ขนาดของมุมตีตัวกลับมีแนวโน้มลดลง [15] ทั้งนี้จากการตัดแบบตามแนวการรีดจะพบว่าที่ขนาดมุมการตัด 45° ขนาดมุมตีตัวกลับจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดการแตกร้าวบนพื้นผิวการตัด

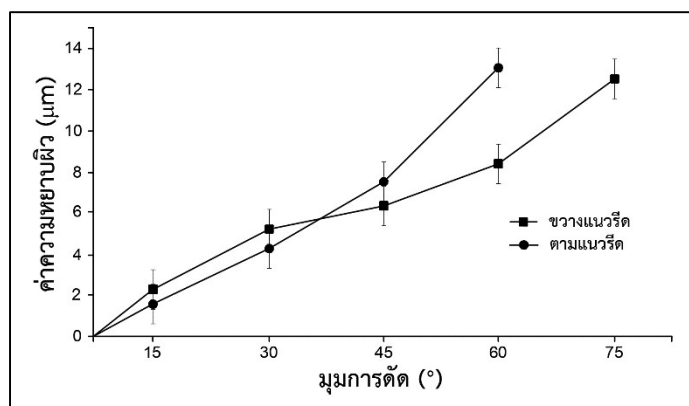


รูปที่ 5 การวัดเพื่อเปรียบเทียบขนาดมุมดัดตัวกลับ [14]



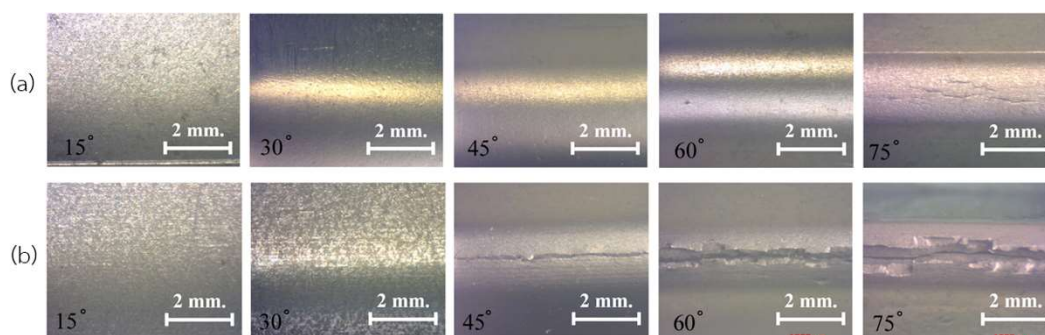
รูปที่ 6 การเปรียบเทียบขนาดมุมดัดตัวกลับของชิ้นทดสอบ

3.3 ค่าความหยาบผิว (surface roughness) ภายหลังการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษในทิศทางขวางและตามแนวการรีด จะนำชิ้นทดสอบมาทำการวัดค่าความหยาบผิวนอกของมุมดัด โดยผลการวัดค่าความหยาบผิวจะแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวการดัดของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษในทั้งสองทิศทางการดัดภายหลังการดัดขึ้นรูปด้วยมุมการดัดที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 15° พบว่าค่าความหยาบผิวจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มมากขึ้น โดยชิ้นทดสอบที่ได้จากการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดจะมีค่าความหยาบผิวสูงกว่าและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงมุมการดัดที่ 75° ส่วนการดัดขึ้นรูปตามแนวการรีดจะมีค่าความหยาบผิวต่ำกว่าในช่วงมุมการดัด 15°-30° และค่าความหยาบผิวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงกว่าการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดที่มุมการดัด 45° จากผลของการเกิดรอยแตกร้าวบนพื้นผิวการดัดของโลหะแผ่น ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวการดัดที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อทำการดัดขึ้นรูปแบบตามแนวการรีดด้วยมุมการดัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีลักษณะเป็นผิวคลื่นและเกิดรอยแตกร้าวได้ง่าย ส่วนการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดซึ่งจะทำให้โลหะแผ่นเกิดการยึดตัวในทิศทางตามแนวการรีดซึ่งมีคุณสมบัติทางกลที่สูงกว่า จึงส่งผลให้พื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยภายหลังการดัดขึ้นรูป



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าความหยابผิวขึ้นทดสอบ

3.4 ลักษณะพื้นผิวการดัด (bending surface characteristics) จากการดัดขึ้นรูปวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ ตามข้อกำหนดและเงื่อนไขการทดลอง เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการดัดขึ้นรูปไปทำความสะอาดและถ่ายภาพพื้นผิวด้านนอกบริเวณการดัดซึ่งได้รับผลกระทบจากค่าความเค้นดึงสูงสุด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (optical microscope) กำลังขยาย 10 เท่า เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวภายหลังการดัดขึ้นรูปดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวขึ้นทดสอบ (a) ขวางแนวรีด (b) ตามแนวรีด

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวขึ้นทดสอบจากการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดแสดงดังรูปที่ 8(a) พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวบริเวณการดัดอย่างชัดเจนที่มุมการดัด 60° โดยพื้นผิวมีลักษณะเป็นผิวคลื่นขนาดเล็กเกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวแกนการดัด เมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มขึ้นเป็น 75° พบว่ารอยแตกจะขยายตัวกว้างขึ้นและปรากฏเป็นการแตกร้าเสียหายอย่างชัดเจน และรูปที่ 8(b) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษจากการดัดขึ้นรูปแบบตามแนวการรีด ซึ่งพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวบริเวณการดัดอย่างชัดเจนที่มุมการดัด 30° และปรากฏเป็นรอยแตกขนาดเล็กเมื่อถูกดัดขึ้นรูปด้วยมุมการดัด 45° โดยรอยแตกจะเกิดขึ้นตลอดแนวความกว้างของชิ้นทดสอบ และรอยแตกจะขยายตัวกว้างขึ้นเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นจนถึงขนาดมุมการดัดที่ 75° รอยแตกหรือความเสียหายจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงส่งผลให้ชิ้นงานฉีกขาดออกจากกันเป็นสองส่วน ทั้งนี้เนื่องจากโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงสูง มีความสามารถในการยึดตัวจำกัด รวมทั้งเกิดความเครียดหรือมีค่าความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงส่งผลให้พื้นผิวของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษเกิดการแตกร้าเสียหายได้ง่ายเมื่อขนาดมุมการดัดขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ ด้วยวิธีการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระในทิศทาง การดัดหรือแนวการรีดที่แตกต่างกัน โดยวิเคราะห์ผลจากค่าแรงในการดัดขึ้นรูป ขนาดมุมดัดตัวกลับ ค่าความหยาบผิว และลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวการดัด จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ค่าแรงดัดขึ้นรูปของชิ้นทดสอบจะแปรผันตามค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุ กล่าวคือการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดจะส่งผลให้วัสดุเกิดการยึดตัวของพื้นผิวการดัดไปตามแนวการรีดซึ่งมีความสามารถในการรับแรงดึงได้สูงกว่า จึงใช้แรงในการดัดขึ้นรูปสูงกว่า ส่วนการดัดแบบตามแนวการรีดจะใช้แรงเพื่อการดัดขึ้นรูปน้อยกว่า

2) ขนาดมุมดัดตัวกลับจะแปรผันกับความสามารถในการยึดตัวของวัสดุ กล่าวคือคุณสมบัติทางกลของวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษที่ได้จากการดึงแบบขวางแนวการรีดจะมีขนาดของมุมดัดตัวกลับสูง ส่วนการทดสอบแรงดึงตามแนวการรีดจะมีขนาดมุมดัดตัวกลับน้อยกว่า

3) ขนาดมุมดัดตัวกลับจะแปรผันกับขนาดมุมการดัด กล่าวคือเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ขนาดมุมดัดตัวกลับลดต่ำลง เนื่องจากเมื่อมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเค้นเพิ่มสูงขึ้นเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรมากขึ้นและค่าความยืดหยุ่นตกค้างน้อยลง จึงส่งผลให้ขนาดมุมดัดตัวกลับมีแนวโน้มลดลง

4) วัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงสูงและเกิดความเครียดเชิงสูง เมื่อมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ต้องใช้ค่าแรงในการดัดขึ้นรูปสูงขึ้น ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดัดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นหลัก ดังนั้นเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้พื้นผิวการดัดมีค่าความหยาบผิวเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยแตกร้าวและฉีกขาดออกจากกันได้ง่าย ทั้งนี้การดัดขึ้นรูปแบบอิสระเป็นลักษณะการขึ้นรูปที่เกิดแรงเสียดทานต่ำเนื่องจากเป็นลักษณะของแรงเสียดทานแบบจุด (point friction) หากเป็นการดัดขึ้นรูปในลักษณะอื่นเช่น การดัดขึ้นรูปแบบตัวยู (U-bending) หรือการดัดขึ้นรูปแบบดึงยึดในลักษณะของการลากขึ้นรูปลึก (deep drawing) ควรมีการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานในระหว่างการขึ้นรูป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษาของสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ที่มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. D. Horvath, "Advanced Steels for Lightweight Automotive Structures," *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles (Second Edition)*, pp. 39–95, 2021.
- [2] S. Pandre, V. Mhatre, N. Kotkunde and S. K. Singh, "Strain Hardening Behavior of DP 590 Steel Using Dislocation Density Based Kock-Mecking Model," *Materials Today: Proceedings*, Article in press, 2020.
- [3] E. Tamer, G. Ozgultekin, O. Poyraz and C. Seyalioglu, "Formability Analyses of a Novel Alloy Cold Rolled Batch Annealed Dual Phase Steel," *Procedia Manufacturing*, vol. 47, pp. 1211–1216, 2020.

- [4] S. Fan, H. Hao, L. Meng and X. Zhang, “Effect of Deep Cryogenic Treatment Parameters on Martensite Multi-Level Microstructures and Properties in A Lath Martensite/Ferrite Dual-Phase Steel,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 810, pp. 141–149, 2021.
- [5] G. Béres, Z. Lukács and M. Tisza, “Springback Evaluation of Tailor Welded Blanks At V-Die Bending Made of DP Steels,” *Procedia Manufacturing*, vol. 47, pp. 1366–1373, 2020.
- [6] S. Nopparat, P. Sansot and S. Tom, “Bendability Evaluation of Sheet Metals in Three-Point Bending Test by Using Acoustic Emission Features,” *The Journal of Applied Science*, vol. 16, pp. 15–22, 2017.
- [7] W. Wang, M. Li, Y. Zhao and X. Wei, “Study on Stretch Bendability and Shear Fracture Of 800 Mpa Dual Phase Steel Sheet,” *Materials and Design*, vol. 56, pp. 907–913, 2014.
- [8] A.W. Hudgins, D.K. Matlock, J.G. Speer and C.J.V. Tyne, “Predicting instability at die radii in advanced high strength steels,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 741–750, 2010.
- [9] D.K. Leu and J. Mater, “A Simplified Approach for Evaluating Bendability and Spring Back in Plastic Bending of Anisotropic Sheet Metal,” *Material Processing Technology*, vol. 66, pp. 9–17, 1997.
- [10] Davidkov, M.K. Jain and R.H. Petrov, “Strain Localization and Damage Development During Bending of Al–Mg Alloy Sheets,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 550, pp. 395–407, 2012.
- [11] M. Laurent, D. Dominique, G. Gilles, K. Helmut and D. Julia, “Strain Localization and Damage Mechanisms During Bending of AA6016 Sheet,” *Materials Science & Engineering A*, vol. 559, pp. 812–821, 2019.
- [12] Davidkov, R.H. Petrov and P.D. Smet, “Microstructure Controlled Bending Response in AA6016 Al Alloys,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, pp. 68–76, 2011.
- [13] Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility, vol. 3, pp. 1–7, 1998.
<https://doi.org/10.1520/E0290-13>.Copyright
- [14] W.F. Hosford and R.M. Caddell, “Metal Forming: Mechanics and Metallurgy,” *Cambridge University Press*, pp. 1–331, 2011.
- [15] D. Fei and P. Hodgson, “Experimental and Numerical Studies of Springback in Air V-Bending Process for Cold Rolled TRIP Steels,” *Nucl Eng Des*, vol. 236, pp. 1847–1851, 2006.

การใช้เทคนิค ECRS เพื่อปรับปรุงกระบวนการบรรจุน้ำผึ้ง

ECRS technique using for honey filling process improvement

วรพจน์ ศิริรักษ์¹ นิวัติชัย ใจคำ¹ อมรรรัตน์ ปิ่นชัยมูล¹ ธวัชชัย คล่องดี^{2*} และศรีัญญา ศิริแสน³

¹หลักสูตรวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย 99 หมู่ 10 ตำบล

ทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120

²วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม 129 หมู่ 7 ถนนศรีสงคราม-ท่าดอกแก้ว ตำบลศรีสงคราม

อำเภอศรีสงคราม จังหวัดนครพนม 48150

³สาขาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ 319 ถนนไทยพันทา

ตำบลโพธิ์ อำเภอเมืองศรีสะเกษ จังหวัดศรีสะเกษ 33000

Worapot Sirirak¹ Niwatchai Jaikham¹ Amornrat Pinchaimoon¹ Tawatchai Klongdee^{2*} and Sarinya Sirisean³

¹Industrial Engineering Program, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang

Rai, 99 Moo 10, Sai Khao, Phan, Chiang Rai, Thailand, 57120

²Srisongkram Industrial Technology College, Nakhon Phanom University, 129 Moo 7, Si Songkhram-Tha Dok

Kaew Road, Si Songkhram, Si Songkhram, Nakhon Phanom, Thailand, 48150

³Department of Industrial Management Technology, Faculty of Liberal Arts and Sciences, Sisaket Rajabhat

University, 319, Thai Pantha Road, Pho, Amphur Muang, Sisaket, Thailand, 33000

*Corresponding author Email: aofzape@gmail.com

(Received: August 8, 2022; Revised: September 14, 2022; Accepted: September 16, 2022)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการบรรจุน้ำผึ้งใส่ขวด เพื่อการตอบสนองความต้องการของลูกค้าด้วยเทคนิค ECRS และเวลามาตรฐานในการบรรจุขวด โดยก่อนการปรับปรุงมีขั้นตอนการทำงานในการบรรจุน้ำผึ้ง 6 ขั้นตอน มีเวลามาตรฐานในการทำงาน 65.98 วินาทีต่อขวด ซึ่งหลังจากการปรับปรุงกระบวนการบรรจุน้ำผึ้ง โดยการออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการบรรจุและปรับปรุงวิธีการทำงานใหม่ สามารถลดขั้นตอนในการบรรจุน้ำผึ้งที่ไม่จำเป็นออกไป ทำให้ขั้นตอนย่อยในการบรรจุเหลือเพียง 3 ขั้นตอน โดยสามารถลดเวลามาตรฐานในการบรรจุขวดเหลือ 27.68 วินาทีต่อขวด คิดเป็นประสิทธิภาพการบรรจุน้ำผึ้งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 58.03 %

คำสำคัญ: กระบวนการผลิตน้ำผึ้งบรรจุขวด เทคนิค ECRS การปรับปรุงกระบวนการ

Abstract

This research aims to efficiency improvement of the bottle honey filling process for demand recompense of customers with ECRS technique and standard time of filling process. Before, the improvement of the honey filling process had six steps in the filling process and a standard time of working of 65.98 seconds

per bottle. After, the improvement of the honey filling process with the fixture design in the filling and the working step could reduce the unnecessary honey filling step. The process is reduced to 3 steps, which decreases the working standard time of honey filling to 27.68 seconds per bottle. The efficiency of the honey filling process increased to 58.03%.

Keywords: Bottle honey process, ECRS technique, Process improvement

1. บทนำ

น้ำผึ้งเป็นสินค้าเกษตรอีกชนิดหนึ่งที่ปัจจุบันมีการส่งเสริมให้เกษตรกรเพาะเลี้ยงผึ้งเพื่อการผลิตน้ำผึ้ง เพื่อการส่งออก และการค้าขายภายในประเทศ ซึ่งสรรพคุณของน้ำผึ้งเป็นที่รู้จักกันดีอยู่แล้วว่ามีสรรพคุณด้านการบำรุงร่างกาย ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ผลิตภัณฑ์เสริมความงาม ผลิตภัณฑ์อาหาร และผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เป็นต้น โดยเฉลี่ยทั่วประเทศไทยแล้วภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะเป็นภูมิภาคที่ทำการผลิตน้ำผึ้งและเลี้ยงผึ้งเนื่องจากมีพืชอาหารผึ้งหลายชนิดในรอบปี เช่น ลำไย ลิ้นจี่ ทานตะวัน งา ข้าวโพด เป็นต้น ทำให้มีประสิทธิภาพการผลิตสูงและปริมาณการผลิตขยายตัวเพิ่มขึ้นทุกปี แต่ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการของท้องตลาด และความต้องการของต่างประเทศดังนั้นน้ำผึ้งเป็นธุรกิจอีกประเภทหนึ่งของไทยที่สำคัญ กลุ่มพัฒนาเกษตรกรรมตามแนวเศรษฐกิจพอเพียงจังหวัดเชียงราย เป็นผู้ผลิตน้ำผึ้งและจำหน่ายผลิตภัณฑ์จากผึ้ง แต่ไม่เพียงพอต่อการผลิตขายให้ทันกับยอดสั่งซื้อ โดยเฉพาะการส่งออกน้ำผึ้ง คิดเป็นร้อยละ 30 ของการผลิตของกลุ่มพัฒนาเกษตรกรรมจังหวัดเชียงราย [1] โดยประเทศที่ส่งออกส่วนใหญ่ คือ จีน มาเลเซีย เวียดนาม เป็นต้น จึงมีความต้องการที่จะเพิ่มอัตราการผลิตหรือขยายกำลังการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า

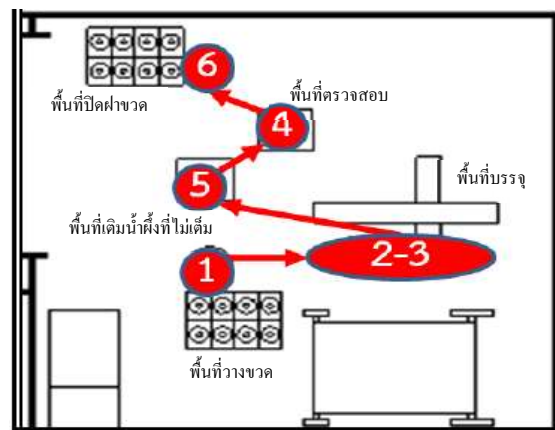
ปัจจุบันกลุ่มพัฒนาเกษตรกรรมจังหวัดเชียงราย มีมูลค่าการขายสินค้าของกลุ่มพัฒนาเกษตรกรรมฯ มีปริมาณสินค้า น้ำผึ้งขายดีที่สุด มีมูลค่าการขายสูงสุด อยู่ที่ 12,094,710 บาท คิดเป็นร้อยละ 90.11 รองลงมาเป็นผลิตภัณฑ์จากน้ำผึ้ง มีมูลค่า 932,797 บาท คิดเป็นร้อยละ 6.95 และ อุปกรณ์สำหรับเลี้ยงผึ้งมีมูลค่า 206,735 บาท คิดเป็นร้อยละ 1.54 มีความสามารถในการบรรจุน้ำผึ้งอยู่ที่ 5,921 ขวดต่อเดือน หรือประมาณ 197 ขวดต่อวัน และมียอดการสั่งซื้อด้วยความต้องการในอนาคตอยู่ที่ 7,130 ขวดต่อเดือน ทำให้สูญเสียโอกาสในการขายอยู่ที่ 1,209 ขวดต่อเดือน คิดเป็นมูลค่า 205,566.56 บาทต่อเดือน [1] จากข้อมูลพบว่าการทำงานของพนักงานปัจจุบันมีความล่าช้า เนื่องจากขาดอุปกรณ์ช่วยในการทำงานเพื่อบรรจุน้ำผึ้งให้กับพนักงาน และพนักงานมีตำแหน่งการทำงานที่ไม่แน่นอน ทำให้ขาดความชำนาญในการทำงานเฉพาะด้าน จึงเป็นสาเหตุของความล่าช้าในการบรรจุน้ำผึ้งส่งผลให้การผลิตน้ำผึ้งไม่ทันต่อความต้องการของลูกค้า ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิธีการปรับปรุงแก้ไขปัญหาล่าช้าในการผลิตด้วยหลายเทคนิค ดังเช่น การใช้เทคนิคแบบลีน เทคนิคการตั้งคำถาม 5W1H เทคนิค ECRS และแผนภูมิแกงปลา ในการปรับปรุงกระบวนการบรรจุขวดพาสเจอร์ไรส์และกระบวนการบรรจุน้ำดื่ม [2-4] และการปรับปรุงกระบวนการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบรรจุน้ำปลาด้วยเทคนิค ECRS [5] นอกจากนี้การปรับปรุงการผลิตด้านเทคนิคโคเซนร่วมกับเทคนิค 7 QC-Tool และเทคนิคการตั้งคำถามมาใช้ในการวิเคราะห์สาเหตุสามารถปรับปรุงการผลิตและลดต้นทุนการบรรจุน้ำดื่มได้เช่นกัน [6] ด้วยเทคนิคที่ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตจากที่กล่าวมาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้อย่างมาก โดยเฉพาะเทคนิค ECRS เป็นที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการเนื่องจากทำได้ง่ายและการวิเคราะห์ผลของประสิทธิภาพได้อย่างรวดเร็วหลังการปรับปรุง

ดังนั้นกระบวนการบรรจุจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดีขึ้นเพื่อลดขั้นตอนการทำงาน มีความรวดเร็ว ลดความเมื่อยล้าในการทำงานของพนักงาน ซึ่งจะให้มีปริมาณสินค้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการปรับปรุงใน

กระบวนการบรรจุน้ำผึ้ง ให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการศึกษางาน ECRS ในการลดขั้นตอนกระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์น้ำผึ้ง และลดเวลามาตรฐานของกระบวนการ ทำให้ประสิทธิภาพกระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งเพิ่มขึ้น

2. วิธีการทดลอง

ศึกษาและเก็บข้อมูลการผลิตแบบเดิมในส่วนของกระบวนการบรรจุ เครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบรรจุแบบเดิม เพื่อลดขั้นตอนและเวลาของกระบวนการบรรจุแบบเดิม พบว่ามีขั้นตอนทั้งหมด 6 ขั้นตอน ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังตารางที่ 1 และมีลำดับการไหลของงานดังแสดงในรูปที่ 1 ในการเก็บข้อมูลการบรรจุน้ำผึ้งใส่ขวดแบบเดิมขนาด 1 ลิตร จำนวน 10 ครั้ง เพื่อหาเวลาเฉลี่ยในการบรรจุแต่ละขั้นตอน มีรอบเวลาการบรรจุเป็น 44.04 วินาทีต่อขวด ซึ่งรายละเอียดการบรรจุของงานย่อยดังตารางที่ 2 เห็นได้ว่าเวลาในขั้นตอนลำดับที่ 4 และ 6 เป็นเวลาเฉลี่ย 12.90 วินาที และ 12.13 วินาที ใช้เวลามากกว่าขั้นตอนอื่น ๆ จึงคาดว่า 2 ขั้นตอนนี้ส่งผลกระทบให้เกิดความล่าช้าในการบรรจุน้ำผึ้ง จากนั้นวิเคราะห์หาสาเหตุของความล่าช้าด้วยแผนภูมิแกงปลา ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกลำนำใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่มีลักษณะคล้ายกัน เช่น การผลิตน้ำมันวบรรจุขวด [7]



รูปที่ 1 ลำดับการไหลของขั้นตอนการบรรจุก่อนปรับปรุง

จากการวิเคราะห์สาเหตุพบว่าความล่าช้าเกิดจากวิธีการทำงานที่ไม่เหมาะสมมีการทำงานซึ่งนั่งกับพื้น อีกทั้งยังขาดอุปกรณ์ในการช่วยบรรจุน้ำผึ้งใส่ขวดส่งผลให้เกิดความเมื่อยล้าและพนักงานมีความชำนาญในการทำงานไม่มากพอ จึงทำให้เกิดความล่าช้า จากนั้นดำเนินการปรับปรุงกระบวนการบรรจุน้ำผึ้ง โดยใช้เทคนิค ECRS ด้วยการออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการบรรจุให้มีพื้นที่การทำงานเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการบรรจุน้ำฝังบ่อนการปรับปรุง

ลำดับ	ขั้นตอน	ลักษณะการทำงาน
1	พนักงานทำการหยิบขวดเปล่ามาวางบนแท่นบรรจุ	
2	พนักงานวางขวดให้ตรงกับหัวจ่ายเครื่องบรรจุน้ำฝัก	
3	ทำการบรรจุน้ำฝักลงในขวดให้ได้น้ำหนักตามที่กำหนด	
4	ทำการตรวจสอบน้ำหนักให้ได้ตามมาตรฐานกำหนด	
5	ทำการเติมส่วนที่น้ำหนักไม่เต็ม	
6	ปิดฝาผนึกให้แน่น	

ตารางที่ 2 แผนภูมิการไหลกระบวนการบรรจุน้ำฝังบ่อนการปรับปรุง

ลำดับ	รายละเอียด	สัญลักษณ์					เวลา(วินาที)
		○	□	D	⇒	▽	
1	นำขวดใส่แท่นวาง	○	□	D	⇒	▽	4.18
2	เช็กการวางขวดให้ตรงกับหัวจ่ายน้ำฝัก	○	■	D	⇒	▽	2.52
3	บรรจุน้ำฝักลงในขวด	●	□	D	⇒	▽	6.49
4	ตรวจสอบน้ำหนัก	○	■	D	⇒	▽	12.90
5	เติมส่วนที่น้ำหนักไม่เต็ม	●	□	D	⇒	▽	5.82
6	ปิดฝา	●	□	D	⇒	▽	12.13
รวม		3	2	-	1	-	44.04

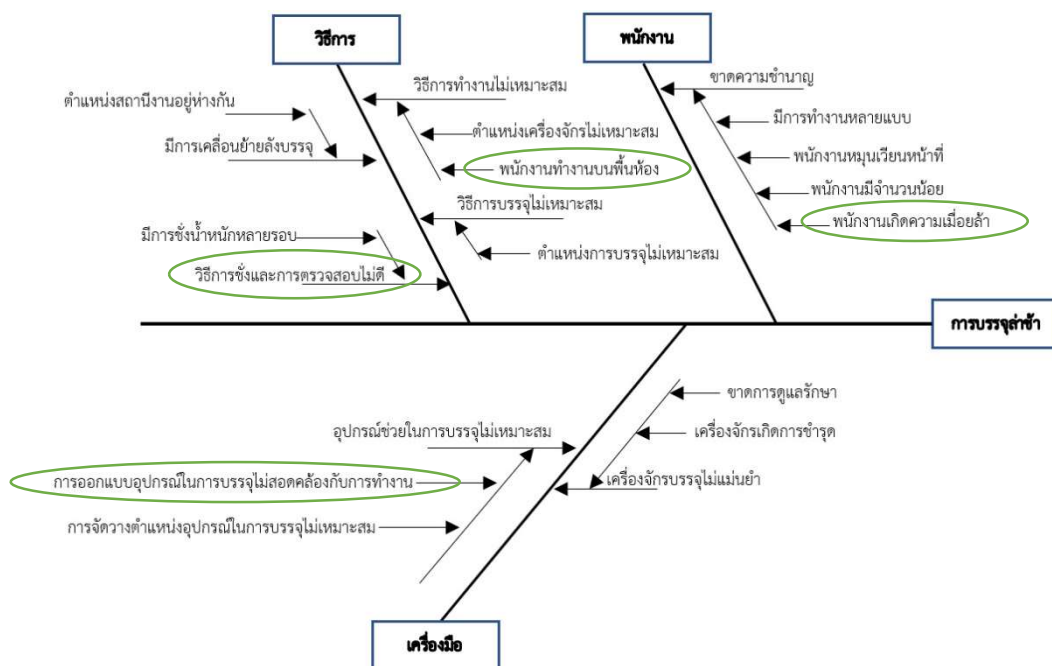
โดยอุปกรณ์ช่วยบรรจุนี้จะออกแบบให้กระบอกใส่ขวดบรรจุน้ำฝักอาศัยหลักการแรงโน้มถ่วงให้ขวดไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ โดยอุปกรณ์ช่วยจับชิ้นงานเป็นอุปกรณ์ช่วยในการทำให้ปากขวดมีความแม่นยำกับปากท่อการบรรจุและโต๊ะบรรจุน้ำฝักปรับระดับความสูงต่ำได้และมีพื้นที่วางน้ำฝักหลังบรรจุ ซึ่งจะทำให้พนักงานไม่จำเป็นต้องยกขวดน้ำฝักไปย้ายเพื่อทำงานขั้นตอนอื่น ๆ เหมือน

วิธีการเดิม โดยที่ก่อนปรับปรุงได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างข้อมูลเวลาเป็นจำนวน 10 ครั้ง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการหาจำนวนครั้งที่เหมาะสมสำหรับการเข้าไปเก็บข้อมูล ดังสมการที่ 1 ด้วยระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % ความแม่นยำ $\pm 5\%$

$$N = \left(\frac{40 \sqrt{N' \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}{\sum x_i} \right)^2 \quad (1)$$

โดยที่ N คือ จำนวนครั้งการสุ่มงานที่เหมาะสม
 40 คือ ค่าคงที่สำหรับระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % ความแม่นยำที่ $\pm 5\%$
 N' คือ จำนวนของข้อมูลที่เก็บตัวอย่างเบื้องต้น
 X_i คือ ข้อมูลของแต่ละตัวอย่าง

จากการหาจำนวนครั้งที่เหมาะสมสำหรับการนำข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยความน่าเชื่อถือที่ระดับ 95 % ความแม่นยำ $\pm 5\%$ ได้จำนวนครั้งการเก็บข้อมูลที่เหมาะสมจำนวน 13 ครั้ง แต่ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลไปแล้ว 10 ครั้ง จึงต้องเก็บข้อมูลเพิ่มอีก 3 ครั้ง ถึงจะเพียงพอต่อความน่าเชื่อถือ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ข้อมูลที่จะนำไปวิเคราะห์มีจำนวนที่เพียงพอน่าเชื่อมากขึ้น ผู้วิจัยจึงดำเนินการเก็บข้อมูลเพิ่มเป็น 20 ครั้ง รวมเป็น 30 ครั้ง เมื่อได้ข้อมูลเวลาการดำเนินงานของพนักงานในการทำงานแล้ว โดยข้อมูลที่ได้ทั้งหมด 30 ครั้ง จะถูกนำไปหาค่าเวลามาตรฐานของกระบวนการ เพื่อนำมาใช้ในการวัดและประเมินผลในกระบวนการบรรจุน้ำผึ้งทั้งก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงกระบวนการผลิต



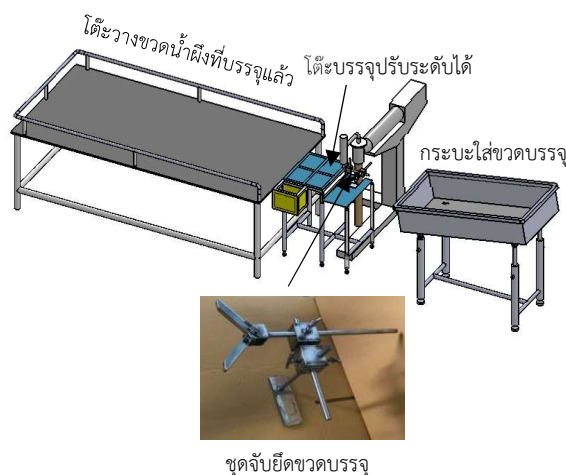
รูปที่ 2 แผนภูมิแก๊งปลาวิเคราะห์สาเหตุของความล่าช้า

โดยหาเวลามาตรฐานของการบรรจุน้ำผึ้งหาได้ดังสมการที่ 2

$$\text{เวลามาตรฐาน} = \text{เวลาปกติ} + \text{เวลาเผื่อ} \quad (2)$$

โดยที่ เวลาปกติคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\text{เวลาปกติ} = \text{เวลาสังเกตการณ์} \times \text{ประสิทธิภาพการทำงาน} \quad (3)$$



รูปที่ 3 อุปกรณ์ช่วยที่ออกแบบสำหรับการบรรจุให้ง่ายขึ้น

โดยค่าประสิทธิภาพการทำงานในการศึกษานี้ใช้ระบบ Westing house ในการกำหนดระดับคะแนนความสามารถในการทำงานด้านต่าง ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้พนักงานมีประสบการณ์และได้รับการฝึกอบรมการบรรจุน้ำผึ้งเป็นอย่างดีแล้วจึงได้กำหนดค่าระดับคะแนนความสามารถดังตารางที่ 3 เมื่อกำหนดค่าระดับคะแนนความสามารถในด้านต่าง ๆ ตามระบบ Westinghouse ซึ่งมีค่า 0.11 แล้วจึงนำค่าระดับความสามารถที่ได้มาบวก 1 จะได้ค่าประสิทธิภาพการทำงาน เป็น 1.11 หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการทำงาน 111% ซึ่งจะถูกนำไปใช้หาค่าเวลาปกติต่อไปสำหรับค่าเวลาเผื่อสำหรับการทำงานในการบรรจุน้ำผึ้งกำหนดให้เท่ากับ 35 นาทีต่อวัน ซึ่งเป็นเวลาเพื่อรวมของการปรับตั้งเครื่องและเวลาเพื่อการหยุดพักทำธุระส่วนตัวของพนักงาน

ตารางที่ 3 คะแนนความสามารถการบรรจุน้ำผึ้งตามระบบ Westinghouse

ความสามารถ	ระดับความสามารถ	คะแนน
Skill (ความชำนาญ)	C1	+0.06
Effort (ความพยายาม)	C2	+0.02
Consistency (ความสม่ำเสมอ)	C	+0.02
Condition (เงื่อนไข)	C	+0.01
รวม		0.11

3. ผลการทดลอง

จากการปรับปรุงวิธีการทำงานใหม่ทำให้พนักงานทำงานได้ง่ายขึ้น โดยลักษณะการทำงานใหม่ดังแสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากขั้นตอนที่ทำให้เกิดเวลาสูญเปล่าที่เกิดขึ้นทั้งหมด 3 ขั้นตอน ได้แก่ วางขวดให้ตรงกับหัวจ่ายน้ำผึ้ง ตรวจสอบน้ำหนักรวม น้ำผึ้งในส่วนที่ไม่เต็ม ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ไม่จำเป็นในการบรรจุน้ำผึ้งทุกขนาด เมื่อปรับปรุงการทำงานดังกล่าวด้วยหลักการ ECRS เป็นด้านของ E = Eliminate คือ การตัดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็นออกไป โดยการกำจัดงานที่ไม่จำเป็นในลำดับที่ 2, 4 และ 5 ในขั้นตอนการตรวจสอบน้ำหนักรวม จากเดิมพนักงานจะทำการบรรจุ แล้วตรวจสอบน้ำหนักรวมอีกครั้งทำให้เกิดการเสียเวลาในกระบวนการบรรจุ และเป็นการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น จึงได้ทำการออกแบบโต๊ะบรรจุน้ำผึ้งปรับระดับ เพื่อการบรรจุน้ำผึ้งสามารถตรวจสอบน้ำผึ้งได้ในขณะเดียวกัน ส่วนขั้นตอนเติมน้ำผึ้งไม่ได้ให้น้ำหนักหลังบรรจุจัดงานส่วนนี้ออกโดยการปรับตั้งปริมาตรกระบอกสูบในการจ่ายน้ำผึ้งให้มีปริมาณตามกำหนด



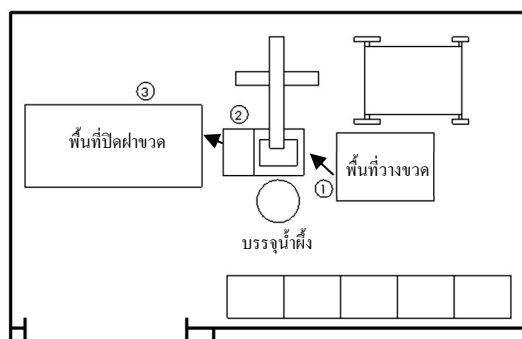
ก่อนปรับปรุง



หลังปรับปรุง

รูปที่ 4 ลักษณะการทำงานในการบรรจุน้ำผึ้ง

S = Simplify คือ การทำให้ง่ายขึ้น จากเดิมพนักงานที่ทำการบรรจุน้ำผึ้งได้ทำการหยิบขวดน้ำผึ้งและทำการจัดปากขวดน้ำผึ้งให้ตรงกันแล้วทำการบรรจุ ซึ่งปรับปรุงได้ทำการออกแบบฟิกเจอร์ ที่ช่วยในการลดขั้นตอนในการวางขวดให้ตรงกับหัวจ่ายน้ำผึ้ง



รูปที่ 5 ลักษณะการไหลการบรรจุหลังปรับปรุง

หลังปรับปรุงสามารถลดขั้นตอนการทำงานลงได้จากเดิมมีทั้งหมด 6 ขั้นตอน เหลือเพียง 3 ขั้นตอนคือ 1. การนำขวดใส่แท่นวาง 2. การบรรจุน้ำผึ้ง และ 3. การปิดฝา ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและการทำงานด้วย

เทคนิค ECRS สามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากสอดคล้องกับกระบวนการแก้ปัญหาการบรรจุน้ำมันข้าวโพด สามารถลดขั้นตอนและเวลาในการบรรจุได้มากถึง 83.62% [8] การปรับปรุงกระบวนการผลิตเต้าหอยนมสดสามารถทำให้ระยะเวลาการผลิตลดลง 69.36% [9] และการปรับปรุงประสิทธิภาพการบรรจุน้ำดื่มที่ช่วยลดกระบวนการและระยะทางการเคลื่อนย้าย รวมถึงวิธีการทำงานที่เหมาะสมอย่างมีประสิทธิภาพ [10-12] และสามารถเพิ่มปริมาณการผลิตได้ตามเป้าหมายที่วางไว้ เทคนิค ECRS สามารถลดขั้นตอนการทำงานทำให้มีเวลาการทำงานได้เร็วขึ้นกว่าวิธีการทำงานเดิม โดยเวลาการทำงานของกระบวนการบรรจุน้ำดื่มจากการสังเกตการณ์ก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงแสดงดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งการบรรจุน้ำดื่มขนาด 1 ลิตร ใช้เวลาเฉลี่ยรวมต่อขวด 18.48 วินาทีต่อขวด โดยลักษณะการไหลของกระบวนการดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งสามารถลดเวลาและขั้นตอนการบรรจุได้อย่างมาก เนื่องจากการออกแบบเครื่องมือช่วยในการบรรจุที่ทำให้ง่ายรวดเร็วทำให้ลักษณะการทำงานของพนักงานเป็นไปตามหลักการศึกษางานและลดการเคลื่อนไหวร่างกายและขจัดงานย่อยที่ไม่จำเป็นออกไปในลำดับที่ 2 ลำดับที่ 4 และ ลำดับที่ 5 ออกไป ทำให้ขั้นตอนการทำงานลดลง ซึ่งจากเวลาสังเกตการณ์หลังการปรับปรุงแล้วนำมาหาจำนวนครั้งที่เหมาะสมของการเก็บตัวอย่างดังสมการที่ 1 พบว่าจำนวนการเก็บข้อมูลที่เหมาะสม เพียง 1 ครั้ง จึงสรุปได้ว่าข้อมูลเวลาที่เก็บมา 30 ครั้ง ในกระบวนการหลังปรับปรุงมีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการนำข้อมูลเพื่อหาเวลามาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์เปรียบเทียบ จากนั้นหาเวลามาตรฐานตามสมการที่ 3 จะได้ค่าเวลามาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งเป็นเวลามาตรฐานของกระบวนการก่อนและหลังปรับปรุง เห็นได้ว่าเวลามาตรฐานในการบรรจุน้ำดื่มหลังปรับปรุงมีเวลาลดลงถึง 38.29 วินาทีต่อขวด ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพในการบรรจุน้ำดื่มเพิ่มขึ้น 58.03 % จากกระบวนการบรรจุก่อนปรับปรุง ทำให้สามารถบรรจุน้ำดื่มได้เพิ่มขึ้นวันละ 114 ขวด หรือเพิ่มขึ้นจากเดิมเดือนละ 3,420 ขวดต่อเดือน สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ตามความต้องการของลูกค้า

ตารางที่ 4 ระยะเวลาในการบรรจุน้ำดื่มต่อขวด

ก่อนปรับปรุง				หลังปรับปรุง			
ลำดับที่	วินาที	ลำดับที่	วินาที	ลำดับที่	วินาที	ลำดับที่	วินาที
1	40.1	16	48.2	1	15.2	16	20.1
2	42.8	17	44.5	2	19.5	17	17.5
3	38.6	18	45.8	3	18.2	18	18.7
4	39.7	19	43.1	4	17.3	19	17.9
5	47.5	20	44.9	5	20.1	20	16.4
6	45.3	21	48.3	6	19.8	21	19.7
7	40.8	22	46.2	7	16.7	22	16.8
8	44.2	23	45.5	8	18.4	23	17.9
9	50.1	24	46.1	9	19.2	24	20.1
10	48.7	25	44.7	10	17.3	25	19.7
11	37.3	26	47.2	11	21.2	26	21.7
12	38.5	27	48.3	12	15.6	27	18.1
13	39.2	28	42.6	13	18.7	28	17.9
14	39.1	29	42.1	14	16.6	29	18.2
15	45.6	30	46.3	15	19.3	30	20.5
รวม			1321.3	รวม			554.3
เวลาเฉลี่ย			44.04	เวลาเฉลี่ย			18.48

ตารางที่ 5 แผนภูมิการไหลกระบวนการบรรจุน้ำผึ้งหลังปรับปรุง

ลำดับ	รายละเอียด	สัญลักษณ์					เวลาเฉลี่ย (วินาที)
		○	□	D	⇒	▽	
1	นำขวดใส่แท่นวาง	○	□	D	⇒	▽	2.45
2	บรรจุน้ำผึ้งลงในขวด	●	□	D	⇒	▽	4.71
3	ปิดฝา	●	□	D	⇒	▽	11.32
รวม		2	-	-	1	-	18.48

ตารางที่ 6 เวลามาตรฐานการบรรจุน้ำผึ้ง (วินาทีต่อขวด)

เวลา (วินาทีต่อขวด)	กระบวนการ		ระยะเวลาลดลง (วินาทีต่อขวด)
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	
เวลาสังเกตการณ์	44.04	18.48	25.56
เวลาปกติ	$44.04(1.11) = 48.88$	$18.48(1.11) = 20.51$	28.36
เวลามาตรฐาน	$48.88 + [48.88(35/100)] = 65.98$	$10.31 + [20.51(35/100)] = 27.68$	38.29

4. สรุป

ในการปรับปรุงกระบวนการบรรจุน้ำผึ้งขนาด 1 ลิตร ด้วยวิธีการศึกษางานด้วยเทคนิค ECRS สามารถลดขั้นตอนในการบรรจุลงจาก 6 ขั้นตอน เหลือ 3 ขั้นตอน ส่งผลให้สามารถลดเวลามาตรฐานในการบรรจุน้ำผึ้ง หลังปรับปรุงลดลงเหลือ 27.68 วินาทีต่อขวด ซึ่งสามารถลดลงได้ถึง 38.29 วินาทีต่อขวด คิดเป็นประสิทธิภาพการบรรจุน้ำผึ้งเพิ่มขึ้น 58.03 % ทำให้สามารถบรรจุน้ำผึ้งได้เพิ่มขึ้นเฉลี่ยวันละ 114 ขวด คิดเป็น 3,420 ขวดต่อเดือน คิดเป็นรายได้เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 581,400 บาทต่อเดือน

อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิแกงปลา ที่ยังไม่ได้รับการแก้ไข เช่น การดูแลรักษาเครื่องจักรในการบรรจุ ดังนั้นการวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรจึงเป็นประเด็นที่จะทำการศึกษาเพื่อแก้ปัญหาการผลิตน้ำผึ้งบรรจุขวดให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นในครั้งต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษาและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ที่สนับสนุนงบประมาณและสถานที่สำหรับการศึกษาวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Trade Negotiations. (2022, February 22). 'Department of Negotiation' visits Chiang Rai area Searching for honey and white elephant cocoa, aiming to use FTA to penetrate international markets [Online]. Available: <https://www.dtn.go.th/th/news> (In Thai)
- [2] W. Impho and K. Poonikom, "Increasing Efficiency in The Production Process of Drinking Water Using Lean Technical: Case Study of Drinking Water Thanthip Production", *SNRU Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 653–660, 2017.

- [3] T. Wongwanruean and W. Wattanutchariya, “Improvement of Bottle Pasteurized Milk Production Process Using Lean Manufacturing Technique”, *The 1st Academic Conference on Industrial Engineering, Graduate School, Chiang Mai University, Chiang Mai*, 2017. (In Thai)
- [4] P. Purinthrapibal, C. Bunyadach, W. Kaewkong, B. Junmui, S. Khongsong, T. Thongtong, and S. Kochapakdee, “Increase of Packing Efficiency of Pasteurized Milk Process by Ishikawa Diagram: A Case Study of Phatthalung Dairy Cooperative Limited,” *Research and Development Institute, Rajamangala University of Technology Srivijaya*, vol. 10 no. 3, pp. 454–464, 2018. (In Thai)
- [5] U. Ketsripongsa, C. Pongpeera, S. Huiprakhon, and P. Sittisang, “Optimizing the Fish Sauce Production Process by Using a Functional Study,” *The 10th Engineering, Science, Technology and Architecture Conference 2019, Nakhon Ratchasima*, 2019. (In Thai)
- [6] S. Kerdsonbat, N. Thangthong, and N. Cheychom, “Analysis to Identify Causes and Guidelines for Reducing Costs in Drinking Water Filling Process Using KAIZEN to Continuous Improvement,” *Ph.D. dissertation, Department of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University*, 2017. (In Thai)
- [7] S. Yuphayao, “A Study on Cost Reduction Approaches for The Production of Clear Plastic Bottled Lemon Juice, A Case Study of Lime House Company,” *The 16th RSU national graduate research conference, Rangsit University*, pp. 1059–1066, 2021. (In Thai)
- [8] R. Suwan, “Productivity Increasing in Production Process: Corn Milk Bottling,” *Ph.D. dissertation, Master of Engineering Program, Engineering Management, Faculty of Engineering, Dhurakij Pundit University*, 2014. (In Thai)
- [9] P. Deekhampor and I. Thirawatsakul, “Improving the Efficiency of The Milk Pudding Production Process,” *Thai Science and Technology Journal, Udon Thani Rajabhat University*, vol. 2, no. 1, pp. 15–30, 2014. (In Thai)
- [10] C. Kittidecha and A. Chaiklang, “The Productivity Improvement of Bottled Water Manufacturing Using Work Study Technique,” *Journal of Manufacturing and Management Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2022. (In Thai)
- [11] A. Darusaram, A. Prakrobkun and S. Muangnangrong, “Guidelines for Increasing Efficiency in The Production Process Case Study of Nicha Drinking Water Factory,” *Ph.D. dissertation, Bachelor of Science, Industrial Management Technology, Faculty of Industrial Technology, Buriram Rajabhat University*, 2019. (In Thai)
- [12] W. Nakkrua, N. Nongbua and M. Meesikhi, “Optimization of Drinking Water Packaging Process: A Case Study of Tubtim Water Plant, Krasang, Buriram,” *Ph.D. dissertation, Bachelor of Science, Industrial Management Technology, Faculty of Industrial Technology, Buriram Rajabhat University*, 2017. (In Thai)

สมบัติของกระดาษจากเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพด

Properties of Paper from Mixed Fiber of Bamboo Sprout Coat and Corn Husk

มนตรี ขาวสุข¹ ธนัญญุต สมใจ^{2*}¹ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรเพื่ออุตสาหกรรม ² ภาควิชาการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี

จังหวัดปทุมธานี 25230

Montri Kawsuk¹ Thanutyot Somjai^{2*}

¹Department of Agricultural Engineering for Industry, ²Department of Industrial Management,
Faculty of Industrial Technology and Management, King Mongkut's University of Technology North Bangkok,
Prachinburi Campus, Prachinburi, 25230

*Corresponding author Email: thanutyot.s@itm.kmutnb.ac.th

(Received: July 25, 2022; Revised: November 24, 2022; Accepted: November 28, 2022)

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากเส้นใยเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพด ขั้นตอนการเตรียมเยื่อทำการแช่เปลือกหน่อไม้ในน้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เปลือกข้าวโพดใช้เวลาต้ม 6 ชั่วโมง จากนั้นต้มโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเปลือกหน่อไม้ในอัตราส่วน 100 : 1800 กรัม และต้มโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเปลือกข้าวโพดในอัตราส่วน 200 : 700 กรัม เยื่อที่ได้จะนำมาปั่นให้ละเอียดซึ่งเปลือกหน่อไม้ปั่น 3 นาที และเปลือกข้าวโพด 1 นาที จากนั้นทำการตีเยื่อโดยแบ่งเยื่อเปลือกหน่อไม้และเยื่อเปลือกข้าวโพดออกเป็นอัตราส่วนต่างๆ ทำการผสมกันแล้วนำไปตีกระจายเยื่อให้สม่ำเสมอเพื่อขึ้นรูปกระดาษ ตากแดดให้แห้ง กระดาษที่ได้จะถูกนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาของกระดาษ ทดสอบสมบัติทางกล ประกอบด้วย ความต้านแรงดันทะลุ ความต้านแรงดึง ความต้านทานการหักพับ การสะท้อนน้ำของกระดาษ กับกระดาษที่ขายในท้องตลาด ผลการทดสอบพบว่ากระดาษจากเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพดในอัตราส่วน 20 : 80 มีความหนา 0.024 มิลลิเมตร ค่าความต้านแรงดันทะลุ 42.930 ± 3.848 นิวตัน ค่าความต้านแรงดึง 44.674 ± 4.899 นิวตัน ค่าความต้านทานการหักพับ 733 ± 55.076 ครั้ง ค่าการสะท้อนน้ำของกระดาษ 9.735 วินาทีซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมและดีที่สุดในการนำมาผลิตกระดาษที่สามารถใช้ในท้องตลาดได้

คำสำคัญ: กระดาษจากเส้นใยเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพด สมบัติทางกาย สมบัติทางกล

Abstract

This paper's goal was to investigate the mechanical and physical characteristics of paper made from a mixture of bamboo sprout coat and corn husk fiber. Pulping was processed by steeping in water: the bamboo sprout coat for 12 hours and corn husk for 6 hours. Boil the sodium hydroxide to bamboo sprout coat at a ratio of 100: 1800 g. and boiling the sodium hydroxide to corn husk at a ratio of 200: 700 g. Finely chop the pulp

yield in a blender, 3 minutes for the bamboo sprout coat, and 1 minute for corn husk. Subsequently, pulp beating with the mixed pulp different ratio of bamboo sprout coat to corn husk, spread the pulp evenly to form paper. Paper desiccated in the sun. The paper was tested for the physical property of paper thickness. Testing for mechanical properties consisted of; penetration pressure resistance, tensile strength, folding broken resistance, water reflection of paper, with the paper sold in the market. The results showed that the paper from bamboo sprout coat mixed with corn husks at a ratio of 20: 80 had a thickness of 0.024 mm. 42.930 ± 3.848 N, tensile strength 44.674 ± 4.899 N, folding reduction adjustment value 733 ± 55.076 times, the water reflectivity of the paper 9.735 seconds. It was the most suitable and optimal ratio to produce a paper that applicable in the market.

Keywords: Paper from Mixed Fiber of Bamboo Sprout Coat and Corn Husk, Mechanical properties, Physical properties

1. บทนำ

ข้าวโพดเป็นพืชที่สำคัญของจังหวัดปราจีนบุรีในปี พ.ศ. 2562 มีผลผลิตข้าวโพดประกอบด้วย ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 จำนวน 15,580 ตัน ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 2 จำนวน 1,922 ตัน [1] และจังหวัดปราจีนบุรีมีการปลูกไม้ 6 สกุล 18 ชนิด มีเนื้อที่ปลูก 21,998 ไร่ [2] ซึ่งหน่อไม้ไผ่ตงและข้าวโพดเป็นผลผลิตที่มีการบริโภคและการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ จำนวนมากจึงส่งผลให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร หากปล่อยทิ้งไว้จะทำให้เกิดเป็นขยะมูลฝอยประเภทสารอินทรีย์ถึงแม้ขยะประเภทนี้จะย่อยสลายได้เองแต่ก็ต้องใช้เวลา [3] การจัดการขยะมูลฝอยโดยการฝังกลบทำให้เกิดกระบวนการหมักขยะอินทรีย์แบบไร้อากาศและเกิดก๊าซในหลุมฝังกลบ ก๊าซจากหลุมฝังกลบประกอบด้วย มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไนโตรเจน [4] ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนจึงต้องมีการจัดการที่เหมาะสม และด้วยเปลือกหน่อไม้และเปลือกข้าวโพดเป็นขยะทางการเกษตรที่มีมากในจังหวัด อีกทั้งลักษณะของเปลือกหน่อไม้และเปลือกข้าวโพดซึ่งมีเส้นใย โดยทั่วไปแล้วลักษณะของพืชกลุ่มนี้จะมีศักยภาพและคุณสมบัติในการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษจากเส้นใยธรรมชาติ จากงานวิจัยของ อธิภัทร ไชยกาล [5] ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระดาษจากเปลือกหน่อไม้ไผ่ตง สำหรับใช้ งานด้านคหกรรม โดยศึกษาปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในเวลาที่ต่างกัน พบว่าอัตราส่วนระหว่างเปลือกหน่อไม้ไผ่ตงต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าความสว่างของกระดาษและค่าการดูดซึมน้ำ มีแนวโน้มลดลง แต่ค่าความต้านทานต่อแรงดึง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และขณะที่เมื่อใช้เวลาในการต้มเพิ่มขึ้น ค่าความสว่างของกระดาษ ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในการผลิตกระดาษจากหน่อไม้ไผ่ตง คือ ต้มด้วยอัตราส่วนเปลือกหน่อไม้ไผ่ตงต่อ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:18 กิโลกรัม และใช้เวลาในการต้ม 90 นาที ภัทราวดี คงงาม และคณะ [6] การทำกระดาษจากเปลือกข้าวโพด โดยกระดาษเปลือกข้าวโพดทุบเยื่อละเอียดจะมีความเหนียวที่สุด ลักษณะการดูดซึมน้ำได้ดี ซึ่งสามารถใช้ทำบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ใส่ของรับน้ำหนักได้ สำหรับกระดาษเปลือกข้าวโพดทุบเยื่อไม่ละเอียด ไม่มีความเหนียวของเนื้อกระดาษ ลักษณะการดูดซึมน้ำไม่ซึมน้ำ สามารถนำไปตกแต่งห่อกล่องบรรจุภัณฑ์ กาญจนา ลือพงษ์และคณะ[7] ศึกษาการเตรียมกระดาษคราฟท์ จาก ผักตบชวา ใบสับปะรด และกากกล้วย เป็นวัตถุดิบเสริม โดยใช้สารเคมี ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดน้ำความเข้มข้นร้อยละ 50 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 35 และสารกระจายเยื่อประเภทพอลิเมอร์ (Acramine 3187) โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำกระดาษ คือใช้เยื่อกากผักตบชวาร้อยละ 70 เยื่อใบสับปะรดย้อยละ 10 และเยื่อกากกล้วยร้อยละ 20 ซึ่งจะได้

กระดาษเทียบเท่ากระดาษคราฟท์ ประเภท KI เหมาะสำหรับนำไปใช้งานเป็นกล่องสินค้าเพื่องานบรรจุภัณฑ์ จากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตกระดาษจากเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพด และศึกษาสมบัติของกระดาษ ความหนาของกระดาษ การสะท้อนน้ำ แรงดันทะลุ ความเสียดทานแรงดึง ความต้านทานการหักพับ และการศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดเปลือกหน่อไม้และเปลือกข้าวโพด เพื่อให้ได้กระดาษที่สามารถใช้งานได้หลากหลาย และยังรักษาสิ่งแวดล้อมโดยการนำกลับมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรกลับมาใช้ประโยชน์

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาศักยภาพทางกลและสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากเส้นใยเปลือกหน่อไม้และเปลือกข้าวโพด และศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดเปลือกหน่อไม้และเปลือกข้าวโพดมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

2.1 การเตรียมเยื่อกระดาษ

เปลือกหน่อไม้ไฟแดงตัดให้ได้ขนาดประมาณ 4-5 นิ้ว นำไปแช่น้ำทิ้งไว้ 1 คืน นำไปล้างทำความสะอาด และนำมาต้มที่อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเปลือกหน่อไม้ 100 : 1800 กรัม ใช้น้ำในปริมาณ 1 ลิตร ต้มเยื่อเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมงในส่วนเปลือกข้าวโพดจะตัดให้ได้ขนาดประมาณ 4-5 นิ้ว นำไปแช่น้ำทิ้งไว้ 1 คืน นำไปล้างทำความสะอาด นำมาต้มที่อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเปลือกข้าวโพด 200 : 700 กรัม ใช้น้ำในปริมาณ 1 ลิตร ต้มเยื่อเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาทำการล้างเยื่อของเปลือกหน่อไม้และเปลือกข้าวโพดจนเมือกหมด เยื่อที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 1



a) เยื่อเปลือกหน่อไม้ไฟแดง



b) เยื่อเปลือกข้าวโพด

รูปที่ 1 ลักษณะเยื่อที่ผ่านการต้ม

2.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปกระดาษ

นำเยื่อเปลือกหน่อไม้ไฟแดงที่ผ่านการต้มไปปั่นเป็นระยะเวลา 3 นาที และเปลือกข้าวโพดผ่านการต้มไปปั่นเป็นระยะเวลา 1 นาที นำเยื่อทั้งสองชนิดที่ได้จากการต้มนำมาผสมในอัตราส่วนต่างๆ และจะได้ปริมาณในการผสมต่อครั้งเท่ากับน้ำหนัก 100 กรัม เทเยื่อผสมลงตีเยื่อให้ทั่วเฟรมตาข่ายจนได้ความหนาสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 2 นำกระดาษที่ได้ไปตากแดดจนแห้ง ดังรูปที่ 3 อัตราส่วนการผสมเส้นใยเปลือกหน่อไม้ไฟแดงและเปลือกข้าวโพดมีอัตราส่วนผสม ดังนี้ 1)100:0 2)0:100 3)50:50 4)60:40 5)40:60 6)80:20 7)20:80



a) ผสมเชื้ออัตราส่วนต่างๆ



b) เทเชื้อลงแม่พิมพ์

รูปที่ 2 วิธีการเทเชื้อให้ทั่วเฟรมตาข่าย



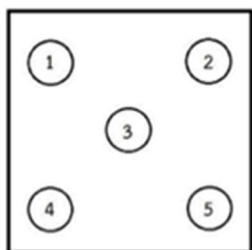
รูปที่ 3 ลักษณะกระดาษที่ได้เมื่อแห้งสนิท

2.3. ทดสอบสมบัติของกระดาษ

กระดาษที่ได้จากเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพดในแต่ละอัตราส่วนจะถูกนำมาทดสอบสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ ประกอบด้วย

2.3.1 ทดสอบความหนาของกระดาษ โดยตัดกระดาษออกเป็น 3 ชิ้น แล้ววัดจุดต่างๆ จำนวนทั้งหมด 12 จุด โดยใช้ไมโครคาลิเปอร์ ยี่ห้อ Mitutoyo มาวัดความหนาของกระดาษในจุดต่างๆ

2.3.2 ทดสอบการสะท้อนน้ำ ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T411 ทำการทดสอบด้วยดรอปปเปอร์ หยดน้ำปริมาณ 0.05 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงบนชิ้นทดสอบ 5 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 4 โดยทำการจับเวลาแต่ละตำแหน่ง



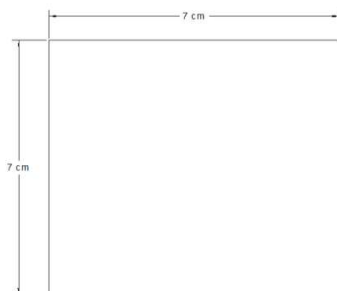
a) ขนาดชิ้นงานและจุดในการทดสอบการสะท้อนน้ำ



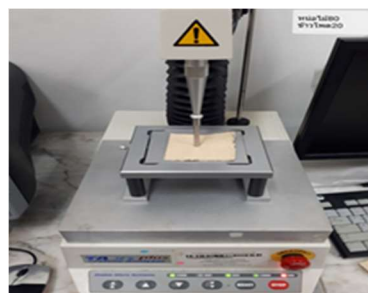
b) หยดน้ำลงบนชิ้นงาน

รูปที่ 4 จุดในการทดสอบการสะท้อนน้ำของกระดาษ

2.3.3 ทดสอบแรงดันทะลุ ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T403 โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA.XT and Texture Analyzer (Stable Micro Systems, Godalming, England) ชิ้นงานทดสอบขนาด 7 x 7 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่นในแต่ละอัตราส่วน แสดงดังรูปที่ 5



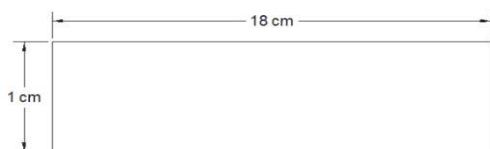
a) ขนาดชิ้นงานในการทดสอบแรงดันทะลุ



b) การทดสอบแรงดันทะลุ

รูปที่ 5 การทดสอบแรงดันทะลุ

2.3.4 ทดสอบความเสียดทานแรงดึง ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T404 โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส TA.XT and Texture Analyzer (Stable Micro Systems, Godalming, England) ตัดกระดาษให้มีลักษณะความกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้น แสดงดังรูปที่ 6



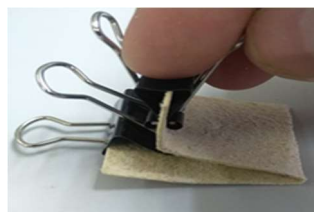
a) ขนาดชิ้นงานในการทดสอบแรงดึง



b) การทดสอบแรงดึง

รูปที่ 6 การทดสอบแรงดึงชิ้นงาน

2.3.5 ทดสอบความต้านทานการหักพับ ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T511 om-94 โดยตัดกระดาษให้มีลักษณะความกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 7 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น ทำการจับคลิปหนีบกระดาษส่วนหัวไปชนส่วนท้าย และนำส่วนท้ายไปชนส่วนหัว ทำจนกระดาษขาด แสดงดังรูปที่ 7



a) ขนาดชิ้นงานในการทดสอบการหักพับ b) หักพับชิ้นงานจนเกิดรอยฉีกขาด

รูปที่ 7 วิธีทดสอบความต้านทานการหักพับ

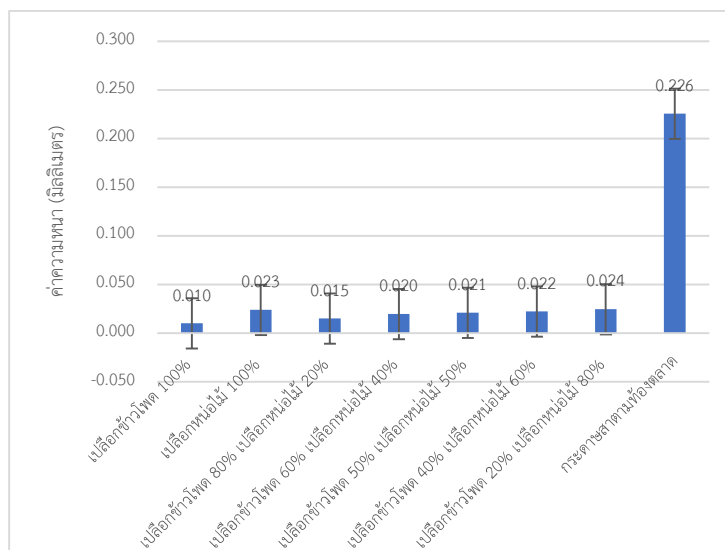
2.4. การศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการย่อยสลายของขยะอินทรีย์ การคำนวณผลการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจะคำนวณโดยใช้ปริมาณขยะอินทรีย์คูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) ซึ่งมีหน่วยเป็น kgCO_2e โดยในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้ค่า Emission Factor = $0.38 \text{ tonneCO}_2/\text{tonnewaste}$ [8]

3. ผลการวิจัย

3.1 การทดสอบความหนาของกระดาษ

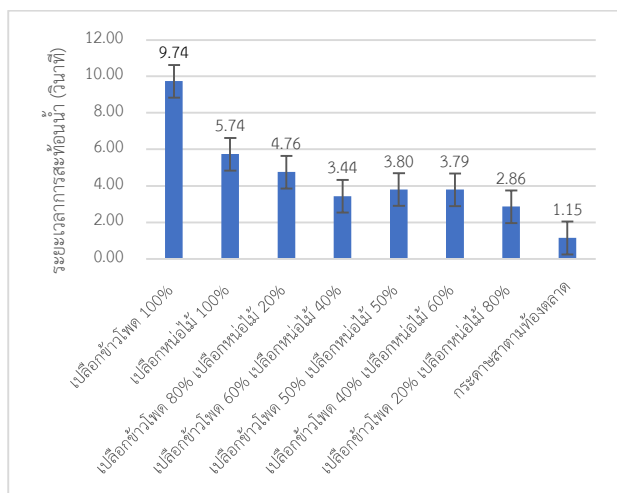
ความหนาของกระดาษในแต่ละอัตราส่วนต่างๆ แสดงผลดังรูปที่ 8 พบว่ากระดาษสาตามท้องตลาดมีความหนามากที่สุดคือ 0.226 ± 0.168 และเปลือกหน่อไม้ 80% เปลือกข้าวโพด 20% เป็นอัตราส่วนที่มีความหนาที่สุดในทุกอัตราส่วนเนื่องจากมีส่วนผสมของเส้นใยหน่อไม้ที่มีลักษณะเส้นใยที่หนาและยาว มีความหนาเท่ากับ 0.024 ± 0.004 มิลลิเมตร ซึ่งมีความหนาน้อยกว่ากระดาษสา คิดเป็นร้อยละ 89.4



รูปที่ 8 ค่าความหนาของกระดาษ

3.2 การทดสอบการสะท้อนน้ำ

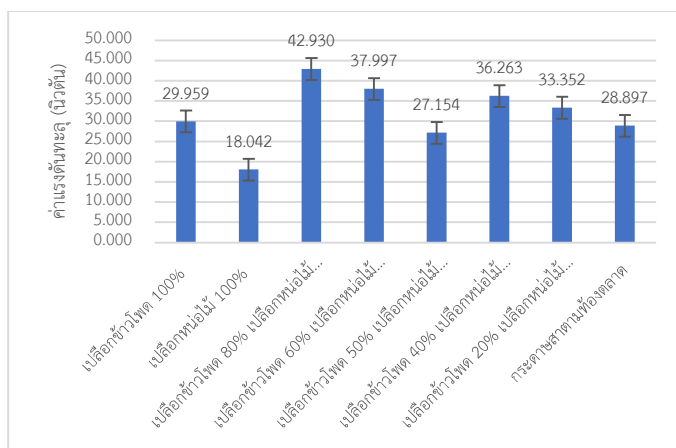
การดูดซึมน้ำของกระดาษที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงผลดังรูปที่ 9 พบว่าทุกอัตราส่วนมีค่าการสะท้อนน้ำมากกว่ากระดาษสาตามท้องตลาดและเปลือกหน่อไม้ 100% มีค่าการสะท้อนน้ำมากเนื่องจากการดูดซึมน้ำได้น้อย เส้นใยเปลือกหน่อไม้มีขนาดที่หนาใหญ่และไม่มีความละเอียดเท่าเส้นใยเปลือกข้าวโพด ค่าการสะท้อนน้ำ เท่ากับ 9.735 ± 2.500 วินาที



รูปที่ 9 ค่าการสะท้อนน้ำของกระดาษ

3.3 การทดสอบแรงดันทะลุ

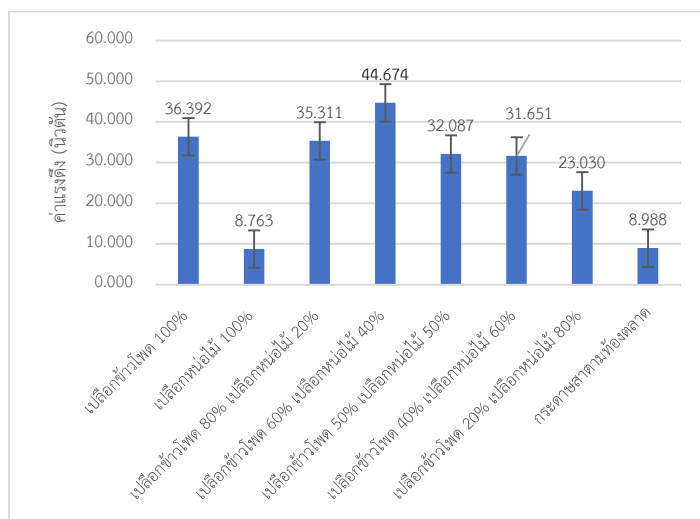
แรงดันทะลุของกระดาษในอัตราส่วนต่างๆ แสดงผลดังรูปที่ 10 พบว่ากระดาษที่ทำจากเส้นใยเปลือกข้าวโพดผสมเปลือกหน่อไม้ ในอัตราส่วน 80:20 สามารถทนต่อแรงดันทะลุได้มากที่สุด เนื่องจากกระดาษมีความหนาและเส้นใยเปลือกข้าวโพดและเส้นใยเปลือกหน่อไม้ช่วยให้ยึดเกาะได้ดี ความเหนียวของกระดาษที่ข้าวโพดจะช่วยเพิ่มสมบัติในการยึดเกาะของเส้นใยระหว่างหน่อไม้และข้าวโพดได้มากขึ้น และจากการทดสอบสามารถนำไปแปรรูปเป็นภาชนะเพื่อรองรับแรงดันที่กระทบลงบนพื้นผิวของกระดาษได้เหมาะสมมีค่าทดสอบแรงดันทะลุของกระดาษเท่ากับ 42.930 ± 3.848 นิวตัน ซึ่งมีค่าแรงดันทะลุมากกว่ากระดาษสาคิดเป็นร้อยละ 48.56



รูปที่ 10 ค่าการทดสอบแรงดันของกระดาด

3.4 การทดสอบแรงดึง

แรงดึงของกระดาดในอัตราส่วนต่างๆ แสดงผลดังรูปที่ 11 พบว่ากระดาดในทุกอัตราส่วนมีแรงดึงทะลุมากกว่า กระดาดตามท้องตลาด ยกเว้นกระดาดเลือกหัวโพด 100% กระดาดที่ทำจากเส้นใยเลือกหัวโพดผสมเลือกหัวโพด 100% ในอัตราส่วน 60:40 อัตราส่วนนี้มีค่าแรงดึงมากที่สุดเนื่องจากเส้นใยของหัวโพดผสมบดในการเพิ่มความเหนียว การขึ้นรูปของกระดาดและเส้นใยหัวโพดไม่มีขนาดใหญ่ หนา และยาว การผสมรวมเส้นใยทั้งสองจึงเป็นการเพิ่มสมบัติความเหนียวของกระดาดทำให้กระดาดต้านทานแรงดึงได้มากเท่ากับ 44.674 ± 4.899 นิวตัน ซึ่งมีค่าต้านทานแรงดึงมากกว่ากระดาดปกติเป็นร้อยละ 397.04

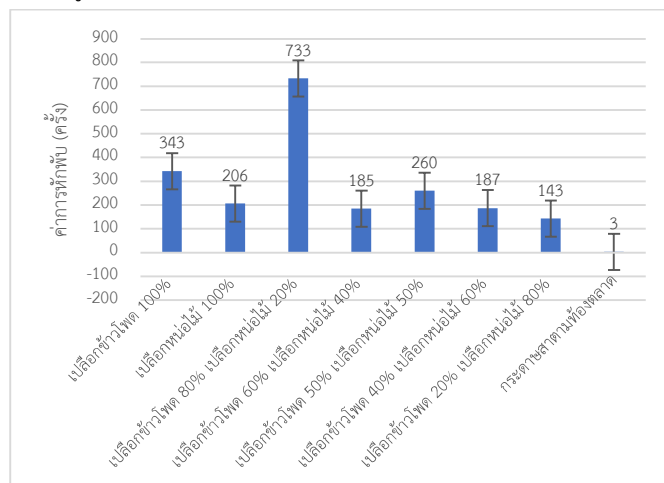


รูปที่ 11 ค่าการทดสอบแรงดึงของกระดาด

3.5 ทดสอบความต้านทานการหักพับ

การหักพับของกระดาดในอัตราส่วนต่างๆ แสดงผลดังรูปที่ 12 พบว่ากระดาดในอัตราส่วนต่างๆ มีความต้านทานการหักพับมากกว่ากระดาดตามท้องตลาด กระดาดที่ทำจากเส้นใยเลือกหัวโพดผสมเลือกหัวโพด 100% ในอัตราส่วน 80:20 มีค่าการหักพับสูง

ที่สุด ส่วนกระดาษจะมีความต้านทานการหักพับสูงขึ้นหากผสมเส้นใยเปลือกข้าวโพด เนื่องจากเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดมีความละเอียดและสั้นทำให้การยึดเกาะที่สูง มีค่าเท่ากับ 733 ± 55.076 ครั้ง



รูปที่ 12 ค่าการทดสอบความต้านทานการหักพับของกระดาษ

3.6 ผลการศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดเปลือกหน่อไม้และเปลือกข้าวโพด

จากการสอบถามเกษตรกรถึงปริมาณขยะมูลฝอยที่ต้องทิ้งต่อผลผลิต พบว่าหน่อไม้ 1 กิโลกรัมจะเหลือเปลือกหน่อไม้ให้ทิ้ง 0.3 กิโลกรัม และข้าวโพด 1 กิโลกรัมจะเหลือเปลือกข้าวโพดให้ทิ้ง 0.3 กิโลกรัม ซึ่งคิดจากจำนวนผลผลิตต่อปีจำนวนขยะมูลฝอยเปลือกหน่อไม้ที่ต้องทิ้ง 22,893.3 ตัน และเปลือกข้าวโพด 5,250.6 ตัน ขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น 28,143.9 ตันต่อปี ซึ่งสามารถปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 10,694.7 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตันขยะอินทรีย์ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอย

ขยะมูลฝอย	ปริมาณขยะมูลฝอย (tonne/year)	ปริมาณก๊าซเรือนกระจก (tonneCO ₂ /tonne _{waste})
เปลือกหน่อไม้ไผ่ตง	22,893.3	8,699.5
เปลือกข้าวโพด	5,250.6	1,995.2
รวม	28,143.9	10,694.7

4. อภิปรายผลการทดลอง

การผลิตกระดาษจากเส้นใยเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพดสามารถใช้งานได้เทียบเท่ากระดาษสาตามท้องตลาด และ สอดคล้องกับงานวิจัยของ กาญจนา ลือพงษ์และคณะ [7] การเตรียมกระดาษคราฟท์จากผักตบชวา ใบสับปะรด และกากกล้วย ซึ่งกระดาษที่ได้สามารถประยุกต์ใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ และเป็นการผลิตกระดาษจากเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพดช่วยลดขยะทางเกษตรจะช่วยลดปัญหาการขาดแคลนเยื่อไม้ในการผลิตกระดาษ และช่วยลดผลกระทบจากปัญหาการฝังกลบขยะอินทรีย์ กระดาษเส้นใยเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพด ในอัตราส่วนเปลือกหน่อไม้ 20% เปลือกข้าวโพด 80% เป็นกระดาษที่มีความหนาที่น้อยกว่ากระดาษสาตามท้องตลาดแต่จะมีการสะท้อนน้ำ การต้านทานแรงดันทะลุ การต้านทานแรงดึง การต้านทานการหัก

พบว่าดีกว่ากระดาษตามท้องตลาดมาก เนื่องจากเส้นใยของข้าวโพดมีสมบัติในการเพิ่มความเหนียว[9] การขึ้นรูปของกระดาษ และเส้นใยหน่อไม่มีขนาดใหญ่ หนา และยาว [10] การผสมรวมเส้นใยทั้งสองจึงเป็นการเพิ่มสมบัติของกระดาษให้มีความเหมาะสม และดีที่สุดในการนำมาผลิตกระดาษที่สามารถใช้ในท้องตลาดได้ หากมีการนำเปลือกหน่อไม้ผึ่ง และเปลือกข้าวโพดที่เป็นขยะทางการเกษตรมาใช้ผลิตกระดาษอย่างเหมาะสมจะช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการฝังกลบขยะอินทรีย์ เท่ากับ 10,694.7 tonneCO₂/tonne_{waste}

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตกระดาษจากเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพด และศึกษาสมบัติของกระดาษด้าน ความหนาของกระดาษ การสะท้อนน้ำ แร่งดันทะลุ ความเสียดทานแรงดึง ความต้านทานการหักพับ และการศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดเปลือกหน่อไม้และเปลือกข้าวโพด เพื่อให้ได้กระดาษที่สามารถใช้งานได้หลากหลาย และยังรักษาสีแวดล้อมโดยการนำกลับมาขยะทางการเกษตรกลับมาใช้ประโยชน์ พบว่ากระดาษจากเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพดในอัตราส่วน 20 : 80 มีค่าความหนาที่ 0.024 มิลลิเมตร ค่าความต้านแรงดันทะลุ 42.930±3.848 นิวตัน ค่าความต้านแรงดึง 44.674±4.899 นิวตัน ค่าความต้านทานการหักพับ 733±55.076 ครั้ง ค่าการสะท้อนน้ำของกระดาษ 9.735 วินาที ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมและดีที่สุดในการนำมาผลิตกระดาษที่สามารถใช้ในท้องตลาดได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม มจพ. วิทยาเขตปราจีนบุรี ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย และขอขอบคุณชรัช จินสลุต ประวีณา บำรุงจิตต์ และอัครนาวัน บ่อทองในการวิเคราะห์ข้อมูล

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Agricultural Economics. (2021, March 23). Prachinburi, maize [Online]. Available: <http://mis-app.oae.go.th/product/ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์>
- [2] S. Chaipong, "Quantity Bamboo Production on Demand of Bamboo Production' OTOP In Prachinburi Province," *Rajabhat J. Sci. Humanit. Soc. Sci*, vol. 21, no. 1, pp. 245-254, 2020.
- [3] Eco-friendly compost bin turns waste into benefits. (2021, March 29). Magazine to save the world green network [Online]. Available: <https://www.greennetworkthailand.com>
- [4] W. Sonklin, "Biological Methane Removal in Landfill Cover Soil," *Naresuan University Engineering Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 1-9, 2010.
- [5] T. Chaiyakarn, "Study of Mixture Ratio for Paper Production from Bamboo Shoot Bark," *Bachelor of Industry Thesis Department of Agricultural Machinery Technology Graduate, King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 2013.
- [6] P. Thongngam, P. Jedeeyod and W. Vongthep, "Handmade Corn Husk Paper for Environmental Packaging", (2021, March 1). Journal Kaewpanya Magazine (E-book) [Online]. Available: <https://bala.rmutl.ac.th/news/13078-2020-02-19>

- [7] K. Luepong, N. Sasithon and K. Manarungwit, “Kraft Paper Preparation from Water Hyacinth, Pineapple Leaves and Leaf Sheath of Banana Tree”, *RMUTP Research Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 15–22, 2017.
- [8] W. Markphan and S. O-Thong, “Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Management Case Study: Nakhon Si Thammarat Municipality Landfill,” *Thai Science and Technology Journal (TSTJ)*, vol. 28, no. 11, pp. 2064–2073, 2020.
- [9] P. Wangwan, W. Tamthong and S. Kraisuwan, “Fibrous Webs from Corn Husks”, *In Proceeding of The 55th Kasetsart University Annual Conference, Kasetsart University, Thailand*, pp. 969–976, 2017. (In Thai)
- [10] S. Thepjung and C. Ruangviriyachai, “Optimum Condition of Hydrolysis of Bamboo Shoots Shell by Dilute Sulfuric Acid Using Response Surface Methodology for Glucose Production”, *In Proceeding of The National and International Graduate Research Conference 2016, Khon Kaen University, and Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Indonesia, Thailand*, pp. 267–276, 2016. (In Thai)

การวิเคราะห์อิทธิพลของการหล่อเย็นที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก

Investigate the Effect of Cooling on the Shrinkage of Plastic Injection Part

พิชิต อ่อนปรงค์^{1*}¹สังกัดศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ศูนย์นนทบุรี อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000

Pichit Onprang^{1*}¹Tool and Die Technology Center, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi Mueang Nonthaburi District Nonthaburi 11000

*Corresponding author Email: opichit@hotmail.com

(Received: August 1, 2022; Revised: December 26, 2022; Accepted: December 27, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการหล่อเย็นที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกชนิด พอลิโพรพิลีนเกรด PP1100NK โดยใช้โปรแกรม Cadmould ในการวิเคราะห์ และเป็นเครื่องมือในการศึกษาปัจจัยต่างๆ ของการหล่อเย็นที่มีผลกระทบต่ออัตราการหดตัวของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีความหนา 1.5 mm. ใช้น้ำในการหล่อเย็น เส้นผ่านศูนย์กลางของรูหล่อเย็น กรณีที่ 1 กรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 ใช้ขนาด 6 mm. ตำแหน่งระยะห่างรูหล่อเย็นกับผิวชิ้นงานทั้ง 3 กรณี ใช้เท่ากับ 12 mm. ระยะห่างระหว่างรูหล่อทั้ง 3 กรณี ใช้เท่ากับ 30 mm. ในกรณีที่ 1 มีการหล่อเย็นที่ Core และ Cavity กรณีที่ 2 หล่อเย็นเฉพาะ Cavity และกรณีที่ 3 หล่อเย็นเฉพาะ Core ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cadmould พบว่าการออกแบบระบบหล่อเย็นของแม่พิมพ์ที่ถูกต้องตามกรณีที่ 1 มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) ของชิ้นงานน้อยที่สุด คือ 2.056 % และเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปทดสอบการฉีดจริงด้วยแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก พบว่าได้ผลสำเร็จสอดคล้องตามการพยากรณ์ คือค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานทดสอบตามทิศทางทางไหล (แกน Y) เท่ากับ 0.89 % และ 1.45 % ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของพลาสติกตามทิศทางขวางการไหล (แกน x) เท่ากับ 2.29 % และ 1.83 % และขนาดพิกัดความเผื่อชิ้นงานที่วัดได้ เป็นไปตามที่ออกแบบไว้สามารถนำไปใช้งานได้

คำสำคัญ: การหล่อเย็น การหดตัวพลาสติก งานฉีดพลาสติก

Abstract

The objective of this research is to investigate how cooling affects the shrinkage of a Plastic Injection Part. The analysis was performed with a Plastic Injection Part made of Polypropylene: PP1100NK grade. The experiments were carried out using water for cooling on the different cooling positions of the injection parts with a 1.5 mm thickness and were simulated by Cadmould program. The diameter of the cooling hole in Case 1, Case 2 and Case 3 were 6 mm. The distance between the coolant hole and the workpiece is 12 mm. for Case 1 and Case 2 and Case 3. The distance between the two coolant holes in Case 1 and Case 2 and Case 3

use 30 mm. Case 1 is Core and Cavity cooled, Case 2 is Cavity cooled and Case 3 is Core cooled. Results from software analysis revealed that the correct design of the cooling system mold according to Case 1 had the least shrinkage of the workpiece at 2.056% And when using such information to test the actual injection with a plastic injection mold. Found that the results were successful in accordance with the forecast. is the percentage shrinkage of the test specimen along the flow direction (Y axis) equal to 0.89 % and 1.45 %, the percentage shrinkage of the plastic along the flow direction (x axis) is 2.29 % and 1.83 % and the size of the for measurable workpiece as designed, can be used.

Keywords: Cooling, Plastic Shrinkage, Plastic Injection Part

1. บทนำ

การหล่อเย็นเป็นสิ่งที่ยังเป็นที่ยังในการฉีดพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเภทเทอร์โมพลาสติก เพื่อให้พลาสติกเย็นตัวก่อนที่ทำการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เวลาในการหล่อเย็นยังมีผลต่อเวลาในการฉีด หากเวลาในการหล่อเย็นนานเกินไปก็ทำให้อัตราการผลิตต่ำ หากเวลาในการหล่อเย็นเร็วเกินไปก็อาจทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวและบิดเบี้ยวหลังจากปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ การจัดวางระบบการหล่อเย็นควรทำไปพร้อมๆ กับการออกแบบระบบอื่นๆ ในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เพราะการหล่อเย็นเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการทำแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ระบบการหล่อเย็นที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ เช่น การออกแบบระบบหล่อเย็นให้เล็กเกินไปอาจทำให้รอบเวลาในการฉีด (Cycle Time) มากขึ้น ในทางปฏิบัติจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องวางให้เหมาะสมเพื่อการหล่อเย็นจะได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำหล่อเย็น ความยาวและระยะห่างจากผิวท่อจะต้องเหมาะสม ผิวของท่อน้ำหล่อเย็นควรทำให้เรียบพอสมควรเพื่อให้ถ่ายความร้อนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การเกิดครั้นหรือสนิมในท่อทำให้ระบบการหล่อเย็นเลวลง และเนื่องจากในปัจจุบันเทคนิคการใช้ CAE จำลองและวิเคราะห์การไหลของพลาสติก มีความถูกต้องและมีความแม่นยำสูงและมีความรวดเร็วมากขึ้นมาก จึงได้มีการนำไปใช้กันในงานวิจัยอย่างกว้างขวาง ในการทำงานพฤติกรรมในกระบวนการทางด้านการขึ้นรูปพอลิเมอร์

1.1. วัตถุประสงค์

1.1.1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการหล่อเย็นที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานทั้งในทิศทางการไหลและทิศทางตั้งฉากการไหล

1.1.2. สร้างแม่พิมพ์ฉีดชิ้นงานกล่องอเนกประสงค์แบบฝาแยกชิ้นได้

1.2. ขอบเขต

1.2.1. แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเป็นแบบสามแผ่น (Three Plate Mold) จำนวน 2 Cavity รูเข้าแบบเข็ม (Pin-Point Gate)

1.2.2. ชิ้นงานเป็นกล่องอเนกประสงค์แบบฝาแยกชิ้นได้ ขนาด 65.28 mm. × 157.28 mm. × 12 mm.

1.2.3. ใช้โปรแกรม Cadmould จำลองการฉีด โดยใช้สภาวะการฉีดเหมือนกันทุกครั้ง และทุกกรณี

1.2.4. เงื่อนไขการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรม Cadmould แบ่งออกเป็น 3 กรณี ทุกกรณีใช้เส้นผ่านศูนย์กลางรูหล่อเย็นขนาด 6 mm. โดย กรณีที่ 1 หล่อเย็นที่ตำแหน่ง Core และ Cavity

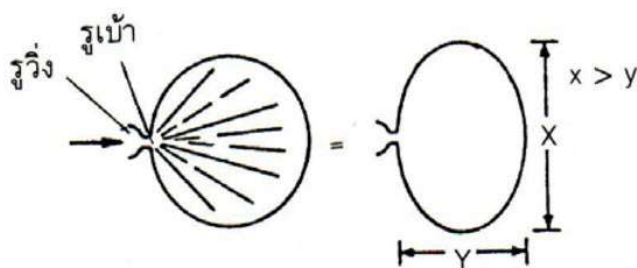
กรณีที่ 2 หล่อเย็นที่ตำแหน่ง Cavity

กรณีที่ 3 หล่อเย็นที่ตำแหน่ง Core

1.2.5. ใช้น้ำในการหล่อเย็นที่แม่พิมพ์ทั้ง 3 กรณี

1.2.6. ใช้เม็ดพลาสติกโพลิโพรพิลีน (PP) Polimaxxเกรด 1100NK บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) กับเครื่องฉีดพลาสติกขนาด 65 ตันยี่ห้อ KRAUSS MAFFEL รุ่น KM 65 – 180 CX

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการหล่อเย็นที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานทั้งในทิศทางการไหลและทิศทางตั้งฉากการไหล ดังแสดงรูปที่ 1 โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ Cadmould เป็นเครื่องมือในการศึกษาปัจจัยต่างๆ ของตำแหน่งการหล่อเย็นที่มีผลกระทบต่อการหดตัวของชิ้นงาน เพื่อลดเวลาในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ และผลการทดลองที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก หรือออกแบบผลิตภัณฑ์พลาสติกให้ได้ขนาดตามแบบที่กำหนด โดยขนาดรูของท่อน้ำหล่อเย็น และระยะห่างของท่อน้ำหล่อเย็นที่เหมาะสมหาได้ดังแสดงรูปที่ 2



X = การหดตัวในทิศทางตั้งฉากกับการไหล

Y = การหดตัวในทิศทางการไหล

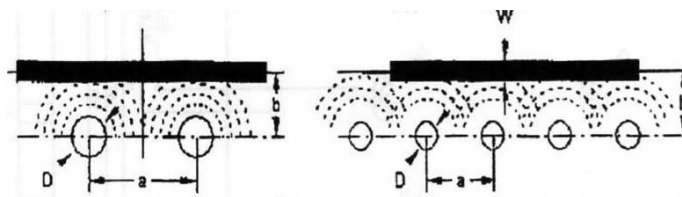
รูปที่ 1 การหดตัวตามทิศทางการไหลของพลาสติกหลอม

ค่าการหดตัวของพลาสติก หาได้จากสูตร

$$\text{อัตราการหดตัว} = \left(1 - \frac{LF}{LW} \right) \times 100 \% \quad (1)$$

โดยที่ LF คือขนาดของชิ้นงาน

LW คือขนาดของแม่พิมพ์

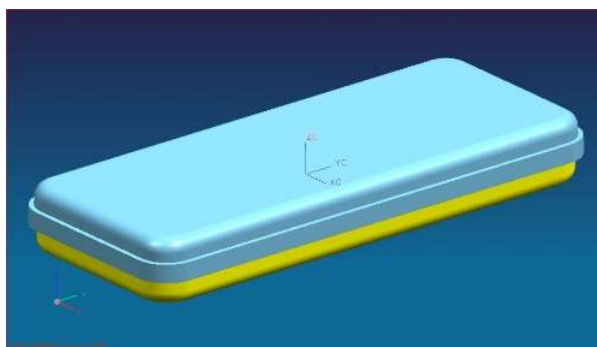


รูปที่ 2 ขนาดความโตและระยะห่างรูหล่อเย็นที่เหมาะสม [9]

1. ความหนาชิ้นงาน (W) < 2 mm. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ท่อน้ำหล่อเย็นมีขนาด 8-10 mm.
2. ระยะห่าง $b = 2-5$ เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อน้ำหล่อเย็น (D)
3. ระยะห่าง $a = 2-5$ เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อน้ำหล่อเย็น (D)

2. วิธีการทดลอง

2.1 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ใช้ฉีดชิ้นงานเป็นแบบสามแผ่น (Three Plate Mold) จำนวน 2 Cavity รูเข้าแบบเข็ม (Pin-Point Gate) ชิ้นงานเป็นกล่องอเนกประสงค์แบบฝาแยกชิ้นได้ ขนาด 65.28 mm. x 157.28 mm. x 12 mm. ดังแสดงรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขนาดชิ้นงานกล่องแบบฝาแยกชิ้นแบบ 3 มิติ

2.2 พลาสติกที่ใช้ในการฉีดชิ้นงานจริง

เป็นพลาสติกพอลิโพรพิลีน (PP) Polimaxx เกรด 1100NK Homopolymer LOT 0221005035 บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) มีสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 1

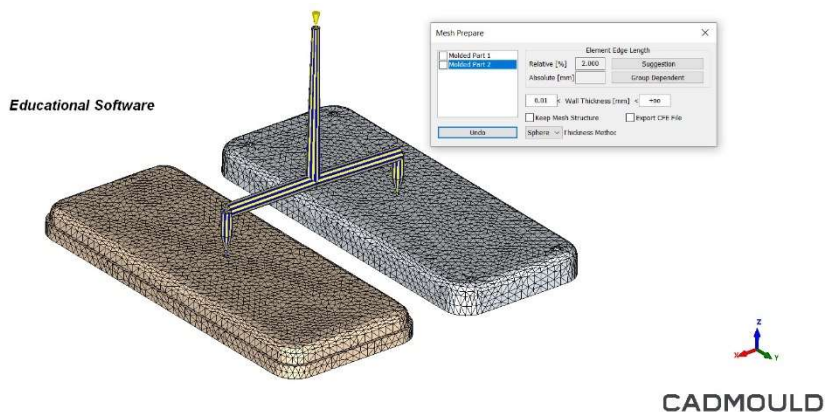
ตารางที่ 1 สมบัติพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการฉีด

ชนิดพลาสติก	Polimaxx PP1100NK
การไหลตัว Melt Flow Index (2.16 kg/230 °C)	: 11 g/10min (ASTM D1238)
ความหนาแน่น	: 0.9 g/cm ³ (ASTM 792)
อัตราการหดตัว	: 1.2 – 2.2 %
อุณหภูมิหลอมละลาย	: 190 – 240 °C
อุณหภูมิแม่พิมพ์	: 40 – 60 °C
อุณหภูมิแม่พิมพ์ปลดชิ้นงาน	: 60 °C

2.3 การวิเคราะห์การฉีดด้วยโปรแกรม Cadmould

ใช้โปรแกรม Cadmould วิเคราะห์หัตถิพลของตำแหน่งการหล่อเย็นที่มีผลต่อการหดตัวของงานฉีดพลาสติก โดยจะทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของพลาสติกในระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานฉีด ตั้งแต่ช่วงเวลาในการฉีดพลาสติก (Filling) การฉีดย้ำ (Packing) และการเย็นตัว (Cooling) ลงจนถึงอุณหภูมิห้อง [10] เพื่อศึกษาค่าการหดตัวของชิ้นงานทั้งในทิศทางการไหลและ

ทิศทางตั้งฉากการไหล ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวของพลาสติกคือกล่องแบบฝาแยกชิ้นได้ มีทางเข้าของน้ำพลาสติกเป็นแบบ Pinpoint gate โมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ได้จากการสร้าง Solid Model ในโปรแกรม NX แล้วส่งเข้ามาในโปรแกรม Cadmould โดยแปลง Solid Model ให้อยู่ในรูปของ STL file และทำการสร้าง Mesh Model ดังแสดงรูปที่



รูปที่ 4 Mesh ที่ใช้ในการทดลอง

การวิเคราะห์หัตถิพลของตำแหน่งการหล่อเย็นที่มีผลต่อการหดตัวของงานฉีดพลาสติก ใช้ในในระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์ โดยในการศึกษาจะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำหล่อเย็นเท่ากันทุกกรณี แต่ตำแหน่งรูหล่อเย็นที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงตารางที่ 2 เพื่อศึกษาว่าตำแหน่งการหล่อเย็นที่แตกต่างกัน มีผลต่อการหดตัวและขนาดของชิ้นงานฉีดพลาสติกอย่างไร

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการหล่อเย็น

รายการ	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
ความหนาชิ้นงาน (w) mm.	1.5	1.5	1.5
ความโตรูหล่อเย็น (D) mm.	6	6	6
ระยะห่างรูหล่อเย็นกับผิวชิ้นงาน (b) mm.	12	12	12
ระยะห่างระหว่างรูหล่อเย็นกับรูหล่อเย็น (a) mm.	30	30	30
หล่อเย็นทั้ง Core และ Cavity	✓		
หล่อเย็นเฉพาะ Cavity		✓	
หล่อเย็นเฉพาะ Core			✓
ระบบหล่อเย็น	น้ำ	น้ำ	น้ำ
ค่าพารามิเตอร์ในการฉีด (เหมือนกันทุกกรณี)	✓	✓	✓
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (l/min)	8.0	8.0	8.0
อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (°C)	30	30	30
อุณหภูมิห้องที่ใช้ทดลอง (°C)	30	30	30

3. ผลการทดลอง

3.1 พลาสติคที่ใช้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cadmould

พลาสติคที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นพลาสติคพอลิโพรพิลีน เกรด BE677AI BOREALIS มีสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติค Polimaxx เกรด 1100NK Homopolymer LOT 0221005035 บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ที่ใช้ในการฉีดขึ้นงานจริง

ตารางที่ 3 สมบัติพลาสติคพอลิโพรพิลีน เกรด BE677AI จากโปรแกรม Cadmould

ชนิดพลาสติค	Polimaxx PP1100NK
การไหลตัว Melt Flow Index (2.16 kg/230 °C)	: 14 g/10min
ความหนาแน่น	: 0.9 g/cm ³
อัตราการหดตัว	: 1.2 – 2.2 %
อุณหภูมิหลอมละลาย	: 200 - 260 °C
อุณหภูมิแม่พิมพ์	: 20 - 60 °C
อุณหภูมิแม่พิมพ์ปลดชิ้นงาน	: 120 °C

3.2 ค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cadmould มีรายละเอียดดังแสดงตารางที่ 4

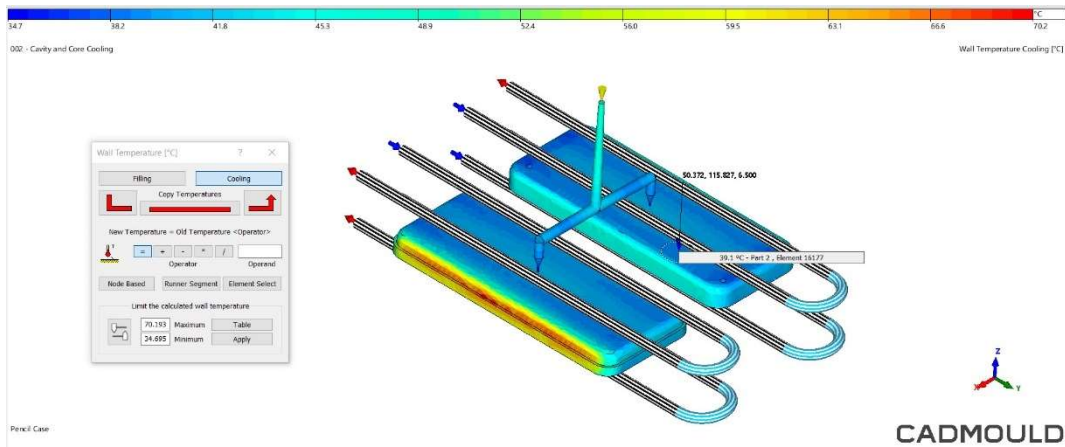
ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cadmould

Process Parameter	
Filling Time (s)	= 0.93
Pressure (bar)	= 339.1
Melt Temperature (°C)	= 230
Wall Temperature (°C)	= 40
Ejection Temperature (°C)	= 120
Packing Time (s)	= 7
Cooling Time (s)	= 15
Cycle Time (s)	= 20.9

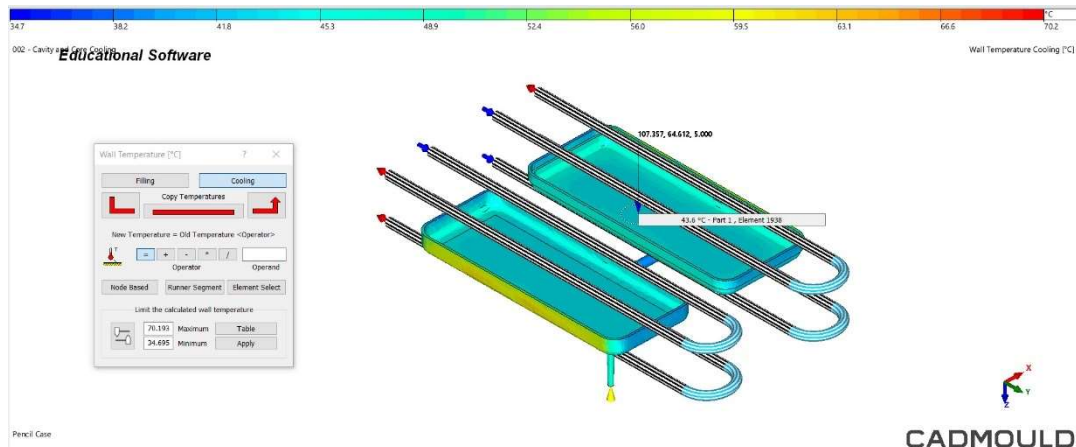
3.3 ผลการวิเคราะห์วิเคราะห์เงื่อนไขการหล่อเย็น กรณีที่ 1

ผลการวิเคราะห์วิเคราะห์การจำลองการฉีดด้วยด้วยโปรแกรม Cadmould ตามเงื่อนไขการหล่อเย็นแบบกรณี 1 โดยมีการหล่อเย็นที่ตำแหน่ง Core และ Cavity ได้ผลดังแสดงรูปที่ 5-6 อุณหภูมิของชิ้นงานอยู่ในช่วง 34.7 – 70.2 °C อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของชิ้นงานอยู่ที่ประมาณ 39.1 °C เนื่องจากมีการหล่อเย็นทั้งด้าน Core และ Cavity มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) มากสุดเท่ากับ 2.056 % ค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) ในแนวแกน Y มากสุดเท่ากับ 1.683 mm. และค่าการบิดตัว

(Warpage) ในแนวแกน Y มากที่สุดคือ 0.472 mm. ดังแสดงตารางที่ 5



รูปที่ 5 ค่าอุณหภูมิด้าน Cavity การหล่อเย็นแบบกรณีที่ 1



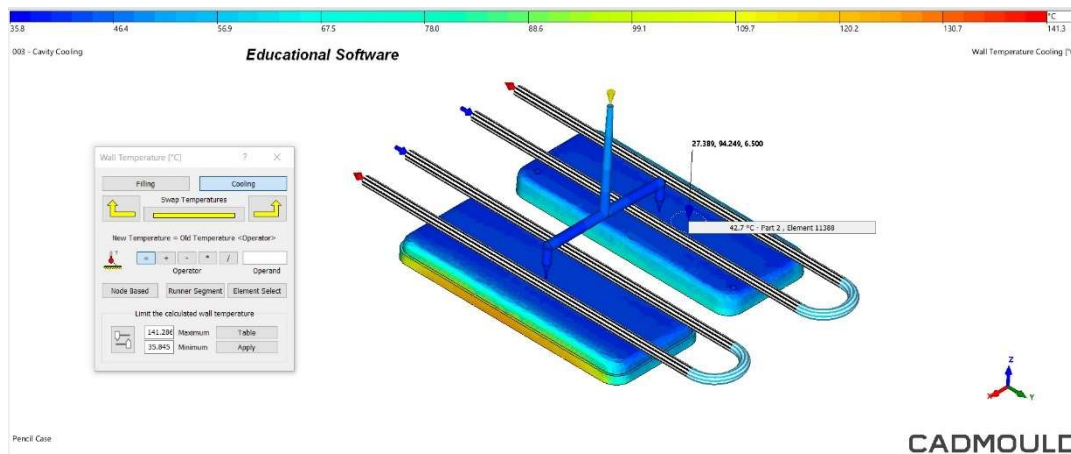
รูปที่ 6 ค่าอุณหภูมิด้าน Core การหล่อเย็นแบบกรณีที่ 1

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์วิเคราะห์เงื่อนไขการหล่อเย็น กรณีที่ 1

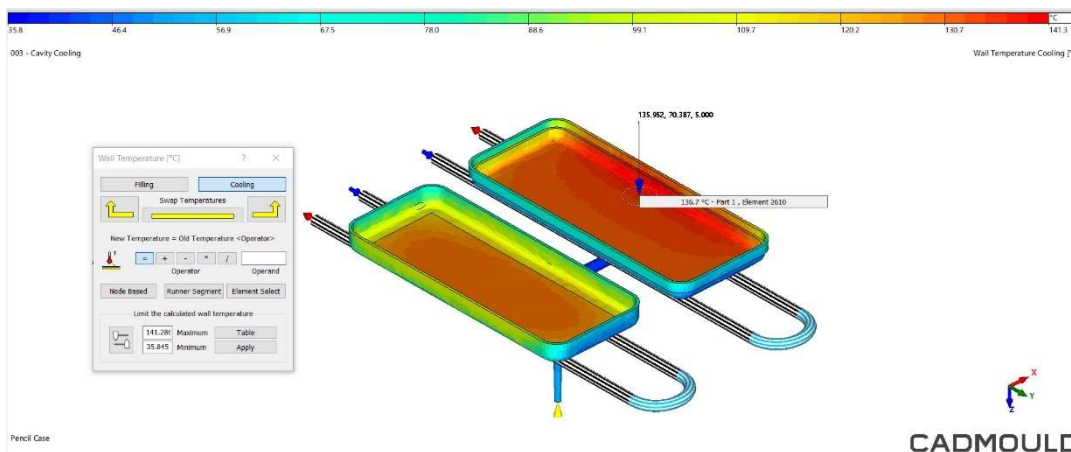
รายละเอียด	ค่าที่ได้
ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) ของชิ้นงานมากที่สุด	= 2.056 %
ค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) ในแนวแกน X มากที่สุด	= 0.900 mm.
ค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) ในแนวแกน Y มากที่สุด	= 1.683 mm.
ค่าการบิดตัว (Warpage) ในแนวแกน X มากที่สุด	= 0.391 mm.
ค่าการบิดตัว (Warpage) ในแนวแกน Y มากที่สุด	= 0.472 mm.
ค่า Reynolds number มากที่สุด	= 35418
ค่าอัตราการไหลของความร้อน (Heat Flux) มากที่สุด	= 29618 W/m ²

3.4 ผลการวิเคราะห์วิเคราะห์เงื่อนไขการหล่อเย็น กรณี 2

ผลการวิเคราะห์วิเคราะห์การจำลองการฉีดด้วยด้วยโปรแกรม Cadmould ตามเงื่อนไขการหล่อเย็นแบบกรณี 2 โดยมีการหล่อเย็นที่ตำแหน่ง Cavity ด้านเดียว ได้ผลดังแสดงรูปที่ 7-8 อุณหภูมิของชิ้นงานอยู่ในช่วง 35.8 – 141.3 °C อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของชิ้นงานอยู่ที่ประมาณ 42.7 °C จุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ด้านในของชิ้นงานเนื่องจากไม่มีการหล่อเย็น มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) มากสุดเท่ากับ 3.516 % ค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) มากสุดอยู่ในแนวแกน X เท่ากับ 4.971 mm. และค่าการบิดตัว (Warpage) มากสุดอยู่ในแนวแกน X คือ 4.277 mm. ดังแสดงตารางที่ 6



รูปที่ 7 ค่าอุณหภูมิด้าน Cavity การหล่อเย็นแบบกรณีที่ 2



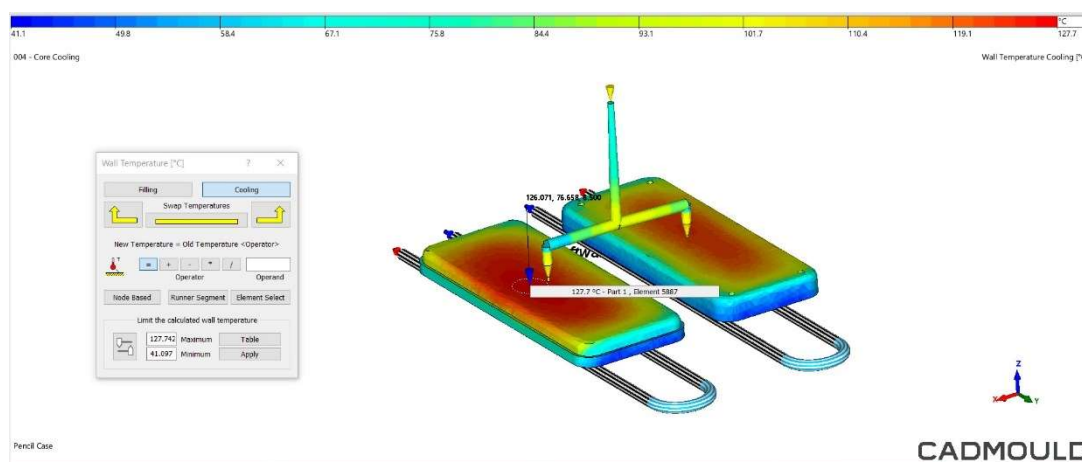
รูปที่ 8 ค่าอุณหภูมิด้าน Core การหล่อเย็นแบบกรณีที่ 2

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์วิเคราะห์เงื่อนไขการหล่อเย็น กรณีที่ 2

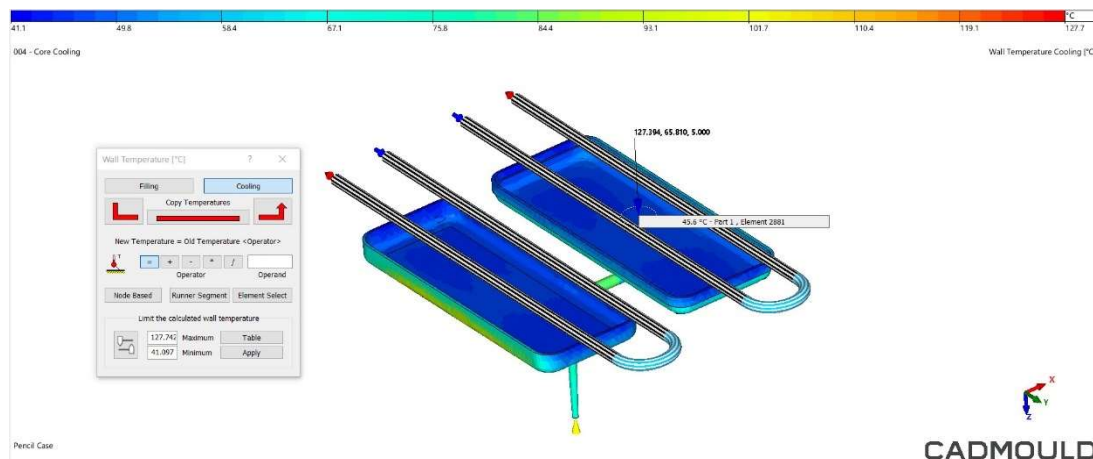
รายละเอียด	ค่าที่ได้
ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) ของชิ้นงานมากที่สุด	= 3.516 %
ค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) ในแนวแกน X มากสุด	= 4.971 mm.
ค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) ในแนวแกน Y มากสุด	= 3.602 mm.
ค่าการบิดตัว (Warpage) ในแนวแกน X มากสุด	= 4.277 mm.
ค่าการบิดตัว (Warpage) ในแนวแกน Y มากสุด	= 1.718 mm.
ค่า Reynolds number มากสุด	= 35490
ค่าอัตราการไหลของความร้อน (Heat Flux) มากสุด	= 39083 W/m ²

3.5 ผลการวิเคราะห์วิเคราะห์เงื่อนไขการหล่อเย็น กรณี 3

ผลการวิเคราะห์วิเคราะห์การจำลองการฉีดด้วยด้วยโปรแกรม Cadmould ตามเงื่อนไขการหล่อเย็นแบบกรณี 2 โดยมีการหล่อเย็นที่ตำแหน่ง Core ด้านเดียว ได้ผลดังแสดงรูปที่ 9-10 อุณหภูมิของชิ้นงานอยู่ในช่วง 41.1 – 127.7 °C อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของชิ้นงานอยู่ที่ประมาณ 45.6 °C จุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ด้านบนของชิ้นงานเนื่องจากไม่มีการหล่อเย็น มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) มากสุดเท่ากับ 2.870 % ค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) มากสุดอยู่ในแนวแกน Y เท่ากับ 2.017 mm. และค่าการบิดตัว (Warpage) มากสุดอยู่ในแนวแกน X คือ 2.197 mm. ดังแสดงตารางที่ 7



รูปที่ 9 ค่าอุณหภูมิด้าน Core การหล่อเย็นแบบกรณีที่ 3



รูปที่ 10 ค่าอุณหภูมิด้าน Core การหล่อเย็นแบบกรณีที่ 3

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์หาค่าเงื่อนไขการหล่อเย็น กรณีที่ 3

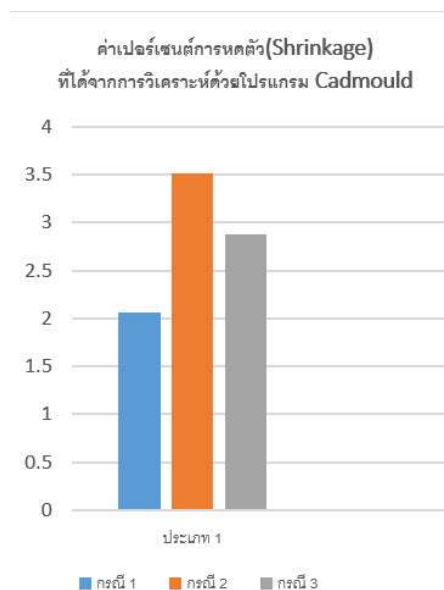
รายละเอียด	ค่าที่ได้
ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) ของชิ้นงานมากที่สุด	= 2.870 %
ค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) ในแนวแกน X มากสุด	= 1.483 mm.
ค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) ในแนวแกน Y มากสุด	= 2.017 mm.
ค่าการบิดตัว (Warpage) ในแนวแกน X มากสุด	= 2.197 mm.
ค่าการบิดตัว (Warpage) ในแนวแกน Y มากสุด	= 0.697 mm.
ค่า Reynolds number มากสุด	= 35549
ค่าอัตราการไหลของความร้อน (Heat Flux) มากสุด	= 41904 W/m ²

3.6 สรุปผลการวิเคราะห์หาค่าเงื่อนไขการหล่อเย็นทั้ง 3 กรณี

จากการจำลองการฉีดขึ้นงานโดยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cadmould โดยมีเงื่อนไขตำแหน่งการหล่อเย็นที่แตกต่างกัน 3 กรณี ได้ผลสรุปดังแสดงตารางที่ 8 ค่าที่ได้จากกรณีที่ 1 จะมีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 โดยค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) ของการหล่อเย็นแบบกรณีที่ 1 มีค่าต่ำสุดคือ 2.056 % ดังแสดงรูปที่ 11

ตารางที่ 8 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cadmould ของการหล่อเย็น 3 กรณี

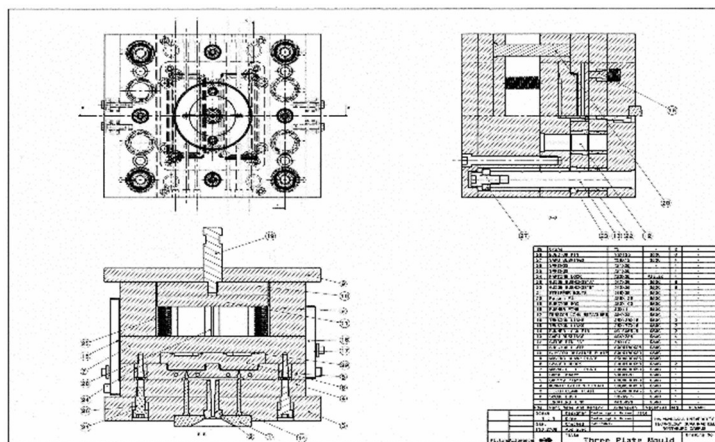
รายการ	ผลการจำลองการฉีดที่มีการหล่อเย็นโดยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cadmould		
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) ของชิ้นงานมากที่สุด (%)	2.056	3.516	2.870
ค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) ในแนวแกน X มากสุด (mm.)	0.900	4.971	1.483
ค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) ในแนวแกน Y มากสุด (mm.)	1.683	3.602	2.017
ค่าการบิดตัว (Warpage) ในแนวแกน X มากสุด (mm.)	0.391	4.277	2.197
ค่าการบิดตัว (Warpage) ในแนวแกน Y มากสุด (mm.)	0.472	1.718	0.697
ค่า Reynolds number มากสุด	35418	35490	35549
ค่าอัตราการไหลของความร้อน (Heat Flux) มากสุด (W/m^2)	29618	39083	41904



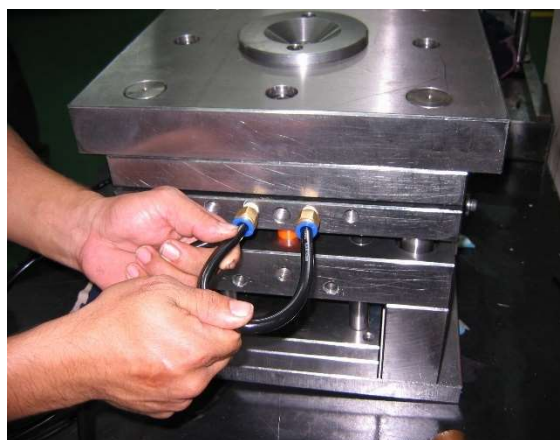
รูปที่ 11 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) ของการหล่อเย็นทั้ง 3 กรณี

3.7 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์

จากผลการทดลองตามตารางที่ 8 ของการหล่อเย็นทั้ง 3 กรณี ค่าที่ได้จากกรณีที่ 1 จะมีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 และผลที่ได้รับนี้เราสามารถนำไปเป็นแนวทางเพื่อการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ต่อไปดังแสดงรูปที่ 12-13



รูปที่ 12 การออกแบบแม่พิมพ์



รูปที่ 13 การสร้างแม่พิมพ์

3.8 การทดลองการฉีดจริง

หลังจากที่สร้างแม่พิมพ์โดยใช้ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cadmould ตามกรณีที่ 1 โดยได้แม่พิมพ์ดังแสดงรูปที่ 13 เราจึงนำแม่พิมพ์มาทดลองการฉีดด้วยเครื่องฉีดพลาสติก ขนาด 65 ตัน ยี่ห้อ KRAUSS MAFFEL รุ่น KM 65 – 180 CX ดังแสดงรูปที่ 14 และมีข้อมูลคุณสมบัติของเครื่องดังแสดงตารางที่ 9



รูปที่ 14 เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการฉีดจริง

ตารางที่ 9 สมบัติเครื่องฉีดพลาสติก

ข้อมูลเครื่องฉีดพลาสติกยี่ห้อ KRAUSS MAFFEL รุ่น KM 65 – 180 CX Screw	
ความโตสกรูฉีด	: 30 mm.
ปริมาตรการฉีดสูงสุด	: 85 cm ³
แรงปิดแม่พิมพ์มากที่สุด	: 650 KN
ขนาดแม่พิมพ์ที่ฉีดได้	: 610x610
แรงดันฉีดสูงสุด	: 2025 bar
ความเร็วฉีดสูงสุด	: 106 cm ³ /s

3.9 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดจริง

ในการทดลองฉีดชิ้นงาน พลาสติกที่ใช้คือพอลิโพรพิลีน (PP) Polimaxx เกรด 1100NK Homopolymer LOT 0221005035 บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) มีสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดดังแสดงตารางที่ 10 และได้ชิ้นงานดังแสดงรูปที่ 15

ตารางที่ 10 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดจริง

Process Parameter	
Filling Time (s)	= 1.92
Pressure (bar)	= 100
Melt Temperature (°C)	= 185-215
Wall Temperature (°C)	= 40
Ejection Temperature (°C)	= 120
Packing Time (s)	= 1
Cooling Time (s)	= 13.25
Cycle Time (s)	= 22.69

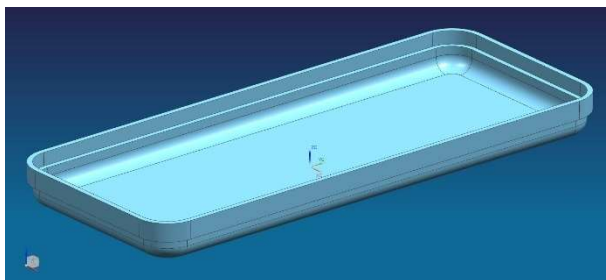


รูปที่ 15 ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดจริง

3.10 การวัดค่าการหดตัว (Shrinkage) ของชิ้นงาน

หลังจากฉีดชิ้นงานแล้วนำชิ้นงานมาวัดขนาดว่าได้ขนาดตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ เนื่องจากพลาสติก PP มีค่าการหดตัวอยู่ที่ 1.2-2.2 % ซึ่งในขั้นตอนออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ได้ทำการเผื่อค่าการหดตัวของเม็ดพลาสติกโพลิโพรพิลีน (PP) Polimaxx เกรด 1100NK Homopolymer LOT 0221005035 บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) มีสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 1 ไว้เท่ากับ 2 % เพื่อให้เราได้ขนาดของชิ้นงานตามที่เราได้ออกแบบไว้ โดยค่าการหดตัวของพลาสติกที่ได้จากการฉีดแล้ว สามารถคำนวณได้จาก

ตำแหน่งการวัดชิ้นทดสอบที่ 1



รูปที่ 15 ชิ้นงานฝาปิดกล่องขนาด 65.28 mm. x 157.28 mm. x 12 mm.

เปอร์เซ็นต์การหดตัวของพลาสติกตามทิศทางการไหล (แกน Y) ดังแสดงรูปที่ 15

$$\text{อัตราการหดตัว} = 1 - \frac{LF}{LW} \times 100$$

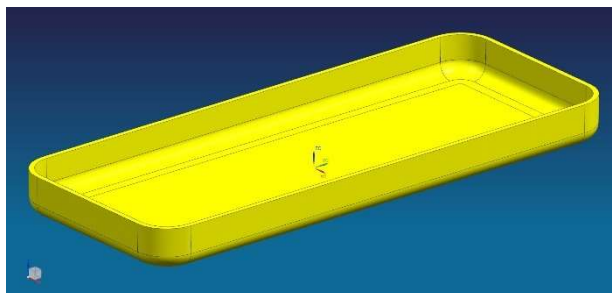
โดยที่ LF = ขนาดของชิ้นงาน (แกน Y)
 LW = ขนาดของแม่พิมพ์
 $= 1 - (156.50/157.91) \times 100$
 $= 0.89 \%$

เปอร์เซ็นต์การหดตัวของพลาสติกตามทิศทางการไหล (แกน x) ดังแสดงรูปที่ 15

$$\text{อัตราการหดตัว} = 1 - \frac{LF}{LW} \times 100$$

โดยที่ LF = ขนาดของชิ้นงาน (แกน x)
 LW = ขนาดของแม่พิมพ์
 $= 1 - (64.80/66.32) \times 100$
 $= 2.29 \%$

ตำแหน่งการวัดชิ้นทดสอบที่ 2



รูปที่ 16 ชิ้นงานฐานกล่องขนาด 62.15 mm. × 154.00 mm. × 12 mm.

เปอร์เซ็นต์การหดตัวของพลาสติกตามทิศทางการไหล (แกน Y) ดังแสดงรูปที่ 16

$$\text{อัตราการหดตัว} = 1 - \frac{LF}{LW} \times 100$$

โดยที่ LF = ขนาดของชิ้นงาน (แกน Y)
 LW = ขนาดของแม่พิมพ์
 $= 1 - (153.90/156.18) \times 100$
 $= 1.45 \%$

เปอร์เซ็นต์การหดตัวของพลาสติกตามทิศทางการไหล (แกน x) ดังแสดงรูปที่ 16

$$\text{อัตราการหดตัว} = 1 - \frac{LF}{LW} \times 100$$

โดยที่ LF = ขนาดของชิ้นงาน (แกน x)
 LW = ขนาดของแม่พิมพ์
 $= 1 - (62.00/63.16) \times 100$
 $= 1.83 \%$

ตารางที่ 11 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) ของชิ้นงาน

รายการ	ตามทิศทางการไหล(แกน Y)	ตามทิศทางการไหล(แกน x)
ชิ้นงานฝาปิดกล่อง	0.89 %	2.29 %
ชิ้นงานฐานกล่อง	1.45 %	1.83 %

4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการวัดค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังการฉีดจริงจากแม่พิมพ์ที่ออกแบบระบบหล่อเย็นถูกต้อง และเหมาะสมตามเงื่อนไขกรณีที่ 1 โดยใช้เงื่อนไขระบบหล่อเย็นเดียวกันกับการใช้โปรแกรม Cadmould จำลองการฉีดดังแสดงตารางที่ 11 ปรากฏว่าชิ้นงานฝาปิดกล่องดังแสดงรูปที่ 15 มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของพลาสติกตามทิศทางการไหล (แกน Y) เท่ากับ 0.89 % และค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของพลาสติกตามทิศทางการไหล (แกน x) มีค่าเท่ากับ 2.29 % และชิ้นงานฐานกล่องดังแสดงรูปที่ 16 มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของพลาสติกตามทิศทางการไหล (แกน Y) เท่ากับ 1.45 % และค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของพลาสติกตามทิศทางการไหล (แกน x) มีค่าเท่ากับ 1.83 % ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้นนี้ มีค่าต่างกันเนื่องจากชิ้นงานมีรูปร่าง ขนาดและปริมาตรต่างกัน ซึ่งค่าการหดตัวที่ได้จากการฉีดชิ้นงานนี้ไม่ต่างจากค่าที่ได้จากการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรม Cadmould มากนัก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.056 % ขนาดชิ้นงานที่วัดได้จากการฉีดจริงนี้อยู่ในพิสัยที่ได้ออกแบบไว้สามารถนำไปใช้งานได้ แสดงว่าการออกแบบระบบหล่อเย็นถูกต้องเหมาะสม ส่งผลให้การหดตัวของชิ้นงานน้อย ทำให้ลดปัญหาเรื่องชิ้นงานมีการหดตัวไม่สม่ำเสมอ ชิ้นงานไม่ได้ขนาด และลดปัญหาชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยว (Warpage) สาเหตุของความแตกต่างของค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Software กับค่าที่ได้จากการฉีดจริงมีดังนี้

1. เม็ดพลาสติกที่ใช้ฉีดจริงกับเม็ดพลาสติกที่ใช้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cadmould ไม่ใช่ผู้ผลิตเดียวกัน ทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้

2. ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องที่ใช้ฉีดจริง แตกต่างจากการใช้โปรแกรม Cadmould ในบางรายการ ผลที่ได้คลาดเคลื่อนไปบ้างเล็กน้อย ค่าความแตกต่าง ดังแสดงตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดจริงเปรียบเทียบกับค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cadmould

Process Parameter	ค่าการฉีดจริง	ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์	ความแตกต่าง
Filling Time (s)	1.92	0.93	51.56 %
Pressure (bar)	100	339.1	70.51 %
Melt Temperature (°C)	185-215	200-230	-
Wall Temperature (°C)	40	40	-
Ejection Temperature (°C)	120	120	-
Packing Time (s)	1	7	85 %
Cooling Time (s)	13.25	15	11.66 %
Cycle Time (s)	22.69	20.9	7.88 %

5. สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของการหล่อเย็นที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกชนิด Polypropylene โดยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cadmould พบว่าการออกแบบระบบหล่อเย็นของแม่พิมพ์ที่ถูกต้องตามกรณีที่ 1 มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) ของชิ้นงานน้อยที่สุด คือ 2.056 % และจากการฉีดจริงมีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานฝาปิดกล่องและฐานกล่องตามทิศทางการไหล (แกน Y) เท่ากับ 0.89 % และ 1.45 % ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานฐานกล่องตามทิศทางการไหล (แกน x) เท่ากับ 2.29 % และ 1.83 % ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกันกับวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cadmould

สรุปได้คือ

1. ขนาดและตำแหน่งรูหล่อเย็นที่ถูกต้อง อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่เหมาะสม และการหล่อเย็นที่สม่ำเสมอทั่วชิ้นงานจะทำให้ชิ้นงานมีการหดตัวน้อย หดตัวอย่างสม่ำเสมอ และลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน
2. คุณภาพของชิ้นงานขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของอุณหภูมิแม่พิมพ์ในขณะหล่อเย็น
3. การนำเอาเทคโนโลยีด้าน CAE มาช่วยวิเคราะห์การฉีดงาน ช่วยทำให้ลดเวลาในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ได้จริง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนงบประมาณ และเอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. E. Dimla, M. Camilotto, and F. Miani, "Design and Optimization of Conformal Cooling Channels in Injection Moulding Tools," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 164–165, pp. 1294–1300, 2005.
- [2] A. R. Nalla, M. Fuqua, J. Glancey, and B. Lelievre, "A Multi-Segment Injection Line and Real-Time Adaptive, Model-Based Controller for Vacuum Assisted Resin Transfer Molding," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 3, pp. 1058–1069, 2007.
- [3] D. Heider, P. Simacek, A. Dominauskas, H. Deffor, S. Advani, and J. W. Gillespie, "Infusion Design Methodology for Thick-Section, Low-Permeability Preforms Using Inter-Laminar Flow Media," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 2, pp. 525–534, 2007.
- [4] J. M. Lawrence, P. Fried, and S. G. Advani, "Automated Manufacturing Environment to Address Bulk Permeability Variations and Race Tracking in Resin Transfer Molding by Redirecting Flow with Auxiliary Gates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, no. 8, pp. 1128–1141, 2005.
- [5] R. A. Harris, H. A. Newlyn, R. J. M. Hague, and P. M. Dickens, "Part Shrinkage Anomalies from Stereolithography Injection Mould Tooling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, no. 9, pp. 879–887, 2003.
- [6] S. Rojananan, "Analyze the Influence of Inlet Type and Injection Speed on Shrinkage of Polypropylene Injected Parts by Finite Element Method," *The 1st Academic Conference on Energy, Environment and Materials, The Twin Hotel, Bangkok Tower 31 August 2007, 2007*. (In Thai)
- [7] K. Iamsaat, "Overflow Cooling System in Hollow Molds by Layer-By-Layer Filling Method," *The 27th Meeting of the Mechanical Engineering Network of Thailand 16–18 October 2013, 2013*. (In Thai)
- [8] P. Boonprasom, "Flow of Plastic Water in The Injection Molding of The Hemostasis," *Rajamangala Academic Conference on Production Technology and Management 28–29 July 2016 Phra Nakhon Si Ayutthaya*, pp. 71–76, 2016. (In Thai)

- [9] P. Somnuek and P. Kasikam, “Plastic Injection Mold Design Basics,” *Article in press*, 2010. (In Thai)
- [10] W. Techawinyutham, “Plastic Injection Engineering,” *Technology Promotion Association (Thailand–Japan)*, 2010. (In Thai)
- [11] C. Kaewduang et al., “Plastic Injection Mold,” *Supporting Industry Development Bureau*, 2006. (In Thai)

Design of 2.4 GHz E-Textile Monopole Antenna for Wearable Technology

Shanin Harnnarong¹ Praphat Arnmanee² Pitchanun Wongsiritorn^{1*}

¹ Department of Logistic Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Phutthamonthon, Nakhon Pathom, 73170

² Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Phutthamonthon, Nakhon Pathom, 73170

*Corresponding author E-mai: pitchanun.won@rmutr.ac.th

(Received: July 22, 2022; Revised: November 18, 2022; Accepted: December 14, 2022)

Abstract

The design and study of a flexible monopole antenna are presented in this work. The proposed antenna design operates in the Industrial Scientific Medical (ISM) band at frequencies between 2.4 and 2.5 GHz, which makes it appropriate for wearable technology. The proposed antenna can be used with wireless technologies including 2.4 GHz RFID and Wi-Fi. An antenna is made from a flexible material. The radiating patch is a conductive fabric with a conductivity of 1250 S/m. The felt is used as the substrate with a dielectric constant of 1.38. The antenna is designed and analyzed by CST Microwave Studio with and without a human body. The antenna simulates and measures at the chest and arm to consider the effect of a human body on the designed antenna. The radiation pattern, the $|S_{11}|$ and gain are measured to verify the antenna performances. The results illustrate that the proposed antenna is appropriated for wearable technology using for frequency between 2.4 GHz and 2.5 GHz.

Keywords: Antenna, Flexible Material, Wearable Technology

1. Introduction

With the advancement of wireless communication technology, wearable technology becomes a device of the future and it is expected to be an integral part of the Internet of Things or IoT [1–2]. Many applications which are based on a wearable device is launched such as wristwatches, life jackets, fitness bands, breast cancer detection sensors and many others [3–4]. Most of the wearable technology is related to wireless communication devices because the device is almost on the human body which is not suitable for communication with a wired connection.

However, in wireless communication, the antenna plays an important role in transmitting and receiving a signal [5]. The antenna should be designed and developed appropriately for specific applications [6]. The frequency band of the application and the desired radiation pattern and gain are very important parameters to

the antenna design [7]. Hence, the antenna for wearable technology should consider both the electrical properties and physical properties. The wearable antenna should be flexible and can be operated when the antenna is attached to a human body [8–10]. For this reason, wearable antenna design becomes a challenging issue.

Many types of antenna are developed nowadays but there are just some types of antenna that are appropriate for wearable technology. The 2.4 GHz textile antenna using E-shape with a microstrip feed line technique is presented in [11]. Because a lot of wearable technology is on the human body; hence, the human effect should be considered. Microstrip patch antennas can have a reduced impact when placed on the human body, according to J.G. Santos *et al* [12]. The skin, fat and muscle of a human are relatively high dielectric; therefore, it can affect the radiation characteristics and the impedance matching of the antenna.

In this work, the antenna is designed and analyzed by a microwave simulation program [13]. The antenna is flexible and made from conductive fabric and felt. The operating frequency is from 2.4 GHz to 2.5 GHz which is in the ISM bands [14]. The antenna was fabricated and tested with-without a human to verify the operability of the designed antenna.

2. Antenna Design

An initial antenna design is based on a monopole antenna. The antenna is designed at the centre frequency of 2.45 GHz. The initial size of the antenna is 29 mm x 70 mm. The CST Microwave Studio program is used for simulation and optimization of the antenna structure. In this part, the antenna is designed in free space (without a human body).

2.1. Prototype of Flexible Monopole Antenna

The antenna structure is shown in figure 1. The size of the antenna is 34 mm x 90 mm. The substrate is felt with a dielectric constant of 1.38. The thickness of the substrate is 1.1 mm. The radiating patch was made from E-textile which is a conductive material. The conductivity of the material is 1250 S/m with a thickness of 0.08 m. These materials have flexible characteristics; therefore, the antenna becomes a flexible antenna structure.

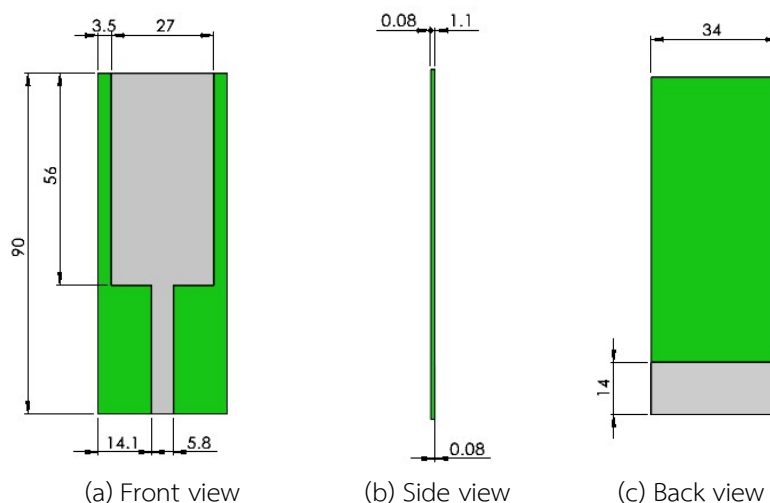


Figure 1 The simulated antenna structure

2.2 Simulation Results of the Antenna

The simulated $|S_{11}|$ of the antenna is illustrated in figure 2. The antenna can be operated, covering the desired frequency band from 2.4 GHz to 2.5 GHz. The impedance bandwidth is 0.6 GHz from 2.1 GHz to 2.7 GHz.

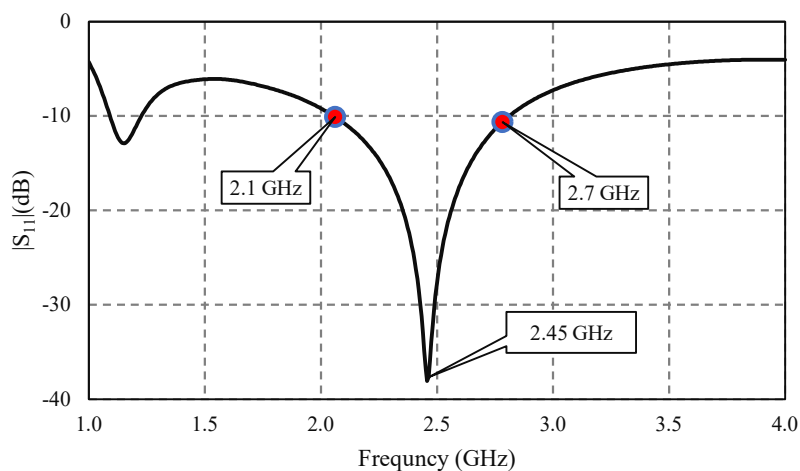


Figure 2 Simulated $|S_{11}|$ of the antenna

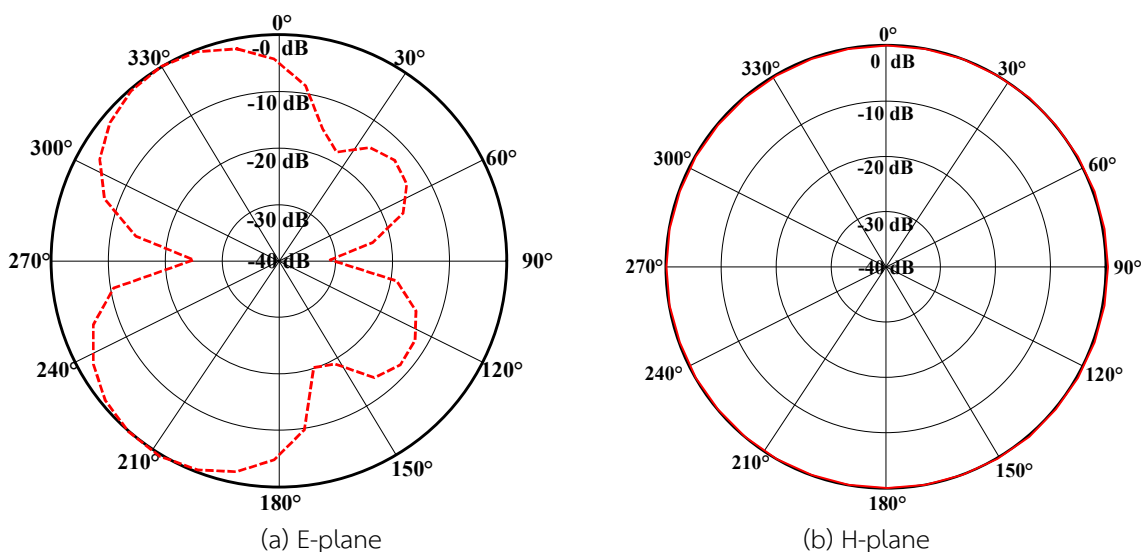


Figure 3 Simulated radiation pattern

The simulated radiating characteristics are in figures 3(a) and 3(b). In E-plane and H-plane, the antenna radiates a symmetrical beam. From the simulated results, it is obvious that the antenna without the human body effect can operate very well. However, the wearable antenna is used on the human body; therefore, the effect of the human on the antenna characteristics should be considered.

3. The Antenna on Human Body

The human body is divided into 3 layers from the simulations. The simulated antenna is located at the arm and chest of the human model with the electrical properties in table 1.

Table 1 The conductivity and dielectric properties of fat, skin and muscle of the human [15].

Parameter	Fat	Skin	Muscle
Conductivity (S/m)	0.1	1.56	1.71
Dielectric Constant	5.29	42.9	52.8

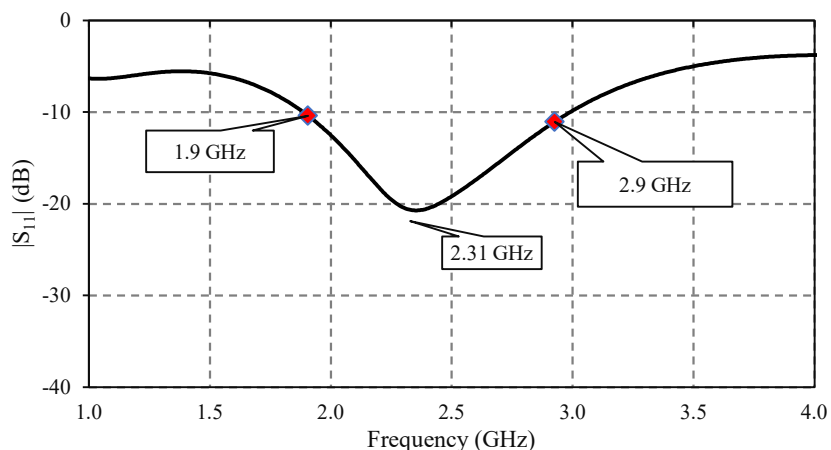


Figure 4 Simulated $|S_{11}|$ of the antenna located on the arm

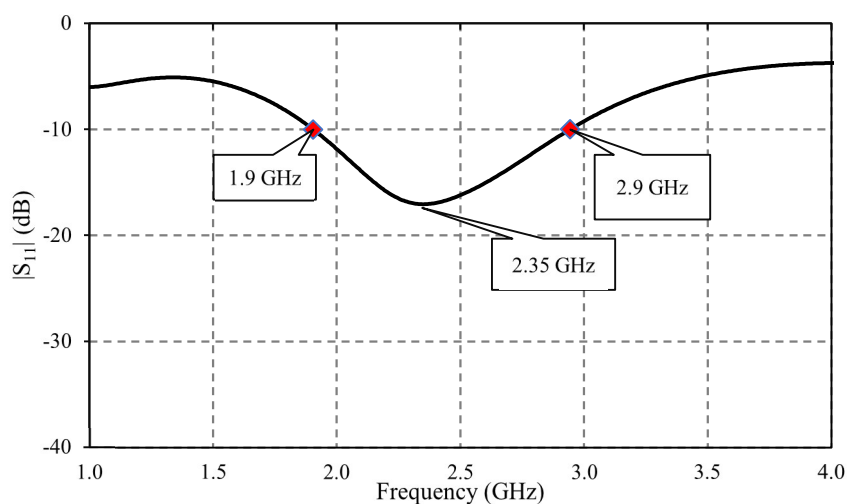


Figure 5 Simulated $|S_{11}|$ of the antenna located on the chest

From figures 4 and 5, it is illustrated that the impedance bandwidth is still effective even though the effect of the arm and chest is included. The antenna can be operated from 1.9 GHz to 2.9 GHz, covering the proposed bandwidth.

The radiation considered at 2.45 GHz, when the antenna is attached to the arm and chest are respectively presented in figure 6 (a)-(d). The results show that the radiation characteristic of the antenna is changed from a bi-directional to a directional radiation pattern. It can be concluded that the arm and chest have little effect on the antenna impedance matching but they have a strong effect on the radiation characteristic of the designed monopole antenna. The antenna radiation pattern changes depending on the body part under consideration. The changed characteristics such as impedance, radiation pattern, and gain of the antenna are caused by the fact that human skin is a lossy material with a high dielectric constant. The high dielectric constant of the human body may decrease the efficiency of the antenna.

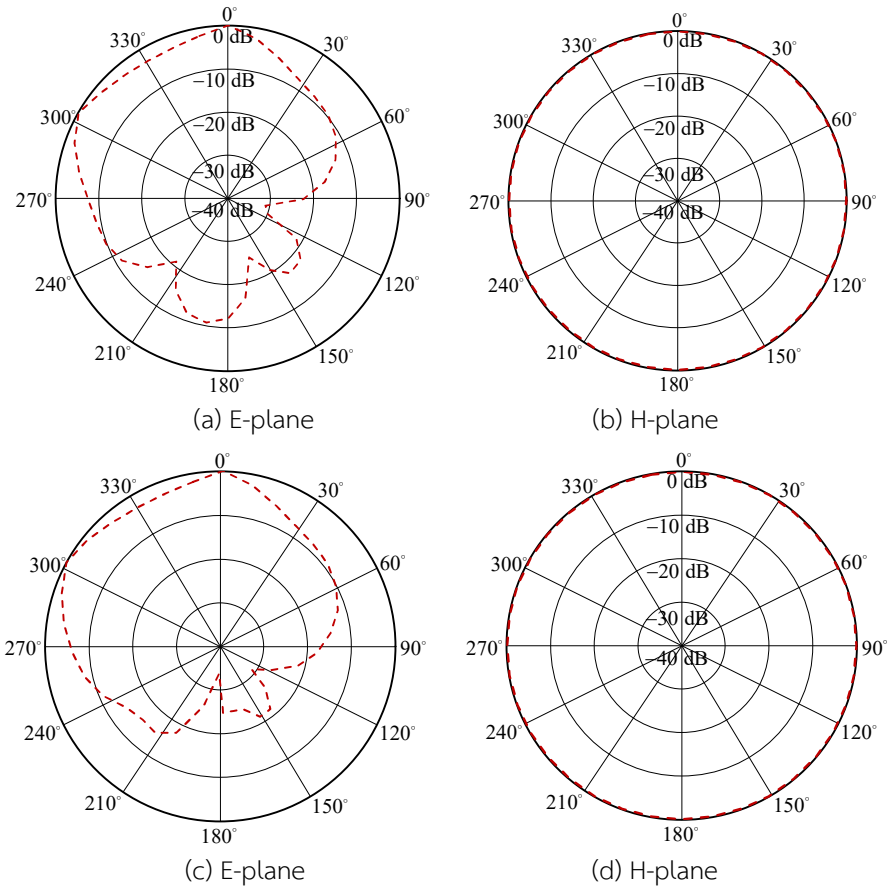


Figure 6 Simulated radiation patterns (a)-(b) located on the arm and (c)-(d) located on the chest

4. Fabrication and Measurement

Figure 7 depicts the proposed E-textile antenna. The antenna structure can bend to suit the human body because the antenna material is based on flexible textile. The antenna characteristics are measured by Network Analyzer. The antenna size is 34 mm x 90 mm with a thickness of 1.1 mm. The radiating patch size is 32 mm x 54 mm with a thickness of 0.08 mm. The ground plane size is 34 mm x 14 mm with a thickness of 0.08 mm.

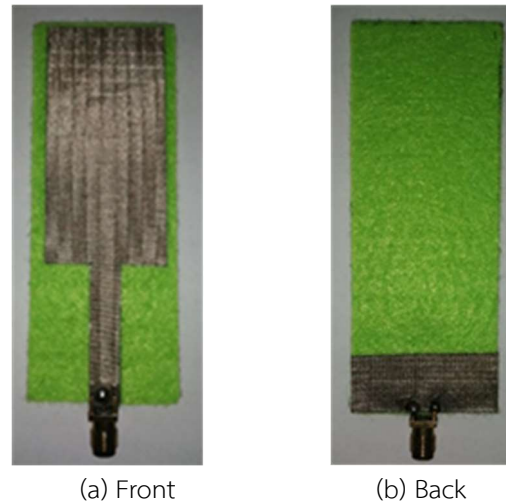


Figure 7 Fabricated Antenna

The measured and simulated results of the antenna without a human body are compared in figure 8. The antenna can operate from 2.2 GHz to 2.7 GHz. At 2.45 GHz, the $|S_{11}|$ is -38.9 dB. The measured result and the simulated result are in the same trend. In figure 9, the measured operating frequency when the antenna is located on the arm is from 2.1 GHz to 2.6 GHz, which covers the desired operating frequency. At the centre frequency of 2.45 GHz, the $|S_{11}|$ is -28.62 dB.

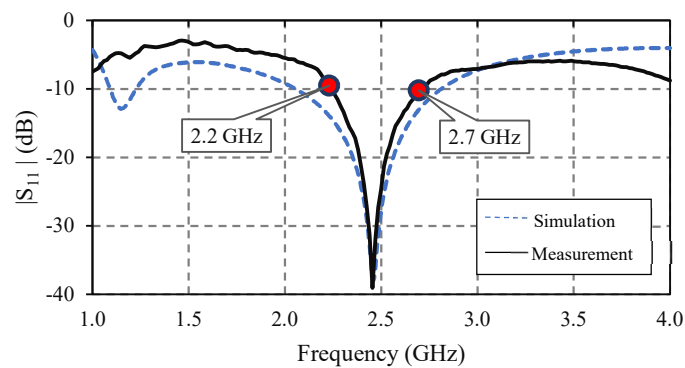


Figure 8 Measured $|S_{11}|$ of the antenna without a human body

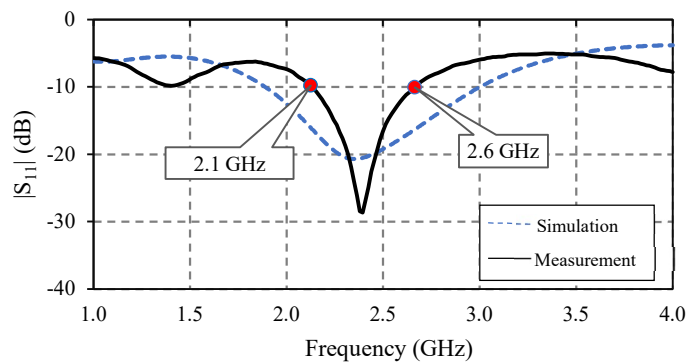


Figure 9 Measured $|S_{11}|$ of the antenna located on the arm

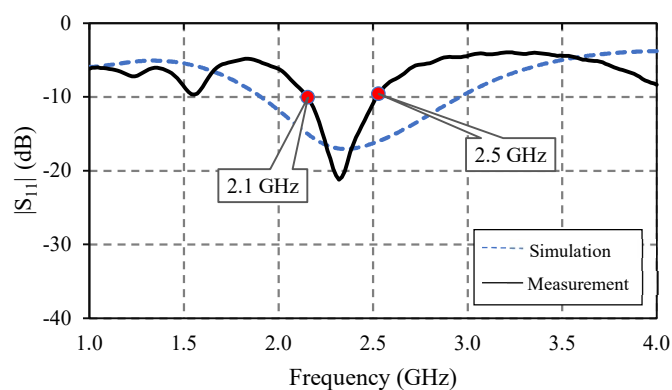


Figure 10 Measured $|S_{11}|$ the antenna located on the chest

The effect of the antenna attached to the chest on the $|S_{11}|$ is illustrated in figure 10. The impedance bandwidth of the measured result becomes narrower than that of the simulated result with the operating frequency between 2.1 GHz and 2.6 GHz. Considering the centre frequency of 2.45 GHz, the $|S_{11}|$ is -21.25 dB.

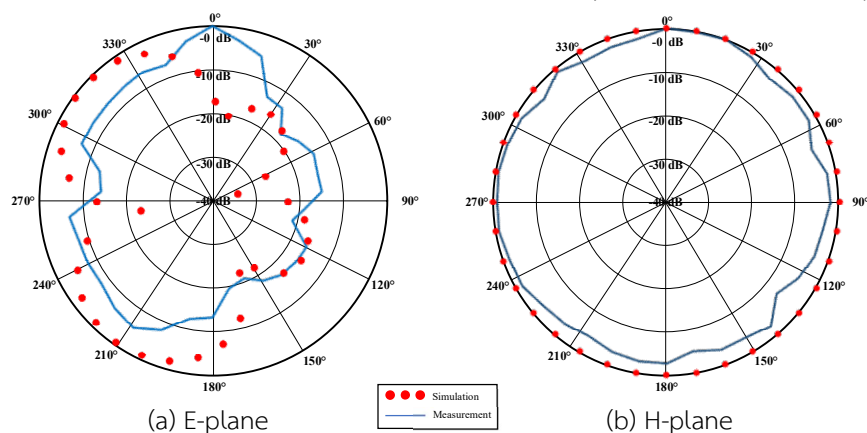


Figure 11 Measured radiation pattern of the antenna without the human body

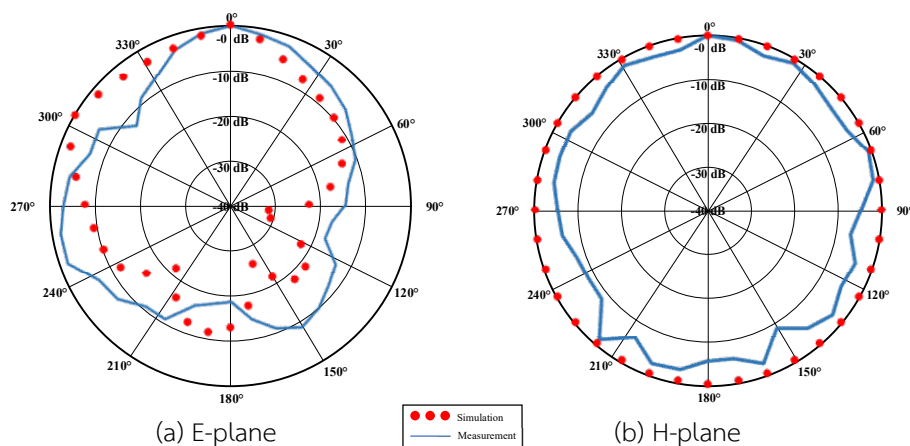


Figure 12 Measured radiation pattern of the antenna located on arm

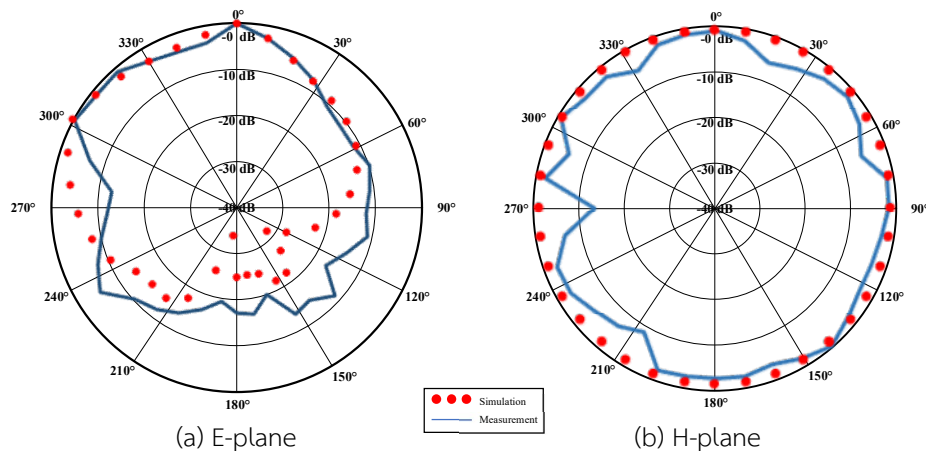


Figure 13 Measured radiation pattern of the antenna on chest

One of the important antenna characteristics is the antenna radiation pattern because it can show the antenna directional characteristic. The radiation pattern in the case of comparing the simulated and measured results without a human body is shown in figure 11. The direction of the antenna is slightly changed but it is still in the same trend. However, considering when the antenna is located on the human body in figures 12 and 13, the patterns are slightly different from the results in figure 11 (without a human body). From that compared results, it can be concluded that the chest and arm of a human body affect the antenna radiation properties. The measured results and the simulated results are different because in the simulation the authors used the human model just a simple human model in which the body is divided into 3 layers that are skin, fat and muscle. An organ, bone and cloth are not included in the simulation model. However, the designed antenna still works properly.

Table 2 The measured antenna gain

Gain	Chest	Arm	Free-space
Simulation	-2.97 dBi	-2.47 dBi	4.36 dBi
Measurement	-2.02 dBi	-1.52 dBi	3.18 dBi

The antenna gain is tabulated in table 2. The gain of the antenna has greatly affected the human body. That can be caused by the degradation of the radiation efficiency and the reflection efficiency (mismatch) when the antenna is placed on high dielectric material such as the human body.

5. Conclusion

The E-textile monopole antenna is presented in this work. The antenna is designed for wearable technology and is located on the human body at the arm and chest. The flexible antenna structure is made of conductive fabric with a conductivity of 1250 s/m and felt with a dielectric constant of 1.38. The operating frequency range of the proposed antenna is from 2.2 GHz to 2.7 GHz without a human body. When combining the effects of the human body structure, the antenna has an operating frequency from 2.2 GHz to 2.6 GHz. According to the measured results, the presented antenna impedance bandwidth covered the proposed operating frequency band of 2.4-2.5 GHz. The results show that the human body has a minor effect on $|S_{11}|$ due to the dielectric constant of the human body. However, the radiation pattern is considerably changed when the antenna is located on the human body such as the characteristics and the direction of the main beam. The antenna radiation pattern will differ when installed on different human parts due to differences in human part shape, which will directly affect antenna propagation. When placed on human parts, the antenna gain is greatly reduced because human skin has a relatively high dielectric value, which may reduce the antenna radiation efficiency. The measured results show that the proposed antenna is appropriated for wearable technology which is used in the arm and chest of the human.

6. Acknowledgments

This research was supported by the Rajamangala University of Technology Rattanakosin and the logistics and water transportation academic service centre, and strategic performance-based budgeting for the water transportation system. The authors gratefully acknowledge Mr Somsak Kocharee and Mr Patompong Suwansuk for many supports.

7. References

- [1] K. N. Paracha, S. K. Abdul Rahim, P. J. Soh and M. Khalily, “Wearable Antennas: A Review of Materials, Structures, and Innovative Features for Autonomous Communication and Sensing,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 56694–56712, 2019.
- [2] F. John Dian, R. Vahidnia and A. Rahmati, “Wearables and the Internet of Things (IoT), Applications, Opportunities, and Challenges: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 69200–69211, 2020.
- [3] J.J. Rutherford, “Wearable Technology,” *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 29, no. 3, pp. 19–24, 2010.
- [4] S. Seneviratne et al., “A Survey of Wearable Devices and Challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2573–2620, 2017.
- [5] C.A. Balanis, *Antenna theory: Analysis and design* (4th ed.), New York, Wiley, 2016.
- [6] P. Wongsiritorn, C. Phongcharoenpanich and P. Tajchai, et al., “Modified UTD-Based UHF RFID Tag Antenna with Two-Pronged Fork Slot for Coated Metallic Cylindrical Surface,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 30, pp. 805–823, 2016.
- [7] Z.N. Chen, and M.W.C. Chia, *Broadband Planar Antennas: Design and Applications*, Chichester, John Wiley & Sons, 2006.
- [8] P.S. Hall, and Y. Hao, *Antennas and Propagation for Body-Centric Wireless Communications*, Artech House, 2006.
- [9] D. Ferreira, P. Pires, R. Rodrigues and R. F. S. Caldeirinha, “Wearable Textile Antennas: Examining the effect of bending on their performance,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 59, no. 3, pp. 54–59, 2017.
- [10] S. M. Abbas, K. P. Esselle, L. Matekovits, M. Rizwan and L. Ukkonen, “On-body antennas: Design considerations and challenges,” *In Proceeding of 2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS 2016), Finland*, pp. 109–110, 2016.
- [11] K. Ali, Md. S. Ali, Md. Nuruzzaman, H. R. Chowdhury and A. Ahmed, “Experimental Characterization of a Textile Antenna Working at 2.4 GHz,” *In Proceeding of The Second International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE), Rajshahi*, pp. 1–4, 2017.
- [12] J. G. Santos, A. Alomainy and Y. Hao, “Textile Antennas for On-Body Communications: Techniques and Properties,” *In Proceeding of The Second European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007), Edinburgh*, pp. 1–4, 2007.
- [13] Dassult Systems. (2020). CST Studio Suit [Online]. Available: <https://www.cst.com>.

- [14] C. Lin, and J. Sun, “Circularly Polarized Dielectric Resonator Antenna Fed by Off-Centered Microstrip Line for 2.4-GHz ISM Band Applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 947–949, 2015.
- [15] A.I. Sabbah, D. Nihad, and Al-Nimr, “SAR and Temperature Elevation in a Multi-Layered Human Head Model Due to an Obliquely Incident Plane Wave,” *Progress in Electromagnetics Research M*, vol. 13, pp. 95–108, 2010.

Investigating of Mixture Ratio of 925 Sterling Silver Compound for the Metal Injection Molding Process

Sasitorn Pramakhamo¹ Siritra Chaekrathok¹ Surat Wannasri¹ Somlak Wannarumon Kielarova² Nararak Budchar¹
Rungwasun Kraiklang¹ Haruetai Maskong¹ Supattra Singnisai¹ Sinmahat Phailouie³ Witthaya Daodon^{1*}

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan, 744, Mueang, Nakhon Ratchasima 30000

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University,
99 Moo 9, Thapho, Mueang, Phitsanulok 65000

³Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, 60 Moo 3, Hantra, Phra Nakhon Si Ayutthaya 13000

*Corresponding author Email: witthaya.da@rmuti.ac.th

(Received: July 30, 2022; Revised: November 30, 2022; Accepted: December 11, 2022)

Abstract

The objective of this study is to determine the mixture ratio of 925 sterling silver compound that was feasible to produce complete green part via a metal injection molding process. The mixture ratios of 925 sterling silver powder to the binder mixture were varied. The particle sizes of 925 sterling silver powders were 100 μm and less. The binder mixture consisted of high density polyethylene, polyvinyl alcohol, polyethylene glycol, paraffin wax as plastic flow ability promoting agent and stearic acid as lubricant. All mixtures were then mixed with an internal mixer. Metal injection molding was performed by using a ram injection machine under constant pressure and temperature of 190 $^{\circ}\text{C}$ and 150 bars, respectively. The highest ratio of 925 sterling silver powder to the binder mixture that could inject the complete parts was required. The results exhibited that the favorable green parts were achieved by the formula with the mixture ratio of 90 percent of 925 sterling silver powder to 10 percent of binders by weight. The components of the formula included 120 grams of 925 sterling silver powder and 13.33 grams of binders, containing 5.067 grams of high density polyethylene, 0.500 grams of polyvinyl alcohol, 0.167 grams of polyethylene glycol, 7.200 grams of paraffin wax and 0.400 grams of stearic acid. The green parts of the formula had average green density of 4.507 g/cm^3 and average green strength of 17.70 MPa. This mixture ratio can be utilized in the metal injection molding for producing the green parts.

Keywords: 925 sterling silver powder, Binder, Mixture ratio, Green density, Green strength

1. Introduction

925 sterling silver has been one of the materials most typically used in jewelry industries to produce silver jewelry items. In accordance with the international standard, sterling silver must contain silver at least 92.5 wt.% [1, 2]. Generally, the rest content is copper (7.5 wt.%) added to improve the strength and hardness of the alloy because pure silver is too malleable [1]. The investment casting or lost wax casting process has commonly been utilized in jewelry industries for producing jewelry parts. However, the parts produced by this process usually have quality problems from casting defects such as gas porosity, shrinkage porosity, interstitial inclusion and fire scale.

Recently, Metal Injection Molding (MIM) technology is employed in the mass production of parts made from steel and titanium. The MIM can produce high quality parts, complex and near net shape parts. The technique competes with traditional manufacturing techniques such as machining, pressing-stamping, and casting process [3]. German and Bose [4] applied an injection molding process for metal powder and found the metal powder was not able to inject like plastic injection molding. There must contain binders to keep the metal powder flowing along the mold cavity like fluid and to maintain its shape upon cooling. The MIM was developed from plastic injection molding technology. This process has been used for producing small metal parts with complex shape and having good mechanical properties. Since the complex shape parts producing by MIM can be more precisely controlled in mass production resulting in lower unit costs compared to traditional process [5]. The MIM process has four main steps consisting of the feedstock mixing, injection molding, debinding and sintering [6]. For the MIM process, binder selection and binder ingredients is one of the most important part. Since the water-soluble binder is environmentally benign, it grows interesting. The feedstock of silver containing water-soluble binder was successfully prepared using water-soluble polyethylene glycol (PEG) together with polyvinyl butyral (PVB). The molded green parts are able to retain their shapes during solvent debinding using water [7]. In mixing of feedstock, the control of mixing temperature and the weight for each mixing sequence were also important. Mixing machine with high shear rate can make the homogeneous feedstock. The higher torque was required when the viscosity of the mixture increased at higher proportion of the powder content. Increasing in the rotating speed and the temperature leading to its low viscosity can help lessen the torque. It is important that the feedstock is homogeneous and free of powder–binder separation or particle segregation [8]. In MIM process of the 316L stainless steel powder, part defects caused by the low specific heat of the powder resulting in the rapid cooling of material during the injection. Consequently, the viscosity increased which led to short shot problem. Appropriate injection pressure brought about less shrinkage. Low injection pressure caused sink mark. If excessive pressure was applied, it led to the crack. Mold design was also an important factor in injection molding [9]. The gate locations had effects on morphology in MIM of 316L stainless steel parts. A perpendicular gate injection caused a separation between outer skin and core of green parts. The homogeneous parts without black streak, crack and phase separation were successfully molded by

the parallel gate injection with low pressure and speed [10]. The MIM has been utilized for fabrication stainless steel watch cases and bracelet [11] as well as used for the production of precious metal jewelry [12]. However, there is limited information available about the MIM process for precious metals and jewelry production, the manufacturing of MIM parts with the 925 sterling silver is not clear.

In this work, the mixture ratio of 925 sterling silver compound for a metal injection molding process possible for producing complete green parts was determined. The mixture ratios between 925 sterling silver powder and binder were varied to find the highest ratio of 925 sterling silver powder that could produce the favorable parts.

2. Experimental setup

2.1 Mixing process

The binder composition for fabricating feedstock comprised high density polyethylene as polymer backbone to hold the silver particles and pack the powder into desired shape. Soluble polymer, polyvinyl alcohol and polyethylene glycol were used because they can be debinded by distilled water. Muangwaeng [13] found that the specimens which were made of feedstock with high polyvinyl alcohol content could be debinded in a shorter time. Therefore, the binder ingredients referring to that study were primarily employed. The percentage of binder ingredients was fixed at 3 wt.% of stearic acid as a surfactant to reduce the agglomeration, 54 wt.% of paraffin wax as a plastic flow ability promoting agent, 38 wt.% of high density polyethylene, 3.75 wt.% of polyvinyl alcohol and 1.25 wt.% of polyethylene glycol. The sterling silver powder and binder were mixed together by an internal mixer. The mixing process is shown in Fig. 1. The sequence of material addition to the 925 sterling silver powder as follows, first, the machine temperature was set to 60 °C, next the metal powder were transferred to the machine and heated at 60 °C for 15 minutes with inverter frequency of 10 Hz. Each binder material, stearic acid, paraffin wax and high density polyethylene was added, sequentially. Later, polyvinyl alcohol and polyethylene glycol were added to the mixture at the same time. The temperature, time and frequency as shown in Table 1 were employed while adding each component to the internal mixer. Finally, the heater was turned off while keeping the mixing process continue for 90 minutes. An example of the feed stocks that were obtained from the process is shown in Fig. 1(c). Table 2 lists all the eight different mixing ratio of the feed stocks that were prepared in this study.

Table 1 Mixing condition of the 925 sterling silver with each binder material.

Material	Temperature (°C)	Time (min)	Inverter frequency (Hz)
Stearic acid	100	10	10
Paraffin wax	100	10	10
High density polyethylene	100	10	15
Polyvinyl alcohol and polyethylene glycol	150	20	15

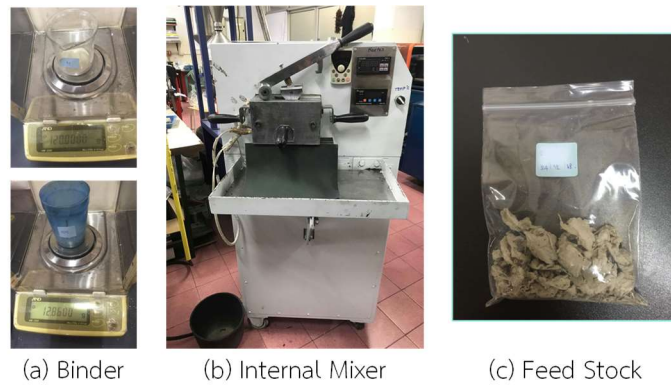


Figure 1 Mixing process.

Table 2 Mixture ratio (wt.%).

No.	Silver powder	Binder
1	98	2
2	94	6
3	90	10
4	86	14
5	82	18
6	78	22
7	74	26
8	70	30

2.2 Metal injection molding

Metal injection molding was performed by using a ram injection machine to prepare the green part samples as shown in Fig. 2. The metal injection molding condition is shown in Table 3. The barrel temperature at the extruder was set to 190 °C. The rotational speed of the screw was 40 rpm. The feed stock of 925 sterling silver compound was transferred to the extruder and melted for 15 seconds. The injection was conducted with the pressure of 150 bars, holding time of 30 seconds, and cooling time of 150 seconds. Finally, the mold was opened, and the samples were ejected out. The mold has two cavities; therefore, two samples were obtained per one injection. The injection was repeated at least three times for each mixture ratio and then five samples were taken for investigating physical and mechanical properties. The density and the strength of molded parts before sintering are green density and green strength, respectively. The powder molded parts must have enough green strength to withstand the handling load prior to sintering. Although, the shape of samples seems like the tensile test specimen, these samples were employed for three-point bending test for evaluating the green strength.

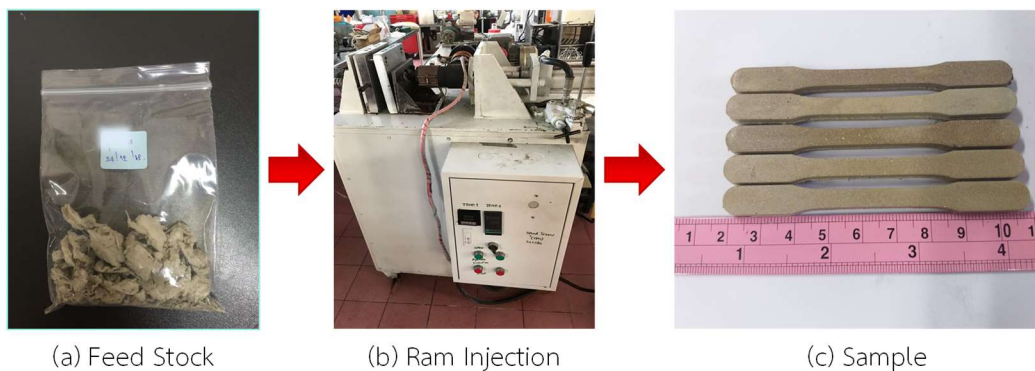


Figure 2 Metal injection molding process.

Table 3 Metal injection molding condition.

Temperature (°C)	190
Pressure (bar)	150

For the physical property, green density of samples was evaluated. The volume of the green parts can be found by Archimedes' principle. The principle states that the upward buoyant force that is exerted on a body immersed in a fluid, whether fully or partially, is equal to the weight of the fluid that the body displaces. Since the volume of the known fluid can be calculated from its weight, the volume of sample is determined. The samples were weighted by a four-digit weight scale. Therefore, the density ρ of the samples can be calculated as the equation (1):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Where m is mass of the sample, and V is volume of the sample which obtained from to the volume of the known fluid. For the mechanical property, the three-point bending test was performed to evaluate the green strength.

3. Results and discussion

3.1 Injection results

Variation in mixture ratio has an influence on viscosity. Sample obtained from mixture ratio of formula No.1 and No.2 with higher proportion of the silver powder content caused short shot. One of the causes of short shot in injection is high viscosity of the compound. Considering binder matrix, the viscosity of molten polymer depends on the temperature. Since the barrel temperature was fixed at 190 °C, the effect of temperature on viscosity is same for all mixture ratios of the 925 sterling silver compound. Therefore, the factor affecting viscosity of the compound was higher proportion of the powder content resulting in higher viscosity.

The samples were incompletely filled due to high viscosity as shown in Fig. 3. To confirm the failed outcome, the injection with formula No.1 and No.2 was repeated two times.



Figure 3 Incomplete shape of green parts with mixture ratio of formula No. 1 and 2.

Increasing in binder ratio affects on the filling of compound into the mold during injection. The compound gets good flow ability with higher binder content assisting by paraffin wax, which is a plastic flow ability promoting agent. The green part samples made of the formula No.3 to No.8 feed stocks were favorable. The binder materials contained stearic acid functioning as the lubricant and surfactant, thus, increasing amount of stearic acid help reducing the viscosity of compound. Large amount of binder or lowering silver content led to completely fill resulting from its low viscosity as shown in Fig. 4. Next, debinding and sintering will be conducted in further work.

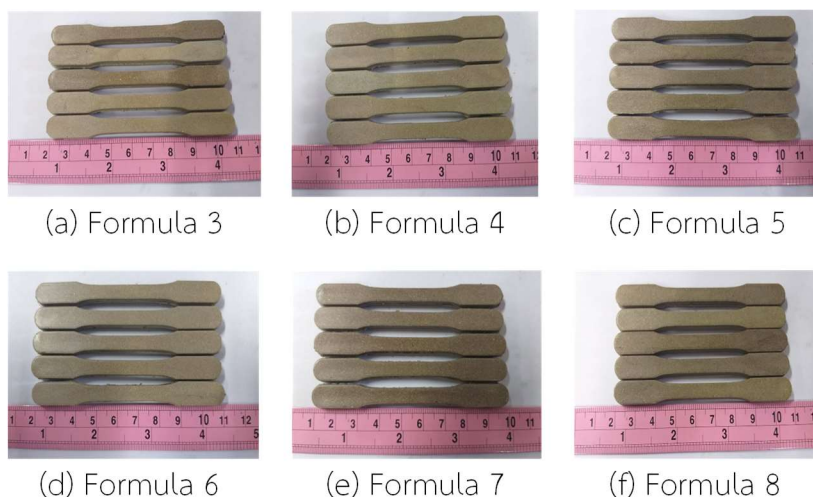


Figure 4 Green parts with different mixture ratio.

3.2 Physical property of green parts

Green density alters with changing in binder content. Average green density of five samples for each mixture ratio is shown in Fig. 5. The formula No.1 with the mixture ratio of 2 percent of binder or 98 percent of 925 sterling silver powder shows the highest green density of 4.693 g/cm^3 resulting from the highest silver powder content. The green density of sample decreased when the percentage of binder increased from 2 to

30 wt.%. Because the density of main contents of binder, paraffin wax ($\rho_{PW} = 0.91 \text{ g/cm}^3$) and high density polyethylene ($\rho_{HDPE} = 0.95 \text{ g/cm}^3$), are lower than that of 925 sterling silver ($\rho_{925Ag} = 10.37 \text{ g/cm}^3$), consequently, the density decreased with increasing in binder ratio.

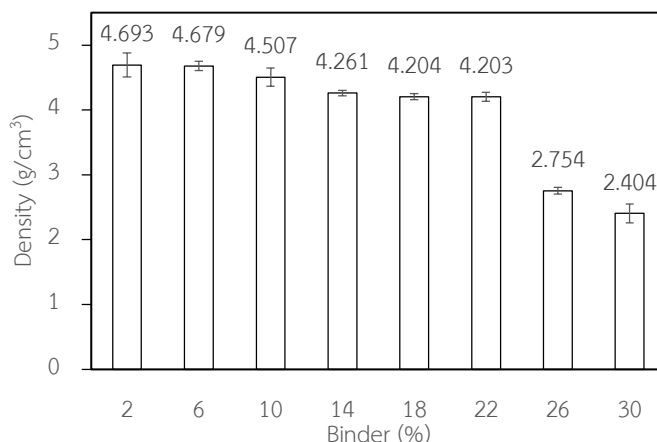


Figure 5 Green density of samples with different mixture ratios of binder.

3.3 Mechanical property of green parts

It is essential that the green parts have to withstand handling before they are fully fused in sintering. Green strength from three-point bending test is shown in Fig. 6. In the injection process, only a binder portion of compound was melt but the silver particles remained solid. They did not bind together with diffusion. Although higher powder content exhibited higher density in previous section, higher unbounded particles caused lower green strength. The green part maintained its shape with holding of binder matrix; therefore, the green strength depended on the amount of binder. The green strength increased with increasing in percentage of binder.

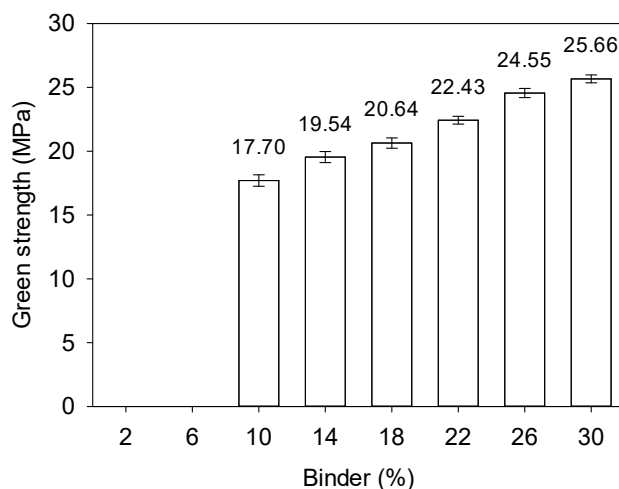


Figure 6 Green strength from three-point bending test.

4. Conclusions

This work aims to investigate the mixture ratio of 925 sterling silver compound that was feasible to produce complete green part via the metal injection molding process. Although there is the utilization of MIM for the fabrication of precious metals and jewelry components, there is limited information available. The mixture ratios of 925 sterling silver powder to the binder mixture were varied to find the highest ratio of 925 sterling silver powder that could produce the favorable parts. The following conclusions were drawn from the results obtained in this study.

1. Higher proportion of the silver powder content caused short shot. The optimal mixture ratio was the third formula which had the highest sterling silver powder content that could produce the complete parts.
2. The third formula mixture ratio contained 90 percent of 925 sterling silver powder and 10 percent of binders. The components of the third formula included 120 grams of 925 sterling silver powder and 13.33 grams of binders, containing 5.067 grams of high density polyethylene, 0.500 grams of polyvinyl alcohol, 0.167 grams of polyethylene glycol, 7.200 grams of paraffin wax and 0.400 grams of stearic acid.
3. The density decreased with increasing in binder ratio, whereas the green strength increased with increasing in percentage of binder. The green parts of the third formula have average green density of 4.507 g/cm³ and average green strength of 17.70 MPa. This mixture ratio can be utilized in the metal injection molding for producing the green parts.

5. Acknowledgements

This research was funded by Gem and Jewelry Institute of Thailand (GIT) Grant No. RD111/2563 (R2564A038) and Rajamangala University of Technology Isan, Grant No. NKR2565INC004.

6. References

- [1] R.V. Carrano, "Sterling Silver Casting Problems," *In Proceeding of the Santa Fe Symposium on Jewellery Manufacturing Technology*, pp. 91–103, 1990.
- [2] A.M. Reti, "Understanding Sterling Silver," *In Proceeding of the Santa Fe Symposium on Jewellery Manufacturing Technology*, pp. 339–356, 1997.
- [3] K. Wiesner, "Metal Injection Moulding (MIM) Technology with 18ct Gold – A Feasability Study," *In Proceeding of the Santa Fe Symposium on Jewellery Manufacturing Technology*, pp. 442–462, 2003.
- [4] R. M. German and A. Bose, *Injection molding of metals and ceramics*. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, pp. 11–182, 1997.
- [5] R.M. German, (2019, December 21). Overview: key criteria for selecting MIM technology [Online]. Available: http://www.pim-international.com/designing_for_PIM/summary
- [6] D. F. Heaney, *Handbook of Metal Injection molding*. Woodhead Publishing, Cambridge, 2012.

- [7] C. Aumnate, N. Nawaukkaratharnant, and N. Chuankrerkkul, "Preparation of Feedstock Containing Water-Soluble Binder for Powder Injection Moulding of Silver," *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 32, no. 3, pp. 75–79, 2022.
- [8] R. Supati, N. H. Loh, K. A. Khor, and S. B. Tor, "Mixing and Characterization of Feedstock for Powder Injection Molding," *Materials Letters*, vol. 46, no. 2–3, pp. 109–114, 2000.
- [9] P. Setasuwon, A. Bunchavimonchet, and S. Danchaivijit, "The Effects of Binder Components in Wax/Oil Systems for Metal Injection Molding," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 196, no. 1–3, pp. 94–100, 2008.
- [10] B. Muangwaeng, S. Rojananan, and S. Rojananan, "The Effect of Injection Parameters on Morphology in Metal Injection Moulding," *Advanced Materials Research*, vol. 802, pp. 174–178, 2013.
- [11] B. Williams, "Watch Cases and Bracelet Parts: PIM Moves Upmarket," *Powder Injection Moulding International*, vol. 2, no. 2, pp. 31–32, 2008.
- [12] J. Strauss, "The Potential of PIM For the Manufacture of Precious Metal Jewellery," *Powder Injection Moulding International*, vol. 2, no. 2, pp. 50–54, 2008.
- [13] B. Muangwaeng, "Feedstock Fabrication for Metal Injection Moulding of Medical Devices," *M.Eng. Thesis (Polymer Processing Engineering), King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand*, 2013.

ศึกษาความสามารถของการเชื่อมมิกเดินตามด้วยการเชื่อมฟลักซ์คอร์ของรอยต่อฉากเหล็กกล้า ความแข็งแรงสูง

Study of Weldability of MIG Welding Tandem FCAW on Fillet Joint of High Strength Steel

ณัฐ แก้วสกุล^{1*} เรืองศักดิ์ ภูธรธราช² อัญญารัตน์ สอนสนาม³ ภาวินี อ่างบุญตา⁴ สุภารัตน์ บุตรไชย⁵

สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Nut Kaewsakul^{1*} Ruangsuk Putontaraj² Anyarat Sonsanam³ Parvinee Angboonta⁴ and Suparat Bootchai⁵

¹Division of Industrial Education, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Thunyaburi

*Corresponding author Email: nut_k@mutt.ac.th

(Received: August 24, 2022; Revised: November 25, 2022; Accepted: November 28, 2022)

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยเรื่องศึกษาความสามารถของการเชื่อมมิกเดินตามด้วยการเชื่อมฟลักซ์คอร์รอยต่อฉากของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราการเติมของเนื้อโลหะเชื่อม และความสามารถในการเชื่อมของกระบวนการเชื่อมมิกเดินตามด้วยการเชื่อมฟลักซ์คอร์รอยต่อฉากของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำเพื่อประยุกต์กับอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกลหนัก อุตสาหกรรมประกอบโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ วิธีการทดลองเตรียมชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ขนาด 100 x 380 x 10 มิลลิเมตร เลือกใช้ลวดเชื่อมมิก (ER 100S-G) และลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ (E111T1-GC H4) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความเร็วในการเชื่อม 34 เซนติเมตรต่อนาที ระยะยื่นลวดเชื่อม 15 มิลลิเมตร โดยกำหนดสภาวะการเชื่อมกระแสไฟเชื่อมของลวดนำน้อยกว่าลวดตาม, ลวดนำมากกว่าลวดตาม และลวดนำเท่ากับลวดตาม ผลการทดลองพบว่ากระบวนการเชื่อมมิก(MIG) เดินตามด้วยการเชื่อมฟลักซ์คอร์ ในสภาวะการเชื่อมที่ลวดนำมีกระแสเชื่อม 270 แอมแปร์ ค่ากระแสไฟเชื่อมของลวดตามคือ 250 แอมแปร์ ให้อัตราการเติมน้ำโลหะมากที่สุดคือ 9.569 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการเติมของแนวเชื่อม พบว่าสภาพะการเชื่อมดังกล่าวให้อัตราการเติมสูงกว่าสภาวะการเชื่อมด้วยลวดนำมีค่ากระแสไฟเชื่อมน้อยกว่าลวดตามถึง 108.82 เปอร์เซ็นต์ และให้อัตราการเติมลวดมากกว่าสภาวะการเชื่อมที่กระแสไฟเชื่อมลวดนำ และลวดตามเท่ากัน ถึง 148 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งพื้นที่หน้าตัดแนวเชื่อมมากที่สุดเท่ากับ 61.53 ตารางมิลลิเมตร ชิ้นงานเกิดการหลอมลึกระหว่างโลหะเชื่อมกับเนื้อโลหะสมบูรณ์ การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาพบว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) จะมีโครงสร้างเป็นเบนไนต์ (Bainite) ซึ่งบริเวณนี้มีความแข็งแรง ส่วนบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) จะมีโครงสร้างเป็นเพิร์ลไลท์ (Pearlite) ตกผลึกเป็นเกรนเล็ก ๆ บนบริเวณขอบเกรนที่มีเนื้อพื้นเป็นเฟอร์ไรท์ และในบริเวณเนื้อแนวเชื่อม (WM) จะมีโครงสร้างเป็นลักษณะเกรนละเอียดทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงมาก ความสามารถในการเชื่อมทำให้เกิดการหลอมละลายลึกตามแกน X และแกน Y เท่ากับ 0.36 และ 1.70 มิลลิเมตรตามลำดับ ขนาดขาของแนวเชื่อม (Leg length of weld) มีขนาดเท่ากับความหนาของชิ้นงานทดสอบ

คำสำคัญ: อัตราการเติมน้ำโลหะ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ การหลอมลึกระหว่างโลหะ โครงสร้างทางโลหะวิทยา

Abstract

This research study aims to find the welding deposition rate of Gas Metal Arc Welding (GMAW) tandem Flux Core Arc Welding (FCAW) of Quenched and Tempered High Strength Steel. To study the effected of welding condition as the welding current of lead solid wire electrode and tandem with flux core wire electrode for heavy equipment industry as steel construction fabrication. By determined the first weld condition with low welding current of lead electrode and high welding current tandem electrode, the second condition weld with high welding current of lead electrode and low welding current tandem electrode and the last condition weld with equal welding current of lead and tandem electrode respectively. To compare the welding deposition rate, relate with the welding current of lead and tandem electrode and inspection of weld quality as weld profile, penetration, width of weld and compare the mechanical test with microstructure. The experimental procedure preparation of base metal is quench and tempered high strength steel has the dimension of width 100 mm long 380 mm and thickness 10 mm. Use the solid wire electrode ER100S-G diameter 1.2 mm and flux core wire E111T1-GC H4 diameter 1.2 mm. Welding speed 34 cm/min, electrode extension 15 mm and inter distance between leading electrode with tandem is 10 mm. The result shows the highest of weld deposition occur from the high welding current of leading electrode as 270 Ampere and tandem electrode welding current as 250 Ampere and produce the high deposition rate as 9.569 Kg/hr. The welding deposition rate of the condition high welding current leading electrode (GMAW) and low welding current tandem electrode (FCAW) can produce the high deposition rate more than welding condition as low welding current of leading electrode and high welding current electrode as 108.22 %, and high deposition rate more than welding condition equal welding current of leading and tandem electrode as 148% respectively. The weld quality of welding condition with high welding current leading electrode and low welding current tandem electrode provided the complete fusion of fillet weld and complete penetration. The weld microstructure of the base metal show as bainite structure and the heat affected zone consist of the matrix of ferrite grain and the small pearlite phase on the grainboundary, the weld metal zone has the fine grain structure.

Keyword: Welding Deposition Rate, High Strength Steel, Penetration, welding Microstructure

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการเชื่อมต่อประกอบโลหะในปัจจุบันได้รับความนิยมเป็นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งการต่อประกอบโครงสร้างเหล็ก เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นในการต่อประกอบประหยัดเวลา ขึ้นรูปได้ง่าย จึงทำให้หลาย ๆ อุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จักรกลหนัก อุตสาหกรรมการประกอบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมการต่อเรือเดินสมุทร อุตสาหกรรมการเชื่อมประกอบโครงสร้างเหล็กอาคารสูง, สะพาน โรงงาน อุตสาหกรรมการต่อประกอบรถเครื่องจักรกลหนัก ได้แก่ รถเครน รถแทรกเตอร์ รถสำหรับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ รวมถึงอุตสาหกรรมการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนหรือภาชนะบรรจุแรงดันสูง (Pressure Vessel Fabrication) อุตสาหกรรมการเชื่อมต่อประกอบระบบท่อส่งน้ำมัน ระบบท่อส่งก๊าซ

การเชื่อมประกอบโรงแยกก๊าซ การเชื่อมประกอบทุ่นลอยหรือฐานเจาะน้ำมัน (Off Shore Platform) การเชื่อมประกอบถังสำรองเชื้อเพลิงที่มีแรงดันสูง (Pressure Vessel) จากความต้องการที่หลากหลายของอุตสาหกรรมการผลิตประกอบโลหะ จึงทำให้กระบวนการที่นำมาใช้ในการต่อประกอบโลหะได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะอย่างยิ่งกลวิธีการเชื่อมโลหะที่มีอยู่อย่างมากมาย หลากหลายวิธีได้นำมาทำการการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลายเกี่ยวกับความสามารถในการเชื่อมโลหะประเภทต่าง ๆ ตัวแปรของกระบวนการเชื่อมที่มีผลต่อชิ้นงานเชื่อมทั้งด้านคุณลักษณะทางโลหะวิทยาของงานเชื่อม คุณสมบัติทางกล ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน รวมไปถึงด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตโดยวิธีการเชื่อมด้วยเช่นกัน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้อง สามารถตอบสนองได้ตรงตามความต้องการภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคของอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ อุตสาหกรรมผลิตเครื่องจักรกลหนัก และชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์ที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว และความต้องการอย่างต่อเนื่องในอนาคต จากการคาดการณ์ของสมาคมผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ไทย (Thai Auto parts Manufacturers Association) ในการตั้งเป้าหมายเพื่อเป็นประเทศผู้ผลิตส่งออกรายใหญ่อันดับ 8 ของโลกมีกำลังในการผลิตมากกว่า 1 ล้านคันต่อปี [1] เป็นการนำรายได้เข้าสู่ประเทศไทยอย่างมากมาย ทำให้เกิดการจ้างงาน เพื่อสร้างงาน สามารถยกระดับคุณภาพชีวิตของกลุ่มคนในวงโซ่ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมเหล่านี้ให้มีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น และมีทักษะในการปฏิบัติงานที่มีศักยภาพสูงขึ้นตามลำดับ

ในอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ และอะไหล่ชิ้นส่วนยานยนต์สำหรับงานเครื่องจักรกลหนัก ประกอบด้วยกระบวนการผลิตต่าง ๆ มากมาย กระบวนการผลิตโดยการเชื่อมถือว่าเป็นกระบวนการผลิตขั้นต้นที่สำคัญอย่างยิ่งในการต่อประกอบชิ้นส่วนหลัก เช่น โครงสร้างหลัก ตัวถัง ชิ้นส่วนรับ โครงสร้างบรรทุกโหลด โครงสร้างระบบส่งกำลัง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการเชื่อมสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ และชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์ ประกอบไปด้วยตัวแปรมากมายเข้ามาเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโดยการเชื่อม อย่างเช่น ตัวแปรแรกที่มีความสำคัญและถือเป็นตัวแปรต้นในงานเชื่อมได้แก่ กระบวนการเชื่อม (Welding Processes) กระบวนการเชื่อมที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมากที่สุดวิธีหนึ่งในกลุ่มของอุตสาหกรรมผลิตอะไหล่ และชิ้นส่วนยานยนต์ทั้งขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ได้แก่กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะด้วยก๊าซคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) หรือกระบวนการเชื่อมมิก (Metal Inert Gas: MIG) และกระบวนการเชื่อมที่มีวิธีการใกล้เคียงกันมาก ๆ ได้แก่ การเชื่อมแม็ก (Metal Active Gas: MAG) การเชื่อมซีโอทู (CO₂) รวมถึงการเชื่อมด้วยลวดแกนฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding: FCAW) เป็นต้น เนื่องจากกระบวนการเชื่อมทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นกระบวนการที่สามารถเชื่อมต่อประกอบโลหะได้อย่างสมบูรณ์ สามารถให้ความแข็งแรงตอบสนองลักษณะของการใช้งานอีกทั้งเป็นกระบวนการเชื่อมที่ให้ผลผลิตสูง (High productivity) เนื่องจากสามารถเชื่อมต่อหรือปรับปรุงให้เป็นการเชื่อมในระบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi-Automatic) หรือระบบอัตโนมัติ (Robotic Welding) กระบวนการผลิตโดยการเชื่อมด้วยโลหะก๊าซคลุมได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางเพื่อเพิ่มผลผลิต (Productivity) ให้สูงขึ้นดังเช่นรายงานของ P.J. Modenesi and R.I.Reis [2] อัตราการหลอมละลายของลวดเชื่อมเป็นปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อการอาร์คที่เสถียร และผลิตภาพ (Productivity) รวมทั้งรูปร่างของแนวเชื่อม จากการศึกษาทดลองพบว่าอัตราการหลอมละลายของลวดเชื่อม กระแสไฟเชื่อม และอาร์คโวลต์เตจ บริเวณบ่อหลอมละลาย พบความผิดปกติของอัตราการหลอมที่ปลายลวดเชื่อมที่มีการส่งถ่านน้ำโลหะแบบพ่นเป็นหยด และพ่นเป็นละออง การรายงานของ K.K. Cho, et al. [3] นำระบบการเชื่อมแบบอัตโนมัติมาใช้สำหรับอุตสาหกรรมการต่อเรือเพื่อทดแทนการต่อประกอบเรือแบบทั่ว ๆ ไปโดยอาศัยพื้นฐานจากประสบการณ์ พบว่าการนำระบบการเชื่อมแบบอัตโนมัติมาวางแผนในการเชื่อมเรือในลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยมโดยใช้ข้อมูลการเชื่อมได้แก่ ตำแหน่งท่าเชื่อม วิธีการเชื่อม เครื่องมืออุปกรณ์การเชื่อม และวัสดุงานเชื่อม การพัฒนาระบบการเชื่อมอัตโนมัติ สามารถดำเนินการเชื่อมให้ผลเป็นที่น่าพอใจเมื่อนำมาใช้เชื่อมประกอบต่อเรือจริง L.Carrino et al. [4] จากการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ เช่น อาร์คโวลต์เตจ, ความเร็วในการเชื่อม และความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม โดยใช้การวิเคราะห์ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบหาตัวแปรที่ดีที่สุดที่มีผล

ต่ออัตราการเติมที่เหมาะสม พบว่าอาร์คโวลต์เตจ, ความเร็วในการเชื่อม, ความเร็วในการป้อนลวด และตัวแปรรูปทรงแนวเชื่อม เช่น พื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อมมีอิทธิพลต่อกระแสไฟเชื่อม หรือการศึกษาของ K.H. Li et al. [5] เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการเติมของลวดเชื่อมในการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เนื่องจากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบริเวณผลกระทบเนื่องจากความร้อน (HAZ) ค่อนข้างมากเมื่อเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม และอาร์คโวลต์สูง ๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการเติมเพิ่มขึ้น การเชื่อมที่ให้พลังงานความร้อนสูงย่อมส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของชิ้นงานเชื่อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมเติมแบบคู่ทำให้ได้อัตราการเติมเท่ากันกับการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม และอาร์คโวลต์เตจสูง ๆ แต่จะให้ขนาดพื้นที่ของผลบริเวณผลกระทบจากความร้อน (HAZ) แคบกว่า เนื่องจากใช้กระแสเชื่อมต่ำกว่าทำให้ได้พลังงานในการหลอมละลายต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมแบบเดิมที่มีพลังงานความร้อนมากกว่าและทำให้เกิดการเย็นตัวเร็วจึงเกิดความแข็งแรงเพิ่มขึ้นบริเวณผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมจากการศึกษาของ S. Goecke et al. [6] การเพิ่มอัตราการเติมแนวเชื่อมของการเชื่อมแบบมิก/แม็กเดินตาม เนื่องจากเป็นวิธีการเชื่อมที่ประหยัดสามารถใช้เครื่องเชื่อมมิกที่มีอยู่ในสายการผลิตมาปรับปรุงให้เป็นการป้อนลวดแบบสองเส้นคู่เชื่อมตามหลังกันผลที่ได้พบว่าสามารถเดินแนวเชื่อมได้เร็วขึ้น ให้อัตราการเติมเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเชื่อมด้วยลวดเดี่ยว เมื่อความเร็วในการป้อนลวดเท่ากันหรือช้าลง จะเห็นได้ว่าการให้ความสำคัญและศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มผลการผลิตด้วยการเพิ่มอัตราเติมของงานเชื่อม อย่างไรก็ตามกระบวนการเชื่อมพลาสมาเป็นกระบวนการเชื่อมที่ให้อัตราการเติมสูงแต่ยังไม่มีผลการรายงานเกี่ยวกับใช้กระบวนการเชื่อมดังกล่าวร่วมกับกระบวนการเชื่อมอื่นๆ

ดังนั้นการศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาช่วงกระแสไฟเชื่อมที่มีผลต่ออัตราการเติมการเชื่อมมิกเดินตามด้วยการเชื่อมพลาสมา ศึกษาผลกระทบของสภาวะการเชื่อมต่อรูปลักษณะของแนวเชื่อมต่อฉาก และเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม เพื่อเป็นข้อมูลในการพิจารณาเลือกใช้กระบวนการเชื่อมมิกเดินตามด้วยกระบวนการเชื่อมพลาสมาสำหรับอุตสาหกรรมการเชื่อมผลิตเครื่องจักรกลหนัก อุตสาหกรรมการเชื่อมประกอบโครงสร้างเหล็ก อุตสาหกรรมการเชื่อมประกอบถังแรงดันสูง เป็นต้น

2. การดำเนินการทดลอง

2.1 กำหนดสภาวะในการเชื่อม

กำหนดช่วงกระแส อาร์คโวลต์เตจ ความเร็วในการเชื่อม ก๊าซคลุมสำหรับการเชื่อมต่อฉาก (Fillet Joint) เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงแผ่นหนา 10 มม. ด้วยกระบวนการเชื่อมมิกเดินตามด้วยการเชื่อมด้วยพลาสมาเชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงใช้สำหรับงานอุตสาหกรรมการยานยนต์ มีความหนาไม่ต่ำกว่า 10 มม. ประกอบในลักษณะรอยต่อฉาก (Fillet Weld) เชื่อมในตำแหน่งทำราบใช้กระบวนการเชื่อมมิก (MIG) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อม 1.2 มม. เดินแนวแรก และเชื่อมตามด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยพลาสมา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อม 1.2 มม. ใช้ก๊าซอาร์กอนปกคลุมแนวเชื่อม โดยกำหนดสภาวะในการเชื่อมตามตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 กำหนดค่าตัวแปรสภาวะการเชื่อมชิ้นงานทดสอบ

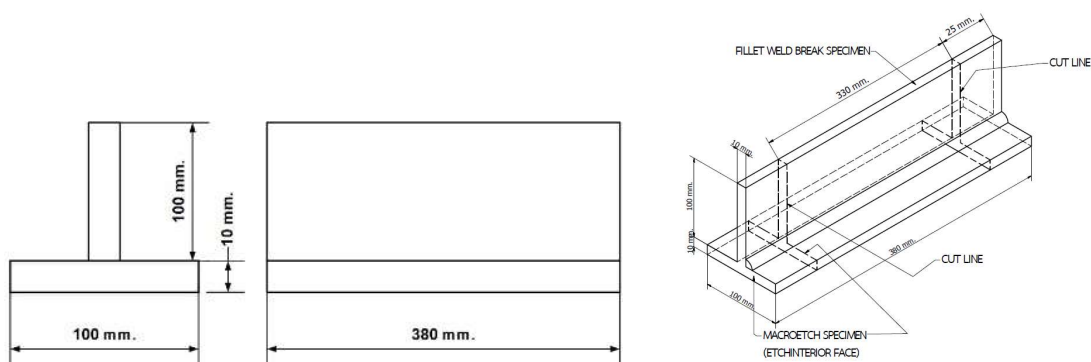
แก๊สที่ใช้ในการ ทดลองงานวิจัย	การปรับตั้งค่าคงที่ เครื่องช่วยเชื่อม	การแบ่งกลุ่มชิ้นงานเชื่อม ตามสภาวะการเชื่อมต่าง ๆ	กระแสไฟเชื่อมมิก (หัวนำ)	กระแสไฟเชื่อม ฟลักซ์คอร์ (หัวเชื่อมตาม)
อาร์กอน	- ความเร็วในการเดินแนว 34เซนติเมตร/นาที	กลุ่มที่ 1	NO.1	170
			NO.2	210
			NO.3	250
		กลุ่มที่ 2	NO.4	190
			NO.5	230
			NO.6	250
	- ระยะยื่นของลวดเชื่อม 15 มิลลิเมตร	กลุ่มที่ 3	NO.7	170
			NO.8	190
			NO.9	210
			NO.10	230
			NO.11	250

หมายเหตุ จากตารางที่ 1 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการทดลองงานวิจัย โดยแบ่งชิ้นงานทดสอบเป็น 3 กลุ่มดังนี้

- กลุ่มที่ 1 กำหนดให้กระแสไฟเชื่อมมิก (MIG) หัวเชื่อมนำ มีค่าน้อยกว่ากระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) หัวเชื่อมตาม
- กลุ่มที่ 2 กำหนดให้กระแสไฟเชื่อมมิก (MIG) หัวเชื่อมนำ มีค่ามากกว่ากระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) หัวเชื่อมตาม
- กลุ่มที่ 3 กำหนดให้กระแสไฟเชื่อมมิก (MIG) หัวเชื่อมนำ มีค่าเท่ากับกระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) หัวเชื่อมตาม

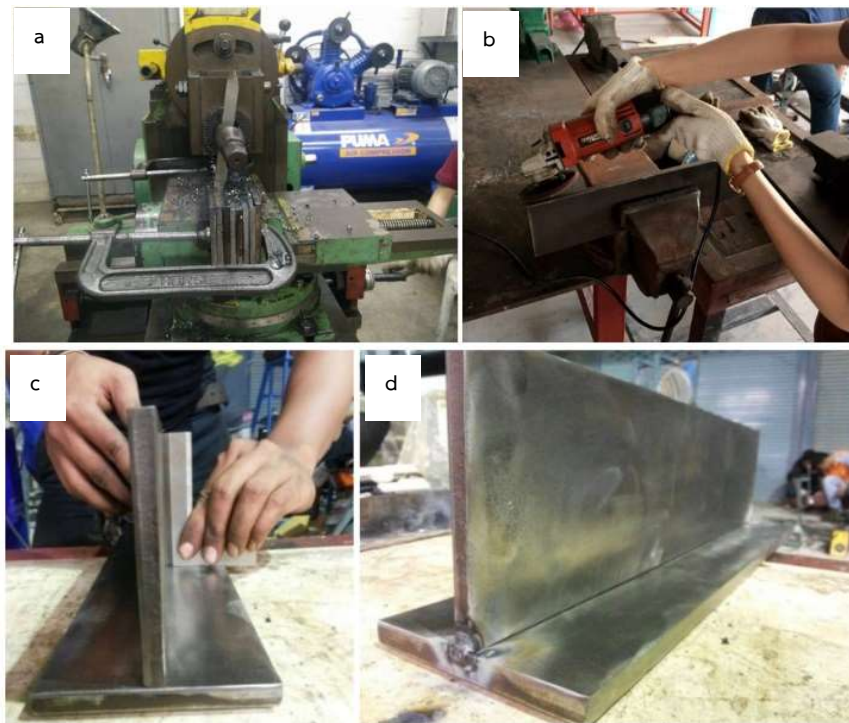
2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในการทดลองจะมีการออกแบบชิ้นงาน สำหรับการเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบในครั้งนี้ใช้มาตรฐานเกี่ยวกับการเชื่อมของอเมริกาซึ่งเป็นที่ยอมรับ (American Welding Society: AWS D 1.1 – 2020) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเตรียมประกอบชิ้นงานทดสอบ

การตัดเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบโดยการไสชิ้นรูปให้มีขนาด 100 x 380 มิลลิเมตร เจียรแต่งผิวชิ้นงานขัดคราบสนิม นำชิ้นงานมาวางต่อฉาก (Fillet Joint) เพื่อเตรียมสำหรับการเชื่อมต่อฉากทำراب เมื่อเชื่อมเสร็จตัดปลายชิ้นงานด้านเริ่มต้นเชื่อมและด้านสิ้นสุดการเชื่อมออกด้านละ 1 นิ้วสำหรับการเตรียมทดสอบการแตกหักของงานเชื่อม แสดงตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 การประกอบชิ้นงานก่อนการเชื่อม

รูปที่ 2 (a) เป็นการไสเตรียมขนาดชิ้นงานทดสอบ (b) แสดงการเจียรทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานก่อนการเชื่อม (c) แสดงการเตรียมประกอบชิ้นงานในรอยต่อฉาก (Fillet weld) ด้วยการจับฉากชิ้นงาน (d) เป็นการเชื่อมยึดชิ้นงานต่อฉาก

2.3 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ ใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ (High-strength low-alloy steel : HSLA Bis80) หรือเรียกว่า บิสเพลท 80 (Bisplate 80) คือ เหล็กที่มีความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ มีความแข็งแรง ค่าแรงดึงสูงเป็น 3 เท่าของเหล็กกล้าคาร์บอน เป็นเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัวลักษณะการใช้งานคือ อุปกรณ์ขนส่ง โครงสร้างของตึกสูง อุปกรณ์เหมือง สะพาน บั๊งกี้และโครงสร้างรถชุดมีความหนา 10 มิลลิเมตร แล้วนำมาตัดเป็นชิ้นงานเชื่อมขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 380 มิลลิเมตร และมีสมบัติทางกลตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ (HSLA Bis80)

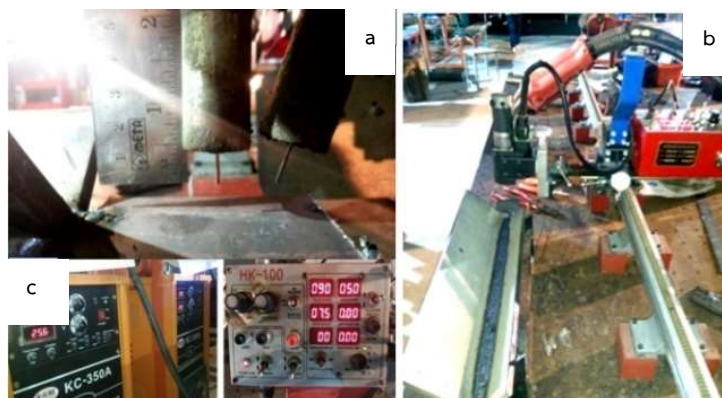
PROPERTIES	SPECIFICATION	TYPICAL
0.2% Proof Stress	690 MPa (Min)	750 Mpa
Tensile Strength	790 – 930 Mpa	830 Mpa
Elongation in 50mm G.L.	18% (Min)	26%
Charpy Impact (Longitudinal) – 20°C (10mm X 10mm)	40J (Min)	160J
Hardness	-	255HB

ในการทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องเชื่อมมิกกี้อั้ววีวันรุ่น KC-350A และเครื่องช่วยเชื่อมมิกกี้อั้ว HUAWEI รุ่น HK-100 Auto welding machine สามารถเชื่อมโดยการป้อนลวดเชื่อมเพื่อให้เกิดการอาร์กกับชิ้นงานอัตโนมัติทำให้เกิดการหลอมละลายอย่างต่อเนื่อง โดยจะมีแก๊สอาร์กอนทำหน้าที่คอยปกคลุมป้องกันอากาศจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับบ่อหลอมละลายทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่อง เช่น รูพรุน โพรงอากาศในแนวเชื่อมได้ การเชื่อมจะใช้เครื่องช่วยเชื่อมเพื่อรักษาสถานะการเชื่อมให้คงที่ทั้งกระแสเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม ระยะห่างระหว่างหัวเชื่อมโดยมีการประกอบติดตั้งดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การประกอบติดตั้งเครื่องเชื่อม เครื่องช่วยเชื่อม

รูปที่ 3 (a) แสดงการประกอบหัวเชื่อมตัวนำและหัวเชื่อมเดินตาม (b) แสดงการปรับตัวหัวเชื่อมกับชิ้นงาน (c) แสดงการปรับตั้งระยะอาร์กของหัวเชื่อมตัวนำและหัวเชื่อมตัวตาม (d) แสดงการเตรียมเริ่มต้นอาร์กขึ้นงาน การปรับตั้งค่าสถานะการเชื่อม เช่น กระแสไฟเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม ระยะอาร์ก อัตราการป้อนแก๊สคลุมเป็นระบบกึ่งอัตโนมัติสามารถควบคุมสถานะการเชื่อมได้คงที่ดังแสดงในรูปที่ 4

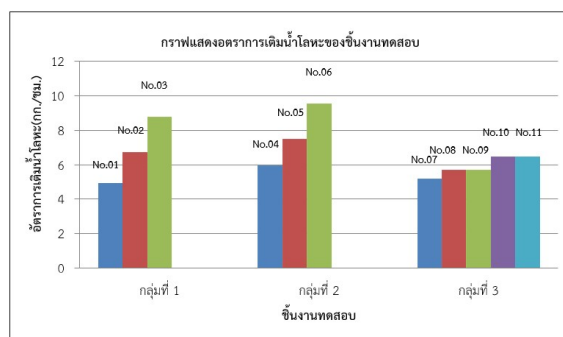


รูปที่ 4 การปรับตั้งค่าสภาวะการเชื่อม

รูปที่ 4 (a) แสดงการปรับระยะยื่นของลวดเชื่อมตัวนำและตัวตาม (b) แสดงการเชื่อมและการการเดินแนวเชื่อมชิ้นงาน (c) แสดงการปรับตั้งค่าสภาวะการเชื่อม

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการทดลองหาอัตราการเติมของชิ้นงานเชื่อมอัตราการเติมน้ำโลหะของกระบวนการเชื่อมมิกเดินตามด้วยการเชื่อมฟลักซ์คอร์รอยต่อจากของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ พบว่าชิ้นงานทดสอบกลุ่มที่ 2 ที่มีสภาวะการเชื่อมกระแสไฟเชื่อมมิกมากกว่ากระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์ โดยชิ้นงานหมายเลข 06 กระแสไฟเชื่อมมิก (MIG) 270 แอมแปร์ กระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) 250 แอมแปร์ ให้น้ำหนักของชิ้นงานเพิ่มขึ้นหลังจากการเชื่อมมากที่สุดคือ 0.185 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 2.998 ของน้ำหนักชิ้นงานก่อนเชื่อม และมีอัตราการเติมน้ำโลหะมากที่สุดคือ 9.569 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และพบว่าชิ้นงานทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่มีสภาวะการเชื่อมกระแสไฟเชื่อมมิกน้อยกว่ากระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์ ชิ้นงานหมายเลข 01 กระแสไฟเชื่อมมิก (MIG) 170 แอมแปร์ กระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) 190 แอมแปร์ ให้น้ำหนักของชิ้นงานเพิ่มขึ้นหลังจากการเชื่อมน้อยที่สุดคือ 0.095 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 1.548 ของน้ำหนักชิ้นงานก่อนเชื่อม และมีอัตราการเติมน้ำโลหะน้อยที่สุดคือ 4.914 กิโลกรัมต่อชั่วโมง



รูปที่ 5 อัตราการเติมน้ำโลหะที่สภาวะการเชื่อมต่าง ๆ

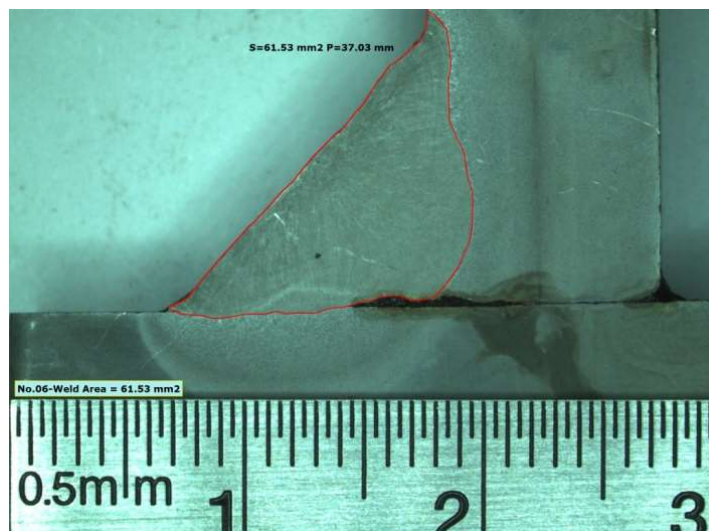
อย่างไรก็ตามจะเห็นได้จากผลการทดลองเมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมสูงขึ้นจะทำให้อัตราการเติมน้ำโลหะลงในบ่อหลอมกลายเป็นแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับตามลำดับ โดยชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานที่ 06 ในกลุ่มที่ 2 ซึ่งกำหนดให้กระแสไฟเชื่อมมิก (MIG) เท่ากับ 270 แอมแปร์มีค่ากระแสไฟเชื่อมสูงกว่ากระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) เท่ากับ 250 แอมแปร์ให้อัตราการเติมน้ำโลหะสูงที่สุด รองลงมาคือชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานที่ 03 ในกลุ่มที่ 1 ซึ่งกำหนดให้กระแสไฟเชื่อมมิก (MIG) เท่ากับ 250 แอมแปร์

มีค่ากระแสไฟเชื่อมต่ำกว่ากระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) เท่ากับ 270 แอมแปร์ ดังแสดงผลการหาอัตราการเติมน้ำโลหะจึงพบว่ากระแสไฟเชื่อมที่สูงขึ้นจะทำให้ได้อัตราการเติมน้ำโลหะที่สูงขึ้นตามไปด้วย ไม่ว่าจะกำหนดให้กระแสไฟเชื่อมมิก (MIG) มีค่ากระแสไฟเชื่อมสูงกว่า ต่ำกว่า หรือเท่ากับกับกระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) และพบว่ากระแสไฟเชื่อมมิก (MIG) ที่กำหนดค่ากระแสไฟเชื่อมให้สูงกว่าค่ากระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) จะทำให้ได้อัตราการเติมน้ำโลหะที่มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นอัตราการเติมของน้ำโลหะในแนวเชื่อมกลุ่มที่ 2 เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.1 เมื่อเทียบกับการอัตราการเติมในกลุ่มที่ 1 และเพิ่มขึ้นร้อยละ 32.64 เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ 3 แสดงให้เห็นว่ากระแสไฟเชื่อมของลวดตัวนำสูงสามารถสร้างแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงเป็นการให้ความร้อนนำสูงจึงสามารถหลอมละลายลวดตัวตามได้มากขึ้นทำให้เกิดอัตราการเติมที่เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ในขณะที่สภาวะการเชื่อมกลุ่มที่ 1 ให้อัตราการเติมลดลงมาเนื่องจากค่ากระแสไฟเชื่อมที่หัวเชื่อมตัวนำต่ำ แต่ได้อัตราการหลอมละลายที่เพิ่มขึ้นจากหัวเชื่อมตัวตามที่มีกระแสไฟเชื่อมสูงในส่วนของสภาวะการเชื่อมกลุ่มที่ 3 เป็นสภาวะการเชื่อมที่ให้อัตราการเติมลวดน้อยที่สุดเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการอาร์กของลวดตัวนำ และตัวตามเท่ากัน



รูปที่ 6 แนวโน้มการเติมน้ำโลหะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟเชื่อมสูงขึ้น

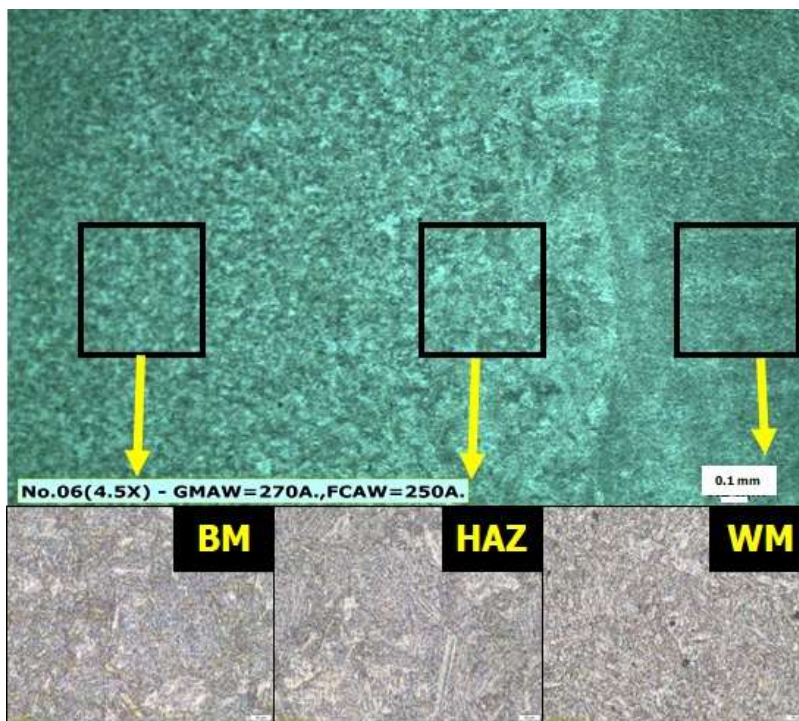
ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ของรูปลักษณะชิ้นงานทดสอบพบว่าชิ้นงานที่ 06 ที่มีสภาวะการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมมิกลวดตัวนำ 270 แอมแปร์ และกระแสเชื่อมฟลักซ์คอร์ของลวดตัวตาม 250 แอมแปร์ มีพื้นที่หน้าตัดแนวเชื่อมมากที่สุดคือ 61.53 ตารางมิลลิเมตร สอดคล้องกับค่าอัตราการเติมน้ำโลหะในแนวเชื่อม เมื่ออัตราการเติมน้ำโลหะมากพื้นที่หน้าตัดแนวเชื่อมจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7 การหาพื้นที่หน้าตัดแนวเชื่อม



รูปที่ 7 การหาพื้นที่หน้าตัดแนวเชื่อม

ชิ้นงานที่ 06 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีอัตราการเติมน้ำโลหะมากที่สุดมีการหลอมละลายรวมตัวของโลหะเชื่อมกับเนื้อโลหะสมบูรณ์ ผิวหน้าแนวเชื่อมราบเรียบ ปราศจากรูพรุน และโพรงอากาศ ในขณะที่ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมต่ำเกิดการหลอมละลายไม่สมบูรณ์บริเวณรากของแนวเชื่อม การหลอมละลายไม่สมบูรณ์บริเวณขาแนวเชื่อม เกิดแนวซ้อนเกย (Overlap) เนื่องจากการหลอมของลวดเชื่อมทำให้เกิดน้ำโลหะปริมาณมากแต่พลังงานความร้อนไม่เพียงพอต่อการหลอมเนื้อชิ้นงานเชื่อมทำให้น้ำโลหะส่วนเกินไหลทับแนวเชื่อม

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานกระแสไฟเชื่อมมิก 270 แอมแปร์และกระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์ 250 แอมแปร์ พบว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) จะมีโครงสร้างพื้น (Matrix) เป็นเบนไนท์ (Bainite) เนื่องจากเป็นเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง และอบคืนตัวจึงทำให้บริเวณเนื้อชิ้นงานมีความแข็งค่อนข้างสูง ส่วนบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) มีโครงสร้างเพิร์ลไลท์ (Pearlite) ขนาดเล็กๆ ตกผลึกที่ขอบเกรนกับโครงสร้างเบนไนท์ (Bainite) เนื่องจากความร้อนจากการเชื่อมที่แพร่กระจายสู่เนื้อโลหะบริเวณโดยรอบแนวเชื่อมทำให้บริเวณดังกล่าวมีความแข็งลดลง ในส่วนที่อยู่บริเวณใกล้แนวเชื่อมเนื่องจากได้รับความร้อนจากการเชื่อมมากทำให้บริเวณดังกล่าวมีขนาดเกรนโตกว่าบริเวณอื่น ๆ ทำให้ทนต่อแรงดึงได้น้อยแต่ให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น และในบริเวณเนื้อแนวเชื่อม (WM) มีลักษณะโครงสร้างเกรนละเอียดทำให้แนวเชื่อมมีความแข็ง [7] ดังรูปที่ 8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาของงานเชื่อม



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานทดสอบ

ผลการทดสอบสมบัติทางกล โดยการทดสอบการแตกหัก (Fracture Test) ชิ้นงานกระแสไฟเชื่อมมิก 270 แอมแปร์ และ กระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์ 250 แอมแปร์ พบว่ามีการหลอมรวมตัวของแนวเชื่อมกับเนื้อโลหะชิ้นงานสมบูรณ์ รอยแตกหักเกิดขึ้น บริเวณกึ่งกลางตลอดแนวเชื่อมแสดงให้เห็นถึงการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ของขาแนวเชื่อมกับผิวชิ้นงานเชื่อม เนื่องจากสภาวะ การเชื่อมที่เหมาะสมทำให้ความร้อนจากกระแสไฟในการเชื่อมหลอมละลายชิ้นงานเชื่อมและลวดเชื่อมได้สมบูรณ์สร้างความ แข็งแรงให้แก่เนื้อแนวเชื่อมบริเวณขาของแนวเชื่อมสามารถรับแรงจากการทดสอบโดยไม่เกิดการพังทลายบริเวณขาของแนวเชื่อม สามารถยอมรับผลการทดสอบผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของ AWS D1.1-2020 [8]



รูปที่ 9 ผลการทดสอบการพังทลาย (Fracture Test)

ผลการทดลองสภาวะการเชื่อม จะเห็นได้ว่าสภาวะการเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมมิกหัวนำที่ 270 แอมแปร์ กระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์หัวตาม 250 แอมแปร์ จะให้อัตราการเติมน้ำโลหะในแนวเชื่อมมากที่สุดเมื่อกระแสไฟเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อลดกระแสเชื่อมลงจะทำให้การเติมน้ำโลหะในแนวเชื่อมลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่เดียวกันการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมของหัวเชื่อมที่มากกว่ากระแสเชื่อมของหัวเชื่อมตามสามารถหลอมละลายลวดเชื่อมให้กลายเป็นน้ำโลหะได้มากกว่าการเชื่อมที่ใช้กระแสเชื่อมของหัวเชื่อมที่น้อยกว่ากระแสเชื่อมของหัวเชื่อมตาม เนื่องจากการเชื่อมด้วยกระแสสูงสามารถหลอมละลายลวดเชื่อมได้เพิ่มขึ้นอีกทั้งเป็นการเพิ่มความร้อนเข้าไปในแนวเชื่อมให้สูงขึ้นทำให้เพิ่มการหลอมละลายของลวดตัวตามได้มากขึ้นตามไปด้วย

ผลการตรวจสอบรูปลักษณ์ของแนวเชื่อม ปรากฏว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมที่เหมาะสมโดยกระแสไฟเชื่อมมีหัวนำ 270 แอมแปร์ กระแสไฟเชื่อมฟลักซ์คอร์หัวเชื่อมตาม 250 แอมแปร์ สามารถหลอมละลายชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์ทั้งการหลอมลึก การหลอมบริเวณขาแนวเชื่อมกับชิ้นงานอีกทั้งให้ลักษณะผิวหน้าของแนวเชื่อมเรียบเนียน สม่ำเสมอลักษณะผิวหน้าชิ้นงานจะแบนราบทำมุม 45 องศากับชิ้นงานเชื่อม

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบสมบัติทางกล จากผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าความร้อนจากกระแสในการเชื่อมเมื่อกระแสไฟในการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานหลอมละลายได้เพิ่มขึ้นและส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคมากขึ้นกล่าวคือมีการขยายตัวของเกรนบริเวณผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมเป็นบริเวณกว้างทำให้บริเวณดังกล่าวลดความแข็งแรงลงทันที ในขณะที่เชื่อมด้วยสภาวะการเชื่อมที่มีกระแสเชื่อมต่ำ ๆ จะพบว่าการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ทั้งรากของแนวเชื่อม และบริเวณขอบของแนวเชื่อมจะเกิดความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้นสม่ำเสมอ

ผลการทดสอบสมบัติทางกล พบว่าการเชื่อมด้วยสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสม สามารถสร้างรูปลักษณ์ของแนวเชื่อมได้เป็นอย่างดี เกิดการหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวทั้งแนวเชื่อมและชิ้นงานทำให้สามารถรับแรงจากการทดสอบได้ดีโดยไม่เกิดการแตกหักพังทลายในพื้นที่ขอบขาของแนวเชื่อม

4. กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณ ผู้ให้ทุนศึกษา คือสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม นางสาวเจนจิรา นาครักษ์ และนางสาวสุนิสา สุวรรณเกิด ผู้จัดเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทดสอบและบันทึกผล สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องทดสอบ และบุคลากรทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ทำให้งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Master Plan for Automotive Industry 2012– 2016. Thailand Automotive Institute. Ministry of Industry 2012. [Online]. Available: http://www.thaiauto.or.th/2012/backoffice/file_upload/research/ (In Thai)
- [2] P.J. Modenesi and R.I. Reis, “A Model for Melting Rate Phenomena in GMA Welding, Journal of Materials Processing Technology,” vol. 189, pp. 199–205, 2007.
- [3] K.K. Cho, J.G. Sun and J.S. Oh, “An Automated Welding Operation Planning System for Block Assembly in Shipbuilding, Int. J. Production Economics,” vol. 60–61, pp. 203–209, 1999.
- [4] L. Carrino, U. Natale, L. Nele, M. L. Sabatini and L. Sorrentino, “A Neuro-Fuzzy Approach for Increasing Productivity in Gas Metal Arc Welding Processes,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 32, pp. 459–467, 2007.

- [5] K.H. Li, Y.M. Zhang, P. Xu, and F.Q. Yang, “High–Strength Steel Welding with Consumable Double–Electrode Gas Metal Arc Welding, *Welding Journal*,” vol. 87, pp. 57–64, 2008.
- [6] G. Sven, “Tandem MIG/MAG Welding,” *Svetsaren*, vol. 2, no. 3, pp. 24–28, 2001.
- [7] N. Keawsakul, R. Phuthrontaraj, C. Hongtong, “Influence of Heat Treatment Processes on High Strength Steel (Q&T Steel) 690 MPa by Gas Metal Arc Welding,” *The 6th Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference*, 2021. (in Thai)
- [8] AWS D1.1 Structural Welding Steel, 24th Edition, 2020.

การวิเคราะห์ฮิวริสติกส์สำหรับการประยุกต์ในการจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียน

An Analysis Heuristics for Application in School Bus Routing

จารุพงษ์ บรรเทา^{1*} ปวีณา อาสาชาติ¹ สุจิตรา สรภูมิ¹¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานJarupong Banthao^{1*}, Paweena Arsachat¹, Suchitra Soraphum¹¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

E-mail: jarupong.ba@rmu.ac.th*

(Received: November 21, 2022; Revised: December 18, 2022; Accepted: December 19, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอวิธีการทางฮิวริสติกส์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียน การศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียนของกรณีศึกษา พบว่าเส้นทางการรับส่งนักเรียนมีระยะทางรวมมาก ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการเดินทางมาก และยังพบว่าการเดินทางของทุกเส้นทางมีช่วงเวลาจำกัด โดยจะต้องถึงโรงเรียนก่อนเวลา 08:00 น. นอกจากนั้นยังพบว่าในบางเส้นทางมีจำนวนนักเรียนเกินจำนวนที่นั่งกำหนด ซึ่งจะส่งผลต่อความปลอดภัยในการเดินทาง กรณีศึกษามีนักเรียนที่ต้องรับส่งทั้งหมด 346 คนต่อวัน จำนวนจุดรับส่งทั้งหมด 43 จุด และมีรถสองแถวเล็ก 12 ที่นั่ง 2 คัน รถสองแถวใหญ่ 35 ที่นั่ง 2 คัน และรถรับส่ง 55 ที่นั่ง 4 คัน วิธีฮิวริสติกส์ที่นำมาประยุกต์ใช้ 4 วิธีคือ Nearest Neighbor Heuristic, Clarke - Wright Saving Heuristic, Sweep Heuristic และ Cluster First Route Second จากการเปรียบเทียบผลทำให้สามารถจัดเส้นทางภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด พบว่าการประยุกต์ใช้ Cluster First Route Second โดยการใช้รถรับส่ง มีระยะทางที่สั้นลงจากเดิม 287.65 กิโลเมตร หรือคิดเป็น 28.11% และไม่มีจำนวนที่นั่งเกินกว่าที่กำหนดได้

คำสำคัญ: การจัดเส้นทาง รถรับส่งนักเรียน ฮิวริสติกส์

Abstract

This research aims to propose a heuristic method to optimize the routing of student shuttle buses. The study of the problem of arranging the shuttle bus route for school appointments found that, the route to pick up students has a large total distance. As a result, it takes a lot of travel time, and found that the travel of all routes has a limited time. They must arrive at school before 8:00 AM. In addition, found that some routes had more students than the required number of seats. This will affect travel safety. The case study had a total of 346 students per day, 43 pick-up points, including 2 minibuses (12-seat), 2 minibuses (35-seat), and 4 buses (55-seat). The applied 4 heuristics are Nearest Neighbor Heuristic, Clarke - Wright Saving Heuristic, Sweep Heuristic and Cluster First Route Second. The conclusion from the comparison of the results of the experiment provided a result showed that using Cluster First Route Second with a bus to transfer can get the shortest distances in a

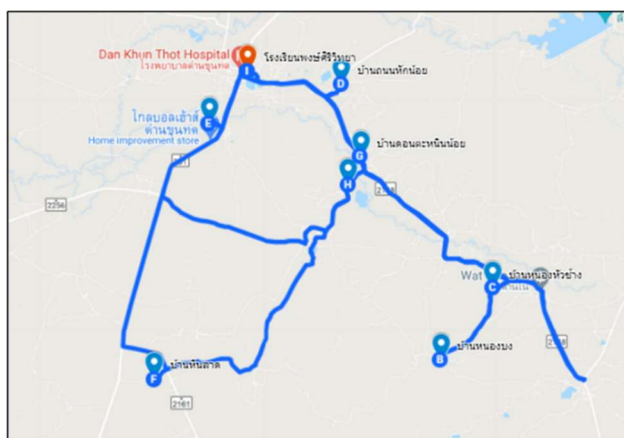
shorter distance relative to the original route, with a reduction of 287.65 kilometers (28.11% of original route) and no more than the number of seats allowed.

Keywords: Routing, School Bus, Heuristics

1. บทนำ

ในปัจจุบันการขนส่งได้มีบทบาทความสำคัญเป็นอย่างมากต่อระบบเศรษฐกิจ ระบบการศึกษา และการดำเนินชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นการขนส่งทางบก ทางน้ำ ทางอากาศ และทางท่อ ทั้งนี้ ระบบการขนส่งทางบกนับว่ามีบทบาทสำคัญในลำดับต้นๆ เนื่องจากการขนส่งทางบก นั้นมีการขนส่งทางถนนเป็นหลัก การขนส่งทางถนนนับว่ามีบทบาทสำคัญอย่างมากในระบบการขนส่ง ทั้งภายในและภายนอกประเทศ ไม่ว่าจะเป็นการขนส่งสินค้า การขนส่งมวลชน หรือการขนส่งอื่น ๆ ซึ่งการขนส่งทางถนนนั้นมีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งภาครัฐ และเอกชน เนื่องจากการขนส่งทางถนน นั้นสามารถไปยังจุดรับส่งต่าง ๆ ได้โดยมีข้อจำกัดน้อย และต้นทุนการขนส่งที่ต่ำ ทำให้การขนส่งทางถนนมีส่วนสำคัญต่อระบบการขนส่งทางบกเป็นอย่างมาก

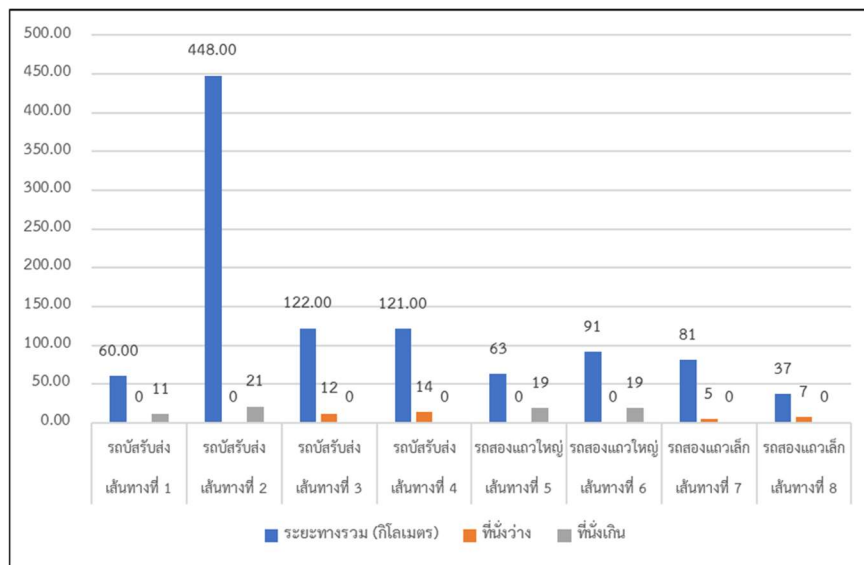
การให้บริการขนส่งรับ-ส่งนักเรียนเช่นเดียวกัน ซึ่งปัจจุบันมีสถานศึกษาไม่ว่าจะเป็นภาครัฐ หรือเอกชนได้ก่อตั้งขึ้นเป็นจำนวนมาก โรงเรียนกรณศึกษา ตั้งอยู่ที่ ตำบลด่านขุนทด อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา เป็นอีกหนึ่งโรงเรียนเอกชนที่มีขนาดใหญ่ เปิดการเรียนการสอนตั้งแต่เตรียมอนุบาลไปจนถึงชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3 ปีการศึกษา พ.ศ. 2563 มีนักเรียนทั้งสิ้น 3,577 คน นอกจากการจัดการเรียนการสอนแล้วทางโรงเรียนยังให้บริการรับ-ส่งนักเรียน โดยสภาพทั่วไป โรงเรียนกรณศึกษามีรถรับส่งทั้งหมด 8 คัน และนักเรียนที่ใช้รถรับส่งนักเรียนเป็นประจำจำนวน 346 คน ซึ่งแบ่งจุดรับส่งออกเป็น 43 จุด โดยมียานพาหนะ 3 ประเภท ได้แก่ 1) รถสองแถวเล็ก 2) รถสองแถวใหญ่ และ 3) รถบัสรับส่ง โดยแต่ละประเภทมีความจุไม่เท่ากัน ซึ่งมีตัวอย่างเส้นทางที่ 3 ในการใช้รถบัสรับส่ง 55 ที่นั่ง รับ-ส่งนักเรียนของโรงเรียนกรณศึกษา ระยะทางรวมทั้งหมด 122 กิโลเมตร แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างเส้นทางที่ 3 การรถรับ-ส่งนักเรียนของโรงเรียนกรณศึกษา

ซึ่งการจัดเส้นทางกรณศึกษารูปแบบเดิม มีจำนวนเส้นทางรับส่งทั้งหมด 8 เส้นทาง ระยะทางของรถทุกคันรวมทั้งหมด 1,023 กิโลเมตร ที่นั่งว่างรวมทั้งหมด 38 ที่นั่ง และที่นั่งเกินรวมทั้งหมด 70 ที่นั่ง ดังรูปที่ 2 แต่ปัจจุบันระบบรถรับส่งนักเรียนนั้นส่วนใหญ่ผู้ประกอบการมักจะใช้การตัดสินใจจากประสบการณ์ในการจัดการ และการจัดเส้นทาง ทำให้การขนส่งไม่มีประสิทธิภาพ

เท่าที่ควร ส่งผลให้ระยะทางรวมต่อสัปดาห์ของแต่ละเส้นทาง และระยะทางรวมทั้งหมดมีระยะทางมากเกินไป นอกจากนั้นยังเกิดปัญหาการโดยสารเกินความจุของรถรับส่งนักเรียน อาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อนักเรียนได้ และรถรับส่งบางคันมีการโดยสารไม่เต็มความจุส่งผลให้ประสิทธิภาพของการขนส่งยังใช้ไม่เต็มที่ จากปัญหาที่กล่าวมาจัดได้ว่าเป็นรูปแบบปัญหาการจัดการจัดเส้นทางยานพาหนะ Vehicle Routing Problem (VRP) และปัญหาประเภทนี้จะประกอบด้วยตัวแปรในการตัดสินใจจำนวนมาก ทำให้มีความซับซ้อนในการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้โดยจะเรียกปัญหาในลักษณะนี้ว่าปัญหา NP-hard ทำให้การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมที่เป็นที่นิยมด้วยเหตุผลที่ไม่มีความยุ่งยากในการแก้ไข ใช้เวลาในการแก้ปัญหาไม่นาน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้แบบยืดหยุ่นและเหมาะสมมากกว่า



รูปที่ 2 กราฟแสดงระยะทางต่อสัปดาห์ ประเภทรถ ที่นั่งว่าง และที่นั่งเกินของการจัดเส้นทางโรงเรียนกรณิศศึกษารูปแบบเดิม

ด้วยเหตุนี้กลุ่มผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่ศึกษาการจัดการเส้นทางของรถรับส่งนักเรียนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบรถรับส่งนักเรียนมากยิ่งขึ้นในด้านของระยะทางรวม และความปลอดภัย โดยมุ่งศึกษาการจัดการเส้นทางด้วยวิธีฮิวริสติกส์ที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานให้มีระยะทางรวมของเส้นทางรถรับส่งนักเรียนสั้นที่สุด

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 2.1. เพื่อวิเคราะห์หาวิธีฮิวริสติกส์ที่เหมาะสมสำหรับการจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียนของกรณิศศึกษา
- 2.2. เพื่อลดระยะทางรวมสำหรับจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียนของกรณิศศึกษา

3. งานวิจัยเกี่ยวข้อง

สำหรับการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วนสำคัญได้แก่ การศึกษาการจัดการเส้นทาง และการจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียน โดยเน้นศึกษาการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกส์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ไชยา โฉมเฉลา และระพีพันธ์ ปีตา คะโส [1] ได้เสนองานวิจัยเรื่องการจัดเส้นทางรถขนส่งน้ำดื่มสำหรับบริการกลุ่มลูกค้าด้วยวิธีฮิวริสติก กรณิศศึกษา โรงงานน้ำดื่มเรนโบว์ มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหการจัดเส้นทางขนส่งน้ำดื่ม กรณีที่มีความไม่แน่นอน ทั้งปริมาณ และระยะทางของการเกิดความต้องการ

ต้องการแต่ละรอบของลูกค้าแต่ละราย พบว่าการใช้วิธี Cluster first – route second ร่วมกับ Sweep Approach มีระยะทางขนส่งที่ต่ำกว่าวิธี Nearest Neighborhood โดยทางเลือกที่ 3 ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดซึ่งสามารถลดระยะทางได้ 8.5% ในปี พ.ศ. 2555 ศิริพงษ์ ชัยเจริญ [2] ได้นำวิธี Saving Algorithm และวิธี Sweep Approach เพื่อเปรียบเทียบระยะทางในการจัดเส้นทางในปัญหาการจัดเส้นทางรถให้บริการรถขนส่งน้ำดื่มที่เหมาะสมในระบบมัลติครัน เพื่อเสนอแนะเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการขนส่งน้ำดื่มภายในมหาวิทยาลัย โดยให้มีระยะทางขนส่งรวมสั้นที่สุดภายใต้ข้อจำกัดของความต้องการสินค้า และขนาดความจุบรรทุกของรถ ได้ผลการวิจัยพบว่า วิธี Saving Algorithm มีระยะทางโดยรวมสั้นกว่าการวิ่งแบบเดิม 13.1 กิโลเมตร และวิธีการกวาด Sweep Approach มีระยะทางโดยรวมสั้นกว่าการวิ่งแบบเดิม 10.14 กิโลเมตร ในปี พ.ศ. 2556 มิ่งขวัญที่เกี่ยวข้อง 3 เรื่องคือ ปฏิพัทธ์ หงส์สุวรรณ และคณะ [3] ได้นำวิธีการแก้ปัญหาวิธีฮิวริสติกส์แบบการหาคำตอบใกล้เคียงที่สุด วิธีการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะอัลกอริทึมแบบประหยัด และวิธีการคำนวณเส้นทางโดยโปรแกรมเชิงเส้น ได้ผลสรุปจากการเปรียบเทียบพบว่า วิธีการคำนวณเส้นทางโดยโปรแกรมเชิงเส้น ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุดในการจัดเส้นทางรถขนส่งน้ำดื่ม ที่ระยะทางสั้นที่สุด คือ 40.70 กิโลเมตร และต้นทุนรวมในการขนส่งต่ำที่สุด 4,066.80 บาทต่อเดือน อภิชาติ มณีงาม และคณะ [4] ได้นำเสนอวิธีฮิวริสติกส์สำหรับหาคำตอบของปัญหาการจัดเส้นทางรถโดยสาร โดยพิจารณาเงื่อนไขการจำกัดเวลาเดินทางรถบรรทุกขนาดใหญ่ในเขตเมือง เพื่อให้ได้เส้นทางรถโดยสารที่มีต้นทุนรวมต่ำที่สุด งานวิจัยนี้พัฒนาวิธีหาคำตอบเป็น 3 ขั้นตอนตามลำดับ ดังนี้ ขั้นตอนแรกจัดกลุ่มลูกค้าตามเงื่อนไขการจำกัดช่วงเวลาในการเดินทาง ขั้นตอนที่ 2 สร้างคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธี Savings Algorithm ขั้นตอนที่ 3 นำคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่สองมาปรับปรุงเส้นทางโดยวิธีการปรับปรุงคำตอบเฉพาะที่ ผลการศึกษาพบว่า สามารถลดระยะทางรวมจากเดิม 19,367 กิโลเมตร ลดลงเหลือ 17,489 กิโลเมตร หรือลดลง 9.70% ญาณิภา ชินสุวรรณ [5] ได้เสนองานวิจัยเรื่องการจัดเส้นทางรถโดยสารแบบต่อเนื่องที่มีการเปลี่ยนถ่ายสินค้าและพักรถสินค้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีฮิวริสติกส์สำหรับตัดสินใจเพื่อปรับปรุงการจัดเส้นทางรถโดยสารแบบต่อเนื่อง โดยวิธีฮิวริสติกส์ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยกระบวนการคิด 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1. การพิจารณาหาเส้นทางที่มีโอกาสในการปรับปรุงเส้นทางรถขนส่ง 2. การพิจารณาหาเส้นทางในการถ่ายโอนรถขนส่ง 3. การจับคู่เส้นทางในการถ่ายโอนรถขนส่ง และ 4. การเลือกรถขนส่งที่ทำการถ่ายโอนเพื่อช่วยในการหาเส้นทางใหม่ พบว่าเส้นทางใหม่ที่มีการถ่ายโอน และพักรถสินค้าที่มีค่าใช้จ่ายในการเดินทางต่ำ ซึ่งวิธีที่ใช้ในการวิจัยนี้สามารถลดระยะทางรถโดยสารได้เฉลี่ยร้อยละ 12.42 เมื่อเทียบกับการเดินทางแบบต่อเนื่องซึ่งไม่มีการเปลี่ยนถ่าย และพักรถสินค้า นอกจากนี้ในปี พ.ศ. 2559 จารุพงษ์ บรรเทา และคณะ [6] ได้เสนอการประยุกต์ใช้วิธีการฮิวริสติกส์สำหรับการจัดการเส้นทางรถขนส่งขึ้นส่วนยานยนต์ ได้ผลสรุปว่าวิธี MNH ให้ระยะทางในการจัดเส้นทางที่สั้นที่สุดคือ 121.94 กิโลเมตร แต่วิธี EDD มีค่าการขนส่งเกินเวลากำหนดน้อยที่สุด คือ 4 ชั่วโมง 18 นาที และยังสามารถลดการจ้างรถจากภายนอกลด 30.58% ภิกขญา คงแก้ว และธนัญญา วสุศรี [7] ได้เสนอการพัฒนาฮิวริสติกส์เพื่อการจัดเส้นทางรถรับ และส่งสินค้าที่มีชนิด และน้ำหนักที่หลากหลาย ผลการวิจัยพบว่าจำนวนยานพาหนะที่ใช้ลดลงเฉลี่ย 27.38% และสามารถลดระยะทางขนส่งเฉลี่ย 35.52% และงานวิจัยที่จัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียนของ ปัญญวัฒน์ จันทร์ชัยภักดิ์ [8] ได้เสนอการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียน โดยใช้ฮิวริสติกส์ในการจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียน ผลการวิจัยพบว่า การใช้ Saving heuristic โดยการใช้รถบัสนำในการรับส่ง ให้ระยะทางที่สั้นที่สุด โดยมีระยะทางรวม 733 กิโลเมตรต่อรอบ และมีต้นทุนค่าใช้จ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงในการรับส่งรวม 206,283 บาทต่อเดือน จากต้นทุนการรับส่งแบบเดิมในปัจจุบันพบว่า สามารถลดต้นทุนต่อเดือนได้ 134,817 บาทต่อเดือน

4. การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยการเก็บรวบรวมข้อมูล และการจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียนด้วยวิธีการฮิวริสติกส์ 4 วิธี คือ Nearest Neighbor Heuristic, Clarke - Wright Saving Heuristic, Sweep Heuristic และ Cluster First Route Second โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 เก็บรวบรวมข้อมูล

การกำหนดขอบเขตในงานวิจัย โดยสภาพทั่วไปพบว่ารถรับส่งนักเรียนจะต้องมาถึงโรงเรียนภายในเวลา 8.00 น. โดยมีรถรับส่งทั้งหมด 8 คัน ได้แก่ รถสองแถวเล็ก 12 คันนั่ง 2 คน รถสองแถวใหญ่ 35 คันนั่ง 2 คน และรถบัสรับส่ง 55 คันนั่ง 4 คน และจำนวนนักเรียนที่ใช้รถรับส่งนักเรียนเป็นประจำจำนวน 346 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 9.67 ของจำนวนทั้งหมด ซึ่งแบ่งจุดรับส่งออกเป็น 43 จุด และพิกัดละติจูด ลองติจูดของจุดรับส่ง แสดงตัวอย่างดังตารางที่ 1 โดยมียานพาหนะ 3 ประเภท คือ รถสองแถวเล็ก รถสองแถวใหญ่ และรถบัสรับส่ง โดยมีจุดรับส่ง และจำนวนแต่ละจุดแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลจุดรับส่งนักเรียนและจำนวนนักเรียนในแต่ละจุด

ลำดับ	จุดรับส่ง	จำนวนนักเรียน (คน)	พิกัดละติจูด	พิกัดลองติจูด
D	โรงเรียนกรณีศึกษา	-	15.21054	101.76846
1	บ้านค่ายพะยิง	40	15.07089	101.65831
2	บ้านค่ายพะยิง	22	15.06485	101.66152
3	บ้านโกรกลี	4	15.07744	101.69679
4	บ้านด่านใน	37	15.12963	101.88445
.....				
43	บ้านด่านเหนือ	1	15.15063	101.84398

ตารางที่ 2 ประเภทรถรับส่ง ความจุ และจำนวนรถแต่ละประเภท

ลำดับ	ประเภทรถ	ความจุรถรับส่ง (ที่นั่ง)	จำนวนรถ (คัน)
1	รถสองแถวเล็ก	12	2
2	รถสองแถวใหญ่	35	2
3	รถบัสรับส่ง	55	4

4.2 การจัดเส้นทางด้วยวิธี Nearest Neighbor Heuristic

เป็นวิธีการสร้างเส้นทางโดยค้นหาจุดรับส่งที่อยู่ใกล้กับโรงเรียนมากที่สุดก่อน และจากนั้นทำการค้นหาจุดที่ใกล้จุดถัดไปเรื่อย ๆ จนรวมจุดรับส่งครบทุกจุด โดยพิจารณาพร้อมกับความจุของรถรับส่งควบคู่ไปด้วย เมื่อมีความจุเกินให้ทำการเปิดเส้นทางใหม่ และเลือกจุดรับส่งที่ใกล้กับ โรงเรียน ในจุดถัดไป โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เลือกจุดรับส่งที่มีระยะทางใกล้กับจุดโรงเรียน มากที่สุดก่อน
- 2) ทำการค้นหาจุดรับส่งที่ยังไม่ถูกรวมเข้าในเส้นทาง และมีระยะทางใกล้กับจุดสุดท้ายมากที่สุด เพื่อรวมเข้าในเส้นทาง พร้อมพิจารณาความจุในกรณีที่ความจุเกินให้ทำการสร้างตัวใหม่
- 3) ทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 จนรวบรวมจุดรับส่งเข้าในเส้นทางครบทุกจุด

4.3 การจัดเส้นทางด้วยวิธี Saving Heuristic

Saving Heuristic เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม และใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยวิธีจะสร้างผลเฉลยทีละขั้นตอน โดยเริ่มจากผลเฉลยเริ่มต้นที่อาจยังมีความเป็นไปได้ จากนั้นสร้างผลเฉลยในลำดับถัดไป โดยความต้องการรวมจะต้องไม่เกินความสามารถในการโดยสาร และความจุของยานพาหนะ การแทรกลูกค้าในเส้นทางจะถูกแทรกเข้าอยู่เรื่อย ๆ จนทำให้เกิดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดโดยจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) สร้างเส้นทางย่อยจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดรับส่งแต่ละจุด และกลับมายังจุดเริ่มต้น
- 2) ทำการคำนวณค่า Saving ของจุดรับส่งแต่ละคู่โดยคำนวณได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$S_{ij} = D_{i0} + D_{0j} - D_{ij}$$

เมื่อ

S_{ij} = ค่า Saving ระหว่างคู่จุดรับส่ง i และ j

D_{i0} = ระยะทางจากจุดรับส่ง i ไปยังคลังสินค้า

D_{0j} = ระยะทางจากคลังสินค้าไปยังจุดรับส่ง j

D_{ij} = ระยะทางจากจุดรับส่ง i ไปยังจุดรับส่ง j

- 3) เรียงลำดับค่า Saving แต่ละคู่จากมากไปหาน้อย และทำการจัดเส้นทางโดยพิจารณาเลือกค่า Saving ที่มีค่ามากที่สุดก่อน
- 4) ตรวจสอบความจุของรถที่ใช้ในการรับส่งว่ามีความจุเกินหรือไม่ถ้าเต็มความจุให้ทำการเปิดเส้นทางใหม่ และทำการจัดเส้นทาง
- 5) ทำการจัดเส้นทางจุดรับส่งจนครบทุกจุดรับส่ง

4.4 การจัดเส้นทางด้วยวิธี Sweep Heuristic

Sweep Heuristic เป็นการจัดเส้นทาง โดยการกวาดจุดรับส่งต่าง ๆ ไปเรื่อย ๆ ตามเข็มนาฬิกา โดยใช้จุดโรงเรียน เป็นจุดศูนย์กลางในการกวาด และทำการรวมจุดรับส่งที่ถูกกวาดเข้าในเส้นทาง พร้อมทำการรวมความจุของแต่ละจุดที่ถูกกวาดไม่ให้เกินความจุของยานพาหนะที่ใช้ขนส่ง ถ้าความจุเกินยานพาหนะในการขนส่งให้ทำการสร้างเส้นทางใหม่โดยมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

- 1) สร้างพิกัดของจุดรับส่งต่าง ๆ ที่ได้จาก Google Earth และกำหนดให้โรงเรียน เป็นจุดศูนย์กลางในการกวาด
- 2) เริ่มกวาดที่มุม 0 องศา และทำการกวาดตามเข็มนาฬิกาไปเรื่อย ๆ เมื่อผ่านจุดรับส่งใดให้ทำการรวมจุดรับส่งนั้นเข้าในเส้นทาง พร้อมทั้งพิจารณาความจุไม่ให้เกินความจุของรถรับส่ง ถ้ามีความจุเกินให้ทำการเปิดเส้นทางใหม่
- 3) ทำการกวาดรวบรวมจุดรับส่งจนครบทุกจุด

4.5 การจัดเส้นทางด้วยวิธี Cluster First Route Second

วิธีการแบ่งพื้นที่ออกเป็นกลุ่มก่อนจัดเส้นทางเป็นการหาเส้นทางโดยการแบ่งกลุ่มเส้นทางก่อน จากนั้นทำการจัดเส้นทางภายในกลุ่มที่แบ่งไว้ โดยกำหนดให้ทำการจัดกลุ่มเป็นขั้นตอนที่ 1 และทำการจัดเส้นทางภายในกลุ่มโดยใช้วิธีคลัสเตอร์อื่น ๆ จัดลำดับเส้นทางภายในกลุ่ม เช่น Nearest Neighbor เป็นต้น โดยจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) สร้างพิกัดของจุดรับส่งต่าง ๆ ที่ได้จาก Google Earth และกำหนดให้โรงเรียนเป็นจุดศูนย์กลางในการกวาด
- 2) เริ่มกวาดที่มุม 0 องศา และทำการกวาดตามเข็มนาฬิกาไปเรื่อย ๆ เมื่อผ่านจุดรับส่งใดให้ทำการรวมจุดรับส่งนั้นเข้าในเส้นทาง พร้อมทั้งพิจารณาความจุไม่ให้เกินความจุของรถรับส่ง ถ้ามีความจุเกินให้ทำการเปิดเส้นทางใหม่
- 3) ทำการกวาดรวบรวมจุดรับส่งจนครบทุกจุด

4) ทำการใช้ Nearest Neighbor Heuristic จัดลำดับของจุดรับส่งภายในกลุ่มที่ทำการกวาดอีกครั้ง

5. ผลการวิจัย

ผลการจัดเส้นทางด้วยวิธีการฮิวริสติกส์ทั้ง 4 วิธี ได้แก่ Nearest neighbor heuristic, Saving heuristic, Sweep heuristic และ Cluster First Route Second โดยแบ่งยานพาหนะออกเป็น 3 ประเภท และการกำหนดความจุให้รถแต่ละประเภท ได้แก่ รถสองแถวเล็ก 12 ที่นั่ง รถสองแถวใหญ่ 35 ที่นั่ง และรถบัสรับส่ง 55 ที่นั่ง มีรายละเอียดดังนี้

5.1 ผลการจัดเส้นทางวิธี Nearest Neighbor Heuristic

ผลการจัดเส้นทางด้วยวิธี Nearest Neighbor Heuristic พบว่า ในการใช้รถบัสรับส่ง 55 ที่นั่ง จำนวนเส้นทางรับส่งทั้งหมด 9 เส้นทาง ให้ระยะทางรวมที่เหมาะสมที่สุด 745.44 กิโลเมตร ที่นั่งว่างรวมทั้งหมด 149 ที่นั่ง ซึ่งมีจำนวนเส้นทางย่อย ความจุ ระยะทางย่อยในการรับส่ง ที่นั่งว่าง และที่นั่งเกิน แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการจัดเส้นทางโดยใช้วิธี Nearest Neighbor Heuristic

ลำดับรถรับส่ง	เส้นทางรถขนส่ง	จำนวน รับส่ง(คน)	ระยะทาง (กิโลเมตร)	ที่นั่งว่างรวม	ที่นั่งเกินรวม
เส้นทางที่ 1	0-35-41-23-42-6-0	51	15.77	4	0
เส้นทางที่ 2	0-8-22-16-15-43-17-0	46	46.16	9	0
เส้นทางที่ 3	0-26-40-37-28-39-0	24	35.00	31	0
เส้นทางที่ 4	0-25-31-27-30-36-29-32-34-0	53	106.00	2	0
เส้นทางที่ 5	0-24-38-21-20-14-9-18-13-10-0	37	98.51	18	0
เส้นทางที่ 6	0-4-33-19-0	52	78.00	3	0
เส้นทางที่ 7	0-5-11-7-3-0	20	195.00	35	0
เส้นทางที่ 8	0-2-0	22	58.00	33	0
เส้นทางที่ 9	0-1-12-0	41	113.00	14	0
รวม		346	745.44	149	0

5.2 ผลการจัดเส้นทางวิธี Saving heuristic

ผลการจัดเส้นทางด้วยวิธี Saving heuristic พบว่า ในการใช้รถบัสรับส่ง 55 ที่นั่ง จำนวนเส้นทางรับส่งทั้งหมด 9 เส้นทาง ให้ระยะทางรวมที่เหมาะสมที่สุด 921.77 กิโลเมตร ที่นั่งว่างรวมทั้งหมด 149 ที่นั่ง ซึ่งมีจำนวนเส้นทางย่อย ความจุ ระยะทางย่อยในการรับส่ง ที่นั่งว่าง และที่นั่งเกิน แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการจัดเส้นทางวิธี Saving heuristic

ลำดับรถรับส่ง	เส้นทางรถขนส่ง	จำนวน รับส่ง(คน)	ระยะทาง (กิโลเมตร)	ที่นั่งว่างรวม	ที่นั่งเกินรวม
เส้นทางที่ 1	0-5-11-9-19-13-33-0	26	172.00	29	0
เส้นทางที่ 2	0-1-3-0	44	59.00	11	0
เส้นทางที่ 3	0-2-12-14-16-20-22-10-34-0	47	251.00	8	0
เส้นทางที่ 4	0-17-32-0	46	45.00	9	0
เส้นทางที่ 5	0-8-15-7-18-24-38-37-40-28-39-30-36-21-43-0	54	266.00	1	0
เส้นทางที่ 6	0-27-31-25-29-0	30	53.00	25	0
เส้นทางที่ 7	0-35-41-23-42-0	41	9.77	14	0
เส้นทางที่ 8	0-6-26-0	21	23.00	34	0
เส้นทางที่ 9	0-4-0	37	43.00	18	0
รวม		346	921.77	149	0

5.3 ผลการจัดเส้นทางวิธี Sweep heuristic

ผลการจัดเส้นทางด้วยวิธี Sweep heuristic พบว่า ในการใช้รถรับส่ง 55 ที่นั่ง จำนวนเส้นทางรับส่งทั้งหมด 8 เส้นทาง ให้ระยะทางรวมที่เหมาะสมที่สุด 828.43 กิโลเมตร ที่นั่งว่างรวมทั้งหมด 94 ที่นั่ง ซึ่งมีจำนวนเส้นทางย่อย ความจุ ระยะทางย่อยในการรับส่ง ที่นั่งว่าง และที่นั่งเกิน แสดงในตารางที่ 5

5.4 ผลการจัดเส้นทางวิธี Cluster First Route Second

ผลการจัดเส้นทางด้วยวิธี Cluster First Route Second พบว่า ในการใช้รถรับส่ง 55 ที่นั่ง จำนวนเส้นทางรับส่งทั้งหมด 8 เส้นทาง ให้ระยะทางรวมที่เหมาะสมที่สุด 735.35 กิโลเมตร ที่นั่งว่างรวมทั้งหมด 94 ที่นั่ง ซึ่งมีจำนวนเส้นทางย่อย ความจุ ระยะทางย่อยในการรับส่ง ที่นั่งว่าง และที่นั่งเกิน แสดงในตารางที่ 6

5.5 วิเคราะห์ผลจากการจัดเส้นทางของแต่ละวิธี

ทางผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบผลของคำตอบที่ได้จากการจัดเส้นทางด้วยฮิวริสติกทั้ง 4 วิธี และการจัดเส้นทางรูปแบบเดิม พบว่า การจัดเส้นทางด้วยวิธี Cluster First Route Second โดยการใช้รถรับส่งที่ความจุ 55 ที่นั่ง ให้ระยะทางรวมที่เหมาะสมที่สุด 735.35 กิโลเมตร ที่นั่งว่างรวมทั้งหมด 94 ที่นั่ง ในส่วนของการจัดเส้นทางรูปแบบเดิม โดยมีระยะทางรวมทั้งหมด 1,023 กิโลเมตร ที่นั่งว่างรวมทั้งหมด 38 ที่นั่ง และที่นั่งเกินรวมทั้งหมด 70 ที่นั่ง ส่วนวิธี Nearest neighbor heuristic, วิธี Sweep heuristics และวิธี Saving heuristic มีระยะทางรวมเท่ากับ 745.44, 828.43 และ 921.77 กิโลเมตรตามลำดับ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 7 และรูปที่ 3

ตารางที่ 5 ผลการจัดเส้นทางโดยใช้วิธี Sweep heuristic

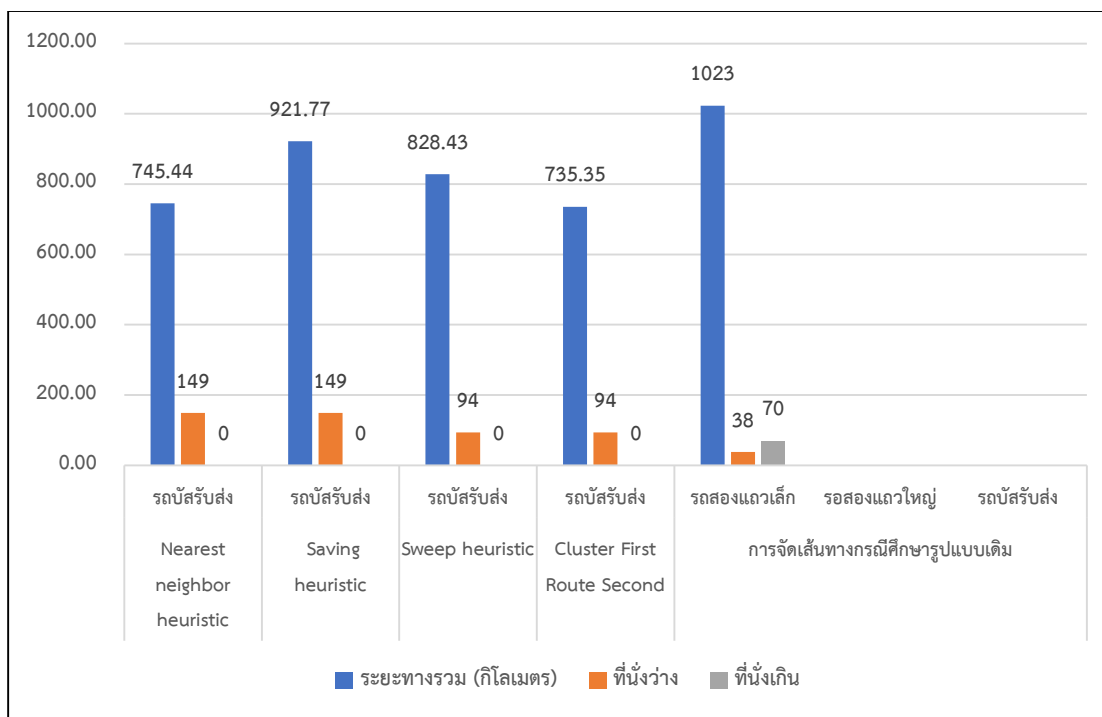
ลำดับรถรับส่ง	เส้นทางรถขนส่ง	จำนวน รับส่ง(คน)	ระยะทาง (กิโลเมตร)	ที่นั่งว่างรวม	ที่นั่งเกินรวม
เส้นทางที่ 1	0-7-11-5-8-22-16-34-33-13-0	48	189.57	7	0
เส้นทางที่ 2	0-32-10-15-0	24	84.00	31	0
เส้นทางที่ 3	0-4-43-14-18-19-9-0	48	116.00	7	0
เส้นทางที่ 4	0-21-17-20-12-38-0	52	166.00	3	0
เส้นทางที่ 5	0-35-41-3-40-37-0	46	56.85	9	0
เส้นทางที่ 6	0-23-26-2-28-39-42-0	46	74.00	9	0
เส้นทางที่ 7	0-1-29-27-31-6-0	55	106.00	0	0
เส้นทางที่ 8	0-25-30-36-0	27	36.00	28	0
รวม		346	828.43	94	0

ตารางที่ 6 ผลการจัดเส้นทางวิธี Cluster First Route Second

ลำดับรถรับส่ง	เส้นทางรถขนส่ง	จำนวน รับส่ง(คน)	ระยะทาง (กิโลเมตร)	ที่นั่งว่างรวม	ที่นั่งเกินรวม
เส้นทางที่ 1	0-8-22-16-13-33-34-5-11-7-0	48	184.57	7	0
เส้นทางที่ 2	0-15-32-10-0	24	49.00	31	0
เส้นทางที่ 3	0-43-4-18-14-9-19-0	48	86.00	7	0
เส้นทางที่ 4	0-17-20-21-38-12-0	52	152.00	3	0
เส้นทางที่ 5	0-35-41-37-40-24-3-0	46	60.85	9	0
เส้นทางที่ 6	0-42-23-26-28-39-2-0	46	56.92	9	0
เส้นทางที่ 7	0-6-31-27-29-1-0	55	110.00	0	0
เส้นทางที่ 8	0-25-30-36-0	27	36.00	28	0
รวม		346	735.35	94	0

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบผลจากการจัดเส้นทางของแต่ละวิธีการ

วิธีการ	ประเภทรถรับส่ง	ความจุรถ รับส่ง	ระยะทางรวม (กม.)	ที่นั่งว่าง รวม	ที่นั่งเกิน รวม
Nearest neighbor heuristic	รถรับส่ง	55	745.44	149	0
Saving heuristic	รถรับส่ง	55	921.77	149	0
Sweep heuristic	รถรับส่ง	55	828.43	94	0
Cluster First Route Second	รถรับส่ง	55	735.35	94	0



รูปที่ 3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลจากการจัดเส้นทางด้วยฮิวริสติกทั้ง 4 วิธี และการจัดเส้นทางรูปแบบเดิม

6. สรุปผลการวิจัย

จากปัญหาการจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียนของโรงเรียนกรณีศึกษาและวัตถุประสงค์ การศึกษาการจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียนกรณีศึกษา พบว่าระบบการขนส่งยังขาดประสิทธิภาพซึ่งจะเห็นได้จากการจัดเส้นทางรูปแบบเดิมมี ระยะทางของรถทุกคันรวมทั้งหมด 1,023 กิโลเมตร ที่ว่างรวมทั้งหมด 38 ที่นั่ง และที่ว่างเกินรวมทั้งหมด 70 ที่นั่ง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบรถรับส่งนักเรียนในด้านของระยะทางรวม และความปลอดภัย เมื่อใช้การจัดเส้นทางด้วยวิธี Cluster First Route Second โดยการใช้รถรับส่งที่ความจุ 55 ที่นั่ง ให้ระยะทางรวมที่เหมาะสมที่สุด 735.35 กิโลเมตร ทำให้ลดระยะทางการรับส่งนักเรียนลงได้ 287.65 กิโลเมตร หรือคิดเป็น 28.11% และลดจำนวนที่เกินคิดเป็น 100% นั่นคือในแต่ละเส้นทางไม่มีจำนวนนักเรียนเกินจำนวนที่นั่งที่กำหนดไว้ ทำให้เกิดความปลอดภัยในการเดินทางและทำให้ผู้ประกอบการเพิ่มความเชื่อมั่นในการเดินทางของบุตรหลานได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนั้นยังพบว่า โรงเรียนสามารถเลือกใช้รถรับส่งนักเรียนได้อย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพสูงสุด

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้อำนวยการ บุคลากร นักเรียน และผู้ปกครองนักเรียน โรงเรียนกรณีศึกษา เป็นอย่างยิ่งที่ให้ข้อมูล และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Chomchalao and R. Pitakaso, "Route Arrangement of Drinking Water Trucks for Customer Service by Heuristic Method: A Case Study Rainbow Drinking Water Factory," *The 28th Conference of Industrial Engineering Network 2010, October*, 2010. (In Thai)
- [2] S. Chaijaroen, "Transportation Route Arrangement of Drinking Water (SUT) The Optimal Solution in Milk Run System," *Suranaree University of Technology Intellectual Repository*, 2012. (In Thai)
- [3] P. Hongsuwan, W. Chantaraksa, and S. Chuapisutkul, "A Study to Increase the Efficiency of Transporting Drinking Water Routes Samut Songkhram Province," *The 31st Conference of Industrial Engineering Network 2013, October*, 2013. (In Thai)
- [4] A. Manee-ngam, K. Sripathasawat, and A. Udomsakdikul, "Solving Bus Routing Problems with Large Bus Operating Time Limits Using Heuristics Method: A Case Study Brick Transport in Bangkok Metropolitan," *Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University*, vol. 3, no. 5, pp. 73–85, 2013. (In Thai)
- [5] Y. Chinsuwan, "Design of Decision Support System for Continuous Routing of Vehicles with Transfer and Suspension of Goods," *Thesis, Master's Degree Thesis in Science, Bangkok*, 2013. (In Thai)
- [6] J. Banthao, N. Santichuwong, and W. Tanklang, "Solving a Vehicle Routing Problem with Time Window by Heuristics Method: A Case Study of Automotive Part Manufacturer," *Research Journal Rajamangala University of Technology Krungthep*, vol. 10, no. 2, pp. 31–42, 2016. (In Thai)
- [7] P. Kongkaew and T. Wasusri, "Development of Heuristics for Routing of Receiving and Sending Products of Various Types and Weights," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 27, no. 1, pp. 111–123, 2016. (In Thai)
- [8] P. Chanchaiphak, "Problem Solving of Student Shuttle Route Arranging: A Case Study of Prasit Suksa Songkhro School," *Thesis, Master's Degree Thesis in Engineering, Ubon Ratchathani*, 2018. (In Thai)

การเลือกใช้อิเล็กโทรดล่างสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับ

ท่อเหล็กคาร์บอน STKM 13A และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC

Selection of Lower Electrode for Single-Sided Resistance Spot Welding of Carbon Steel Tube STKM 13A and Cold Rolled Carbon Steel Sheet SPCC

ธีรวัฒน์ เขื่อนแก้ว¹ ฐิติ หมอรักษา¹ ประจักษ์ จัตกุล^{1*} ธัญญลักษณ์ มะปะเข¹ สุริยศรี แสงสว่าง¹

เกริกฤทธิ์ ถาวรศิริ¹ และวิทยา อินทร์สอน²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี

วิทยาเขตจันทบุรีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

² แผนกวิชาช่างเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์

E-mail: prajak_ja@rmutto.ac.th*

Teerawut Khuenkaew¹ Thiti Mhoraksa¹ Prajak Jattakul^{1*} Thunyalak Mapakhe¹

Suriyate Saengsawang¹ Kreakrit Thawornsiri¹ and Withaya Insorn²

¹ Department of Industrial Engineering, Establishment Project Faculty of Integrated Engineering and Technology, Chanthaburi Campus, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi

² Department of Welding, Surin Technical College

E-mail: prajak_ja@rmutto.ac.th*

(Received: November 21, 2022; Revised: December 19, 2022; Accepted: December 20, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเลือกรูปร่างของอิเล็กโทรดด้านล่างในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับท่อเหล็กคาร์บอน STKM 13A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ความหนา 1.4 มิลลิเมตร และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC ความหนา 1.2 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดกระแสสลับค่าพิกัดกำลัง 50 กิโลวัตต์แอมแปร์ 50 เฮิร์ตคุณภาพของรอยเชื่อมผ่านการตรวจสอบด้วยวิธีตรวจพินิจจากลักษณะทางกายภาพทั้งบริเวณรอยเชื่อมบนแผ่นเหล็ก SPCC และผิวด้านล่างของท่อเหล็ก รวมทั้งพิจารณาขนาดของรอยเชื่อม จากผลการทดลองพบว่าการใช้อิเล็กโทรดด้านล่างแบบที่ 3 ซึ่งมีพื้นที่ส่วนโค้งของอิเล็กโทรดเป็นพื้นที่รองรับท่อขณะเชื่อม ทำให้เกิดลักษณะทางกายภาพที่ดีที่สุดโดยไม่ปรากฏร่องรอยของการอาร์กบนผิวท่อ ขนาดของรอยเชื่อมมีค่าเฉลี่ย 6.018 มิลลิเมตร ซึ่งผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน JIS Z3140

คำหลัก: การเชื่อมความต้านทานแบบจุดบนท่อเหล็ก รูปร่างอิเล็กโทรด ขนาดของรอยเชื่อม

Abstract

The objective of this research is to select the geometry of the lower electrode tip used in the single-sided resistance spot welding of weldments between carbon steel tube STKM 13A with a 12.7 mm outer diameter and 1.4 mm of thickness and cold rolled carbon steel sheet SPCC with 1.2 mm of thickness. The spot

was welded using a 50 kVA AC, 50 Hz RSW machine, while the quality of the weld was assessed by considering the weldment visual examination and nugget diameter. The results of the study explained the weldment appearance of both the top surfaces of SPCC and the surface of the tube STKM 13A. The electrode geometry type 3 is where the arc area of the electrode is the support area for the pipe during welding. optimal physical appearance without arcing on the pipe surface. The average nugget diameter was 6.018 mm, which meets the JIS Z3140 standard.

Keywords: Single-sided resistance spot welding, Electrode geometry, Nugget diameter

1. บทนำ

กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในภาคการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีวัฏจักรการเชื่อมสั้น และสามารถประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์งานเชื่อม [1-2] ดังเห็นได้จากรถยนต์นั่งส่วนบุคคลมีการประสานชิ้นส่วนให้ติดกันมากกว่าหนึ่งพันจุด ชิ้นส่วนรถยนต์โดยส่วนมากจะใช้กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเพื่อประสานชิ้นงานแผ่นเรียบ 2 แผ่นหรือมากกว่าโดยอาศัยความร้อนที่เกิดจากการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านพื้นที่รอยต่อจนเกิดการหลอมวัสดุและประสานให้ติดกันด้วยแรงดันจากอิเล็กโทรดทั้งสองข้าง [3] แต่ยังมีชิ้นส่วนรถยนต์บางชิ้นส่วนใช้กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเชื่อมชิ้นงานให้ติดกันบนผิวโค้งของท่อกลม ท่อสี่เหลี่ยม เช่น ท่อไอเสียของระบบ Exhaust Gas Recirculation (EGR) หรือ โครงเบาะรถยนต์ กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเชื่อมบนผิวโค้งของชิ้นงาน มีการควบคุมคุณภาพที่มีความเข้มงวดมากกว่าการเชื่อมชิ้นงานแผ่นเรียบ เช่น การเสียรูปของท่อหลังการเชื่อมไม่เกิน 20 % ของขนาดท่อเดิม พื้นที่ภายในท่อหลังจากการเชื่อมต้องมีย่านค่ามากกว่า 88 % ของพื้นที่เดิม หรือต้องไม่มีรอยเชื่อมที่ก่อให้เกิดการรั่วไหลของเหลวหรือแก๊สที่ไหลผ่าน เป็นต้น

จากการศึกษาวรรณกรรมเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดบนผิวโค้งของชิ้นงาน การศึกษาพฤติกรรม การเกิดรอยเชื่อม รวมถึงกำหนดปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมยังมีการศึกษาของนักวิจัยจำนวนน้อย เนื่องจากกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเชื่อมบนผิวโค้งมีปัจจัยการเชื่อมที่ควบคุมได้ยากทั้งนี้รวมถึงการออกแบบเพื่อกำหนดรูปร่างของอิเล็กโทรดให้มีความเหมาะสมเพื่อใช้ในการเชื่อมมีความยากเช่นกัน งานวิจัยของ H.G. Yang และคณะ [4] ทำเชื่อมแผ่นเหล็กคาร์บอนหนา 1.5 มิลลิเมตร บนท่อเหล็กคาร์บอนทรงสี่เหลี่ยมหนา 2.0 มิลลิเมตร ด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด งานวิจัยสรุปว่า แรงกดอิเล็กโทรดมีค่าสูงจะทำให้ระยะการกดลึกเพิ่มมากขึ้นแต่จะทำให้ทนแรงดึงได้ต่ำลงควรใช้แรงกดระดับ 2.4 ถึง 2.6 กิโลนิวตัน (kN) ส่วนกระแสไฟฟ้าเชื่อมควรใช้ระดับ 14 ถึง 15 กิโลแอมแปร์ (kA) เวลาการเชื่อมควรใช้ระดับ 13 ถึง 15 ไซเคิล (Cycle) การใช้ปัจจัยการเชื่อมทั้งสองในระดับสูงจะทำให้ระยะการกดลึกและค่าทนแรงดึงเพิ่มมากขึ้น M. Najuch และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของแผ่นชิ้นงาน DC01(SPCC) หนา 1.5 มิลลิเมตร บนท่อกลม 26MnB5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 55 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร แล้วใช้ Copper Solder เป็นตัวประสานการเชื่อม งานวิจัยบางส่วนสรุปผลได้ว่า การเพิ่มแรงกดอิเล็กโทรดทำให้เพิ่มพื้นที่การกดระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน การเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อม เวลาเชื่อมจะทำให้ความร้อนในการเชื่อมและแรงการยึดติดของรอยเชื่อมสูงขึ้น จากการศึกษาวรรณกรรมจะเห็นได้ว่านักวิจัยจะทำการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนปัจจัยการเชื่อมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้แต่ไม่ได้ให้ความสำคัญกับการเลือกรูปร่างของอิเล็กโทรดให้มีความเหมาะสมกับลักษณะชิ้นงานเชื่อม เนื่องจากอิเล็กโทรดเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าเชื่อมเพื่อให้เกิดวัฏจักรการเชื่อม ดังนั้นรูปร่างอิเล็กโทรดที่มีความเหมาะสมจะมีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางกลของรอยเชื่อม

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ทำร่วมกับโรงงานผู้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ซึ่งเป็นการนำเสนอกระบวนการใหม่ของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดบนท่อเหล็กโดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการเลือกใช้อิเล็กโทรดล่างในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับท่อเหล็กคาร์บอน STKM 13A และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC โดยการเปรียบเทียบผลการทดลองจากการใช้อิเล็กโทรดด้านล่าง 3 รูปแบบ จากการเชื่อมด้วยปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดแบบคงที่ ผลการทดลองที่นำมาพิจารณาได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังผ่านการเชื่อม และขนาดของรอยเชื่อม (Nugget size)

2. วิธีการดำเนินงานและอุปกรณ์การทดลอง

2.1 วัสดุและวิธีการทดลอง

ชิ้นงานเชื่อมประกอบด้วยท่อเหล็กคาร์บอน STKM 13A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ความหนา 1.4 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน JIS G3445 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC ความหนา 1.2 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน JIS G3141 มีส่วนประกอบทางเคมี และมีคุณสมบัติทางกล ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุท่อเหล็กคาร์บอน STKM 13A และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC (wt%)

สัญลักษณ์/วัสดุ	ท่อเหล็กคาร์บอน STKM 13A	เหล็กกล้าคาร์บอนรีด เย็น SPCC
C	สูงสุด 0.25	สูงสุด 0.12
Mn	0.30-0.90	สูงสุด 0.50
P	สูงสุด 0.04	สูงสุด 0.04
S	สูงสุด 0.04	สูงสุด 0.04
Si	สูงสุด 0.35	-

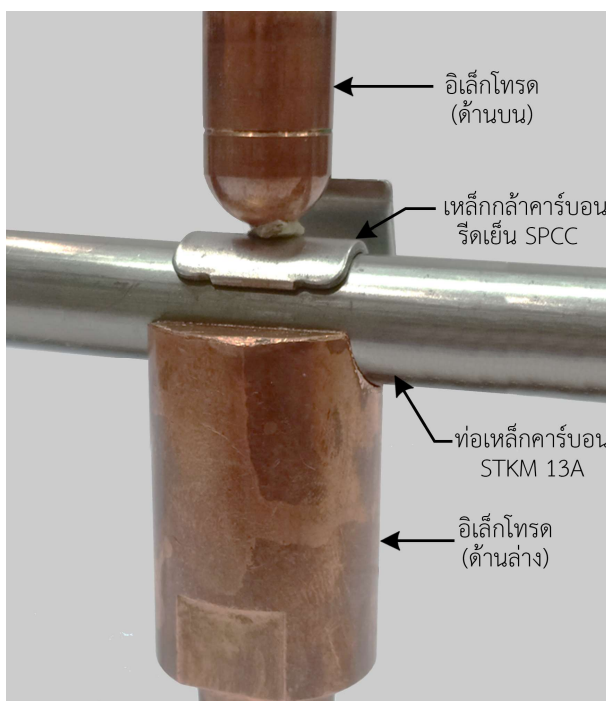
ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของวัสดุท่อเหล็กคาร์บอน STKM 13A และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC

สมบัติทางกล	ท่อเหล็กคาร์บอน STKM 13A	เหล็กกล้าคาร์บอนรีด เย็น SPCC
Tensile Strength (MPa)	ต่ำสุด 370	ต่ำสุด 270
Yield Point (MPa)	ต่ำสุด 215	สูงสุด 205
Elongation (%)	ต่ำสุด 30	ต่ำสุด 37

ทำการเชื่อมโดยใช้เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด PANASONIC รุ่น YR500-CM2 มีพิกัดกำลัง 50 กิโลวัตต์แอมแปร์ (kVA), 50 Hz ผู้วิจัยทำการปรับตั้งค่าปัจจัยการเชื่อมโดยกำหนดเป็นค่าคงที่ตามตารางที่ 3 ซึ่งอ้างอิงจากคู่มือการใช้งานของผู้ผลิตเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด ทำการจัดเตรียมชิ้นงาน อุปกรณ์ และองค์ประกอบของการเชื่อมเสมือนการผลิตจริงในโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ตามรูปที่ 1 โดยก่อนการเชื่อมชิ้นงานทำการเช็ดทำความสะอาดผิวชิ้นทดสอบด้วยเมทานอล (Methanol)

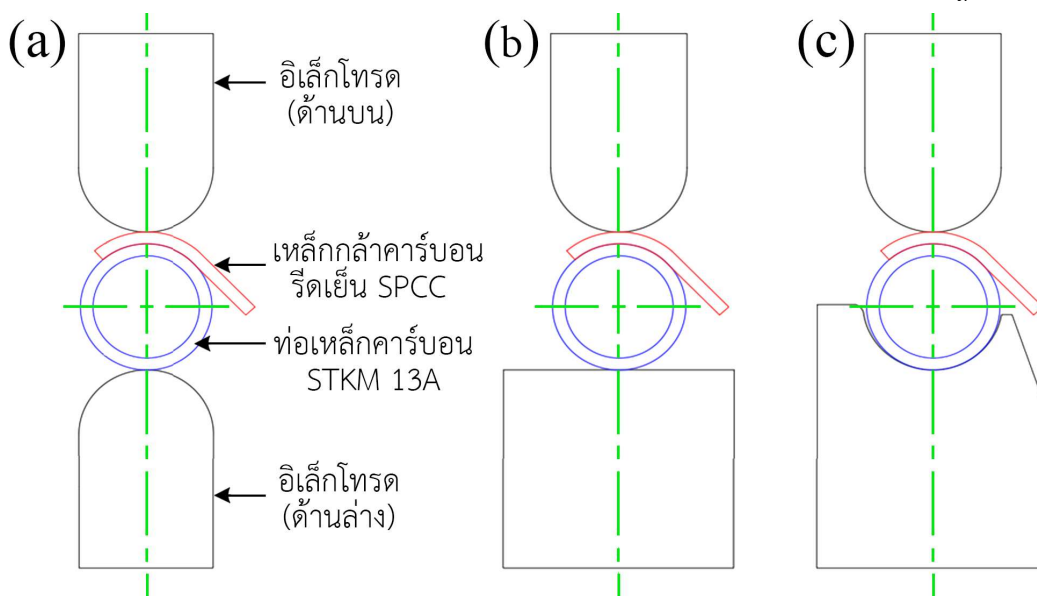
ตารางที่ 3 ปัจจัย และระดับของปัจจัย

ปัจจัยการเชื่อม	ค่าปัจจัย	หน่วย
แรงกดอิเล็กโทรด	1.0	กิโลนิวตัน (kN)
กระแสไฟฟ้าเชื่อม	10,000	แอมแปร์ (A)
เวลาเชื่อม	15	ไซเคิล (Cycle)
หมายเหตุ: 1 ไซเคิล (Cycle) เท่ากับ 0.02 วินาที		



รูปที่ 1 การวางตำแหน่งชิ้นงานในการเชื่อม

โดยในการศึกษานี้ได้ทำการเลือกใช้อิเล็กโทรดด้านบนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 13 มิลลิเมตร โดยมีรูปร่างด้านปลายเป็นลักษณะแบบโดม (DOME) ที่มีขนาดรัศมี 6.5 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุที่มีส่วนผสมของ ทองแดง โครเมียม และเซอร์โคเนียม (CuCrZr) ส่วนอิเล็กโทรดด้านล่าง 3 รูปแบบทำจากวัสดุ CuCrZr เช่นเดียวกัน โดยรูปแบบที่ 1 เป็นลักษณะ DOME รัศมี 6.5 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 2 (a) รูปแบบที่ 2 เป็นชนิดแบนเรียบเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 22 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 2 (b) และรูปแบบที่ 3 เป็นชนิดออกแบบพิเศษ โดยให้มีส่วนโค้งของอิเล็กโทรดเป็นพื้นที่รองรับท่อขณะเชื่อมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 22 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 (c) ซึ่งเป็นลักษณะการกดของอิเล็กโทรดกับชิ้นงานเชื่อม



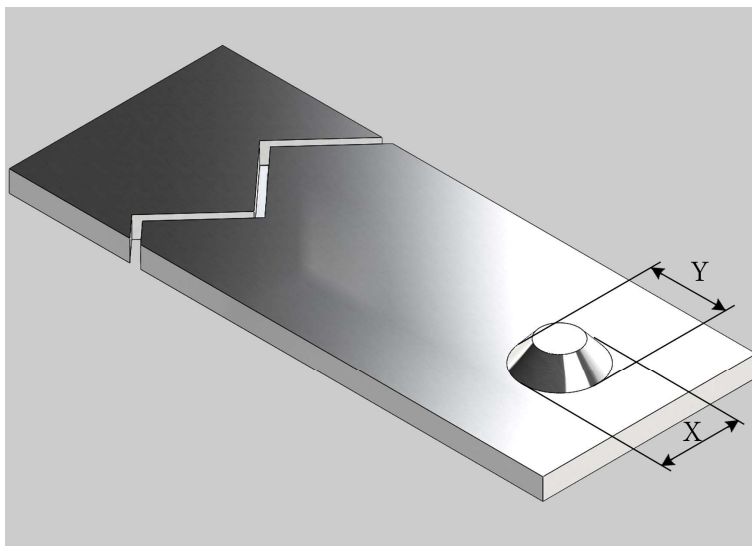
รูปที่ 2 ลักษณะการกดของอิเล็กโทรดกับชิ้นงานเชื่อม (a): แบบที่ 1 (b): แบบที่ 2 และ (c): แบบที่ 3

2.2 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเชื่อม

ลักษณะทางกายภาพ (Appearance) ของรอยเชื่อมถูกตรวจด้วยวิธีตรวจพินิจ (Visual Examination) ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายเพื่อตรวจหาจุดบกพร่องของรอยเชื่อมที่อาจเกิดขึ้นด้วยสายตา เป็นการตรวจคุณภาพรอยเชื่อมเบื้องต้นว่า รอยเชื่อมมีจุดบกพร่องหรือมีคุณภาพที่ดี เช่น รอยเชื่อมจะต้องมีความเรียบปราศจากการแตกร้าว หลุม โพรง ไม่มีร่องรอยของเศษโลหะที่เกิดจากการแตกกระจายของน้ำโลหะ [6] ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการตรวจสอบบริเวณรอยเชื่อมบนแผ่นเหล็ก SPCC และผิวด้านล่างของท่อเหล็ก เนื่องจากตำแหน่งการกดของอิเล็กโทรดด้านล่างทั้ง 3 รูปแบบมีความแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2

2.3 การตรวจสอบขนาดของรอยเชื่อม

รอยเชื่อมจะถูกทดสอบแบบทำลายโดยการตอกส่วหรือลิ้มเข้าไปในตะเข็บระหว่างจุดเชื่อมสองจุด (Chisel test) โดยอ้างอิงตามมาตรฐานและข้อกำหนดของลูกค้า โดยส่วหรือลิ้มจะทำให้เกิดการฉีกขาดของวัสดุที่ใช้เชื่อมบริเวณรอบๆ แล้วทำการวัดขนาดของรอยเชื่อม การตอกส่วหรือลิ้มเข้าไปในตะเข็บระหว่างจุดเชื่อมยังเป็นการทดสอบว่าชิ้นงานเชื่อมมีความแข็งแรงหรือไม่ สำหรับขนาดของรอยเชื่อมจะคำนวณโดยใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัดรอยเชื่อมตามแนวแกน X และ Y หรือ $(X+Y)/2$ ตามลักษณะการฉีกของรอยเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3 การตรวจสอบขนาดรอยเชื่อมในงานวิจัยนี้ใช้กล้อง Macro Scope รุ่น SK-Measure กำลังขยาย 30 เท่าโดยวางชิ้นงานให้อยู่ตรงกลางบริเวณที่แสงผ่านและให้ลำกล้องเลื่อนมาอยู่ใกล้ชิ้นงานมากที่สุดและทำการถ่ายภาพ แล้ววัดขนาดรอยเชื่อมโดยใช้เครื่องมือวัดที่อยู่ในโปรแกรมสำเร็จรูป SK-Measure

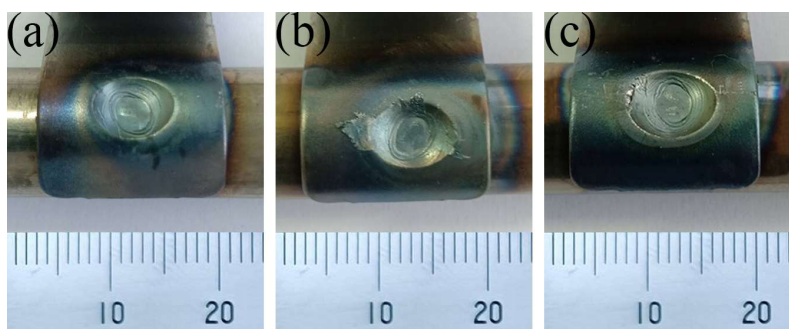


รูปที่ 3 ลักษณะการฉีกของรอยเชื่อม

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

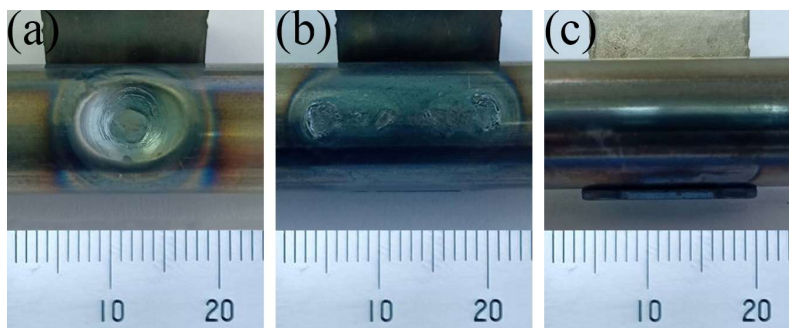
3.1 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อม

จากการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมด้วยวิธีตรวจพินิจจะเห็นว่า รอยเชื่อมบนแผ่นเหล็ก SPCC มีรูปร่างคล้ายกัน โดยปรากฏรอยกดลึกบริเวณผิวบนของแผ่นงานเชื่อมตามรูปที่ 4 (a), (b) และ (c) จะสังเกตได้ว่าจะปรากฏร่องรอยการแตกของน้ำโลหะ (Expulsion) แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเชื่อมที่มีค่าสูงบริเวณจุดเชื่อม [7] การใช้อิเล็กโทรดแบบที่ 2 ตามรูปที่ 4 (b) จะเกิดมากที่สุด การใช้อิเล็กโทรดด้านล่างแบบที่ 2 จะปรากฏร่องรอยการอาร์กบนผิวท่อตลอดทั้งแนวตามพื้นที่ของอิเล็กโทรดด้านล่าง ตามรูปที่ 5 (b) ส่วนการใช้อิเล็กโทรดด้านล่างแบบที่ 3 ไม่พบร่องรอยการอาร์ก ดังนั้นรูปร่างและขนาดของอิเล็กโทรดที่ใช้สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดบนท่อเหล็กมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง จำเป็นต้องทำการออกแบบอิเล็กโทรดให้มีความสัมพันธ์กับท่อเหล็กดังกล่าว



รูปที่ 4 รอยเชื่อมบนแผ่นเหล็ก SPCC จากการใช้อิเล็กโทรด (a) แบบที่ 1 (b) แบบที่ 2 และ (c) แบบที่ 3

สำหรับบริเวณผิวด้านล่างของท่อเหล็กมีรอยการอาร์ก เนื่องจากรูปร่างของอิเล็กโทรดที่ใช้มีความแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าการใช้อิเล็กโทรดด้านล่างแบบที่ 1 ปรากฏระยะการกดลึกอย่างชัดเจนตามรูปที่ 5 (a)



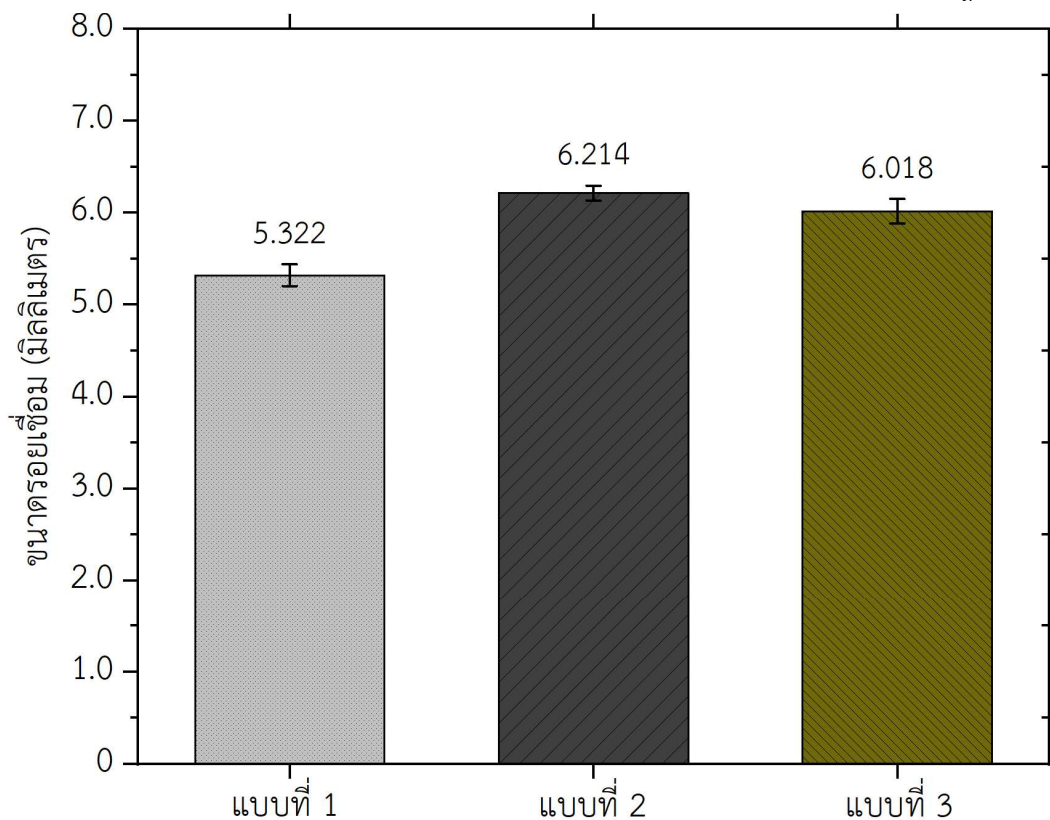
รูปที่ 5 รอยเชื่อมผิวด้านล่างของท่อเหล็ก จากการใช้อิเล็กโทรด (a) แบบที่ 1 (b) แบบที่ 2 และ (c) แบบที่ 3

3.2 ขนาดของรอยเชื่อม

ขนาดของรอยเชื่อมมีความสำคัญต่อความแข็งแรงรอยเชื่อมโดยจะทำให้ชิ้นงานเชื่อมมีสมบัติทางกลที่สามารถต้านทานแรงที่มากระทำโดยไม่เกิดการเสียหายขณะใช้งาน [8] โดยขนาดของรอยเชื่อมตามมาตรฐาน JIS Z3140 ระดับความเข้มงวดคลาส C ของแผ่นงานเชื่อมความหนา 1.2 มิลลิเมตร ขนาดรอยเชื่อมต้องมีความมากกว่า 3.8 มิลลิเมตร โดยขนาดของรอยเชื่อมจากการใช้อิเล็กโทรดด้านล่างแบบที่ 1 แบบที่ 2 และแบบที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 6 จากผลการทดลองแสดงให้เห็น รอยเชื่อมมีขนาดเล็กที่สุดเกิดจากการใช้อิเล็กโทรดด้านล่างแบบที่ 1 รองลงมาคือ แบบที่ 3 และแบบที่ 2 ตามลำดับ การใช้อิเล็กโทรดด้านล่างแบบที่ 2 จะมีขนาดรอยเชื่อมใหญ่ที่สุด เนื่องจากอิเล็กโทรดดังกล่าวมีพื้นที่สัมผัสกับท่อเหล็กมากที่สุดซึ่งพื้นที่ดังกล่าวเป็นจุดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขณะเกิดวัฏจักรการเชื่อมการเกิดความร้อนจะเริ่มจากจุดสัมผัสของอิเล็กโทรดแล้วขยายออกเป็นพื้นที่ที่ได้รับความร้อนระหว่างวัสดุ เมื่อความร้อนในระบบมีค่าสูงขึ้นโดยเฉพาะบริเวณตรงกลางของอิเล็กโทรดที่เป็นจุดสัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อโลหะและประสานให้ติดกันด้วยแรงดันจากอิเล็กโทรดทั้งสองข้างทำให้เกิดรอยเชื่อม ดังนั้นพื้นที่การกดหรือบริเวณจุดสัมผัสที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ดี และเกิดความร้อนในระบบที่สูงเช่นกัน [9] หากพิจารณาขนาดของรอยเชื่อมร่วมกับลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมแล้ว การใช้อิเล็กโทรดด้านล่างแบบที่ 3 จะได้คุณภาพรอยเชื่อมที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4 ขนาดรอยเชื่อมจากการใช้อิเล็กโทรดด้านล่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

ชิ้นงานทดลอง	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
1	5.360	6.200	5.870
2	5.420	6.170	6.260
3	5.090	6.360	6.040
4	5.390	6.120	5.940
5	5.350	6.220	5.980
ค่าเฉลี่ย	5.322	6.214	6.018
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.119	0.080	0.133



ลักษณะการกดของอิเล็กโทรด
รูปที่ 6 ขนาดรอยเชื่อมจากการใช้อิเล็กโทรดด้านล่าง

4. สรุป

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การใช้อิเล็กโทรดด้านล่างแบบที่ 3 มีค่าเฉลี่ยขนาดของรอยเชื่อมผ่านเกณฑ์มาตรฐาน JIS Z3140 ผิวท่อด้านล่างไม่พบร่องรอยการอาร์กที่อาจเป็นจุดบกพร่องจากการเชื่อม ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้อิเล็กโทรดด้านล่างแบบที่ 3 ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับท่อเหล็กคาร์บอน STKM 13A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 12.7 มิลลิเมตร ความหนา 1.4 มิลลิเมตร และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC ความหนา 1.2 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด PANASONIC รุ่น YR500-CM2 พิกัดกำลัง 50 kVA, 50 Hz

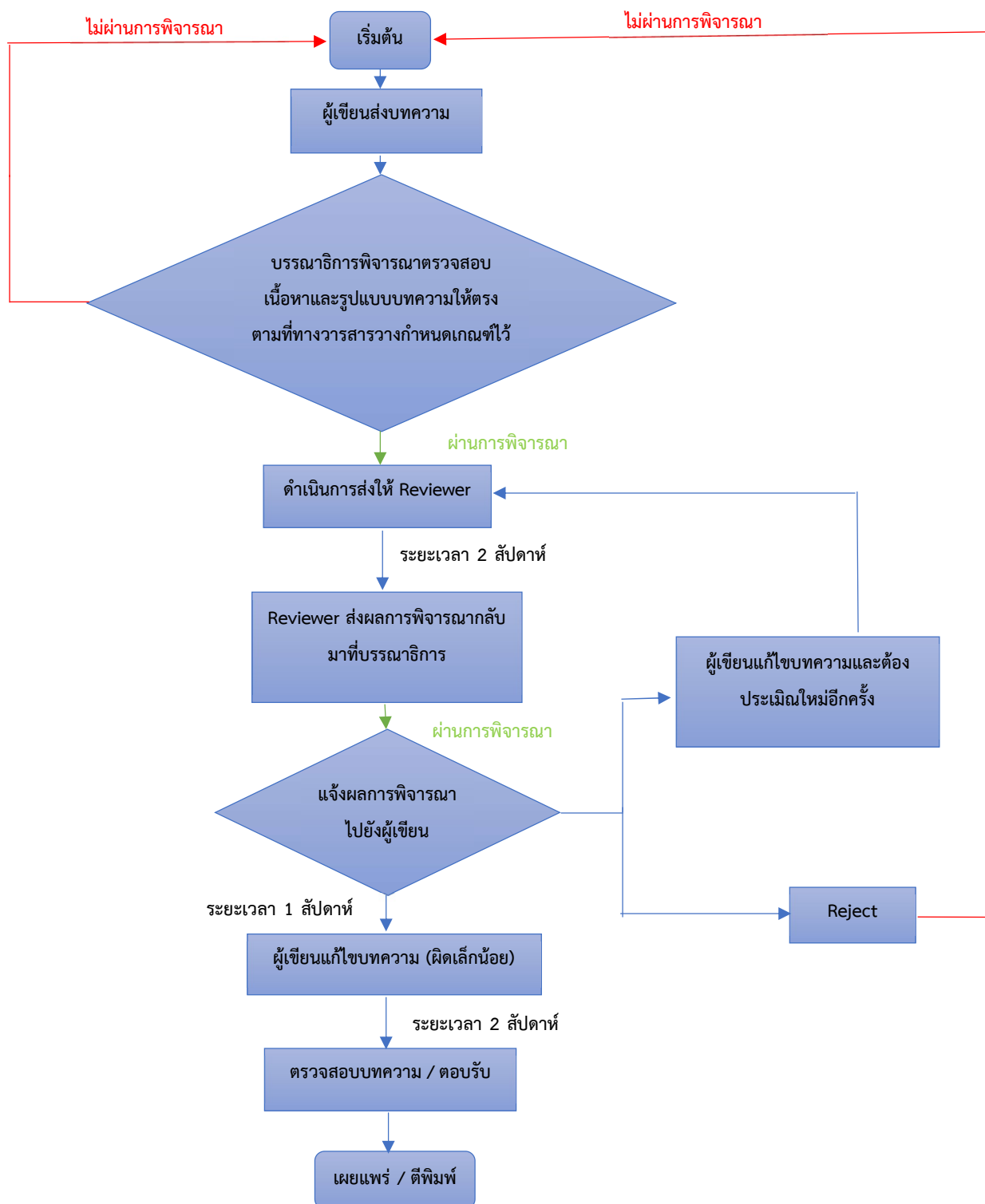
5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการวิจัยได้โดยเสรีจสมบุรณ์ ต้องขอขอบพระคุณบริษัทกรณีศึกษา ที่ได้อนุญาตให้คณะวิจัยเข้าศึกษาวิจัย ให้ข้อมูล และเผยแพร่ข้อมูลงานวิจัยเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าต่อไป ขอขอบคุณพนักงานทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งขอขอบพระคุณ โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตบูรณาการและเทคโนโลยี วิทยาเขตจันทบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการศึกษานี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Abdulkarim A., Muhammed E. and Bilge D., “RSW Junctions of Advanced Automotive Sheet Steel by Using Different Electrode Pressures”, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 8, no. 5, pp. 3492-3495, 2018.
- [2] Vivek D. Kalyankar, and Gautam P. Chudasama, “Influence of electrode tip diameter on metallurgical and mechanical aspects of spot welded duplex stainless steel”, *High Temperature Materials and Processes*, vol. 39, pp. 317–327, 2020.
- [3] Sakchai Ch., Paiboon Y. and Kittipong K., “Effect of resistance spot welding current on lap joints properties between aluminum alloy and zinc-coated steel”, *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 28, no. 1, pp. 37–46, 2017. (In Thai)
- [4] H. G. Yang, S. J. Hu, Y. S. Zhang, Y. B. Li and X. M. Lai, “Experimental study of single sided sheet to tube resistance spot welding”, vol. 6, pp. 530–535, 2007.
- [5] M. Najuch, S. Jüttner and D. Schmicker, “Simulative and experimental investigations on the influence of force during single-sided resistance brazing on sheet metal tube connections as an alternative to single-sided resistance spot welding”, *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 2, no. 100031, 2020.
- [6] Teerawut Kh and Kannachai K., “Resistance spot welding of SUS316L austenitic/SUS425 ferritic stainless steels: weldment characteristics, mechanical properties, phase transformation and solidification”, *Materials*, vol. 9, no. 6, 2019.
- [7] Hayat F., “The effects of the welding current on heat input, nugget geometry, and the mechanical and fractural properties of resistance spot welding on Mg/Al dissimilar materials”, *Materials & Design*, vol. 32, no. 4, pp. 2476–2484, 2011.
- [8] Teerawut Kh., Thiti M., Pannawit P. and Sathaphon S., “Selection of upper electrode tips for the resistance projection welding of M12 T-shape weld nut and SGHC Hot-dip zinc-coated steel sheet”, *The journal of Manufacturing and Management Technology*, vol. 1, No. 1, pp. 78-85. 2022. (In Thai)
- [9] W. Mazur., A. Kyriakopoulos, N. Bott and D. West, “Use of modified electrode caps for surface quality welds in resistance spot welding”, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 22, pp. 60-73, 2016.

ขั้นตอนการตีพิมพ์ลง วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ



แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ
เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

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

ชื่อ-สกุล.....

(ภาษาอังกฤษ).....

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

☐ อาจารย์ ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....

ที่อยู่ (ที่ติดต่อได้).....

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

โทรสาร.....อีเมล.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง:

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ).....

การตรวจสอบ ☐ ทำการลงทะเบียนและส่งวารสารในเว็บไซต์ <https://ph01.tcithaijo.org/index.php/JMMT/index> เรียบร้อยแล้ว

วันที่ ส่งวารสารต้นฉบับ เข้าสู่ระบบออนไลน์

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุไว้ในบทความจริง และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และข้าพเจ้าจะไม่นำส่งบทความนี้ไปพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน นับจากวันที่ข้าพเจ้าส่งบทความ

ลงนาม.....

(.....)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

TECHNICAL ARTICLE FORM

FOR PUBLISHING ON JOURNAL OF MANUFACTURING AND MANAGEMENT TECHNOLOGY

Title ☐ Mr. ☐ Ms. ☐ Others (Please specify).....

Name-Surnames

Academic Positions (Please specify) ☐ Professor ☐ Associate Professor ☐ Assistant Professor ☐ Lecturer ☐ Others
(Please specify).....

Address (for Contact).....

Office Phone Number..... Mobile Phone Number.....

Fax Number..... E-mail.....

Name of Article:.....

Submission Checklist ☐ Already register and submit on <https://ph01.tcithaijo.org/index.php/jMMT/index>

The days of Online Submission.....

I promise this article belongs to me and co-authors as the name indicated in the article. In addition, this article has not been previously published on another journal. Furthermore, I will not submit this article on another journal within 60 days from the day of my submission on the JOURNAL OF MANUFACTURING AND MANAGEMENT TECHNOLOGY.

Sign

(.....)

...../...../.....



สมาคมเครือข่ายราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ดำเนินการจัดทำวารสารโดยสมาคม

สมาคมเครือข่ายราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

Association of Rajamangala Network of Manufacturing and Management Technology, RNMT

เลขทะเบียนที่ ๖/๒๕๖๕ อาคารภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

E-mail : rnmt@en.rmutt.ac.th