



JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

THONBURI UNIVERSITY

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธนบุรี



Vol 9 No 1 January – June 2025

ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2568



ISSN 2730-3837 (ONLINE)

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี

ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม-มิถุนายน 2568



กำหนดการพิมพ์เผยแพร่

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี กำหนดพิมพ์เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ

1. ฉบับที่ 1 มกราคม- มิถุนายน
2. ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม

พิมพ์ที่ : มหาวิทยาลัยธนบุรี

วัตถุประสงค์ของการจัดพิมพ์วารสาร

1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ ในด้านวิศวกรรมศาสตร์ ได้แก่ วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมการผลิต วิศวกรรมวัสดุ วิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม รวมทั้งสาขาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง และในด้านวิทยาศาสตร์ ได้แก่ สาขาวิชา คณิตศาสตร์ สถิติ ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา วิทยาศาสตร์การอาหาร วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาการสารสนเทศ หรือวิทยาศาสตร์ประยุกต์ และสาขาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ความคิดเห็น วิทยาการและเทคนิคใหม่ๆ อันนำไปสู่การพัฒนาทักษะและศักยภาพในการสร้างผลงานทางวิชาการ การค้นคว้า ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อส่งเสริมความร่วมมือและการนำเสนอบทความทางด้านการวิจัย และการบริการสังคม

เจ้าของ : มหาวิทยาลัยธนบุรี

ผู้ดำเนินการ : ดร.บัญชา เกิดมณี อธิการบดี มหาวิทยาลัยธนบุรี

บรรณาธิการวารสาร : ดร.ฐิติพร กรัยวิเชียร ผู้อำนวยการสำนักวิจัย มหาวิทยาลัยธนบุรี

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร. ปรัชญนันท์ นิลสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมชาติ มานพ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จริญญา แสงราช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ศิริลักษณ์ สุวรรณวงศ์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ สุรัชย์ ธรรมทวีกุล	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนิต แต่งศรี	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยอดนภา เกตุเมือง	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

ฝ่ายจัดการ และเลขานุการ

ผศ.ดร.เอกรัตน์ นภกานต์	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ ผศ.จิระศักดิ์ ส่งบุญแก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ ผศ.สมจินต์ อักษรธรรม	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์วัฒนา เอกปมิตศิลป์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์สิทธิศักดิ์ ทองสุข	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์นันทวัน นาคอร่าม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์อรรหาวี เจ๊ะสะแม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์เอนก นามจันทร์	ศูนย์คอมพิวเตอร์และสารสนเทศ
อาจารย์ศิรินทิพย์ ดีเฉลา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ว่าที่ ร.ต.หญิงภัทรากร อาภาไพโร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์สุภารัตน์ คงคาชาติ	สำนักวิชาศึกษาทั่วไป/สำนักวิจัย
อาจารย์วราภรณ์ สุ่มมาตย์	สำนักวิชาศึกษาทั่วไป/สำนักวิจัย

คณะกรรมการกลั่นกรอง (Peer Review)

รศ.ดร.ไพฑูรย์ ศิริโอฬาร	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
รศ.ดร.มานิตย์ อิมาทา	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผศ.ดร.ศราวุธ สุวรรณอรรถ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ.ดร. วงศ์วิศรุต เชื่องสตุ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เรวดี ศักดิ์ดุยธรรม	มหาวิทยาลัยราชพฤกษ์
ผศ.ดร.พรรษา เอกพรประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. ประสพโชค ให้อทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.พิสิทธิ วิสุทธิเมธีกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.เมธา อึ้งทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สถิตย์พงษ์ มั่นหล้า	วิทยาลัยดุสิตธานี
ผศ.ดร.กัม พรประเสริฐ	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผศ.ดร.พรสิริ ขาดปรีชา	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
รศ.ดร.ปัญญา สำราญพันธ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
ผศ.ดร.นภดล เชนะโยธิน	มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
ผศ.จิระศักดิ์ ส่งบุญแก้ว	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผศ.สมจินต์ อักษรธรรม	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ดร.น่านน้ำ บัวคล้าย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ตันติกร พิษณุพิบูล	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
ดร. อัครนันท์ พงศธรวิวัฒน์	สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
ดร. ยุทธนา คงจีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.โสธมา เครือเมฆ	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ดร. วสพร นิษรัตน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร. พรหมพักตร์ บุญรักษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ. กิตติพงษ์ พุ่มโกษนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร. กัลยารัตน์ เขียวชาญ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร. จิรวดี อินทกาญจน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ดร.อุทุมพร อยู่สุข	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ดร.รณฤทธิ์ ชิงภูเขียว	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผศ.ดร.วรวิทย์ กังหัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ปวีตรา อวยจินดา	วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ์
ผศ.ดร.รัตติยา ชังชาติ	มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต
ดร.เกวลี สืบญาติ	วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ์

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ฉบับนี้ จัดพิมพ์ขึ้นเป็นปีที่ 9 ฉบับที่ 1 (มกราคม - มิถุนายน 2568) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทุกบทความเน้นเนื้อหาที่น่าสนใจ และเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเนื้อหาของบทความทั้งรูปแบบบทความวิชาการและบทความวิจัยที่ผ่านการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา โดยแต่ละบทความผ่านการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน เพื่อพัฒนาคุณภาพวารสารและเป็นประโยชน์สูงสุด

ในนามของกองบรรณาธิการของวารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ขอถือโอกาสเชิญชวนคณาจารย์ นักวิชาการและผู้สนใจเสนอบทความเข้ารับการตีพิมพ์เผยแพร่ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านทุกท่าน และขอขอบคุณที่ท่านผู้อ่านได้ให้ความสนใจวารสารฯ มาโดยตลอด

ดร.ฐิติพร กรัยวิเชียร

บรรณาธิการวารสาร

สารบัญ

ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม - มิถุนายน 2568

บทความวิจัย

- 1-12 การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A CONVERTED ELECTRIC MOTORCYCLE USING AN INDUCTION MOTOR
พนัสชัย ศรีบำรุง กริษา จิรัฏฐิวัตรมกุล วิโรจน์ เลิศธีระชาญชัย อิศกฤตา โลหพรหม
- 13-25 ศึกษาผลกระทบของปริมาณคาร์บอนต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม
THE STUDY ON THE EFFECT OF CARBON CONTENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF SPHERICAL GRAPHITE CAST IRON
ชาตรี นุชนาง มนตรี สุขชุม กิตติศักดิ์ จิตรประยูร เอกวิทย์ พลสุสวัสดิ์
- 26-37 การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ระบบการวัดกรณีของซิกซ์ ซิกม่าสำหรับการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพระบบการวัดแขนหัวอ่าน
THE APPLICATION OF GAUGE R&R ANALYSIS IN A SIXSIGMA CASE OF IMPROVING AND OPTIMIZING AN ACTUATOR ARM MEASUREMENT SYSTEM
ธนพงศ์ วรรณพราหมณ์ โกสินทร์ชัย แผ้วไธสง
- 38-54 การทดสอบการระบายความร้อนแพ็คเกจเตอร์ยานยนต์ไฟฟ้าด้วยการระบายความร้อนด้วยอากาศ
EXPERIMENTAL ON AIR COOLING FOR ELECTRIC VEHICLE BATTERY PACKS
อำพล พิชัยเชิด สัณชัย รำเพยพิต บัณฑิต กฤตาคม วริศราภรณ์ จรโคกกรวด วชิรินทร์ ดงบัง อภิเดช บุญเจือ
- 55-65 การผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB โดยใช้กังหันน้ำเพลตัน
ELECTRICITY GENERATION FROM UASB-TREATED WASTEWATER USING A PELTON TURBINE
ภาณุพงษ์ สามล เอกรัตน์ นกกานต์ นาโชค วัฒนานัย ชัยพร สุภาหิตานุกุล ศุภประดิษฐ์ มาสงค์
- 66-78 การควบคุมแบบสไลด์โหมดสำหรับวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์
SLIDING MODE CONTROL FOR SINGLE PHASE BRIDGE RECTIFIER CIRCUIT WITHPOWER FACTOR IMPROVEMENTOF BOOSTCONVERTER
ปิยะนัฐ ใจตรง กำจัด ใจตรง
- 79-88 2025การทำให้เป็นเชิงเส้นของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองโดยใช้การแปลงเชิงเส้นทั่วไป
LINEARIZATION OFSECOND-ORDER ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS BY USING A GENERALIZED LINEARIZING TRANSFORMATION
ศุภกิจ ธรรมชนันท์ กิตติ ศศิวิมลลักษณ์

Received: Mar 19, 2025

Revised: Jun 8, 2025

Accepted: Jun 18, 2025

การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง

โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A CONVERTED ELECTRIC MOTORCYCLE USING AN INDUCTION MOTOR

พนัสชัย ศรีบำรุง¹ กริธา จิรัถฐิวิรุฒมกุล¹ วิโรจน์ เลิศธีระชาญชัย¹ อิศกฤตา โลหพรหม^{2*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Panuschai Sribumrung¹ Kreetha Jiratthivarutku¹ Wirote Lerttheerachanchai¹

Itsagritta Lohaphrom^{2*}

¹Department of Next-Generation Automotive Technology, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Krungthep

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Krungthep

Corresponding Author: e-mail *itsagritta.l@mail.rmuk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างและความทนทานของระบบภายใต้สภาวะการทำงานต่อเนื่องที่ความเร็ว 45 km/h เป็นระยะเวลา 30 นาที การประเมินลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าและกลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยระบบไดนาโมมิเตอร์ที่ความเร็วรอบสูงสุด 7,000 rpm และการทดสอบสมรรถนะการทำงานจริงบนถนนภายใต้สภาวะโหลดคงที่ 100 kg ผลการทดสอบไดนาโมมิเตอร์จากการทำซ้ำ 5 รอบแสดงกำลังขับสูงสุดเฉลี่ย 5.27 ± 0.07 kW ที่ความเร็วของรถต้นแบบ 70.79 ± 0.39 km/h และแรงบิดสูงสุดเฉลี่ย 77.36 ± 0.40 N·m ที่ความเร็ว 68.47 ± 0.87 km/h โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) น้อยกว่า 5% ในทุกพารามิเตอร์ของการวัดสะท้อนความเสถียรและความสามารถทำซ้ำได้ของระบบควบคุม การทดสอบสมรรถนะในสภาพการใช้งานจริงจำนวน 3 รอบ การทดลองแสดงระยะทางการขับขี่เฉลี่ย 68.43 กิโลเมตรต่อการชาร์จ และค่าการใช้พลังงานจำเพาะเฉลี่ย 56.3 Wh/km ภายใต้สภาวะความเร็วคงที่ไม่ต่ำกว่า 45 km/h การวิเคราะห์ลักษณะพฤติกรรมการใช้พลังงานตามช่วงแรงดันระบบแบตเตอรี่เผยให้เห็นการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพอย่างมีนัยสำคัญ โดยช่วงแรงดันสูง (58.0-51.1 V) มีอัตราการใช้พลังงานจำเพาะ 71.2-76.8 Wh/km ช่วงแรงดันกลาง (51.1-49.9 V) แสดงประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดที่ 12.2-31.9 Wh/km และช่วงแรงดันต่ำ (49.0-43.1 V) มีอัตราการใช้พลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 55.2-86.4 Wh/km ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีจุดทำงานเหมาะสมในช่วงแรงดันปานกลางของระบบไฟฟ้า ผลการวิจัยยืนยันความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการดัดแปลงรถจักรยานยนต์เป็นระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พร้อมทั้งแสดงสมรรถนะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการเดินทางในเขตเมือง ซึ่งสามารถนำไปเป็นแนวทางสำหรับการ

พัฒนาเทคโนโลยีการดัดแปลงยานพาหนะในระดับการผลิตเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงประสิทธิภาพของแบตเตอรี่และระบบส่งกำลังยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มระยะทางการขับขี่และความยั่งยืนของระบบ

คำสำคัญ: รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง, มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, การดัดแปลงรถจักรยานยนต์, การทดสอบสมรรถนะ

Abstract

This research aimed to design and analyze the performance of a converted electric motorcycle using an induction motor. The research methodology comprised three main phases: structural integrity testing and system durability assessment under continuous operation at 45 km/h for 30 minutes, evaluation of electrical and mechanical characteristics of the induction motor using a dynamometer system at maximum speed of 7,000 rpm, and field performance testing on road conditions under constant load of 100 kg. Dynamometer test results from five repeated trials demonstrated an average maximum power output of 5.27 ± 0.07 kW at prototype vehicle speed of 70.79 ± 0.39 km/h, and average maximum torque of 77.36 ± 0.40 N·m at speed of 68.47 ± 0.87 km/h, with coefficient of variation (CV) less than 5% for all measured parameters, reflecting system stability and control repeatability. Real-world performance testing across three experimental cycles showed an average driving range of 68.43 kilometers per charge cycle and average specific energy consumption of 56.3 Wh/km under constant speed conditions of not less than 45 km/h. Energy consumption behavior analysis across battery system voltage ranges revealed significant efficiency variations, with high voltage range (58.0-51.1 V) exhibiting specific energy consumption of 71.2-76.8 Wh/km, medium voltage range (51.1-49.9 V) demonstrating optimal performance at 12.2-31.9 Wh/km, and low voltage range (49.0-43.1 V) showing increased specific energy consumption of 55.2-86.4 Wh/km. These findings correspond to the electrical characteristics of induction motors having optimal operating points within the medium voltage range of the electrical system. The research results confirmed the technical feasibility of motorcycle conversion to electric propulsion systems using induction motors, demonstrating suitable performance characteristics for urban transportation applications. This work provided guidelines for developing vehicle conversion technology at commercial production scale. However, improvements in battery efficiency and powertrain systems remain critical factors requiring further development to enhance driving range and system sustainability.

Keywords: converted electric motorcycle, induction motor, motorcycle conversion, performance testing

บทนำ

ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นได้กระตุ้นการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 30-70% เมื่อเทียบกับยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน พร้อมทั้งมีต้นทุนดำเนินงานและบำรุงรักษาที่ต่ำกว่าในระยะยาว [Acampa, et al., 2021]

ประเทศไทยสนับสนุนการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าผ่านนโยบาย Thailand 4.0 โดยกำหนดให้ยานยนต์สมัยใหม่เป็นอุตสาหกรรมเป้าหมายหลัก มีแผนพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าระยะที่ 2 (พ.ศ. 2566-2573) และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ตั้งเป้าหมายให้มียานยนต์ไฟฟ้า 1.5 ล้านคันภายในปี 2579 [สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2023]

รถจักรยานยนต์เป็นยานยนต์ที่ได้รับความนิยมสูงในประเทศไทย โดย ณ เดือนธันวาคม 2024 มีการจดทะเบียนสะสม 22.4 ล้านคัน [กรมการขนส่งทางบก, 2024] เนื่องจากมีความคล่องตัวในการจราจรหนาแน่น [Acampa, et al., 2021]

รถจักรยานยนต์มีศักยภาพสำหรับการดัดแปลงเป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า [Sopha, et al., 2022] ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนและทรัพยากรเมื่อเทียบกับการผลิตใหม่ทั้งคัน [Habib, et al., 2021]

การดัดแปลงยานยนต์เป็นยานยนต์ไฟฟ้า (EV Conversion) ต้องพิจารณาทั้งระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าและระบบกักเก็บพลังงาน [Mudaheranwa, et al., 2023] มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายประเภท ได้แก่ มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Motor: IM) มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบแม่เหล็กถาวร (BLDC) และ สวิทช์รีลัคแทนซ์มอเตอร์ (SRM) [Apribowo, et al., 2021]

งานวิจัยนี้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Motor: IM) จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีข้อได้เปรียบสำคัญ คือ โครงสร้างเรียบง่ายและทนทาน ไม่มีแปรงถ่าน [S. K, et al., 2022] ทำให้อายุการใช้งานยาวและต้องการการบำรุงรักษาน้อย [Camargos, P. H., et al., 2022] มีประสิทธิภาพดีในช่วงความเร็วกว้างและให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ [Dianati, B., et al., 2020] ใช้วัสดุต้นทุนต่ำ และไม่ต้องพึ่งพาแม่เหล็กหายากเหมือน BLDC [Kalt, S., et al., 2020] รวมทั้งมีเทคโนโลยีควบคุมที่เสถียรและห่วงโซ่อุปทานในท้องถิ่น [M. K. Metwaly, et al., 2021]

จากข้อได้เปรียบดังกล่าว การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาชุดดัดแปลงรถจักรยานยนต์เครื่องยนต์ 110 ซีซี ระบบส่งกำลังแบบโซ่ให้เป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 4 kW โดยเน้นการใช้ชิ้นส่วนผลิตในประเทศให้มากที่สุด การเลือกรถจักรยานยนต์ประเภทนี้เนื่องจากมีข้อได้เปรียบด้านกลไกการติดตั้งที่เรียบง่าย ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจ และศักยภาพในการพัฒนาต่อยอดไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ วัตถุประสงค์หลักคือ ออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของชุดดัดแปลงที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถติดตั้งและใช้งานได้สะดวก เพื่อสร้างต้นแบบสำหรับการขยายผลไปสู่การผลิตระดับพาณิชย์ ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จะสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทยให้เกิดความยั่งยืน สร้างความสามารถในการพึ่งพาตนเอง และเป็นแนวทางสำหรับการดัดแปลงยานยนต์เดิมให้เป็นยานยนต์ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัด

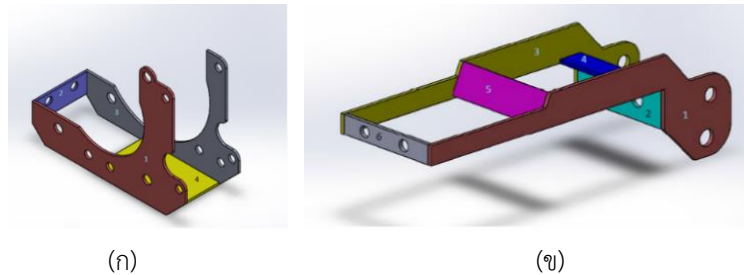
วิธีการวิจัย (Methodology)

การพัฒนาต้นแบบชุดดัดแปลงรถจักรยานยนต์เป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบอินดักชัน มีองค์ประกอบหลักคือ ส่วนทางกล ส่วนทางไฟฟ้า และระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ โดยออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริงในประเทศไทย

1 ส่วนประกอบทางกล

1.1 การออกแบบชุดโครงสร้างสำหรับติดตั้ง

การออกแบบโครงสร้างชุดขับเคลื่อนคำนึงถึงการกระจายน้ำหนักและจุดศูนย์ถ่วงที่สมดุล เพื่อความปลอดภัยขณะขับขี่และเข้าโค้ง กระบวนการเริ่มจากการใช้เครื่องสแกน 3 มิติ เพื่อสร้างแบบจำลองโครงสร้างรถจักรยานยนต์ จากนั้นวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เพื่อประเมินความแข็งแรงภายใต้สภาวะการใช้งานต่าง ๆ ก่อนออกแบบด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สำหรับงานวิศวกรรม ชุดยัดมอเตอร์ขนาด 4 kW และชุดยัดแบตเตอรี่ชนิด NMC ดังแสดงในภาพที่ 1(ก) และ 1(ข) ตามลำดับ ถูกออกแบบให้มีระบบป้องกันการสั่นสะเทือนแบบยางคู่ (Dual Rubber Dampening System) เพื่อยืดอายุการใช้งานและป้องกันความเสียหาย โดยคำนึงถึงปัจจัยสำคัญ ได้แก่ ความแข็งแรงทางโครงสร้าง วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทดสอบภายใต้แรงบิดสูงสุด และการระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมจริง รวมถึงอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่เหมาะสม



ภาพที่ 1 (ก) โครงสร้างชุดยึดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 4 kW (ข) โครงสร้างชุดยึดแบตเตอรี่ชนิด NMC ขนาด 2.1 kWh

1.2 การออกแบบระบบทางกลที่ใช้ขับเคลื่อน

ระบบขับเคลื่อนใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบอินดักชันขนาด 4 kW เป็นต้นกำลัง พร้อมระบบส่งกำลังแบบโซ่ตรง (Direct Chain Drive) ซึ่งมีประสิทธิภาพการส่งกำลังสูง (97-98%) และบำรุงรักษาง่าย [Hasan, et al.,2021] รถจักรยานยนต์ การคำนวณอัตราทดเกียร์อาศัยสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ล้อและแรงบิดที่มอเตอร์ โดยแรงบิดที่ล้อเท่ากับแรงบิดที่มอเตอร์คูณด้วยอัตราทดเกียร์และประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง [Chen, et al.,2019]

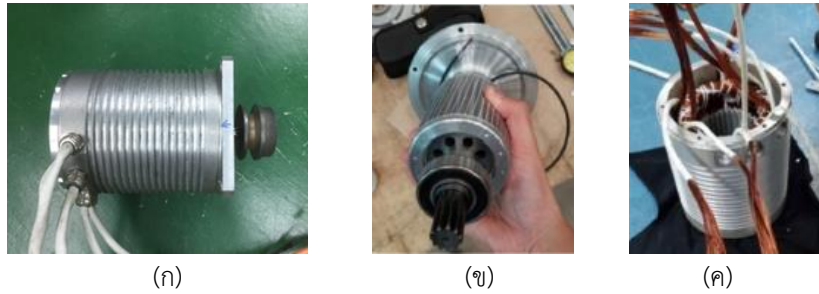
การออกแบบอัตราทดของสเตอร์ตัวขับและตัวตามเพื่อให้ได้ค่าแรงบิดและความเร็วของรถคำนวณโดยค่าพารามิเตอร์ของรถจักรยานยนต์ ดังนี้

- 1) ขนาดยางและเส้นรอบวง: ยาง 80/90-17 คิดเป็นความยาวเส้นรอบวง 1.809 เมตร
- 2) ความเร็วสูงสุดที่ต้องการ: $110 \text{ km/h} = 110 \text{ (km/h)} \times 1000 \text{ (m/km)} \times 1/60 \text{ (h/min)} = 1833.33 \text{ m/min}$
- 3) ความเร็วล้อ = $1833.33 \text{ (m/min)} \times 1/1.809 \text{ (รอบ)} = 1013.45 \text{ rpm}$
- 4) ความเร็วรอบสูงสุดมอเตอร์ = 8000 rpm
- 5) ความเร็วล้อ = $1,833.33/1.809 = 1,013.45 \text{ rpm}$
- 6) อัตราทดเกียร์ = $8000/1013.45 = 7.89$
- 7) แรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์ = 25 Nm
- 8) แรงบิดสูงสุดที่ล้อ (กรณีอัตราทด 7.89) = $25 \times 7.89 = 197.25 \text{ Nm}$
- 9) สเตอร์ที่หาได้ หน้า 12 ฟัน หลัง 70 ฟัน (12:70 ฟัน) คิดเป็นอัตราทด $70/12 = 5.83$
- 10) แรงบิดสูงสุดที่ล้อ = $25 \times 5.83 = 145.75 \text{ Nm}$
- 11) ความเร็วสูงสุด = $[8000 \text{ (รอบ/นาที)} / 5.83] \times 1.809 \text{ (m/รอบ)} \times [1/1000 \text{ (km/min)} \times 60 \text{ (min/h)}]$
 $= 1,372.38 \times 1.809 \times 0.06 = 148.94 \text{ km/h}$

2 ส่วนประกอบทางไฟฟ้า

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าแบบอินดักชัน (IM)

การพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้าแบบอินดักชันขนาด 4 kW ดังแสดงในภาพที่ 2 มีเหตุผลสำคัญในการเลือกใช้คือ ความคงทนสูง ค่าบำรุงรักษาต่ำ หาอะไหล่ภายในประเทศ และทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง การออกแบบโรเตอร์แบบกรงกระรอกใช้วัสดุอลูมิเนียมด้วยกระบวนการ Die Casting เพื่อลดต้นทุนและน้ำหนัก แต่ยังคงประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าที่ดี ตามตารางที่ 1



ภาพที่ 2 (ก) ต้นแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (ข) ส่วนโรเตอร์ (ค) ส่วนสเตเตอร์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของมอเตอร์

คุณลักษณะ	ค่าที่ใช้งาน	หมายเหตุ
Motor Type	Induction Motor	ระบบขดลวด: Y-connection 3 เฟส
Maximum Power (kW @ rpm)	10 @ 3,800 -- 8,000	สามารถทำงานที่กำลังสูงสุดได้ต่อเนื่อง 3 นาที
Continuous Power (kW @ rpm)	4 @ 3,800 -- 8,000	สามารถทำงานได้ต่อเนื่องไม่จำกัดเวลา
Maximum Torque (Nm @ rpm)	25 @ 0 -- 3,800	ค่าแรงบิดคงที่ช่วง 0-3,800 rpm
Continuous Torque (Nm @ rpm)	10 @ 0 -- 3,800	ทำงานได้ต่อเนื่องโดยไม่เกิดความร้อนสูง
DC Voltage (V)	48	แรงดันการทำงาน 48V DC (มาตรฐานระบบ)
Cooling System	Natural air cooling	-
Weight (kg) / Dimensions (mm)	16 kg /170	อัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนัก 0.25 kW/kg
Efficiency	89-92%	ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 4,000-6,000 rpm

2.2 อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบอินดักชัน (IM)

การขับเคลื่อนมอเตอร์อินดักชันในรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าต้องใช้อุปกรณ์ควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3 ที่รองรับการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างรวดเร็ว เช่น การเร่ง การเบรก และการขึ้นทางลาดชัน คณะผู้จัดทำเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ร่วมกับ Field-Oriented Control (FOC) ตามตารางที่ 2 เนื่องจากเทคนิค FOC สามารถแยกควบคุมแรงบิดและสนามแม่เหล็กอิสระ ทำให้ตอบสนองการขับขี่ได้ราบรื่น เทคโนโลยี SiC MOSFET ที่ความถี่ 20 kHz ให้ประสิทธิภาพ 94-97% รองรับกระแสสูงสุด 450 A และกระแสต่อเนื่อง 180 A สำหรับการเร่งและขับขี่หนัก ระบบทำงานในช่วงแรงดัน 20-69 V พร้อมเบรกป้อนกลับพลังงาน 0-80% ลดการสูญเสียพลังงาน อุปกรณ์มีระบบป้องกันครบครัน (กระแสเกิน แรงดันเกิน/ต่ำ อุณหภูมิสูง ไฟฟ้าลัด) น้ำหนัก 5 กก. ขนาด 200x200 มม. พร้อมการสื่อสาร CAN Bus และ UART เหมาะสำหรับการดัดแปลงรถจักรยานยนต์



ภาพที่ 3 อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบอินดักชัน (IM)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวงจรอินเวอร์เตอร์

คุณลักษณะ	ค่าที่ใช้งาน
Nominal Voltage (V)	48
Maximum Voltage (V)	69
Minimum Voltage (V)	20
Peak Current (A)	450
Continuous Current (A)	180
Switching Technology	SiC MOSFET [Peng et al., 2022]
Switching Frequency (kHz)	20
Control Method	Field-Oriented Control (FOC)
Power Stage Efficiency (%)	94-97
Protection Features	Over-current, over-voltage, under-voltage, over-temperature, short-circuit
Cooling System	Natural air cooling with aluminum heatsink
Weight (kg) / Dimensions (mm)	5 kg / Diameter 200 x Length 200
Communication Interface	CAN Bus, UART
Regenerative Braking	Supported (Adjustable 0-80%)

2.3 ระบบกักเก็บพลังงาน

ระบบกักเก็บพลังงานใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide: NMC) ซึ่งคุณลักษณะของแบตเตอรี่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง เกิดความร้อนในระหว่างการชาร์จต่ำ และเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมในยานยนต์ไฟฟ้าปัจจุบัน ระบบมีการติดตั้งระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) เพื่อควบคุมและตรวจสอบสถานะของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ ระบบนี้สามารถขับขี่ได้ในระยะทาง 60-70 กิโลเมตรต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของแบตเตอรี่

คุณลักษณะ	ค่าที่ใช้งาน
Nominal Battery Voltage (V)	51.8
Maximum Voltage (V)	58.8
Minimum Voltage (V)	42
Cell Type	NMC
Charge Rate	4C
Discharge Rate	6C
Weight (kg) / Dimensions (mm)	15 kg / 250 x 210 x 220

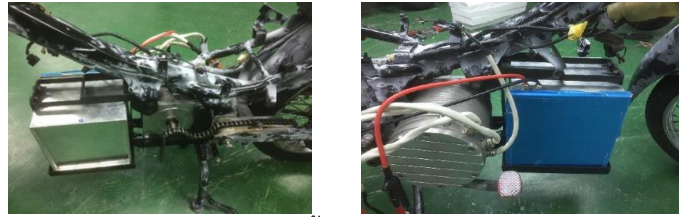
ผลการวิจัย

การวิจัยนี้ทดสอบประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนและการใช้พลังงานของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง โดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การทดสอบทางกล การทดสอบทางไฟฟ้า และการทดสอบสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

1 การทดสอบทางกล

ชุดติดตั้งมอเตอร์และแบตเตอรี่ ถูกติดตั้งไว้ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งการทดสอบทางกลประเมินความแข็งแรงของชุดโครงสร้างสำหรับติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าและชุดแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะการขับขี่จริง โดยทดสอบที่ความเร็ว 45 กม./ชม. เป็น

เวลา 30 นาที ผลการทดสอบพบว่าโครงสร้างสามารถรองรับน้ำหนักได้โดยไม่มีการแตกร้าวหรือเสียรูปเชิงกล ซึ่งบ่งชี้ว่ามีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งานจริง



ภาพที่ 4 ชุดติดตั้งมอเตอร์และแบตเตอรี่

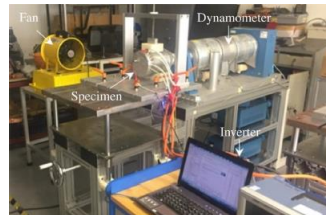
2 การทดสอบทางไฟฟ้า

การทดสอบทางไฟฟ้าประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้สภาวะไม่มีโหลด ดังรูปที่ 5(ก) โดยใช้ไดนาโมมิเตอร์วัดการตอบสนองที่ความเร็วรอบสูงสุด 7,000 รอบต่อนาที ซึ่งมีแสดงผลแบบกราฟในรูปที่ 5(ข) ผลการทดสอบพบว่ามอเตอร์ทำงานได้ภายในขีดจำกัดของพิกัดที่กำหนด โดยไม่พบความผิดปกติหรือการสูญเสียพลังงานที่ไม่คาดคิด

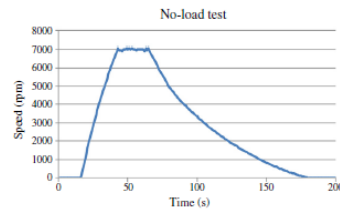
3 การทดสอบสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง

3.1 การทดสอบสมรรถนะบนไดนาโมมิเตอร์

ภายหลังการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าและชุดขับเคลื่อนเข้ากับโครงสร้างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงเรียบร้อยแล้ว ดังภาพที่ 6 ได้ทำการทดสอบสมรรถนะบนไดนาโมมิเตอร์ ดังภาพที่ 7 เพื่อวัดค่ากำลังสูงสุดและแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วต่างๆ โดยทดสอบซ้ำ 5 รอบ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4 และตัวอย่างแผนภูมิแสดงสมรรถนะความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและแรงบิดกับความเร็วรอบเครื่องยนต์จากการทดสอบ ดังภาพที่ 8



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5 (ก) ชุดทดสอบขณะไม่มีโหลด และ (ข) ผลตอบสนองของมอเตอร์ (IM) ขณะไม่มีโหลด

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงบนไดนาโมมิเตอร์

รอบการทดสอบ	กำลังสูงสุด (kW)	ความเร็วที่กำลังสูงสุด (km/h)	แรงบิดสูงสุด (N·m)	ความเร็วที่แรงบิดสูงสุด (km/h)
1	5.31	70.98	77.60	68.64
2	5.18	70.25	76.82	67.20
3	5.27	71.05	77.15	69.35
4	5.22	70.45	77.40	68.10
5	5.35	71.22	77.85	69.05
ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD	5.27 ± 0.07	70.79 ± 0.39	77.36 ± 0.40	68.47 ± 0.87
ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV)	1.33%	0.55%	0.52%	1.27%

หมายเหตุ: ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ระดับประจุแบตเตอรี่เริ่มต้น $90 \pm 2\%$, และความชื้นสัมพัทธ์ $65 \pm 5\%$

การทดสอบสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Motor: IM) ได้ดำเนินการบนไดนาโมมิเตอร์ภายใต้สภาวะควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิห้อง $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ระดับประจุแบตเตอรี่เริ่มต้น $90 \pm 2\%$ และความชื้นสัมพัทธ์ $65 \pm 5\%$ โดยอ้างอิงตามหลักวิศวกรรมการทดสอบมาตรฐานสำหรับระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า การทดสอบซ้ำจำนวน 5 รอบ มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเสถียร ความน่าเชื่อถือ และสมรรถนะสูงสุดของระบบขับเคลื่อนของต้นแบบชุดดัดแปลงรถจักรยานยนต์เป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

จากผลการทดสอบด้านกำลังสูงสุด พบว่าค่าเฉลี่ยของกำลังสูงสุดอยู่ที่ $5.27 \pm 0.07 \text{ kW}$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation: CV) เท่ากับ 1.33% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม ($\text{CV} < 5\%$) แสดงให้เห็นถึงความเสถียรของระบบควบคุมมอเตอร์ที่พัฒนาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความเร็วที่มีกำลังสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ $70.79 \pm 0.39 \text{ km/h}$ (ประมาณ 19.7 m/s) ตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งมีลักษณะโค้งกำลัง-ความเร็วแบบพาราโบลา กล่าวคือ กำลังจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วในช่วงก่อนถึงความเร็วซิงโครนัส และลดลงภายหลังเนื่องจากผลของสลลิป (Slip) และการสูญเสียพลังงานในโรเตอร์ (Rotor Loss)

ในด้านแรงบิดสูงสุด พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $77.36 \pm 0.40 \text{ N.m}$ ณ ความเร็วเฉลี่ย $68.47 \pm 0.87 \text{ km/h}$ ซึ่งสูงกว่าค่าของรถจักรยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในขนาดใกล้เคียงกัน โดยแรงบิดสูงสุดที่เกิดในช่วงความเร็ว $68-69 \text{ km/h}$ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเร่งและบรรทุกของระบบขับเคลื่อนที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

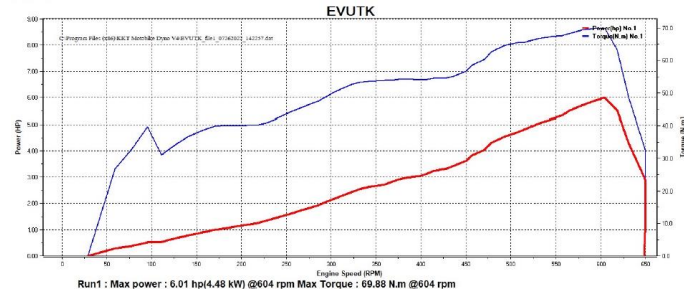
ทั้งนี้ ความสัมพันธ์ของตำแหน่งที่เกิดกำลังสูงสุดและแรงบิดสูงสุดในช่วงความเร็วที่ใกล้เคียงกัน ($65-75$ กิโลเมตรต่อชั่วโมง) บ่งชี้ว่า มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้มีช่วงความเร็วที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง โดยเฉพาะในเขตเมืองและถนนสายรอง ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายของการดัดแปลงเพื่อการใช้งานที่ยั่งยืนและเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในประเทศไทย



ภาพที่ 6 มอเตอร์ชุดขับเคลื่อนและแบตเตอรี่ที่ติดตั้งเข้ากับจักรยานยนต์ไฟฟ้า



ภาพที่ 7 การทดสอบสมรรถนะของจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงบนไดนาโมมิเตอร์



ภาพที่ 8 แผนภูมิแสดงสมรรถนะความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและแรงบิดกับความเร็วรอบเครื่องยนต์จากการทดสอบ

3.2 การทดสอบสมรรถนะจากการขับขึ้นจริง

การทดสอบอัตราการใช้พลังงานต่อระยะทางดำเนินการภายใต้สภาวะมาตรฐาน โดยมีน้ำหนักบรรทุก 100 กิโลกรัม และรักษาความเร็วคงที่ไม่น้อยกว่า 45 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จนกระทั่งระบบตัดการทำงานเมื่อแรงดันแบตเตอรี่ลดลงถึงระดับต่ำสุด (43.1 โวลต์) การทดสอบดำเนินการซ้ำทั้งหมด 3 รอบ เพื่อตรวจสอบความเชื่อถือได้และความสม่ำเสมอของผลการทดสอบ ในแต่ละรอบการทดสอบ ดังแสดงผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 5 คณะผู้วิจัยได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ช่วงตามระดับแรงดันแบตเตอรี่ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบในช่วงการใช้งานที่แตกต่างกัน การแบ่งช่วงนี้ช่วยให้สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น เช่น อุณหภูมิแบตเตอรี่ สภาพอากาศ และสภาพการจราจร

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้พลังงานจากการขับขึ้นจริงจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง

รอบ ที่	การ ทดสอบ	แรงดันแบตเตอรี่ (V)			กระแส เฉลี่ย (A)	เวลา (นาท)	ความเร็ว เฉลี่ย (km/h)	ระยะทาง (km)	อัตราการใช้พลังงาน (Wh/km)	หมายเหตุ
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	ลดลง (%)						
1	1	58.0	51.1	11.9	2.48	32.2	45	24.16	71.2	-
	2	51.1	49.9	2.3	0.46	31.7	52	26.85	12.2	-
	3	49.0	43.1	12.0	2.87	19.8	53	17.43	86.4	Cut-off
	รวม	58.0	43.1	25.7	1.96	83.7	50	68.44	56.3	
2	1	58.0	51.1	11.9	2.61	29.9	45	22.40	76.8	-
	2	53.5	49.9	6.7	1.59	34.7	51	29.45	31.9	-
	3	47.0	43.1	8.3	2.11	18.4	54	16.56	62.9	Cut-off
	รวม	58.0	43.1	25.7	2.10	83.0	50	68.41	56.3	
3	1	58.0	51.1	11.9	2.48	32.2	45	24.16	71.2	-
	2	52.8	49.9	5.5	1.23	32.2	50	26.85	29.9	-
	3	46.7	43.1	7.7	1.84	19.0	55	17.43	55.2	Cut-off
	รวม	58.0	43.1	25.7	1.85	83.4	50	68.44	56.3	
เฉลี่ย	-	58.0	43.1	25.7	1.97	83.4	50	68.43	56.3	-

การคำนวณอัตราการใช้พลังงาน

$$\text{อัตราการใช้พลังงาน (Wh/km)} = (\text{แรงดันเฉลี่ย} \times \text{กระแสเฉลี่ย} \times \text{เวลา}) / \text{ระยะทาง} \quad (1)$$

ตัวอย่างการคำนวณ (รอบที่ 1, การทดสอบที่ 1):

$$\text{แรงดันเฉลี่ย} = (58.0 + 51.1) / 2 = 54.55 \text{ V}$$

$$\text{กระแสเฉลี่ย} = 2.48 \text{ A}$$

$$\text{เวลา} = 32.2 \text{ นาที} = 0.537 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{ระยะทาง} = 24.16 \text{ km}$$

$$\text{อัตราการใช้พลังงาน} = (54.55 \times 2.48 \times 0.537) / 24.16 = 71.2 \text{ Wh/km}$$

การทดสอบสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงแสดงให้เห็นความเสถียรสูง โดยมีระยะทางการวิ่งที่สม่ำเสมอในทุกรอบ (68.41-68.44 กิโลเมตร) ซึ่งสะท้อนถึงเสถียรภาพของระบบแบตเตอรี่และการควบคุมพลังงานมอเตอร์ไฟฟ้า อัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย 56.3 Wh/km อยู่ในเกณฑ์ดีเมื่อเทียบกับมาตรฐานยานพาหนะไฟฟ้าประเภทเดียวกัน

ผลการทดสอบเผยให้เห็นประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงความเร็วปานกลาง (45-55 km/h) และการลดลงของแรงดันแบตเตอรี่เฉลี่ย 25.7% ในแต่ละรอบ แสดงถึงลักษณะการคายประจุที่มีเสถียรภาพ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานแบตเตอรี่

การวิเคราะห์ตามช่วงแรงดันแบตเตอรี่ ช่วงแรงดันสูง (58.0-51.1 โวลต์) ในช่วงเริ่มต้นการใช้งาน อัตราการใช้พลังงานอยู่ที่ 71.2-76.8 Wh/km ซึ่งสูงกว่าช่วงอื่น สาเหตุเกิดจากระบบควบคุมพลังงานมอเตอร์ต้องปรับตัวให้เข้ากับแรงดันสูง ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนที่อินเวอร์เตอร์ และมอเตอร์ยังไม่อยู่ในจุดประสิทธิภาพสูงสุด และช่วงแรงดันกลาง (51.1-49.9 โวลต์) ช่วงนี้แสดงประสิทธิภาพสูงสุดของระบบ โดยมีอัตราการใช้พลังงานเพียง 12.2-31.9 Wh/km ซึ่งต่ำที่สุดในการทดสอบ สอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่ามอเตอร์ไฟฟ้า DC มีประสิทธิภาพสูงสุดที่จุดทำงานเหมาะสม (optimal operating point) ในช่วงแรงดันปานกลาง และช่วงแรงดันต่ำ (49.0-43.1 โวลต์) อัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 55.2-86.4 Wh/km เนื่องจากมอเตอร์ต้องใช้กระแสสูงขึ้นเพื่อรักษาระดับพลังงานให้คงที่ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานตามกฎของโอห์ม และประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์ลดลงเมื่อทำงานที่แรงดันต่ำ

ผู้วิจัยได้แบ่งช่วงในการทดสอบเนื่องจากระยะทางที่ไกล และช่วยให้สามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ เช่น อุณหภูมิแบตเตอรี่ สภาพอากาศ และสภาพการจราจร การทดสอบในช่วงเวลาที่แยกจากกันช่วยลดผลกระทบของตัวแปรเหล่านี้ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์จากตารางจะเห็นข้อดีคือ สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบในแต่ละช่วงการใช้งานได้อย่างละเอียด ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถทำได้หากทดสอบแบบต่อเนื่องตลอดทั้งรอบการใช้งาน การวิเคราะห์นี้จะช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของระบบและสามารถปรับปรุงการออกแบบให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ข้อมูลพฤติกรรมการคายประจุในแต่ละช่วงมีความสำคัญต่อการพัฒนาระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System) ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

การอภิปราย

1 สมรรถนะมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากผลการทดสอบแสดงกำลังสูงสุด 5.27 ± 0.07 kW ที่ความเร็ว 70.79 km/h และแรงบิดสูงสุด 77.36 ± 0.40 N·m ที่ความเร็ว 68.47 km/h ค่า $CV < 5\%$ ชี้ให้เห็นความเสถียรของระบบควบคุม ลักษณะการกระจายของกำลังและแรงบิดในช่วงความเร็วใกล้เคียงกันสอดคล้องกับทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งแรงบิดสูงสุดเกิดก่อนความเร็วเชิงโคโรนัสและกำลังสูงสุดเกิดที่ความเร็วสูงกว่า

2 ประสิทธิภาพพลังงาน อัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย 56.3 Wh/km การวิเคราะห์ตามช่วงแรงดันแบตเตอรี่พบว่า ช่วงแรงดันสูง (58.0-51.1 V) มีอัตราการใช้พลังงานสูงสุด (71.2-76.8 Wh/km) จากการสูญเสียในอินเวอร์เตอร์และสเตเตอร์ ช่วงแรงดันกลาง (51.1-49.9 V) แสดงประสิทธิภาพสูงสุด (12.2-31.9 Wh/km) ณ จุดทำงานเหมาะสม ส่วนช่วงแรงดันต่ำ (49.0-43.1 V) มีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น (55.2-86.4 Wh/km) จากการสูญเสียตามกฎของโอห์ม

3 ความเหมาะสมของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีข้อดีในด้านความทนทาน ต้นทุนต่ำ และไม่ต้องบำรุงรักษาเนื่องจากไม่มีแปรงถ่าน อย่างไรก็ตาม มีข้อจำกัดคือประสิทธิภาพต่ำกว่า PMSM และต้องการระบบควบคุมที่ซับซ้อน การใช้ Vector Control หรือ FOC จะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพได้

4 ระบบจัดการพลังงาน ความสามารถในการรักษาการคายประจุสม่ำเสมอ (แรงดันลดลง 25.7% ในทุกรอบ) แสดงประสิทธิภาพของ BMS การตัดที่แรงดัน 43.1 V เหมาะสมสำหรับการปกป้องแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน 48V (13S)

5 การประยุกต์ใช้งานจริง ระยะทางการวิ่ง 68.43 km ต่อการชาร์จเหมาะสำหรับการใช้งานในเขตเมือง สมรรถนะที่เสถียรในช่วงความเร็ว 45-55 km/h สอดคล้องกับสภาพการใช้งานในประเทศไทย

สรุปผล

การวิจัยนี้แสดงให้เห็นความสำเร็จในการออกแบบและพัฒนาารถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ผลการทดสอบยืนยันความเป็นไปได้ทางเทคนิคและประสิทธิภาพที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม

การทดสอบทางกลยืนยันความแข็งแรงของโครงสร้างที่รับน้ำหนักได้โดยไม่เกิดการเสียรูป การทดสอบทางไฟฟ้าแสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ทำงานภายในขีดจำกัด และการทดสอบสมรรถนะบนไดนาโมมิเตอร์ให้ค่ากำลังสูงสุด 5.27 ± 0.07 kW และแรงบิดสูงสุด 77.36 ± 0.40 N·m ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนต่ำกว่า 5% แสดงความเสถียรของระบบ

การทดสอบภาคสนามแสดงอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย 56.3 Wh/km และระยะทางการวิ่ง 68.43 km ต่อการชาร์จซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในเขตเมือง การวิเคราะห์ตามช่วงแรงดันแบตเตอรี่เผยให้เห็นจุดทำงานที่เหมาะสมของระบบในช่วงแรงดันกลาง

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแสดงลักษณะการทำงานที่สอดคล้องกับทฤษฎี โดยมีแรงบิดสูงสุดและกำลังสูงสุดในช่วงความเร็วที่ใกล้เคียงกัน ระบบจัดการแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพในการควบคุมการคายประจุและป้องกันการคายประจุเกินขีดจำกัด ความแปรปรวนต่ำของผลการทดสอบยืนยันความน่าเชื่อถือของระบบควบคุม

ผลการวิจัยสนับสนุนแนวทางการดัดแปลงรถจักรยานยนต์เป็นรถไฟฟ้าในระดับท้องถิ่น ซึ่งมีศักยภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน สมรรถนะที่เหมาะสมกับการใช้งานในเขตเมืองและความเสถียรของระบบทำให้เป็นทางเลือกที่เป็นไปได้สำหรับการขนส่งที่ยั่งยืน อย่างไรก็ตาม การพัฒนาต่อยอดในด้านระยะทางการขับขี่และประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ยังคงเป็นประเด็นสำคัญ เพื่อให้รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นำไปสู่การพัฒนาเชิงพาณิชย์และการส่งเสริมอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณบริษัทเรียล ปีพีเอ็ม จำกัด และสถาบันไทย-ญี่ปุ่น ที่อนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับการทดสอบอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย ขอขอบคุณคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินการวิจัย ตลอดระยะเวลาของโครงการ การสนับสนุนจากทุกฝ่ายมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- กรมการขนส่งทางบก. (2024). สถิติการขนส่งประจำปี 2024. กรุงเทพฯ: กระทรวงคมนาคม.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2023). แผนขับเคลื่อนพลังงานแห่งชาติ 2023-2037. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- Acampa, G., Campisi, T., Grasso, M., Marino, G., & Torrisi, V. (2021). *Exploring European strategies for the optimization of the benefits and cost-effectiveness of private electric mobility*. Lecture Notes in Computer Science, 12891, 715-729. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86976-2_49
- Apribowo, C. H. B., & Maghfiroh, H. (2021). Fuzzy logic controller and its application in brushless DC motor (BLDC) in electric vehicle-A review. *Journal of Electrical, Electronic, Information, and Communication Technology*, 3(1), 35-43. <https://doi.org/10.20961/jeeict.3.1.50651>
- Bindal, R. K., & Kaur, I. (2020). Torque ripple reduction of induction motor using dynamic fuzzy prediction direct torque control. *ISA Transactions*, 99(9), 322-338.

- Camargos, P. H., & Caetano, R. E. (2022). A performance study of a high-torque induction motor designed for light electric vehicles applications. *Electrical Engineering*, 104(2), 797-805. <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01331-4>
- Chen, P.-T., Shen, D.-J., Yang, C.-J., & Huang, K. D. (2019). Development of a hybrid electric motorcycle that accords energy efficiency and controllability via an inverse differential gear and power mode switching control. *Applied Sciences*, 9(9), 1787. <https://doi.org/10.3390/app9091787>
- Dianati, B., Kahourzade, S., & Mahmoudi, A. (2020). Optimization of axial-flux induction motors for the application of electric vehicles considering driving cycles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(3), 1522-1533. <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.2976625>
- Habib, A. K. M. A., Hasan, M. K., Mahmud, M., Motakabber, S. M. A., Ibrahimya, M. I., & Islam, S. (2021). A review: Energy storage system and balancing circuits for electric vehicle application. *IET Power Electronics*, 14(1), 1-13. <https://doi.org/10.1049/pel2.12013>
- Hasan, M. K., Mahmud, M., Habib, A. K. M. A., Motakabber, S. M. A., & Islam, S. (2021). Review of electric vehicle energy storage and management system: Standards, issues, and challenges. *Journal of Energy Storage*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102940>
- Kalt, S., Stolle, K. L., Neuhaus, P., Herrmann, T., Koch, A., & Lienkamp, M. (2020). Dependency of machine efficiency on the thermal behavior of induction machines. *Machines*, 8(1), 9. <https://doi.org/10.3390/machines8010009>
- Metwaly, M. K., Abdel-Majeed, M. S., Abdel-Khalik, A. S., Hamdy, R. A., Hamad, M. S., & Ahmed, S. (2021). Smart integration of drive system for induction motor applications in electric vehicles. *International Journal of Power Electronics and Drive System*, 12(1), 20-28. <https://doi.org/10.11591/ijped.v12.i1>
- Mudaheeranwa, E., Berkem, H., Cipcigan, L., & Ugalde-loo, C. E. (2023). Feasibility study and impacts mitigation with the integration of Electric Vehicles into Rwanda's power grid. *Electric Power Systems Research*, 220, 109341. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109341>
- S. K, Pillai, N. K., Marri, N. R., Baiju, T. K., & P. P. K. (2022). *Simulation of high efficiency switched reluctance motor (SRM) drive control scheme by alternate rotation motor firing*. In 2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICT) (pp. 1381-1386). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICT54557.2022.9917825>
- Sopha, B. M., Purnamasari, D. M., & Ma'mun, S. (2022). Barriers and enablers of circular economy implementation for electric-vehicle batteries: From systematic literature review to conceptual framework. *Sustainability*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/su14106359>

Translated Thai References

- Department of Land Transport. (2024). Annual transport statistics 2024. Bangkok: Ministry of Transport.
- Eppo Energy Policy and Planning Office . (2023). National Energy Driving Plan 2023-2037. Bangkok: Ministry of Energy.

Received: Mar 16, 2025

Revised: Jun 13, 2025

Accepted: Jun 18, 2025

ศึกษาผลกระทบของปริมาณคาร์บอนต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ แกรไฟต์กลม

THE STUDY ON THE EFFECT OF CARBON CONTENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF SPHERICAL GRAPHITE CAST IRON

ชาตรี นุชนาง*, มนตรี สุขชุม, กิตติศักดิ์ จิตรประยูร, เอกวิทย์ พลสุสวัสดิ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงใหม่

Chatree Nutnang, Montri Sukchum, Kitisak Chitprayoon, Aekkawit Poonsawat

Department of Mechanical Engineering, Faculty of engineering, Chiangrai College

Corresponding author: chatree.de63@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณคาร์บอนที่มีต่อเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมปริมาณคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% โดยใช้เตาหลอมไฟฟ้าชนิดแบบเหนี่ยวนำ ด้วยอุณหภูมิ 1450-1550 °C ใส่แมกนีเซียม 0.02-0.1% และ ฟอสฟอรัส 0.05% นำมาทดสอบเชิงเปรียบเทียบสมบัติทางกลและทางด้านโลหะวิทยา การทดลองและวิเคราะห์ผลการศึกษาเชิงการเปรียบเทียบสมบัติทางกลพบว่า เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 4.0% มีค่าความต้านทานแรงดึงได้สูงสุดเท่ากับ 630.85 N/mm² , มีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 433.96 N/mm² , มีค่าความแข็งมากที่สุดเท่ากับ 180.5 HB และเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดเท่ากับ 22.45% ในส่วนของผลการวิเคราะห์โครงสร้างวัสดุที่มีส่วนผสมของคาร์บอนทั้ง 3 ค่า พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยจะมีลักษณะของแกรไฟต์ที่เป็นรูปร่างกลม และ ปริมาณโครงสร้างของเฟอร์ไรต์จะมีอยู่ประมาณ 80% และปริมาณโครงสร้างของเพิร์ลไลต์จะมีอยู่ประมาณ 20% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของโครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม

คำสำคัญ : เหล็กหล่อแกรไฟต์กลม, เหล็กหล่อเหนียว, เพอร์เซ็นต์คาร์บอน, เฟอร์ไรต์, เพิร์ลไลต์

Abstract

The study of this research was the effects of varying carbon content on ductile cast iron, specifically with carbon contents of 3.0%, 3.5%, and 4.0%. The samples were melted using an induction furnace at temperatures ranging from 1450–1550 °C, with magnesium added at levels between 0.02–0.1% and phosphorus at 0.05%. Comparative testing of mechanical and metallurgical properties was carried out. The experimental results from the comparative analysis of mechanical properties revealed that ductile cast iron with a carbon content of 4.0% exhibited the highest tensile strength at 630.85 MPa, the highest yield strength at 433.96 MPa, and the greatest hardness at 180.5 HB. In contrast, ductile cast iron with a carbon content of 3.0% showed the highest elongation percentage at 22.45%. Regarding the metallographic analysis of the samples with the three different carbon contents, the microstructures were found to be similar. The

graphite appeared in a nodular (spherical) form, with the microstructure comprising approximately 80% ferrite and 20% pearlite—consistent with the standard metallurgical characteristics of ductile cast iron.

Keyword : Spheroidal graphite cast iron, Ductile cast iron, Carbon percentage, Ferrite, Pearlite

บทนำ

เหล็กหล่อที่ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ทั้งในด้านอุตสาหกรรมและการก่อสร้าง เนื่องจากต้นทุนต่ำและสามารถผลิตได้ง่ายอีกทั้งคุณสมบัติทางกลอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และมีการพัฒนาเหล็กหล่อหลากหลายเกรด ซึ่งมีสมบัติทางกลที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน เช่น เหล็กหล่อเทา (Grey Cast iron) (Kaewpharin, 2010) มีคุณสมบัติในการนำความร้อนและการดูดซับแรงสั่นสะเทือนได้ดี แต่มีความทนทานต่ำ ในทางกลับกัน เหล็กหล่อแกรไฟต์กลม หรือ เหล็กหล่อเหนียว (Spheroidal graphite cast iron, Ductile cast iron) มีความเหนียว ทนต่อแรงกระแทกและแรงสั่นสะเทือนได้ดีกว่า โดยมีแมกนีเซียมและฟอสฟอรัสเป็นส่วนผสม (สุรสิทธิ์ แก้วพระอินทร์, 2553) ข้อดีคือใช้ความร้อนและเวลาในการผลิตน้อย

เหล็กหล่อถูกผลิตขึ้นจากการถลุงมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 2% (Thamachote, 2015) โดยหลังจากขั้นตอนการหลอม เหล็กหล่อจะถูกเทลงในแม่พิมพ์ ความแตกต่างในการผลิตระหว่างเหล็กกล้าและเหล็กหล่อคือเหล็กหล่อจะต้องใช้เครื่องมือในการผลิต (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2558) นอกจากนั้นองค์ประกอบภายในยังมีความแตกต่างกัน โดยเหล็กหล่อจะประกอบด้วย คาร์บอนประมาณ 3.5% และจะมีโลหะอื่นๆ ผสมรวมถึงแมกนีเซียมและฟอสฟอรัส ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อของโลหะ บางครั้งอาจจะมีการผสมแร่แมงกานีสเล็กน้อย และแร่วัสดุอย่างอื่น เช่น กำมะถัน และซิลิคอน ถึงแม้ว่าเหล็กกล้าและเหล็กหล่อจะมีส่วนประกอบของคาร์บอนและมีลักษณะภายนอกที่คล้ายกัน (Piyasrisawat, 2013) แต่ทั้งสองก็มีความแตกต่างที่สำคัญคือเหล็กกล้าจะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอนน้อยกว่า 2% ซึ่งช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นตอนสุดท้ายมีลักษณะที่แข็งตัวอยู่ในโครงสร้างไมโครคริสตัลไลน์แบบเดียว (สุทธิเกียรติ ปิยะศรีสวัสดิ์, 2556) ซึ่งการมีค่าของธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าของเหล็กหล่อส่งผลให้ผลิตภัณฑ์จะแข็งตัวอยู่ในรูปของโลหะเนื้อผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ในลักษณะนี้จึงมีโครงสร้างของไมโครคริสตัลไลน์ มากกว่าหนึ่งโครงสร้างในหนึ่งผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการมีปริมาณของธาตุคาร์บอนที่สูงและการแมกนีเซียมและฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบ (Boonmee, 2020) ทำให้เหล็กหล่อมีความสามารถในการหล่อที่ดีเยี่ยม มีเพิร์ลไลท์ (Pearlite) ที่เป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวของเฟอร์ไรต์ และซีเมนต์ไต์ (Cementite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีคาร์บอนสูง โดยจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ ซึ่งสร้างความแข็งแรงและความทนทานที่สูงขึ้นกว่าผลึกของเฟอร์ไรต์เพียงอย่างเดียว และยังมีเฟอร์ไรต์ (Ferrite) คือโครงสร้างที่เกิดขึ้นในเหล็กหล่อที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (สารัมภ์ บุญมี, 2563) โดยเป็นเฟสของเหล็กที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ที่มีจุดศูนย์กลาง (Body-Centered Cubic: BCC) โดยจะมีคุณสมบัติที่มีความอ่อนตัวและทนทานต่อการยืดหยุ่นสูง แต่ก็มี ความแข็งแรงไม่สูงมากนัก โครงสร้างเกรน (Grain structure) ของเหล็กหล่อแกรไฟต์ หรือ CGI (Compacted Graphite Iron) (Suwanmanee, 2011) เป็นโครงสร้างที่สำคัญในการกำหนดคุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อชนิดนี้ ซึ่งมีการจัดเรียงของแกรไฟต์ในลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น เหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ที่มีอัตราส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ประมาณ 3.5% แกรไฟต์จะมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม ซึ่งมีแกรไฟต์ที่จัดเรียงเป็นลักษณะกลม (ณัฐพงศ์ สุวรรณณณ์, 2554) มีผลทำให้วัสดุมีความแข็งแรงสูง ความเหนียว และทนทานต่อการแตกหัก ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานในหลายๆ สาขางานในด้านอุตสาหกรรม (Goodrich และคณะ, 2012) ซึ่งจากการศึกษาจึงทำให้ทราบว่า อัตราส่วนของปริมาณเปอร์เซ็นต์คาร์บอนมีผลกระทบต่อสมบัติทางกลของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเห็นความสัมพันธ์ของปริมาณค่าคาร์บอนที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม รวมไปถึงสมบัติทางกลของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม หากมีการปรับปริมาณคาร์บอนที่ใช้ในการหล่อของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% เพื่อทดสอบเชิงเปรียบเทียบว่าจะมีการแปรผกผันของสมบัติทางกลในเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมตามปริมาณเปอร์เซ็นต์คาร์บอนมากน้อยเพียงใด โดยการทดลองอยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM ซึ่งสามารถนำไปเป็น

แนวทางการเลือกใช้ในการออกแบบหล่อขึ้นงานและการเลือกใช้วัสดุในอุตสาหกรรม เพื่อให้สอดคล้องต่อสมบัติทางกลที่ต้องการใช้ในการออกแบบและลดในส่วนของอัตราค่าใช้จ่ายในการผลิตขึ้นงาน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1 ศึกษาผลกระทบของปริมาณคาร์บอนที่มีต่อเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม เพื่อศึกษาผลของปริมาณคาร์บอนที่แตกต่างกันต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม
- 2 ศึกษาสมบัติทางแรงดึงของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3%, 3.5% และ 4% เพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึง ความเค้นคราก และความแข็งของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม
- 3 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลมภายใต้สภาวะปริมาณคาร์บอนที่แตกต่างกัน

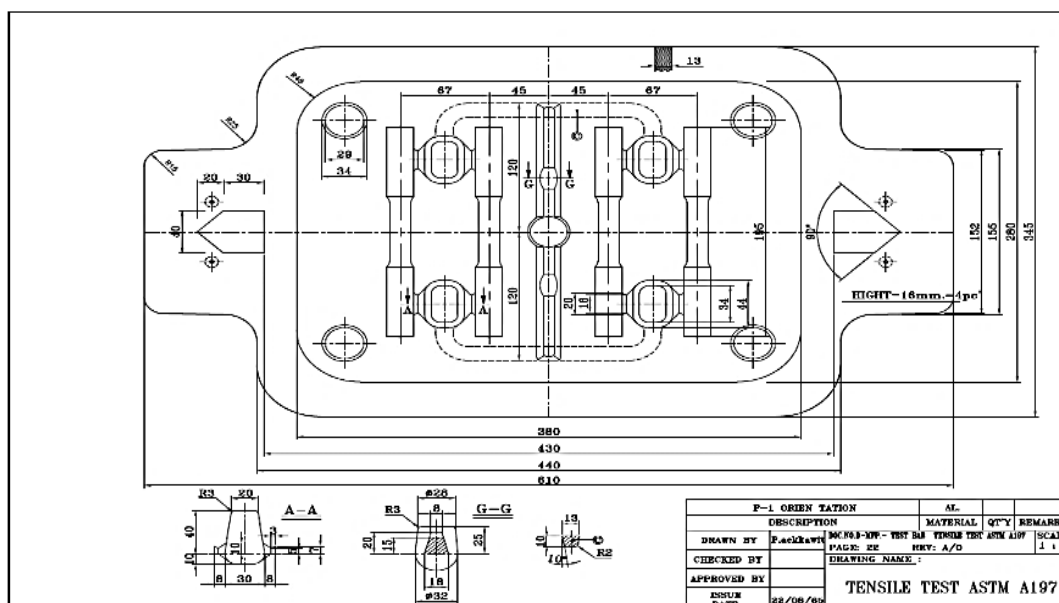
ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1 สามารถใช้เป็นแนวทางในการควบคุมองค์ประกอบทางเคมีให้เหมาะสมกับลักษณะในการใช้งาน
- 2 สามารถนำไปใช้ในการออกแบบขึ้นงานหล่อและการเลือกใช้วัสดุในอุตสาหกรรม
- 3 สามารถนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพและกระบวนการหล่อโลหะ

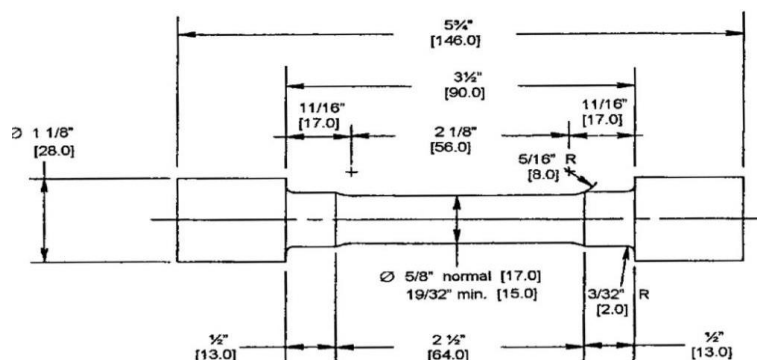
วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1 การออกแบบ

เขียนแบบแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการหล่อเหล็กหล่อเกรไฟต์กลมขึ้นงานตัวอย่าง 2D โดยใช้โปรแกรม Gstar CAD และ 3D โดยใช้โปรแกรม Power Shape 2015 ลิขสิทธิ์ของบริษัท แคดแคมไทย จำกัด อยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation : A 197/A 197M – 00 ดังภาพที่ 1 ออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการหล่อขึ้นงานทดสอบแรงดึงของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม โดยออกแบบภาพสองมิติ (2D) ด้วยโปรแกรม Gstar CAD และแบบจำลองสามมิติ (3D) ด้วยโปรแกรม Power Shape 2015 ซึ่งได้รับสิทธิใช้งานจากบริษัท แคดแคมไทย จำกัด แบบแม่พิมพ์ได้รับการออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM A197/A197M-00 ดังแสดงในภาพที่ 1 และภาพที่ 2



ภาพที่ 1 แบบแม่พิมพ์หล่อขึ้นงานตัวอย่าง



ภาพที่ 2 แบบชิ้นงานตัวอย่างมาตรฐาน ASTM Designation : A 197/A 197M – 00

2 กระบวนการหล่อ

2.1 โดยนำเหล็กเก่าที่จะใช้ในการหล่อ และส่วนผสมที่จำเป็นต้องใช้ในการหล่อเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ที่ผ่านการคำนวณอัตราส่วนที่จะต้องใช้ในการหล่อใส่เข้าไปในเตาหลอม โดยควบคุมอัตราส่วนผสมปริมาณสารหรือธาตุให้ได้ อัตราส่วนดังนี้ คาร์บอน (Carbon) C = 3.0% , 3.5% , 4.0% ซิลิคอน (Silicon) Si = 2.5% ฟอสฟอรัส (Phosphorus) P = 0.05% กำมะถัน (Sulfur) S = 0.02 % โครเมียม (Chromium) Cr = 0.10% และ แมงกานีส (Manganese) Mn = 0.35 % ใส่เข้าเตาหล่อไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (induction furnace) โดยใช้ความร้อนในการหลอมละลายประมาณ 1400-1500 องศาเซลเซียส

2.2 เมื่ออุณหภูมิได้ถึงตามที่กำหนดเมื่ออุณหภูมิของน้ำเหล็กถึงค่าที่กำหนด (ประมาณ 1400-1500 องศาเซลเซียส) จะทำการเติมแมกนีเซียม (Magnesium Mg) ในช่วง 0.035 - 0.055 % โดยน้ำหนักเข้าไป เพื่อเพิ่มความเหนียวให้สูงขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการที่แข็งแกร่งของการหล่อขึ้นรูปนำน้ำเหล็กเทลงใส่เบ้าแม่พิมพ์ ข้อควรระวังในกระบวนการนี้ คือ ความชื้นของทรายและเบ้าแม่พิมพ์และอัตราการเย็นตัวที่สามารถทำให้เกิดฟองอากาศที่ผิวของชิ้นงาน อาจส่งผลกระทบต่อความสัมพันธ์ของสมบัติทางกล ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เทน้ำเหล็กลงสู่แม่พิมพ์

2.3 หลังจากการเทน้ำเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมลงในแม่พิมพ์แล้ว จะปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลง ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลาโดยประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อให้โลหะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง และคงรูปเป็นโครงสร้างของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม (Spheroidal graphite cast iron) ตามมาตรฐาน ASTM Designation : A 536 –84 ดังภาพที่4 เมื่อชิ้นงานเย็นตัวสมบูรณ์แล้ว จะนำไปผ่านกระบวนการกลึงตกแต่งผิวให้ได้ขนาดตามมาตรฐานที่กำหนด



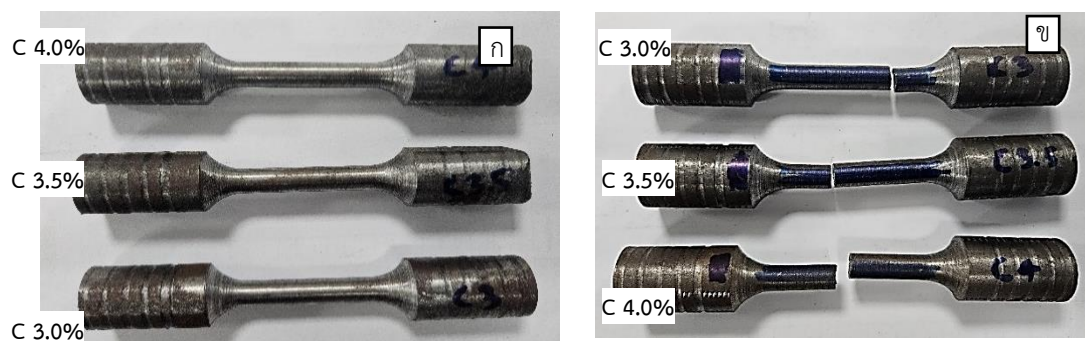
ก ข ค
 ภาพที่ 4 ชิ้นงานหลังหลอมเสร็จ ก.คาร์บอน 3.0% ข.คาร์บอน 3.5% , ค.คาร์บอน 4.0%

3 ขั้นตอนการทดลอง

3.1 ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง TENSILE TESTING MACHINE MODEL : WE 300B (W10-277) BRAND : NAME CHANG CHUN ทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุ (Ultimate tensile) , หาค่าความเค้นสูงสุดของชิ้นงาน (Yield strength) , หาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ (Elongation) โดยอยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: A 536 – 84 ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง TENSILE TESTING MACHINE MODEL : WE 300B (W10-277)



ภาพที่ 6 ก.ลักษณะก่อนทดสอบของชิ้นงานที่ปริมาณคาร์บอนที่แตกต่าง
 ข.ลักษณะการขาดของชิ้นงานที่ปริมาณคาร์บอนที่แตกต่าง

3.2 การทดสอบความแข็งของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ด้วยเครื่อง HARDNEES TESTER MODEL: SA 200
 BRAND NAME : GALILEO วัดค่าความแข็งของวัสดุ โดยอยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation : E 140-02

3.3 ศึกษาโครงสร้างของชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 1 ดูโครงสร้างจุลภาคของเกรน ใช้กล้องจุลทรรศน์ MICROSCOPE MODEL : JAPAN 258203 BRAND NAME : NIKON เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคเกรนของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม

ขั้นตอนที่ 2 ขัดเปิดหน้าผิวด้วยน้ำผงกัดกร่อน (Alumina Powder) หยดน้ำยาอะซิโตน (Acetone) ดูโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมตัวอย่าง เพื่อดูโครงสร้างของเฟอไรต์และเพอร์ไรต์ โดยอยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM : A 247-17 ดังภาพที่ 7



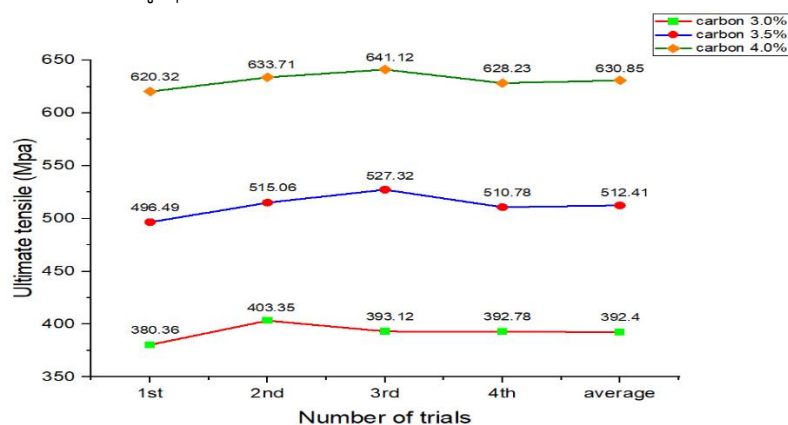
ภาพที่ 7 ดูโครงสร้างจุลภาคของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์ MICROSCOPE MODEL : JAPAN 258203

3.4 วิเคราะห์อัตราส่วนผสมของชิ้นงาน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมของโลหะแบบตั้งโต๊ะ SPECTROMETER MODEL : F – MATE BRAND NAME : BAIRD FOUNDRY MATE

การทดลองและวิเคราะห์ผล

เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณคาร์บอนที่มีผลกระทบต่อเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม โดยมีปริมาณคาร์บอนที่ใช้ในการหล่อเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่ต่างกัน คือ 3.0% , 3.5% และ 4.0% อย่างละ 4 ชิ้นงานตัวอย่าง รวม 12 ชิ้น ผลที่ได้จากการวิจัยซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะแบ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ออกเป็น 6 ส่วนดังนี้

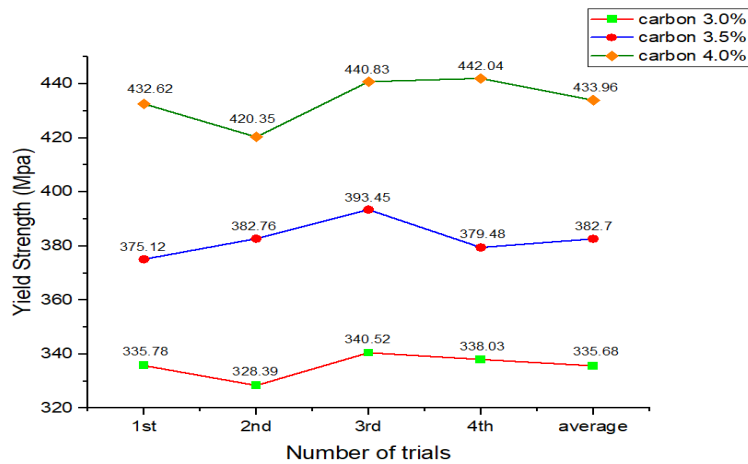
1 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile Strength)



ภาพที่ 8 กราฟแสดงค่า Ultimate tensile Strength

จากภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อวัดค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile Strength) เผยให้เห็นว่า เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 4.0% จะมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุด โดยมีค่าความเค้นเฉลี่ยเท่ากับ 630.85 N/mm^2 และเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.5% มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 512.41 N/mm^2 ในขณะที่เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% จะมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุด โดยมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยอยู่ที่ 392.40 N/mm^2 ตามลำดับ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่สูงขึ้นจะไปเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของแกรไฟต์กลมให้เพิ่มขึ้น จึงสามารถต้านทานแรงดึงได้ดี

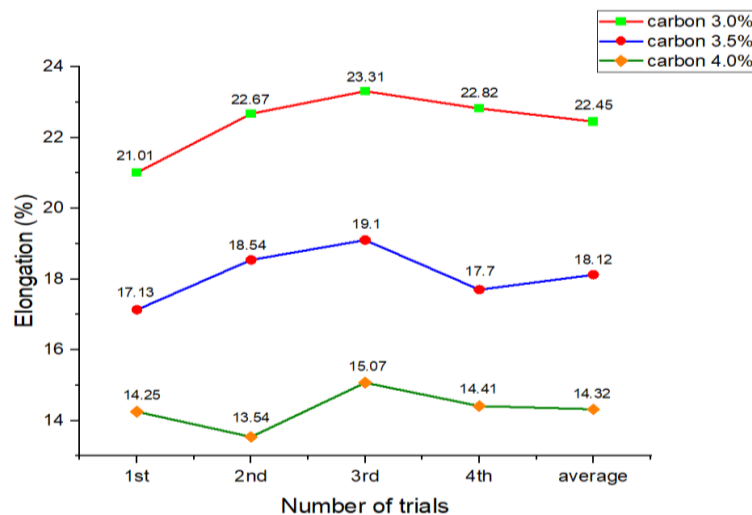
2 ค่าความเค้นสูงสุด (Yield Strength)



ภาพที่ 9 กราฟแสดงค่า Yield Strength

จากภาพที่ 9 แสดงให้เห็นว่า ค่าความเค้นสูงสุด (Yield Strength) เผยให้เห็นว่า เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 4.0% จะมีค่าความเค้นเฉลี่ยมากที่สุด โดยมีค่าความเค้นเฉลี่ยเท่ากับ 433.96 N/mm^2 และปริมาณคาร์บอน 3.5% มีค่าความเค้นเฉลี่ยเท่ากับ 382.7 N/mm^2 ในขณะที่ชิ้นงานตัวอย่างที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% จะมีค่าความเค้นน้อยที่สุด โดยมีค่าความเค้นเฉลี่ยอยู่ที่ 335.68 N/mm^2 ตามลำดับของปริมาณคาร์บอนเนื่องจากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่สูงขึ้นจะไปเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของแกรไฟต์กลมให้เพิ่มขึ้น จึงสามารถต้านทานแรงดึงได้ดี

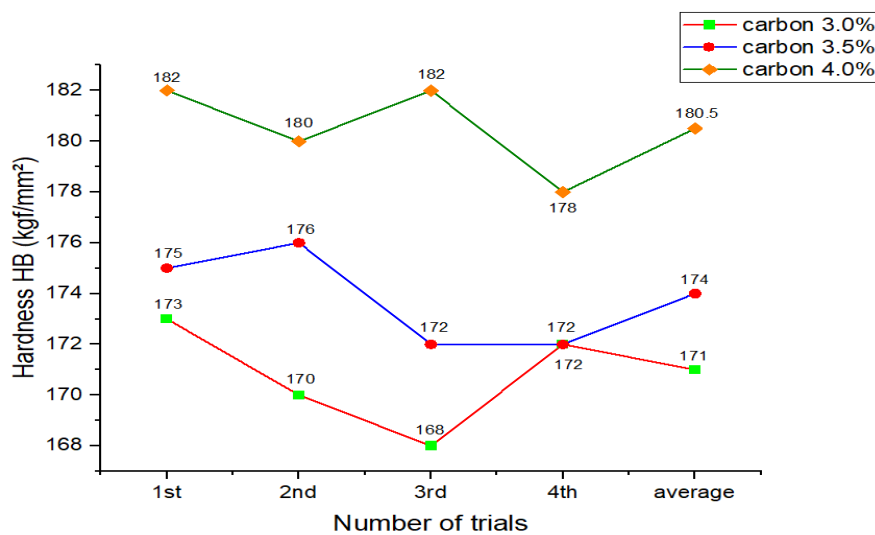
3 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation)



ภาพที่ 10 กราฟแสดงค่า Elongation

จากภาพที่ 10 แสดงให้เห็นว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด (Elongation) เผยให้เห็นว่า ปริมาณคาร์บอน 3.0% มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยมากที่สุด โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 22.45% และที่มีปริมาณคาร์บอน 3.5% มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 18.12% ในขณะที่ปริมาณคาร์บอน 4.0% จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ 14.32% ตามลำดับ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนลดลงจะส่งผลให้มีปริมาณแกรไฟต์น้อยลง และจะมีพื้นที่ของ Matrix มีสัดส่วนสูงขึ้นโดยเฉพาะเฟิร์ลไลต์ จึงทำให้เกิดความยืดตัวได้มากกว่า ซึ่งส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนยิ่งต่ำจะมีคุณสมบัติที่ อ่อนแต่เหนียว

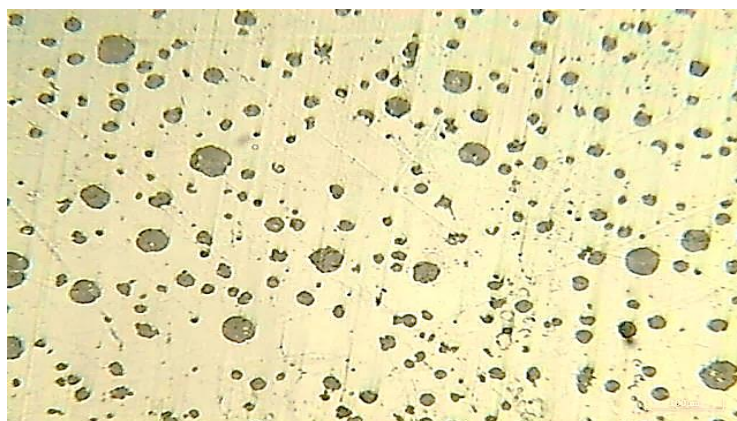
4 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (Hardness HB)



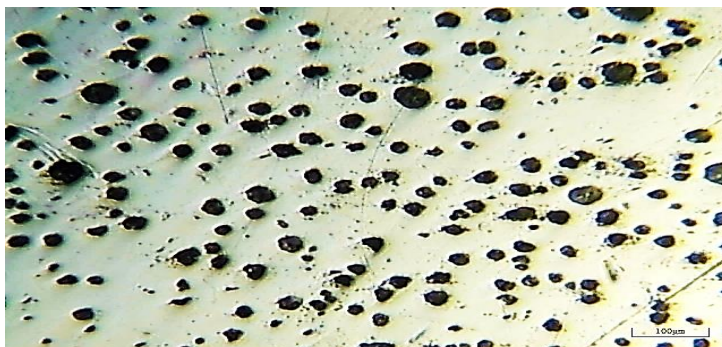
ภาพที่ 11 กราฟแสดงค่า Hardness HB

จากภาพที่ 11 แสดงให้เห็นว่า ค่าความแข็งของวัสดุ (Hardness HB) เผยให้เห็นว่า ชิ้นงานที่มีปริมาณคาร์บอน 4.0% จะมีค่าความแข็งมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 180.5 HB และที่มีชิ้นงานตัวอย่างที่มีปริมาณคาร์บอน 3.5% มีค่าความแข็งเท่ากับ 173.75 HB ในขณะที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% จะมีค่าความแข็งน้อยที่สุด โดยมีค่าความแข็งของวัสดุเฉลี่ยอยู่ที่ 170.75 HB ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่สูงขึ้นจะไปเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของปริมาณแกรไฟต์กลมให้เพิ่มขึ้นตาม จึงส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนยิ่งสูง ค่าความแข็งของวัสดุก็จะสูงขึ้นตามอย่างมีนัยสำคัญ

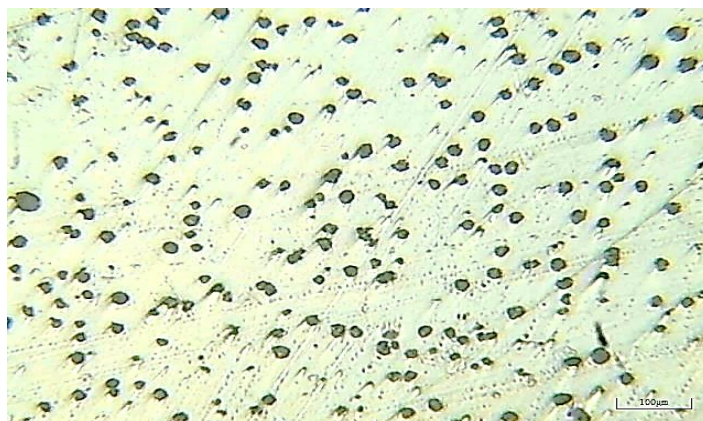
5 ศึกษาโครงสร้างชิ้นงาน เพื่อส่องดูโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมปริมาณคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ดังภาพที่ 12,13 และ 14



ภาพที่ 12 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมปริมาณคาร์บอน 3.0% (X100 μm)

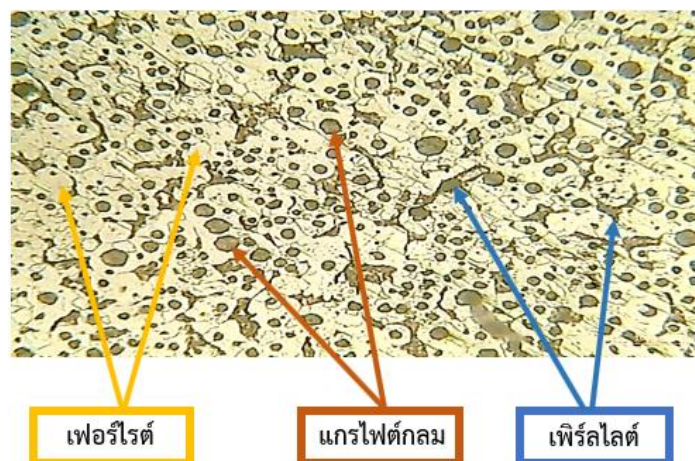


ภาพที่ 13 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมปริมาณคาร์บอน 3.5% (X100 μm)

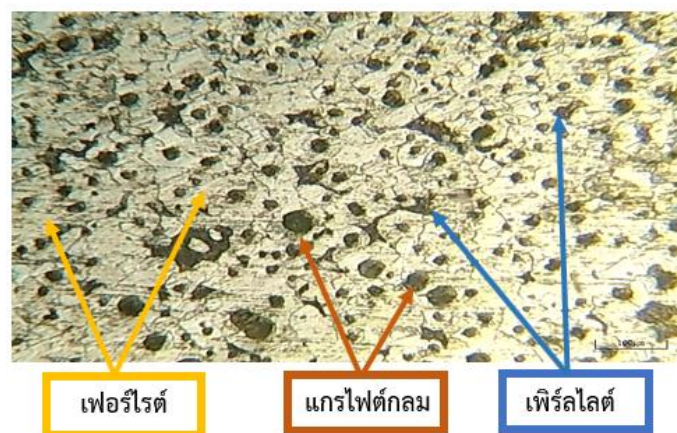


ภาพที่ 14 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมปริมาณคาร์บอน 4.0% (X100 μm)

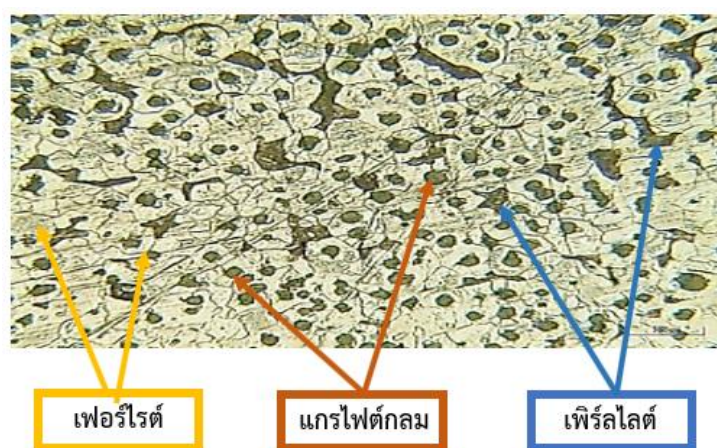
จากภาพที่ 11, 12 และ 13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมชิ้นงานตัวอย่างเข้าสู่กล้องจุลทรรศน์ MICROSCOPE MODEL : JAPAN 258203 BRAND NAME : NIKON ใช้ขนาดความละเอียดในการซูมของเลนส์เท่ากับ 100 μm จะเผยให้เห็นสภาพโครงสร้างจุลภาคจะมีลักษณะของแกรไฟต์ที่กลม หรือ คาร์บอนบริสุทธิ์ที่รวมตัวอยู่ในเนื้อเหล็กจับรวมตัวกันมีลักษณะเป็นวงกลมดี ไม่มีการเสียรูปร่างเป็นเส้นแนวยาวหรือเป็นแบบลักษณะตัวหนอน ซึ่งถือว่าเป็นโครงสร้างที่ผ่านขั้นตอนในกระบวนการหลอมที่ดี ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม และมีลักษณะโครงสร้างใกล้เคียงกันทั้ง 3 ค่าของปริมาณคาร์บอน



ภาพที่ 14 โครงสร้างจุลภาคของเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์ปริมาณคาร์บอน 3.0% (X100 μm)



ภาพที่ 15 โครงสร้างจุลภาคของเพอร์ไรต์และเฟอไรต์ปริมาณคาร์บอน 3.5% (X100 μm)



ภาพที่ 16 โครงสร้างจุลภาคของเพอร์ไรต์และเฟอไรต์ปริมาณคาร์บอน 4.0% (X100 μm)

จากภาพที่ 14, 15 และ 16 จะเผยให้เห็นสภาพของลักษณะโครงสร้างจุลภาคชั้นของโครงสร้างเพอร์ไรต์ที่เป็นชั้นๆ ที่มีสีขาวและชั้นของโครงสร้างเฟอไรต์ที่เป็นชั้นๆ ที่มีสีดำ ได้อย่างชัดเจน จากการมองลักษณะของโครงสร้างจุลภาคด้วยตาเปล่าจะแสดงให้เห็นว่า ปริมาณโครงสร้างของเพอร์ไรต์จะมีอยู่ประมาณ 80% ของพื้นที่ และปริมาณโครงสร้างของเฟอไรต์จะมีอยู่ประมาณ 20% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของโครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม โครงสร้างในภาพแสดงลักษณะของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มี matrix มีเพอร์ไรต์เป็นส่วนใหญ่ร้อยละ 80 และมีเฟอไรต์ร้อยละ 20 ซึ่งบ่งบอกถึงเหล็กที่มีความเหนียวสูง เหมาะกับงานที่ต้องการการดูดซับแรงกระแทกหรือการเสียรูปแบบยืดหยุ่น

6 อัตราส่วนผสม การวิเคราะห์อัตราส่วนผสมของโลหะ ใช้เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมของโลหะแบบตั้งโต๊ะ SPECTROMETER MODEL : F – MATE BRAND NAME : BAIRD FOUNDRY MATE เพื่อทดสอบปริมาณส่วนผสมทั้งหมด แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนผสมภายในของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมชิ้นงาน ที่เผยให้เห็นว่า อัตราส่วนผสมของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% จะมีปริมาณธาตุหลักผสมอยู่ประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) , ซิลิคอน (Si) , แมงกานีส (Mn) , ฟอสฟอรัส (P) , กำมะถัน (S) , โครเมียม (Cr) , แมกนีเซียม (Mg) , เหล็ก (Fe) และมีเปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนผสมทั้งหมด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณค่า 3.0% , 3.5% และ 4.0%

ชื่อเคมี	ชื่อเคมีอังกฤษ	สัญลักษณ์ธาตุ	เลขอะตอม	ปริมาณที่ใช้ (%)		
				Carbon 3.0%	Carbon 3.5%	Carbon 4.0%
คาร์บอน	Carbon	C	6	3.07	3.53	4.01
ซิลิคอน	Silicon	Si	14	2.72	2.69	2.67
แมงกานีส	Manganese	Mn	25	0.29	0.293	0.293
ฟอสฟอรัส	Phosphorus	P	15	0.0149	0.0166	0.0161
กำมะถัน	Sulfur	S	16	0.0084	0.0093	0.0072
โครเมียม	Chromium	Cr	24	0.052	0.0518	0.0508
แมกนีเซียม	Magnesium	Mg	12	0.0406	0.0374	0.0366
เหล็ก	Iron	Fe	26	93.4	93.0	92.5

สรุปผล

1 จากการทดลองหาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดสรุปผลได้ว่า ผลหาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) ชิ้นงานที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 4.0% มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 630.85 Mpa และที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 512.41 Mpa ค่าความต้านทานแรงดึงมีความสัมพันธ์ผกผันกับปริมาณคาร์บอน กล่าวคือ เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าความความต้านทานแรงดึงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามของปริมาณคาร์บอน ซึ่งผ่านเกณฑ์ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: A 536 – 84

2 จากการทดลองหาค่าความเค้นสูงสุดสรุปผลได้ว่า ผลหาค่าความเค้นสูงสุดของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) ชิ้นงานที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 4.0% มีค่าความเค้นเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 433.96 Mpa และที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% มีค่าความเค้นเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 335.68 Mpa ค่าความเค้นมีความสัมพันธ์ผกผันกับปริมาณคาร์บอน กล่าวคือ เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามของปริมาณคาร์บอน ผ่านเกณฑ์ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: A 536 – 84

3 จากการทดลองหาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดสรุปผลได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) ชิ้นงานที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 22.45% และที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 4.0% มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 14.32% ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีความสัมพันธ์ผกผันกับปริมาณคาร์บอน กล่าวคือ เมื่อปริมาณคาร์บอนน้อยลง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามของปริมาณคาร์บอน ผ่านเกณฑ์ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: A 536 – 84 ของปริมาณคาร์บอนทั้ง 3 ค่า

4 จากการทดลองหาค่าความแข็งสรุปผลได้ว่า ค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ทดลองด้วยเครื่องทดสอบความแข็งของวัสดุ (Hardness tester HB) ชิ้นงานที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 4.0% มีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 180.5 kg/mm² และที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% มีค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 170.75 kg/mm² ค่าความแข็งของวัสดุมีความสัมพันธ์ผกผันกับปริมาณคาร์บอน กล่าวคือ เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าความความแข็งของวัสดุจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามของปริมาณคาร์บอน ผ่านเกณฑ์ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: E 140 – 02 ของปริมาณคาร์บอนทั้ง 3 ค่า

5 จากการส่องกล้องจุลทรรศน์สรุปเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคเกรน มีดังนี้

1) จากการนำชิ้นงานส่องกล้องจุลทรรศน์เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเกรนของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ด้วยขนาดความละเอียดของเลนส์เท่ากับ 100 μm จะเห็นได้ว่า สภาพโครงสร้างจุลภาคจะมีลักษณะของแกรไฟต์ที่กลม กล่าวคือ คาร์บอนบริสุทธิ์ที่รวมตัวอยู่ในเนื้อเหล็กจับรวมตัวกันมีลักษณะเป็นวงกลมดี ไม่มีการเสียรูปร่างเป็นแบบลักษณะตัวหนอน เป็นโครงสร้างที่ผ่านกระบวนการหลอมที่ดี และผ่านเกณฑ์ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: A 247 – 19

2) จากการนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัดกร่อนด้วยกรดกัดกร่อน มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคปริมาณของเฟอร์ไรต์และเพอร์ไรต์ของชิ้นงานที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ด้วยขนาดความละเอียดของเลนส์เท่ากับ 100 μm จะเห็นได้ว่า สภาพโครงสร้างจุลภาคชั้นของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่เป็นชั้นสีขาว และชั้นของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่เป็นชั้นสีดำ ได้อย่างชัดเจน จากการมองลักษณะของโครงสร้างจุลภาคด้วยตาเปล่าจะแสดงให้เห็นว่า ปริมาณโครงสร้างของเพอร์ไรต์จะมีอยู่ประมาณ 80% ของพื้นที่ และปริมาณโครงสร้างของเฟอร์ไรต์จะมีอยู่ประมาณ 20% ผ่านเกณฑ์ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: A 247 – 19

6 การทดสอบแยกอัตราส่วนผสมโลหะอยู่ภายในเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ผลการทดสอบเผยให้เห็นว่า อัตราส่วนผสมของโลหะที่อยู่ภายในชิ้นงานนั้น มีเปอร์เซ็นต์ของธาตุโลหะ ดังตารางที่ 1 ซึ่งปริมาณของธาตุโลหะต่างๆ มีเปอร์เซ็นต์ $\pm$ ไม่เกิน 1% ในเกณฑ์การทดสอบอัตราส่วนชิ้นงานตัวอย่าง อยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation : A 536-84

เอกสารอ้างอิง

ณัฐพงศ์ สุวรรณมณี. (2554). *โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กหล่ออบเหนียวภายหลังการอบชุบด้วยความร้อน*.

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2558). *วัสดุวิศวกรรม*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งซีเอ็ดยูเคชั่น.

สุทธิเกียรติ ปิยะศรีสวัสดิ์. (2556). *การศึกษาปัจจัยในกระบวนการหล่อโลหะที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศในชิ้นส่วนยานยนต์*.

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

สุรสิทธิ์ แก้วพระอินทร์. (2553). *โลหะวิทยาเบื้องต้น*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งซีเอ็ดยูเคชั่น.

สารัมภ์ บุญมี. (2563). *ผลของโครงสร้างผิวงานหล่อต่อสมบัติเชิงกลในเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว*.

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, วิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ASTM Designation: A 197/A 197M – 00. (2000). *Standard Specification for Cupola Malleable Iron*. American Society for Testing and Materials.

ASTM Designation: A247 – 19. (2019). *Standard Test Method for Evaluating Microstructure of Graphite in Iron Castings*. American Society for Testing and Materials.

ASTM Designation: A 536 – 84. (1984). *Standard Specification for Ductile Iron Castings*. American Society for Testing and Materials.

ASTM Designation: E 140 – 02. (2002). *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*. American Society for Testing and Materials.

Boonmee, S. (2020). *Effect of Cast Surface Structure on the Mechanical Properties of Nodular Cast Iron and Ductile Cast Iron*. (Bachelor of Engineering, Suranaree University of Technology).

- Goodrich and R.W. Lobenhofer. (2012). *Effect of Cooling rate on ductile iron Mechanical Properties*. Journal of Materials Engineering and Performance.
- Kaewpharin, S. (2010). *Introduction to Metallurgy*. Bangkok: SE-Education Publishing.
- Piyasrisawat, S. (2013). *Study of Factors in the Metal Casting Process Affecting the Formation of Air Bubbles in Automotive Parts*. (Bachelor of Engineering, Silpakorn University).
- Suwanmanee, N. (2011). *Microstructure and Mechanical Properties of Tempered Ductile Cast Iron After Heat Treatment*. (Bachelor of Engineering, Srinakharinwirot University).
- Thamachote, N. (2015). *Engineering Materials*. Bangkok: SE-Education Publishing.

Translated Thai References

- Natthaphong Suwanmanee. (2011). *Microstructure and mechanical properties of ductile cast iron after heat treatment*. Bachelor of Engineering, Srinakharinwirot University.
- Narongsak Thammachote. (2015). *Engineering materials*. Bangkok: SE-Education Publishing.
- Saram Boonmee. (2020). Effect of casting skin on mechanical properties in compacted graphite and ductile irons , Suranaree College of Technology.
- Sutthikiat Piyasrisawat. (2013). Study of foundry process factors affecting on the formation of air bubble in automotive parts. Bachelor of Engineering, Silpakorn University.
- Surasit Kaewphra-in. (2010). Basic metallurgy. Bangkok: SE-Education Publishing.

Received: Mar 16, 2025

Revised: Jun 13, 2025

Accepted: Jun 18, 2025

การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ระบบการวัดกรณีของซิกซ์ ซิกม่าสำหรับการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพระบบการวัดแขนหัวอ่าน

THE APPLICATION OF GAUGE R&R ANALYSIS IN A SIX SIGMA CASE OF IMPROVING AND OPTIMIZING AN ACTUATOR ARM MEASUREMENT SYSTEM

ธนพงศ์ วรรณพราหมณ์¹ โกสินทร์ชัย แผ้วไธสง^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี

²ภาควิชาเทคโนโลยี วิทยาลัยพัฒนาชุมชนเมือง มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช

Thanapong Wannapram¹ Kosinchai Pawthaisong^{2*}

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Pathunthani University

²Department of Technology, Urban Community Development College, Navamindradhiraj University

Corresponding author: E-mail: kosinchai@nmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษากระบวนการวัดของผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพการวัดและลดต้นทุนข้อบกพร่องโดยการประยุกต์ใช้ตามหลักแนวคิดซิกซ์ ซิกม่า ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนของ DMAIC เริ่มจากขั้นตอนการกำหนดปัญหา (Define, D) ซึ่งพบว่าปัญหาหลักคือการส่งแขนหัวอ่านที่มีค่าพารามิเตอร์ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดให้กับลูกค้า ซึ่งสาเหตุเกิดจากการวัดค่า (Measurement, M) พารามิเตอร์ของชิ้นงานไม่มีความสอดคล้องกันระหว่างแผนก IPQC และ OQA หลังจากนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ (Analyze, A) โดยใช้แผนภูมิแกงปลา พบว่าปัจจัยเกี่ยวข้องกับเครื่องมือวัด CMM ของแต่ละแผนก ผู้ปฏิบัติงาน และวิธีการวัด สำหรับขั้นตอนของการปรับปรุงพัฒนา (Improve, I) ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงกระบวนการวัด โดยสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ CMM การอบรมผู้ปฏิบัติงาน และออกแบบอุปกรณ์จับชิ้นงาน สุดท้าย ขั้นตอนการควบคุม (Control, C) ได้ดำเนินการทดลองอย่างเข้มงวด ผลการศึกษาพบว่าจำนวนสินค้าที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดลดลงจาก 121 เหลือ 6 ชิ้น/เดือน และต้นทุนค่าร้องเรียนจากลูกค้าลดลงจาก 24,308 เหลือ 1,200 บาท/เดือน

คำสำคัญ : การวิเคราะห์ระบบการวัด, ซิกซ์ ซิกม่า, แขนหัวอ่าน

Abstract

The study of this research was the measurement system of electronic component manufacturers for purposes of improving the quality of measurement and reducing the cost of defects by applying the Six Sigma methodology. The study followed the DMAIC approach. In the Define phase, the key problem was identified as the delivery of actuator arms with parameter deviations from customer requirements. It was caused by the parameter measurements (Measurement, M) of the part being inconsistent between the IPQC and OQA departments. After that, the analysis (Analyze, A) was performed a cause-and-effect diagram. It was found by the factors related to the Coordinate-Measuring Machine (CMM) of each department,

operators and measurement method. For the improvement stage (Improve, I), the researcher designed and improved the measurement process by checking the time comparison of 3D CMM machines, training operators, and designing of workpiece holding devices. Finally, the control step (Control, C) was seriously experimented. The result showed that after an improved measurement method, the number of products that were not required was reduced from 121 to 6 pieces/month and the cost of customer complaints decreased from 24,308 baht to 1,200 baht/month.

Keywords: Measurement system analysis, Six-sigma, Actuator arm

บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตเครื่องคอมพิวเตอร์และชิ้นส่วน (Printer และ Hard Disk Drive) เป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ โดยมีมูลค่าการส่งออกมากที่สุดเป็นอันดับที่หนึ่งจากข้อมูลการส่งออกในช่วงเดือนมกราคมถึงธันวาคม 2567 มีมูลค่า 52,201.2 ล้านบาทต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 14.3 โดยเฉพาะการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive: HDD) และส่วนประกอบ ที่มีการแข่งขันอย่างรุนแรงจากต่างประเทศทั้งด้านคุณภาพและราคาสินค้า ดังนั้นการลดต้นทุนการผลิตและรักษาคุณภาพของสินค้าจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการดำเนินธุรกิจ (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2567)

บริษัทกรณีศึกษาซึ่งเป็นผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบในคอมพิวเตอร์จำพวกตัวจับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ จากการดำเนินงานช่วง 3 เดือนที่ผ่านมา พบปัญหาการส่งมอบสินค้าไม่เป็นไปตามข้อกำหนดจำนวน 364 ชิ้น (121 ชิ้น/เดือน) คิดเป็นมูลค่า 72,924 บาท (24,308 บาท/เดือน) ซึ่งเกิดจากขั้นตอนการตรวจสอบชิ้นงานด้วยเครื่อง coordinate measuring machine (CMM) ระหว่างแผนกตรวจสอบก่อนส่งมอบชิ้นงานให้แก่ลูกค้า (Out-going Quality Assurance: OQA) กับแผนกตรวจสอบระหว่างกระบวนการผลิต (In Process Quality Checking: IPQC) โดยวัดค่าที่ได้ไม่มีความสอดคล้องกัน (รูปที่ 6a) ส่งผลให้ขาดความน่าเชื่อถือในการตรวจสอบการวัดชิ้นงาน จากการเก็บข้อมูลปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการตรวจสอบมีสาเหตุเกิดจากเครื่องมือวัด อุปกรณ์จับชิ้นงาน คน เครื่องมือวัด และกระบวนการวัด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงคุณภาพการวัดของแผนก IPQC ให้มีความสอดคล้องกับแผนก OQA รวมทั้งการลดต้นทุนการส่งมอบชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องให้ลูกค้า โดยการประยุกต์ใช้ตามหลักแนวคิดของซิกซ์ ซิกมาประกอบด้วย 5 ขั้นตอนของ DMAIC ได้แก่ (1) การกำหนดปัญหา (2) วิเคราะห์สาเหตุ (3) การวิเคราะห์ (4) การปรับปรุง และ (5) การควบคุม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อแก้ไขปัญหาการวัดจากเครื่องมือ CMM ที่มีความคลาดเคลื่อน ส่งผลให้ชิ้นงานถูกจัดว่าไม่ผ่านเกณฑ์การตรวจสอบ (NG)
2. เพื่อปรับปรุงความสอดคล้องของผลการวัดชิ้นงานระหว่างหน่วยงาน IPQC และ OQA ให้มีความแม่นยำและเทียบเคียงกันได้

ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการวัดและวิเคราะห์ค่าการวัดของพนักงานจำนวน 3 คน โดยเน้นที่ความแตกต่างระหว่างบุคคล
2. ศึกษาผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจสอบชิ้นงานจำนวน 10 ชิ้น ด้วยเครื่องมือวัด 3 มิติ (CMM)
3. ดำเนินการทดลองการวัดตามหลักเกณฑ์ของ MSA โดยให้ผู้ตรวจสอบแต่ละคนวัดชิ้นงานซ้ำจำนวน 3 ครั้ง
4. บันทึกและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้โดยใช้โปรแกรม Excel และ Minitab เพื่อประเมินค่าความแปรปรวนของระบบการวัด

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) เป็นวิธีการใช้เครื่องมือเพื่อลดความผันแปรและข้อบกพร่องสำหรับการส่งมอบผลิตภัณฑ์และบริการตามข้อกำหนดของลูกค้า (Greg Brue and Rod Howes, 2008) โดยแนวคิดหลักของการจัดการ Six Sigma กล่าวคือ ถ้าวัดความผันแปรและข้อบกพร่องในกระบวนการได้ จึงสามารถกำหนดวิธีการลดหรือกำจัดปัญหาเหล่านี้ได้อย่างเป็นระบบ เพื่อยกระดับคุณภาพที่มีข้อบกพร่องเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้น Six Sigma มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยลดต้นทุนและสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าได้ดีขึ้น

สำหรับแนวคิดของซิกซ์ ซิกมาประกอบด้วย 5 ขั้นตอนของ DMAIC ได้แก่ (1) การกำหนดปัญหา (Define) (2) วิธีการวัด (Measurement) (3) การวิเคราะห์ (Analyze) (4) การปรับปรุง (Improve) และ (5) ขั้นตอนการควบคุม (Control) โดยนักวิจัยได้นำหลักการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ด้านการปรับปรุงคุณภาพระบบการวัดหรือการปรับปรุงการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ (Uluskan, 2021: Tirelo et al., 2023: Phillip et al., 2022: Uluskan, 2021: Shirodkar, A., & Rane, S: กิตติภาพและคณะฯ, 2565)

วิธีดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยได้นำวิธีการ Six Sigma มาเป็นแนวทางการดำเนินงานสำหรับการวิจัยนี้ ตามกระบวนการ DMAIC ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลำดับกระบวนการ DMAIC และเนื้อหาของงานวิจัย

ลำดับ	ชื่อขั้นตอน	วัตถุประสงค์	กิจกรรมหลัก
1	การกำหนด (Define)	กำหนดลักษณะการวิจัยทั้งหมดเพื่อกำหนดขอบเขตของการวิจัยและระบุวัตถุประสงค์การวิจัย	กำหนดปัญหาการวิจัย กำหนดภารกิจและวัตถุประสงค์การวิจัย กำหนดผลิตภัณฑ์ กำหนดระบบการวัด กำหนดกระบวนการวัด
2	การวัด (Measurement)	ทดลองวัดตัวอย่างผลิตภัณฑ์เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูล	การเตรียมการทดลอง • การเตรียมสถานที่ทดลอง • การเตรียมวัสดุทดลอง • การเตรียมการทดลอง • ทำการทดลอง • รวบรวมข้อมูล
3	การวิเคราะห์ (Analyze)	ค้นหาสาเหตุแท้จริงของการวัดที่ผิดพลาด	การวิเคราะห์เชิงสถิติ การวิเคราะห์ด้วยกราฟ และ การวิเคราะห์สาเหตุหลัก
4	การปรับปรุง (Improve)	แก้ไขการวัดที่ผิดพลาดและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการวัด	การซ่อมแซมเกจ การตรวจสอบโพรบ การทดสอบเครื่องมือวัด และการบำรุงรักษา
5	การควบคุม (Control)	การควบคุมคุณภาพการวัดให้มีความสอดคล้องระหว่างแผนก IPQC และ OQA	การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระบบการวัดของแผนก IPQC และ OQA

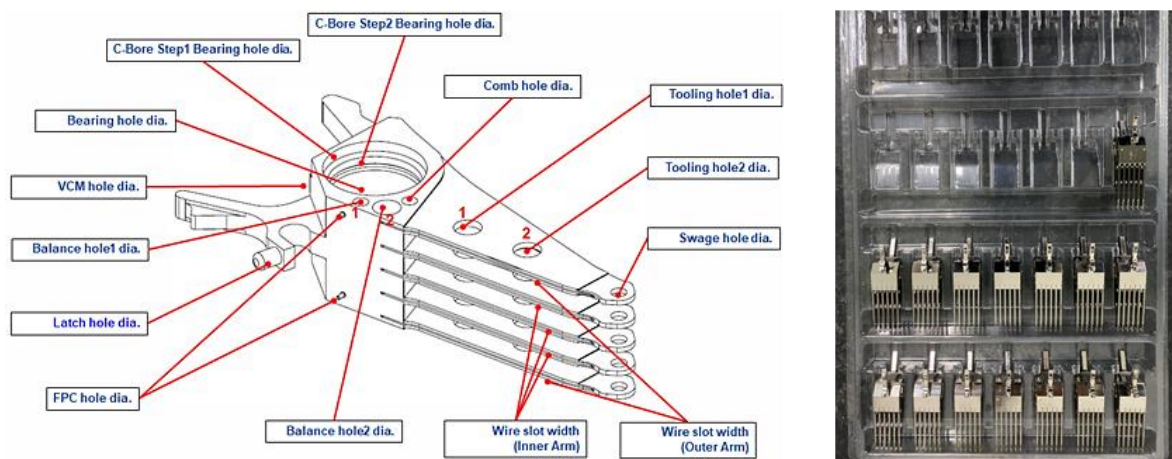
1. ขั้นตอนการกำหนด (Define, D)

1.1 การกำหนดปัญหา จากข้อร้องเรียนของทางบริษัทลูกค้าพบปัญหาคือลูกค้าได้รับผลิตภัณฑ์แชนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดจำนวนมากจากบริษัท โดยสาเหตุเกิดจากระบบการวัดของแผนก IPQC กับแผนก OQA มีค่าที่ไม่สอดคล้องกัน ส่งผลทำให้ไม่มีความน่าเชื่อถือในการตรวจสอบการวัดชิ้นงาน

1.2 กำหนดพันธกิจและวัตถุประสงค์การวิจัย พันธกิจและวัตถุประสงค์งานวิจัยนี้มีพันธกิจ 2 อย่างดังนี้

- ค้นหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหากระบวนการวัด เนื่องจากไม่สามารถวัดรูปร่างผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ
- แก้ไขปัญหากระบวนการวัดที่ผิดพลาด เพื่อกำจัดข้อผิดพลาดของการวัดและหยุดการขนส่งผลิตภัณฑ์แขนหัวอ่านที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดให้กับลูกค้า

1.3 กำหนดผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษาเรียกว่าแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Actuator Arm) ที่มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กยาวๆ ซึ่งรับคำสั่งจากวงจรให้เลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ ไม่ว่าจะเป็นการอ่านหรือเขียนข้อมูลลงบนแผ่นแม่เหล็ก โดยต้องทำงานร่วมกับหัวอ่าน สำหรับผลิตภัณฑ์ดังกล่าวที่ส่งมอบให้กับลูกค้าแสดงดังรูปที่ 1 และมีข้อกำหนดต่าง ๆ (Specifications) ดังตารางที่ 2



รูปที่ 1 แบบผลิตภัณฑ์และชิ้นงานที่ส่งให้กับลูกค้า

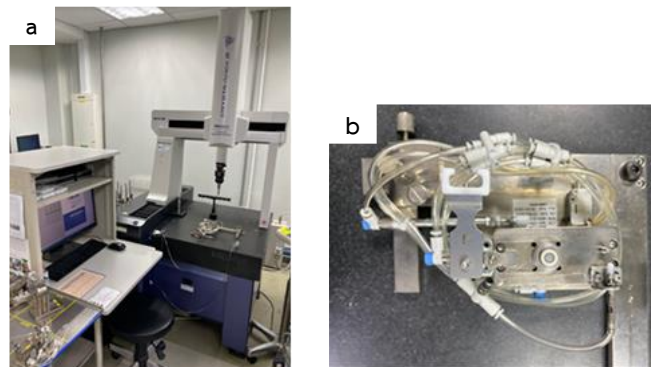
1.4 กำหนดระบบการวัด ประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

1.4.1 เครื่อง CMM (Coordinate Measuring Machine) เครื่องวัดชนิดนี้ มีความละเอียดสูงประมาณ 0.0001 mm (0.000004 in) สามารถวัดได้ 3 แกน คือ แกนระนาบ 2 แกน และแนวตั้ง 1 แกน โดยเครื่องวัดแสดงดังรูปที่ 2a ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยระบบแรงดันลมในการควบคุมการทรงตัวของโต๊ะ และช่วยลดแรงสั่นสะเทือนจากปัจจัยภายนอกได้ ซึ่งลมที่อัดเข้าจะมี ความชื้น จึงมีความเสี่ยงทำให้ระบบภายในอาจเป็นสนิมได้ เครื่องวัดแบบ 3 มิติทุกรุ่นจึงมีตัวกรอง ซึ่งช่วยในการกรองระบบ ภายในให้เป็นอากาศแห้ง โดยการเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกนนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยระบบอัตโนมัติ สามารถวัดค่าและแสดงผลได้แบบ 3D แบบ Manual (ปรับค่าเอง) แบบ CNC (อัตโนมัติ) สามารถติดตั้งโปรแกรมเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลค่าพารามิเตอร์จากการวัด การคำนวณและการวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงการเปลี่ยนใช้ฟังก์ชันต่างๆ โดยใช้ระบบสัมผัส (Touch probe) ที่มีความละเอียดและแม่นยำสูง จึงทำให้เครื่อง CMM นำมาใช้ในการอุตสาหกรรมทุกประเภท

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดของลูกค้า

Parameter Name	Control Specifications (INCH)	USL	LSL	Inspection Method
BEARING_HOLE_DIA	$\varnothing 0.4172 \pm 0.0004$	0.0004	-0.0004	CMM
BEARING_HOLE_DIA_OZ	$\varnothing 0.4172 \pm 0.0004$	0.0004	-0.0004	CMM
SWAGE_HOLE_DIAMETER_1	$\varnothing 0.0738 \pm 0.0004$	0.0004	-0.0004	CMM
TRUE_POSITION_SWAGE_HOLE_1	0.0040	0.0040	0.0000	CMM
SWAGE_HOLE_DIAMETER_2	$\varnothing 0.0738 \pm 0.0004$	0.0004	-0.0004	CMM

Parameter Name	Control Specifications (INCH)	USL	LSL	Inspection Method
TRUE POSITION SWAGE HOLE_2	0.0040	0.0040	0.0000	CMM
SAWAGE HOLE DIAMETER_3	$\varnothing 0.0738 \pm 0.0004$	0.0004	-0.0004	CMM
TRUE POSITION SWAGE HOLE_3	0.0040	0.0040	0.0000	CMM
SWAGE HOLE DIAMETER_4	$\varnothing 0.0738 \pm 0.0004$	0.0004	-0.0004	CMM
TRUE POSITION SWAGE HOLE_4	0.0040	0.0040	0.0000	CMM
SWAGE HOLE DIAMETER_5	$\varnothing 0.0738 \pm 0.0004$	0.0004	-0.0004	CMM
TRUE POSITION SWAGE HOLE_5	0.0040	0.0040	0.0000	CMM
SWAGE HOLE DIAMETER_6	$\varnothing 0.0738 \pm 0.0004$	0.0004	-0.0004	CMM
TRUE POSITION SWAGE HOLE_6	0.0040	0.0040	0.0000	CMM
CS PROFILE (LONG)#1	0.000 ± 0.002	0.0020	-0.0020	CMM
CS PROFILE (BIAS)#2	0.000 ± 0.002	0.0020	-0.0020	CMM



ภาพที่ 2 (a) เครื่อง CMM (Coordinate Measuring Machine) หรือเครื่องมือวัด 3 มิติ (b) อุปกรณ์จับชิ้นงาน (Jig Fixture)

1.4.2 อุปกรณ์จับชิ้นงาน (Jig Fixture) อุปกรณ์จับยึดและอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง (ภาพที่ 2b) คือการใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบเพื่อจับยึดชิ้นงาน หรือ ช่วยกำหนดตำแหน่งของชิ้นงานในการทำงานนั้น ๆ ให้มีความคงที่ เทียบตรง ทุกครั้งที่ทำงาน เป็นวิธีการที่ช่วยให้ทำงานได้สะดวก รวดเร็ว และได้คุณภาพ อันจะนำมาสู่การประหยัดเวลา และลดต้นทุนในการผลิต

1.5 กำหนดกระบวนการวัด ผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องตรวจสอบสภาพของเครื่องมือวัดสามมิติและอุปกรณ์จับชิ้นงานว่าอยู่ในสภาพใช้งานได้ ก่อนทำการตรวจวัด จากนั้นผู้ตรวจสอบจะประมวลผลการวัดตามลำดับขั้นตอนต่อไปนี้

ตรวจสอบอุณหภูมิห้องปฏิบัติการให้อยู่ที่ 20 ± 2 องศาเซลเซียส

ตรวจสอบและทำความสะอาดชิ้นงานและอุปกรณ์จับชิ้นงาน

เข้าสู่โปรแกรมวัดชิ้นงานอัตโนมัติเพื่อเริ่มต้นวัดชิ้นงาน โดยซอฟต์แวร์จะส่งข้อมูลตัวเลขของชิ้นงานเป็นไฟล์ .txt

นำข้อมูลตัวเลขจากไฟล์ .txt นำเข้าซอฟต์แวร์ Excel เพื่ออ่านค่าข้อมูลตัวเลขชิ้นงาน

2. การวัด (Measurement, M)

การวัดนั้นใช้ชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 10 ตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง CMM ของแผนก IPQC เพื่อทำการทดลองการวัดซ้ำ (Replicates) 3 ครั้ง ผู้ตรวจวัด 3 คน ในการทำ Gauge R&R ตามคู่มือ MSA ที่อ้างอิงในการเตรียมการและประมวลผลการทดลอง สำหรับขั้นตอนการควบคุมความคลาดเคลื่อน (Errors) ของชิ้นงานระหว่างแผนก IPQC กับแผนก OQA ใช้การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองของแผนก IPQC และ OQA

2.1 การเตรียมการทดลอง มีการเตรียมการทดลองอย่างถูกต้องก่อนทดลองเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือ

2.2 การเตรียมสถานที่ทดลอง การทดลองทั้งหมดดำเนินการในห้องปฏิบัติการผลิตภัณฑ์ของบริษัทกรณีศึกษา เพื่อให้มั่นใจในความสามารถที่เป็นมืออาชีพ ความปลอดภัย ประสิทธิภาพ และความปลอดภัยของสภาพแวดล้อมการทดลอง

2.3 การเตรียมวัสดุทดลอง มีเครื่อง CMM จำนวน 2 เครื่อง ที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็นของแผนก IPQC 1 เครื่อง และแผนก OQA 1 เครื่อง โดยแต่ละเครื่องจะมีอุปกรณ์จำเป็นใช้งาน และเครื่องวัด CMM ทั้งสองเครื่องจะต้องไม่มีความผิดปกติ ดังนั้นเครื่อง CMM ทั้งสองเครื่องจะต้องได้รับการสอบเทียบ (Calibration) จากผู้ตรวจสอบก่อนทำการทดลอง นอกจากนี้ เพื่อป้องกันความสับสนจึงกำหนดตัวอักษรสำหรับเครื่อง CMM แต่ละแผนกดังนี้ แผนก IPQC คือ X และแผนก OQA คือ Y สำหรับตัวอย่างผลิตภัณฑ์แขนหัวอ่านที่จะวัดในการทดลองมีทั้งหมด 10 ตัวอย่าง โดยกำหนดหมายเลขตั้งแต่ 1 ถึง 10 ตัวอย่างเหล่านี้เป็นสินค้าที่ทราบสภาพและประกอบด้วยชิ้นงานที่ทั้งหมดที่ได้รับการตรวจสอบและส่งคืนจากลูกค้าแล้ว

2.4 การเตรียมลำดับการทดลอง ผู้ตรวจสอบ 3 คนที่ได้รับเลือกสำหรับการตรวจสอบวัดชิ้นงานจากช่วงการทำงานที่แตกต่างกัน จะเข้าและกะดึกรวมถึงช่างเทคนิคเพื่อเข้าร่วมในการทดลองแต่ละครั้ง ผู้ตรวจสอบได้รับมอบหมายให้ทำการทดลองโดยผู้จัดการแผนกควบคุมคุณภาพของบริษัทกรณีศึกษา ผู้ตรวจสอบแต่ละคนได้รับการสุ่มเลือกจากผู้ตรวจสอบ 3 คน ในแต่ละกะ ผู้ตรวจสอบได้รับการตั้งชื่อว่าเป็นผู้ตรวจสอบ A, B และ C ในระหว่างการทดลอง การทดลองแต่ละครั้งใช้เครื่อง CMM แผนก IPQC ที่มีอยู่เครื่องเดียว และการทดลองจะทำการวัดตัวอย่างผลิตภัณฑ์แขนหัวอ่าน 3 ครั้ง ก่อนการทดลองครั้งแรก ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์แขนหัวอ่านที่อยู่ในสภาพดีมีเพียงกลุ่มเดียวจะถูกทำเครื่องหมายตั้งแต่ 1 ถึง 10 ทำให้ไม่มีความแตกต่างที่จะส่งผลต่อผลลัพธ์ของการทดลองหากตัวอย่างถูกจัดลำดับแบบสุ่ม

2.5 ขั้นตอนการทดลอง ปฏิบัติตามขั้นตอนของคู่มือ MSA (Measurement System Analysis) ผู้วิจัยได้ใช้วิธี GR&R (Gauge Repeat and Reproduce) เพื่อทำการทดลอง โดยขั้นตอนการทดลองละเอียดมีดังนี้

2.5.1 ผู้ตรวจสอบ A เป็นผู้ประเมินคนแรกที่ทำกรวัดชิ้นงาน โดยปฏิบัติตามขั้นตอนการวัดชิ้นงาน ผู้ตรวจสอบแต่ละคนจำเป็นต้องบันทึกผลการวัดอย่างชัดเจนทุกครั้งในไฟล์ข้อมูลหลังจากการตรวจวัดแต่ละครั้ง จากนั้นผู้ตรวจสอบ B และ C จะวัดชิ้นงานต่อตามลำดับ

2.5.2 ผู้ตรวจสอบแต่ละคนมีการทดลอง 3 ครั้งในแต่ละการทดลอง และจำเป็นต้องวัดตัวอย่างทั้ง 10 ตัวอย่างในแต่ละการทดลอง เมื่อผู้ตรวจสอบ A เสร็จสิ้นการตรวจสอบครั้งแรก ผู้ตรวจสอบ B ก็เริ่มดำเนินการตรวจสอบครั้งแรก จากนั้นจึงให้ผู้ตรวจสอบ C ตามลำดับ

2.5.3 เมื่อผู้ตรวจสอบทั้งสามคนเสร็จสิ้นการตรวจสอบครั้งแรก ผู้ตรวจสอบ A ก็เริ่มการตรวจสอบครั้งที่สอง เมื่อผู้ตรวจสอบทั้งหมดเสร็จสิ้นการตรวจสอบครั้งที่สอง ผู้ตรวจสอบ A ก็เริ่มการตรวจสอบครั้งที่สาม เพื่อสะท้อนถึงความเป็นกลางของการทดลอง จึงได้นำเสนอตัวอย่างตามลำดับที่แตกต่างกันสำหรับการทดลองแต่ละครั้ง โดยพารามิเตอร์ที่วัดจากเครื่อง CMM ตามข้อกำหนดของลูกค้ามีทั้งหมด 16 จุด (ดังตารางที่ 2) ซึ่งมีข้อมูลเป็นจำนวนมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกตำแหน่งการวัดตามข้อกำหนดของลูกค้าที่ต้องการความละเอียดสูงที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างแผนก IPQC และ OQA คือตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางรูแบร์ริง Z (Bearing Hole Diameter Z) โดยผลการทดลองจากการวัดของเครื่อง CMM แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าจากการวัดค่าตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางรูแบร์ริง Z ของเครื่อง CMM แผนก IPQC ที่ได้จากการทดลอง

ตัวอย่าง	พนักงาน A			พนักงาน B			พนักงาน C		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0.41713	0.41712	0.41714	0.41713	0.41712	0.41712	0.41714	0.41714	0.41712
2	0.41700	0.41700	0.41701	0.41701	0.41700	0.41699	0.41701	0.41700	0.41699
3	0.41702	0.41701	0.41703	0.41703	0.41701	0.41701	0.41702	0.41703	0.41701
4	0.41705	0.41704	0.41706	0.41706	0.41705	0.41705	0.41706	0.41706	0.41704
5	0.41704	0.41704	0.41704	0.41704	0.41703	0.41703	0.41705	0.41704	0.41704
6	0.41704	0.41703	0.41704	0.41705	0.41703	0.41703	0.41705	0.41705	0.41704
7	0.41701	0.41700	0.41702	0.41701	0.41701	0.41700	0.41701	0.41702	0.41700
8	0.41705	0.41705	0.41706	0.41706	0.41705	0.41705	0.41705	0.41705	0.41704
9	0.41701	0.41700	0.41702	0.41702	0.41700	0.41700	0.41701	0.41702	0.41700
10	0.41700	0.41789	0.41791	0.41791	0.41789	0.41790	0.41791	0.41791	0.41789

3. การวิเคราะห์ (Analyze, A)

3.1 การวิเคราะห์เชิงสถิติ วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์เชิงสถิติคือการประมาณค่าความผันแปร (Variation) และเปอร์เซ็นต์ความผันแปรของกระบวนการสำหรับระบบการวัดและชิ้นงาน โดยความสามารถของเครื่องมือวัดประกอบด้วย 2 ส่วนได้แก่ (1) ความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability) หมายถึงความผันแปรของค่าวัดรอบค่าจริง (True Value) ของระบบการวัด ที่สามารถวิเคราะห์จากการวัดชิ้นงานซ้ำ ๆ กัน โดยใช้ชิ้นงานเดียวกัน วัดด้วยอุปกรณ์เดียวกัน และ (2) ความสามารถในการประเมินซ้ำ (Reproducibility) คือความผันแปรที่แสดงค่าเฉลี่ยของค่าวัดจากการใช้อุปกรณ์เดียวกันในการวัดชิ้นงานเดียวกัน แต่ใช้คนวัดคนละคนกัน สำหรับผลลัพธ์การวิเคราะห์เชิงสถิติของระบบการวัดแสดงดังภาพที่ 3

Two-Way ANOVA Table With Interaction					
Source	DF	SS	MS	F	P
Parts	9	0.0000061	0.0000007	23286.0	0.000
Operators	2	0.0000000	0.0000000	3.5	0.051
Parts * Operators	18	0.0000000	0.0000000	0.4	0.989
Repeatability	60	0.0000000	0.0000000		
Total	89	0.0000061			
α to remove interaction term = 0.05					
Two-Way ANOVA Table Without Interaction					
Source	DF	SS	MS	F	P
Parts	9	0.0000061	0.0000007	10103.4	0.000
Operators	2	0.0000000	0.0000000	1.5	0.222
Repeatability	78	0.0000000	0.0000000		
Total	89	0.0000061			
Gage R&R					
Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)			
Total Gage R&R	0.0000000	0.09			
Repeatability	0.0000000	0.09			
Reproducibility	0.0000000	0.00			
Operators	0.0000000	0.00			
Part-To-Part	0.0000001	99.91			
Total Variation	0.0000001	100.00			
Process tolerance = 0.0004					
Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)	
Total Gage R&R	0.0000083	0.0000497	3.01	12.43	
Repeatability	0.0000082	0.0000493	2.98	12.32	
Reproducibility	0.0000011	0.0000066	0.40	1.64	
Operators	0.0000011	0.0000066	0.40	1.64	
Part-To-Part	0.0002751	0.0016508	99.95	412.69	
Total Variation	0.0002753	0.0016515	100.00	412.88	
Number of Distinct Categories = 46					

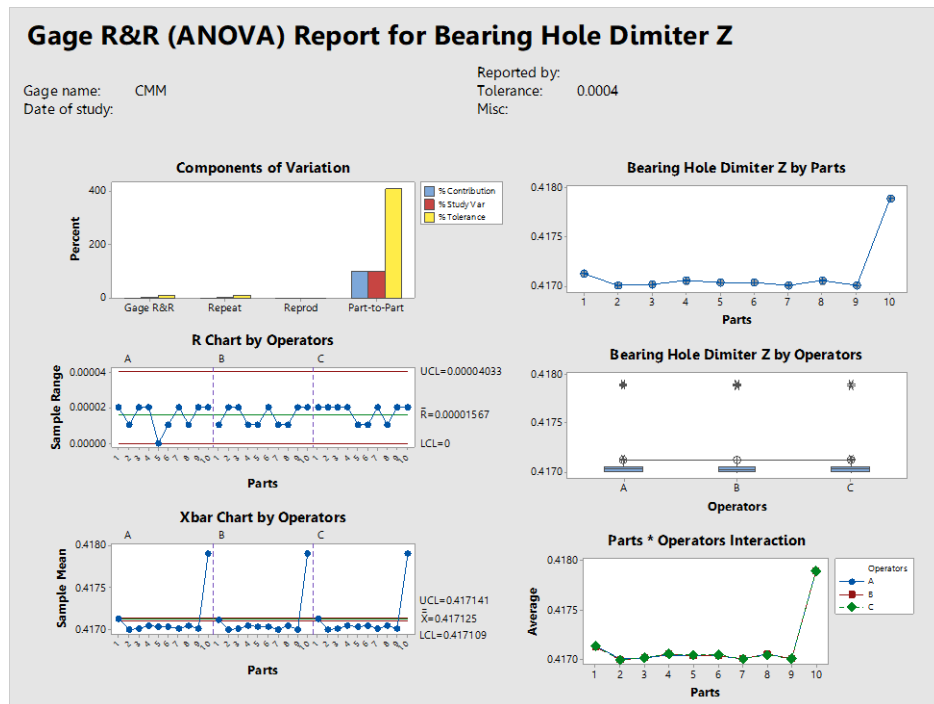
ภาพที่ 3 ผลลัพธ์จากการศึกษาระบบการวัดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูแบริง Z (Bearing Hole Diameter Z)

ผลจากการวิเคราะห์ (ภาพที่ 3) พบว่าระบบการวัดมีค่า P-Value < α (เมื่อ $\alpha = 0.05$) แสดงว่า Part มีความแตกต่างถือว่าผ่าน และ P-Value ของ Operators และ P-Value ของอิทธิพลร่วมระหว่าง Operators * Parts มีค่า > 0.05 แสดงว่าไม่มีความแตกต่างเกิดขึ้น

จาก Total Gage R&R = 0.09% เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของความผันแปรในระบบการวัดพบว่ามาจากความสามารถในการวัดซ้ำเป็นความผันแปรของอุปกรณ์ (Repeatability) เท่ากับ 0.09% และความสามารถในการประเมินซ้ำซึ่งเป็นความผันแปรของพนักงาน (Reproducibility) เท่ากับ 0.00%

เมื่อทำการประเมินผลเทียบกับความสามารถของกระบวนการ พบว่ามีสัดส่วนความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่า Total Gage R&R เท่ากับ 0.09.% เมื่อเทียบกับค่าความเผื่อของกระบวนการ (Process tolerance) จากค่า P/TV เท่ากับ 12.43% อยู่ในเกณฑ์ความผันแปรที่อาจยอมรับได้ (อ้างอิง Measurement System Analysis 4th edition. Table II-D 1: GRRR Criteria, หน้า 78) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่า NDC (Number of Distinct) เท่ากับ 46 แสดงว่าระบบการวัดสามารถแยกความแตกต่างของข้อมูลการวัดได้

3.2 การวิเคราะห์เชิงกราฟิก ผู้วิจัยยังได้ทำการวิเคราะห์เชิงกราฟิกด้วยโปรแกรม MINITAB สำหรับกระบวนการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรูแบริง Z ของแขนหัวอ่านเส้นด้วยเครื่องมือวัด CMM ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4



ภาพที่ 4 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์เชิงกราฟฟิคด้วยโปรแกรม MINITAB

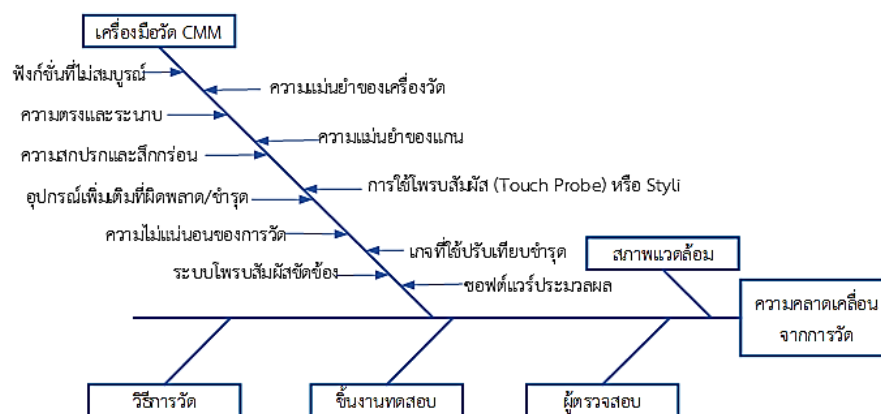
จากภาพที่ 4 พิจารณาแผนภูมิ Component of Variation เห็นว่าชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทำการทดลองมีความแตกต่างของค่าชิ้นงานของสิ่งตัวอย่างที่เพียงพอ

พิจารณาแผนภูมิ R Chart พบว่าทุกจุดอยู่ภายในพิกัดควบคุม แสดงให้เห็นว่าระบบการวัดมีความสามารถแยกความแตกต่างของค่าวัดได้ และระบบการวัดมีความสม่ำเสมอ

พิจารณาแผนภูมิ X bar Chart พบว่า 90% ของข้อมูลอยู่ภายนอกพิกัดความควบคุม แสดงให้เห็นว่าความผันแปรจากสาเหตุของระบบการวัดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความผันแปรจากสาเหตุของระบบการผลิต ดังนั้น ข้อมูลที่วัดได้สามารถนำไปใช้ประมาณความผันแปรของกระบวนการได้

จากผลการวิเคราะห์เชิงกราฟทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าระบบการวัดที่โรงงานใช้ในการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางรูเบริง Z และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแขนหัวอ่านที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง CMM สามารถนำไปใช้ในการวัดแขนหัวอ่านสำหรับกระบวนการวัดได้ เนื่องจากระบบการวัดมีความผันแปรน้อยกว่าความผันแปรของกระบวนการ

3.3 การวิเคราะห์สาเหตุหลัก จากผลการวิเคราะห์เชิงสถิติและกราฟฟิค พบว่า Gauge R&R อยู่ในเกณฑ์ที่อาจยอมรับได้และความผันแปรส่วนใหญ่เกิดจากเครื่องวัด CMM ดังนั้นผู้วิจัยมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ความผิดพลาดของเครื่องมือวัด CMM (Gör and Gerger, 2021: Arumun et al., 2024) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 สาเหตุของความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด CMM

จากแผนผังสาเหตุในรูปที่ 5 พบว่าสาเหตุความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่เกิดจากเครื่องมือวัด CMM ดังนั้น เพื่อวิเคราะห์ลำดับความเสี่ยงของสาเหตุความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือ CMM จึงได้ทำการประเมินด้วยวิธี FMEA โดยพิจารณาค่าความสำคัญ (S), โอกาส (O), และการตรวจพบ (D) ของแต่ละสาเหตุ และคำนวณค่า RPN เพื่อลำดับความเสี่ยงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ FMEA ของเครื่องมือวัด CMM

No.	สาเหตุ	ความสำคัญ (Importance)	โอกาส (Occurrence)	การตรวจพบ (Detection)	RPN
1	โพรบสัมผัส (Touch Probe) หรือ Styli เสื่อมสภาพ	4	10	8	320
2	การชนของหัวโพรบ	6	10	8	480
3	การปรับเทียบเครื่อง CMM ไม่เหมาะสม	7	3	3	63
4	ความไม่แน่นอนของการวัด	8	3	3	72

จากตารางที่ 4 พบว่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดส่วนใหญ่เกิดจากการใช้โพรบสัมผัส (Touch Probe or Styli) ความไม่แน่นอนของการวัด และการสอบเทียบเครื่อง CMM ที่ไม่เหมาะสม จากการวิเคราะห์ FMEA พบว่า ปัจจัยเสี่ยงหลักที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของระบบการวัด CMM ได้แก่ การชนของหัวโพรบ และการเสื่อมสภาพของโพรบสัมผัส ซึ่งมีค่า RPN สูงสุด 480 และ 320 ตามลำดับ เนื่องจากทั้งสองปัจจัยมีแนวโน้มเกิดขึ้นบ่อยและตรวจจับได้ยาก จึงควรได้รับการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ พร้อมกำหนดแนวทางป้องกันหรือบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) เพื่อยกระดับความแม่นยำของระบบการวัดให้สูงขึ้น

4. การปรับปรุง (Improve, I) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของระบบการวัดด้วยเครื่อง CMM ผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับปรุง 3 แนวทางหลัก ดังนี้

4.1 การซ่อมแซมเกจสอบเทียบ (Calibration) โดยทางบริษัทกรณีศึกษาได้เรียกบริษัทตัวแทนจำหน่ายเข้ามาดำเนินงานภายในบริษัท โดยซ่อมแซมเกจที่ใช้สอบเทียบและทำการสอบเทียบให้เครื่องวัด CMM ให้มีความถูกต้องและแม่นยำ รวมทั้งตรวจสอบเครื่อง CMM ตามระยะเวลาที่กำหนด

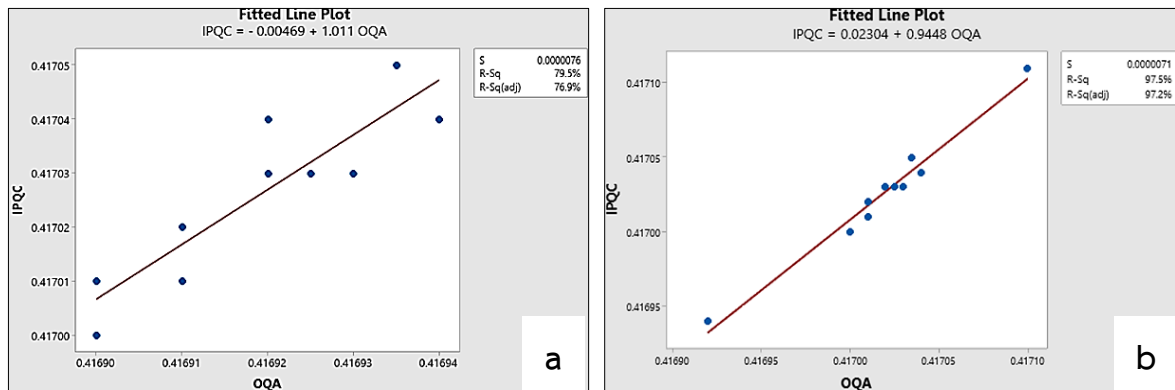
4.2 ตรวจสอบสภาพของโพรบสัมผัส สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ รวมทั้งการทำความสะอาดและตรวจสอบตามระยะเวลาที่กำหนด

4.3 การทดสอบโปรแกรมการวัด คือการทดสอบว่าโปรแกรมทำงานได้อย่างถูกต้องและให้ผลลัพธ์การวัดที่ต้องการ สิ่งสำคัญที่สุดที่ควรให้ความสนใจคือจะต้องแน่ใจว่าไม่มีการชนกันระหว่างแกนเครื่อง CMM และส่วนหนึ่งของอุปกรณ์จับชิ้นงาน

ในระหว่างกระบวนการวัดแบบอัตโนมัติ นอกจากนี้ ยังต้องพิจารณาความเร็วของการเคลื่อนที่ของแกนเครื่อง CMM ว่าความเร็วช้าเกินไปหรือเร็วเกินไป ซึ่งส่งผลต่อความเร็วในการวัดชิ้นงาน

5. การควบคุม (Control, C)

ผู้วิจัยดำเนินการควบคุมคุณภาพในระบบการวัดระหว่างแผนก IPQC และ OQA ให้มีความสอดคล้องกัน โดยใช้การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson Correlation) อ้างอิงจากการศึกษาของ Song et al., (2014) โดยกำหนดตัวแปรอิสระและตัวแปรตามของระบบการวัดดังนี้ แผนก IPQC (X) และแผนก OQA (Y) จากการวิเคราะห์ข้อมูลความสัมพันธ์ของเครื่องวัด CMM แสดงผลลัพธ์ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 (a) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างแผนกก่อนปรับปรุง (b) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์หลังปรับปรุง

จากภาพที่ 6 (a) ก่อนการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างแผนก IPQC และ OQA มีค่า $r = 0.891$ ($R-Sq$ (adj) = 76.9%) อยู่ในเกณฑ์มีความสัมพันธ์กันระดับสูง หลังจากการปรับปรุง (รูปที่ 6b) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างแผนกมีค่า $r = 0.987$ ($R-Sq$ (adj) = 97.2%) อยู่ในเกณฑ์มีความสัมพันธ์กันระดับสูงมาก ดังนั้นการสอบเทียบ (Calibration) เครื่องมือวัด CMM ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือระบบการวัดระหว่างแผนก IPQC และ OQA ได้

สรุปผล

จากการสำรวจข้อมูลประสิทธิภาพการวัดของเครื่อง CMM แผนกตรวจสอบคุณภาพ ตลอดระยะเวลาสามเดือนก่อนและหลังการปรับปรุงผลิตภัณฑ์แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่เกี่ยวข้องกับแง่มุมต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ข้อมูลประสิทธิภาพการวัดของเครื่อง CMM ก่อนและหลังการปรับปรุง

รายการ	ก่อนปรับปรุง (สามเดือน)	หลังปรับปรุง (สามเดือน)
จำนวนผลิตภัณฑ์ที่พบการวัดที่ใช้ไม่ได้ภายในแผนก	872 (291 ชิ้น/เดือน)	43 (15 ชิ้น/เดือน)
ปริมาณสินค้าชำรุดที่จัดส่งให้ลูกค้า (ตำหนิที่เกิดจากการตรวจวัดชิ้นงานผิดพลาด)	364 (121 ชิ้น/เดือน)	18 (6 ชิ้น/เดือน)
จำนวนการส่งกลับในแผนก	17	2
ค่าปรับสินค้าที่ใช้ไม่ได้ทั้งหมด (59 บาท/ชิ้น)	72,924 บาท (24,308 บาท/เดือน)	3,599 บาท (1,200 บาท/เดือน)

หลังการปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบการวัดแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ด้วยการสอบเทียบเครื่องมือวัด CMM ช่วยลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่พบการวัดที่ใช้ไม่ได้ภายในแผนกจากเดิม 291 ชิ้น/เดือน ลดลงเหลือ 15 ชิ้น/เดือน (ลดลง 95%) ปริมาณสินค้าชำรุดที่จัดส่งให้ลูกค้าจากเดิม 121 ชิ้น/เดือน ลดลงเหลือ 6 ชิ้น/เดือน (95%) จำนวนการส่งกลับในแผนกจากเดิม 17

ขึ้น ลดลงเหลือ 2 ขึ้น (ลดลง 88%) นอกจากนี้ ยังลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการจัดการข้อร้องเรียนของลูกค้ากับแผนก IPQC ในช่วงสามเดือนที่ผ่านมาจากเดิม 72,924 บาท (24,308 บาท/เดือน) ลดลงเหลือเพียง 3,599 บาท (1,200 บาท/เดือน) สามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 69,325 บาท

อภิปรายผล

ความคลาดเคลื่อนจากการวัดมีหลายสาเหตุ จากการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิแก๊งปลา (Cause-and-Effect Diagram) ได้แก่ (1) เครื่องมือวัด CMM (2) สภาพแวดล้อม (3) วิธีการวัด (4) ช่างงานทดสอบ และ (5) ผู้ตรวจสอบ ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) โดยเข้าใจผิดว่าค่าพารามิเตอร์ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์อยู่ในพิกัดควบคุม แต่โดยแท้จริงแล้วอยู่นอกพิกัดควบคุมของกระบวนการ ส่งผลให้บริษัทส่งสินค้าที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดให้กับลูกค้า ทำให้เสียค่าปรับจากสินค้าที่ใช้งานไม่ได้ ดังนั้น การทำ Gauge R&R ตามคู่มือ MSA พบว่าความคลาดเคลื่อนของกระบวนการวัดเกิดจากตัวเครื่องมือวัด CMM เป็นหลัก จากการวิเคราะห์สาเหตุหลักด้วยแผนภูมิแก๊งปลาของเครื่องมือวัด CMM จะประกอบด้วย ปัญหาย่อย ๆ ที่สำคัญหลายอย่าง เมื่อนำปัญหาดังกล่าวไปวิเคราะห์ด้วย FMEA ทำให้ทราบสาเหตุความคลาดเคลื่อนและลำดับความสำคัญดังนี้ การชนของหัวโพรบ การเสื่อมสภาพของหัวโพรบ และความไม่แน่นอนของการวัด ดังนั้น การสอบเทียบเครื่อง CMM ตามวงรอบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ หากลดความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัด CMM จะช่วยลดค่าปรับจากการส่งสินค้าที่ใช้งานไม่ได้ให้กับลูกค้าได้

ภายหลังจากการสอบเทียบเครื่องมือวัด CMM สามารถลดการส่งสินค้าชำรุดให้ลูกค้าลดลงจาก 121 ชิ้น/เดือน เหลือ 6 ชิ้น/เดือน โดยความสอดคล้องของค่าพารามิเตอร์จากการวัดของเครื่อง CMM พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างแผนก IPQC และ OQA เพิ่มขึ้นจากค่า $r = 0.891$ เพิ่มขึ้นเป็น $r = 0.987$ ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ทั้งสองข้อ

จากการศึกษาปัญหาต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิแก๊งปลาซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการวัดที่ได้การวิเคราะห์ด้วย Gauge R&R ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Arumun et al., 2024

เมื่อพิจารณาการวัดค่าพารามิเตอร์แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ใด ๆ ของเครื่อง CMM ระหว่างแผนก IPQC และ OQA มีค่าจากการวัดมีความสอดคล้องกันโดยมีแนวโน้มดีขึ้น

ข้อเสนอแนะ

สามารถใช้แนวคิดสำหรับการแก้ไขและการปรับปรุงกระบวนการวัดสำหรับผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้เครื่องมือวัด CMM ในการวัดชิ้นงานในมิติต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของกระบวนการและลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากข้อร้องเรียนของลูกค้า

เอกสารอ้างอิง

กิตติภาพ ปิ่นเทศ เพ็ญศิริพันธ์ สุขสมกิจ และทิมมพร ทวีเดช. (2565). การลดของเสียในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อนโดยใช้เทคนิคซีจีซี ซิกม่า : กรณีศึกษา โรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์แห่งหนึ่ง. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี), 2565 ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 หน้า 110 -122.

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2567). รายงานภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2567 และแนวโน้มปี 2568.

<https://km.fti.or.th/docs/km>

AIAG (Automotive Industrial Action Group). (2001). *Measurement System Analysis (MSA)*. 4th Edition (2001).

Arumun, J. Ekanem, V., & Ashigwuike, E. (2024). Review of Gauge Repeatability and Reproducibility for Dimensional Measurements. *Scholars Bulletin*, 10(7). 186-194.

Brue, G., & Rod Howes. (2008). *Six Sigma*. Tata: McGraw Hill Publications, 1st edition.

- Gör, O., & Gerger, A. (2021). Conducting a Gage R & R Study: An Application Example in Automotive Industry. *Journal of Economic and Social ResearchsEkonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 8 (15).
- Phillip, M. Baaisi. Robert, O. Monageng, K. Mashaba, K. Kommula, V., & Jerekias, G. (2008). Application of Lean Six Sigma Methodology in Defect Reduction: A Case Study of Kalahari Ash Salt Bagging Plant. *the First Australian International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Sydney, Australia, 2022, (pp. 1167-1177).
- Shirodkar, A., & Rane, S. (2021). *Evaluation of Coordinate measuring machine using Gage Repeatability & Reproducibility. International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1. 84-90. doi: 10.1007/s13198-020-01050-2
- Song, F. Osmo, K., & Matti, M. (2014). Assessing Gauge Reliability and Reproducibility Using the Correlation between Two Measurement Systems. *International Journal for Quality Research*, 8(1), 39–46.
- Tirelo, O. Pekenene, Tuelomburu, S. Mphathiwa, Robert, O. Monageng, K. Mashaba, K. Jerekias, G., & Kommula, V. (2023). Application of Lean Six Sigma Methodology in Defect Reduction: A Case Study of Botswana Shade Net Manufacturing Plant. *the 6th European Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Lisbon, Portugal, 2023, 804-815.
- Uluskan, M. (2021). Six Sigma in Plastic Injection Modeling: Reuse Defective Parts in New Article Production as Raw Material Input or Not? *Journal of Industrial Engineering*, 32(2), 341-363.

Translated Thai References

- Pintes, K., Suksomkit, P., & Thaweedeche, T. (2522). *Waste Reduction In Plastic Thermoforming Process Through Six Sigma Techniques: Case Study A Packaging Factory The Building Energy. Journal of Science and Technology Thonburi University*, 6(1), 110-122.
- The Office of Industrial Economics. (2024). Industrial Economic Situation Report 2024 and Outlook for 2025. <https://km.fti.or.th/docs/km>

Received: Mar 17, 2025

Revised: Jun 12, 2025

Accepted: Jun 21, 2025

การทดสอบการระบายความร้อนแพ็กแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าด้วยการระบายความร้อนด้วยอากาศ

EXPERIMENTAL ON AIR COOLING FOR ELECTRIC VEHICLE BATTERY PACKS

อำพล พิชัยเชิด¹, สัญชัย รำเพยพัฑ², บัณฑิต กฤตาคม², วริศราภรณ์ จรโคกกรวด²,
วัชรินทร์ ดงบัง³, อภิเดช บุญเจือ^{2*}

¹ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

³ คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (วิทยาเขตระยอง)

Aumpol Pichaicherd¹, Sanchai Ramphueiphad², Bundit Krittacom²,

Warisaraporn Jornkokkrud², Watcharin Dongbang³, Apidach Boonjue^{2*}

¹ Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Krungthep

² Faculty of Engineering and Technology is the Engineering Rajamangala University of Technology Isan

³ Faculty of Science, Energy and Environment King Mongkut's University of Technology

North Bangkok (Rayong Campus)

Corresponding author: e-mail apidach.bo@rmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ถูกจัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อสร้างชุดระบายความร้อนแพ็กแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าด้วยอากาศแบบตกกระทบ (Air Impinging) และศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนของแบตเตอรี่ให้กับอากาศขณะมีการอัดประจุไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของระยะห่างผิวแบตเตอรี่ 2 mm 3 mm และ 4 mm ในการทดลองเลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียม 18650 ความจุ 1200 mAh ต่อขนานกัน 4 เซลล์ โดยอุณหภูมิของอากาศที่นำมาใช้ในการระบายความร้อนแพ็กแบตเตอรี่ แบบตกกระทบ คือ 20 °C 25 °C และ 30 °C ในทุกการทดลองจะใช้ความเร็วอากาศก่อนเข้าแพ็กแบตเตอรี่ 5 m/s เท่ากัน อัตราการอัดประจุที่ใช้ มี 3 อัตรา คือ 1C 2C และ 3C จากผลการทดลอง พบว่าระยะห่างระหว่างผิวเซลล์แบตเตอรี่ มีผลต่อการระบายความร้อน ซึ่งระยะห่างระหว่างผิวแบตเตอรี่ที่ 4 mm จะเพิ่มพื้นที่การไหลของอากาศระหว่างผิวแบตเตอรี่ ทำให้อากาศสัมผัสกับความร้อนที่แบตเตอรี่กระจายตัวออกมาได้เพิ่มขึ้น จึงทำให้การระบายความร้อนออกได้ดีขึ้นด้วย

คำสำคัญ : การระบายความร้อนด้วยอากาศ, แพ็กแบตเตอรี่, แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน, ชุดระบายความร้อนแบตเตอรี่

Abstract

This research aims to create electrical vehicle battery cooling by Air Impinging and study the heat transfer rate of the battery to the air during charging for comparing the differences in the battery surface distance at 2 mm, 3 mm and 4 mm In the experiment, 4 lithium 18650 batteries with a capacity of 1200 mAh were used in parallel. The cooling

temperature by Air Impinging was set at 20 °C, 25 °C and 30 °C. For all period of the experiment, the same air velocity prior to the battery pack of 5 m/s. were used at 3 rates of charging, including 1C, 2C and 3C. The result showed that distances between battery cell surfaces can affect battery cooling. The distance between the battery surfaces at 4mm can increase the airflow area between the battery surfaces showed that more air was exposed to the heat dissipated by the battery, so it resulted in better heat dissipation.

Keywords: Air cooling, Battery pack, Lithium-ion battery, Battery cooling

บทนำ

ปัจจุบันประเทศต่างๆ ทั่วโลกต่างให้ความสำคัญกับความมั่นคงด้านพลังงาน เนื่องจากแหล่งพลังงานฟอสซิลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป และยังเป็นสาเหตุหลักของปัญหามลภาวะทางอากาศและภาวะโลกร้อน เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว หลายประเทศจึงเร่งส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดจากแหล่งพลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานน้ำ ควบคู่ไปกับการพัฒนาเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

จากเวทีประชุมสหประชาชาติว่าด้วยเรื่องการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สมัยที่ 21 ณ กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส (เชษฐวิทย์มุลสิกะศิริ, 2009, Thitima.K, 2021, อนุสรณ์ สุขเกษม, 2006, Sirikasemsuk, S, Suksusron, P, 2021) โดยประเทศไทยได้มีการผลักดันยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศเพื่อลดก๊าซเรือนกระจกลง 20 - 25 เปอร์เซ็นต์ ภายในปี พ.ศ. 2573 ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยได้เริ่มมีการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานสะอาดซึ่งรวมถึงพลังงานทดแทนกันอย่างจริงจังมากขึ้น อีกทั้งประเทศไทยเป็นประเทศที่มีฐานการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ขนาดใหญ่ แต่โดยส่วนมากจะเป็นยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Rao et al, 2017) ส่วนการผลิตยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย มีอุตสาหกรรมการผลิตจำนวนน้อย เพื่อเตรียมความพร้อมในการรองรับการเข้ามาของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า การวิจัยเพื่อสนับสนุนการสร้างความพร้อม ความสามารถในการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ของยานยนต์ไฟฟ้าจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะแหล่งพลังงานหลักของยานยนต์ไฟฟ้า คือ แบตเตอรี่ เนื่องจากแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า จะมีอายุการใช้งานประมาณ 6-8 ปี (Lu et al, 2016, พิมพ์ ลิ้มทองกุล, 2064, สุริยา พันธุ์พาณิชย์, 2549, กรรชัย เทียงลิ้ม, 2562, Quantunscape, 2021, AEC Hybrid Plus, 2022) แต่ปัจจุบันยังมีราคาค่อนข้างสูง หากใช้งานอย่างไม่ถูกวิธีหรือไม่ได้รับการดูแลรักษาจะทำให้อายุการใช้งานสั้นลงหรือร้ายแรงกว่านั้นอาจทำให้เกิดการเสียหายของแบตเตอรี่ ดังนั้นการพัฒนาแบตเตอรี่จึงมีความสำคัญอย่างมาก

ทางผู้วิจัยเห็นความสำคัญในการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของการระบายความร้อนให้กับแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า จึงเกิดงานวิจัยนี้ขึ้น โดยมุ่งเน้นที่จะศึกษาการระบายความร้อนของแพ็คเกจแบตเตอรี่ด้วยอากาศที่มีความแตกต่างของระยะห่างระหว่างผิวของแบตเตอรี่

วัตถุประสงค์การวิจัย

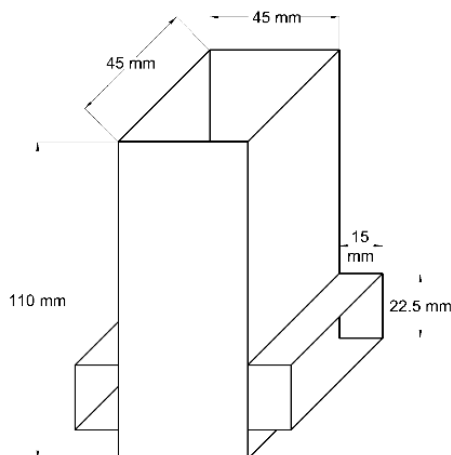
- 1 เพื่อสร้างชุดทดลองระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า
- 2 เพื่อศึกษาการระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เป็นการทดลองเกี่ยวกับการระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ด้วยอากาศแบบไหลตกกระทบ เพื่อเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างผิวแบตเตอรี่ ที่มีอุณหภูมิที่ใช้ระบายความร้อน 20, 25, 30 °C จึงมีส่วนประกอบของอุปกรณ์หลัก ๆ และขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

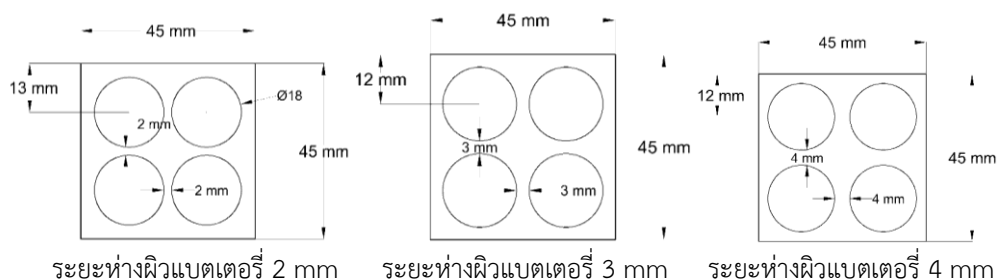
1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยชุดแบตเตอรี่แพ็ก 18650 ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน มีความจุ 1200 mAh แรงดันไฟฟ้า 3.7 V ในการประกอบแพ็กแบตเตอรี่ ต้องจรรยาบรรณแบบขนาน ใช้ลวดนิเกิล ขนาด 0.1 mm ความกว้าง 5 mm เชื่อมต่อขั้วแบตเตอรี่ และใช้วัสดุแผ่นอะคลิลิก ที่มีความหนา 2 mm นำมาประกอบเป็นกล่องบรรจุชุดแบตเตอรี่ดังภาพที่ 1 ซึ่งมีทางเข้าของอากาศที่ระบายความร้อนมีขนาด 45 x 45 mm และมีทางออกของอากาศที่ส่วนล่างของด้านข้าง 2 มีขนาด 15 x 22.5 mm ฐานของชุดแบตเตอรี่ ในการทดลองกำหนดให้ระยะห่างผิวแบตเตอรี่ที่ต่างกัน คือ 2, 3, และ 4 mm ตามลำดับดังภาพที่ 2

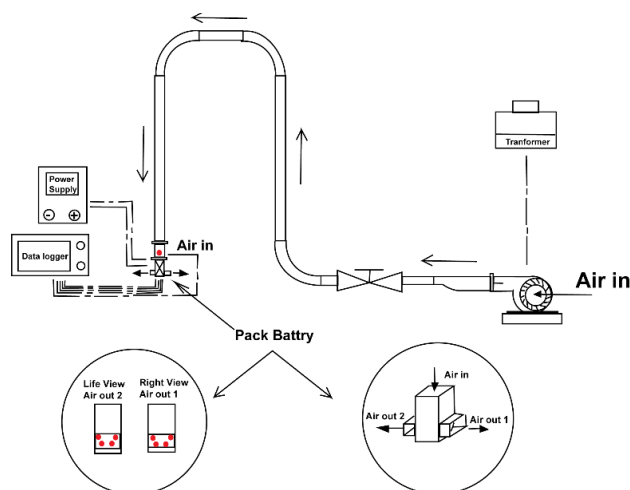


ภาพที่ 1 ชุดกล่องบรรจุชุดแบตเตอรี่

การทดลองมีการกำหนดให้ระยะห่างผิวแบตเตอรี่ที่ต่างกันคือ 2, 3, และ 4 mm โดยมีการออกแบบระยะห่างของผิวแบตเตอรี่ ดังภาพที่ 2 เป็นการออกแบบระยะห่างของผิวแบตเตอรี่ที่ระยะห่าง 2 mm ส่วนการออกแบบระยะห่างของผิวแบตเตอรี่ที่ระยะห่าง 3 และ 4 mm แสดงในภาพที่ 2



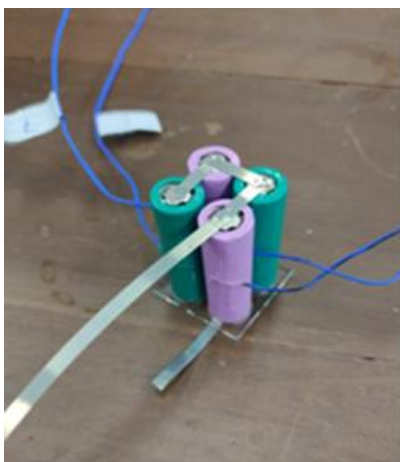
ภาพที่ 2 รายละเอียดการจัดระยะห่างผิวแบตเตอรี่



ภาพที่ 3 ชุดทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้

2. วิธีการทดลองการวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย มอเตอร์พัดลม ซึ่งสามารถสร้างความเร็วลมได้สูงสุด 10 m/s โดยมี ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้า สำหรับปรับลดความเร็วลมให้เหมาะสมกับการทดลองที่ระดับ 5 m/s ลมที่ได้จะถูกส่งผ่าน วาล์วควบคุม และ ชุดจัดเรียงอากาศ เพื่อระบายความร้อนให้กับ ชุดทดลองแพ็กแบตเตอรี่ ตามที่แสดงในรูปภาพที่ 3 สำหรับการวัดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ ได้มีการติดตั้ง สายวัดอุณหภูมิบนผิวของเซลล์แบตเตอรี่ จำนวน 5 จุด (ต่อเซลล์) ดังภาพที่ 4 เพื่อเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างละเอียด ในส่วนของการต่อวงจร ได้เชื่อมต่อที่ ขั้วแบตเตอรี่ ด้วยลวดนิเกิล โดยใช้การต่อแบบวงจรขนาน และประกอบรวมไว้ภายใน ชุดกล่องแพ็กแบตเตอรี่ นอกจากนี้ ยังมีการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของอุโมงค์ลม เพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านชุดทดลอง



ภาพที่ 4 การต่อวงจรในแบตเตอรี่

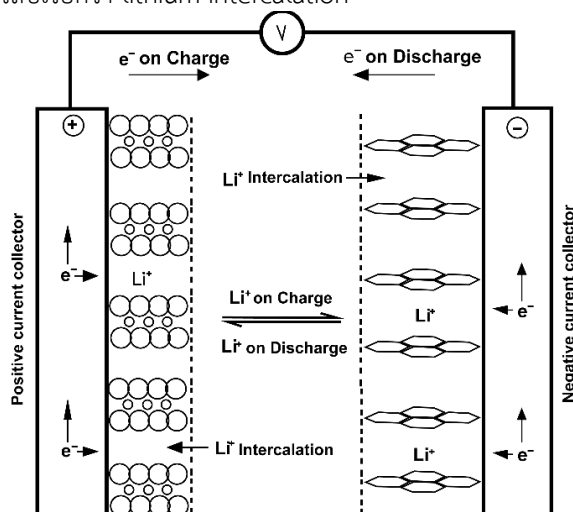
เงื่อนไขของการทดลองใช้มอเตอร์พัดลมที่ความเร็วลมคงที่ 5 m/s จัดเรียงเซลล์แบตเตอรี่โดยเว้น ระยะห่างระหว่างผิวแบตเตอรี่ เป็นระยะ 2, 3 และ 4 mm อุณหภูมิของลมก่อนเข้าสู่ชุดทดลองถูกกำหนดไว้ที่ 20°C, 25°C และ 30°C ตามรายละเอียดใน ตารางที่ 1 ส่วนอัตราการคายประจุต่อระยะเวลา (C-rate) ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ 1C, 2C และ 3C สำหรับแต่ละกรณีจะควบคุมความจุแบตเตอรี่และอุณหภูมิเริ่มต้นให้สอดคล้องกันตามเงื่อนไขการทดลอง

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลองก่อนการทดลอง

อุณหภูมิห้อง °C	อุณหภูมิทางเข้า °C	อุณหภูมิผิวแบตเตอรี่ °C
20 ±2	20 ±2	20 ±2
25 ±2	25 ±2	25 ±2
30 ±2	30 ±2	30 ±2

3. การอัดประจุและการคายประจุแบตเตอรี่

เมื่อมีการอัดประจุ (charge) ไอออนของลิเทียมจะเคลื่อนออกจากโครงสร้างของขั้วบวกผ่านเยื่อเลือกผ่านเข้าสู่ขั้วลบเกิดเป็นสารประกอบของลิเทียม และคาร์บอน และขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจะเคลื่อนตัว จากขั้วบวกสู่ขั้วลบผ่านวงจรภายนอก และขณะเกิดการคายประจุ (discharge) ปฏิกิริยาจะเกิดในทางตรงกันข้ามดังรูปภาพที่ 5 กระบวนการที่ไอออนของลิเทียมสอดแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัสดุขั้วบวกหรือขั้วลบเรียกว่า lithium intercalation



ภาพที่ 5 การทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขณะอัดประจุ Li จะเข้าทางขั้วลบ และคายประจุ Li จะเข้าทางขั้วบวก

4. การคำนวณหาความร้อนของแบตเตอรี่

การคำนวณหาความร้อนของแบตเตอรี่ในกรณีที่เป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติเนื่องจากก่อนที่จะทำการจัดทำชุดระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ด้วยอากาศนั้น ต้องทราบถึงอัตราการกระจายตัวความร้อนของแบตเตอรี่ให้กับอากาศคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

โดยที่ Q คือ การพาความร้อนที่แบตเตอรี่ (W)

h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W / m².K)

A คือ พื้นที่แบตเตอรี่กระจายความร้อนให้กับอากาศ (m²)

T_s คือ อุณหภูมิผิวแบตเตอรี่ (K)

T_∞ คือ อุณหภูมิอากาศรอบๆแบตเตอรี่ (K)

จากการหาการกระจายตัวความร้อนของแบตเตอรี่ให้กับอากาศ จะได้ผลต่างของอุณหภูมิที่ผิว

และอุณหภูมิอากาศรอบๆ เซลล์แบตเตอรี่ ดังนั้นจึงนำมาหาอุณหภูมิ T_f เพื่อนำไปใช้หาคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ T_f (ตารางคุณสมบัติอากาศ) ดังสมการที่ 2

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} \quad (2)$$

โดยที่ T_f คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวแบตเตอรี่และอุณหภูมิ อากาศรอบๆ ภายในกล่อง (K)

5. เรย์เลย์นัมเบอร์ (Ra)

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (convection) ในของไหลของอากาศ ที่ใช้ในการทดลองระบายอากาศของแบตเตอรี่ โดยการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ค่าเรย์เลย์นัมเบอร์เป็นตัวบ่งชี้ถึงแนวโน้มของการเกิด "พาความร้อนแบบธรรมชาติ" (natural convection) ในของไหล ที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบ ดังสมการที่ 3

$$Ra = GrPr = \frac{g\Delta TL^3}{\nu^2} \beta \quad (3)$$

g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (m / s^2)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่และอุณหภูมิรอบๆ แบตเตอรี่ (K)

L คือ ความสูงของแบตเตอรี่ (m)

k คือ ค่าการนำความร้อนของอากาศ ($W / m^2 K$)

ν คือ ค่าความหนืดของอากาศ (m^2 / s)

β คือ อัตราการขยายตัวทางความร้อน

6. นัสเซลนัมเบอร์ (Nu)

นัสเซลนัมเบอร์ คือ จำนวนไร้มิติที่ใช้บ่งบอกว่า "การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน" มีความสำคัญมากน้อยเพียงใด เมื่อเทียบกับ "การถ่ายเทความร้อนแบบนำ" ในระบบของไหลหรือพื้นผิวที่กำลังแลกเปลี่ยนความร้อน ของระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ ดังสมการที่ 4

$$Nu = 0.68 + \frac{0.70 Ra^{\frac{1}{4}}}{[1 + (\frac{0.492}{Pr})^{\frac{4}{9}}]^{\frac{4}{9}}} \quad (4)$$

Pr คือ แพททอนนัมเบอร์

7. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบแบตเตอรี่ คือค่าที่ใช้วัดว่าระบบระบายความร้อนสามารถพาความร้อนออกจากแบตเตอรี่ได้ดีเพียงใด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ แสดงออกดังสมการที่ 5

$$h = \frac{Nuk}{L} \quad (5)$$

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2 K$)

8. อัตราการถ่ายเทความร้อน

อัตราการพาความร้อนออกจากแบตเตอรี่ คือพลังงานความร้อนที่จะถูกระบายออกในแต่ละวินาที โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$Q_{conv} = mC_p(T_{out} - T_{in}) \quad (6)$$

โดยที่ Q_{conv} คือ อัตราการพาความร้อนที่ผิวแบตเตอรี่ (W)

C_p คือ ความจุความร้อนของอากาศ (kJ / kg.K)

T_{out} คือ อุณหภูมิอากาศที่ทางออก (K)

T_{in} คือ อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า (K)

การคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (m) จะได้จากการที่ทางที่ผู้ทำการทดลองกำหนดความเร็วลม (V) ที่ทางเข้า 5 m/s จึงคำนวณได้ดังสมการ 7

$$\dot{m} = \rho A V \quad (7)$$

โดยที่ $\dot{m}$ คือ มวลของอากาศที่จะต้องนำมาระบายความร้อนให้กับแบตเตอรี่ (kg / s)

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg / m³)

A คือ พื้นที่ทางไหลของอากาศ (m²)

V คือ ความเร็วของอากาศ (m/s)

ผลการวิจัย

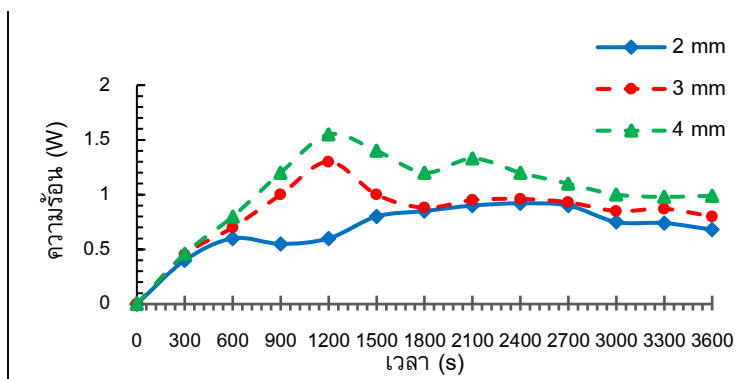
การทดลองการระบายความร้อนจากแพ็คแบตเตอรี่ด้วยอากาศแบบไหลตกกระทบ (Impinging Air) ดังภาพที่ 6 การทดลองจะให้อากาศไหลตกกระทบกับชุดแบตเตอรี่และลงจะกระจายโดยการบังคับออกด้านข้าง เป็นการระบายความร้อนที่เกิดจากการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion) 18650 ได้ทำตามขั้นตอนการทดลอง โดยจะมีผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 6 อุปกรณ์ทดลองและชุดแพ็คแบตเตอรี่

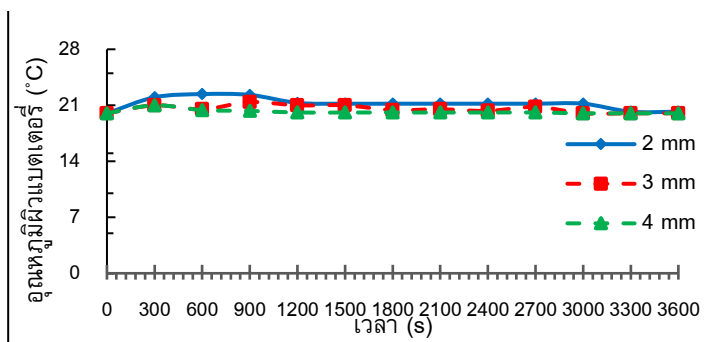
1. ผลการทดลองการระบายความร้อนแพ็คแบตเตอรี่ด้วยอากาศและอุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 1C

ผลการทดลองนี้ จะเป็นผลการทดลองที่มีความแตกต่างของระยะห่างของผิวแบตเตอรี่ที่ใช้อุณหภูมิในการระบายความร้อน 20 °C 25 °C และ 30 °C

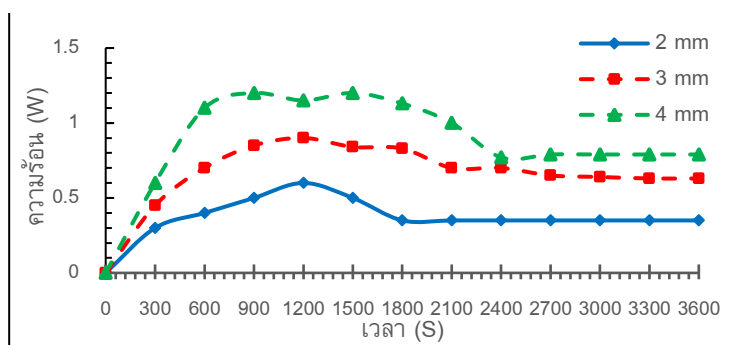


ภาพที่ 7 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ 1C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 20 °C

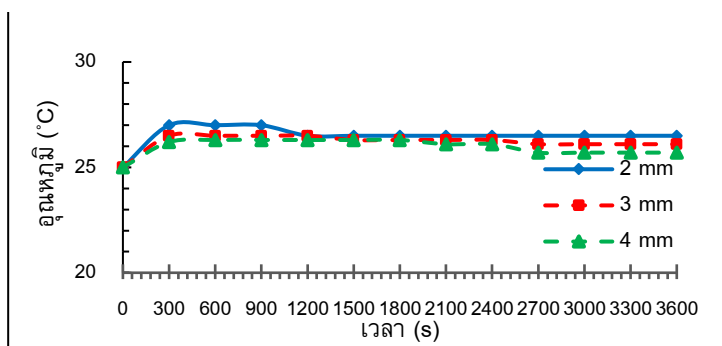
จากการทดลองภายใต้เงื่อนไขการชาร์จที่อัตรา 1C อุณหภูมิอากาศเข้า 20°C และความเร็วลมคงที่ 5 m/s พบว่า ระยะห่างระหว่างเซลล์แบตเตอรี่มีผลต่อประสิทธิภาพการระบายความร้อน โดยทดสอบที่ระยะห่าง 2 mm, 3 mm และ 4 mm ผลการทดลองแสดงให้เห็นดังภาพที่ 8 เมื่อระยะห่างระหว่างเซลล์เพิ่มขึ้น การระบายความร้อนจะดีขึ้นตามลำดับ โดยแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm สามารถระบายความร้อนได้สูงสุดถึง 1.6 W ซึ่งมากกว่าระยะห่าง 3 mm มีความร้อน 1.0 W และ 2 mm 0.7 W อย่างไรก็ตาม แม้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนจะสูงสุดที่ระยะห่าง 4 mm แต่อุณหภูมิผิวเซลล์กลับต่ำกว่าระยะห่างอื่น โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 20–25°C ดังแสดงในภาพที่ 9 สะท้อนว่าอากาศสามารถไหลผ่านช่องว่างได้ดีขึ้นเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ลดความร้อนสะสมบนผิวเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 8 อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 1C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 20 °C

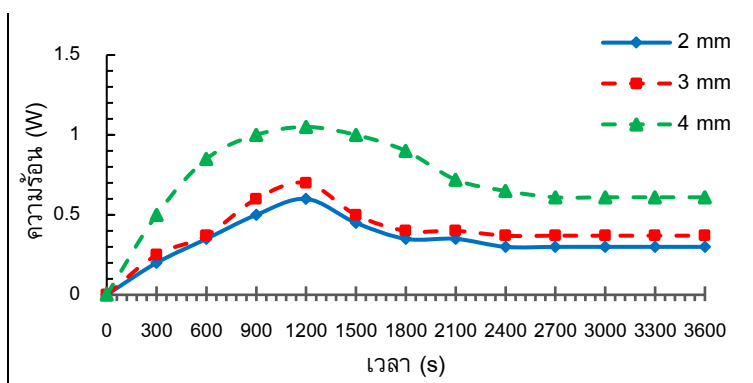


ภาพที่ 9 ความร้อนที่ถูกระบายออกที่อัตราการชาร์จ 1C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 25 °C

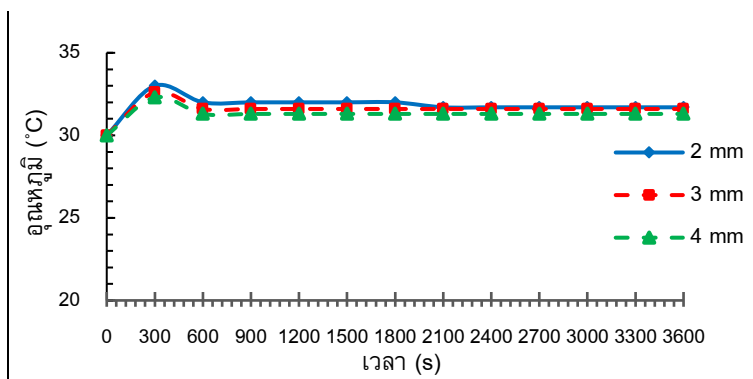


ภาพที่ 10 อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 1C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 25 °C

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการระบายความร้อนให้กับแบตเตอรี่ ดังรูปภาพที่ 10 พบว่าผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่มีระยะห่างระหว่างผิวเซลล์ 2, 3 และ 4 mm ภายใต้เงื่อนไขการอัดประจุที่ 1C อุณหภูมิอากาศเข้า 25°C และความเร็วลม 5 m/s ผลการทดลองพบว่า ระยะห่าง 4 mm ให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนสูงสุด โดยสามารถระบายความร้อนได้สูงสุด 1.3 W ขณะที่ระยะห่าง 3 mm และ 2 mm ระบายความร้อนได้ 0.9 W และ 0.3 W ตามลำดับ ด้านอุณหภูมิผิวเซลล์ แพ็คเกจแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm แสดงอุณหภูมิต่ำที่สุดในช่วง 25–30°C ซึ่งสอดคล้องกับผลในรูปภาพที่ 7 และรูปภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าระยะห่างมากช่วยเพิ่มการพาความร้อนและลดอุณหภูมิสะสมที่ผิวเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 11 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ 1C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 30 °C

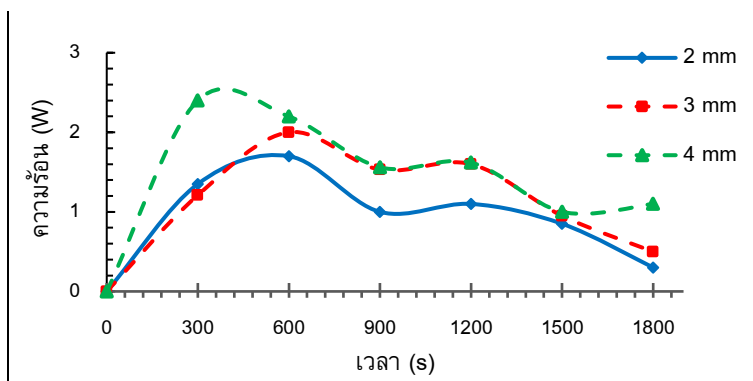


ภาพที่ 12 ความร้อนที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 1C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 30 °C

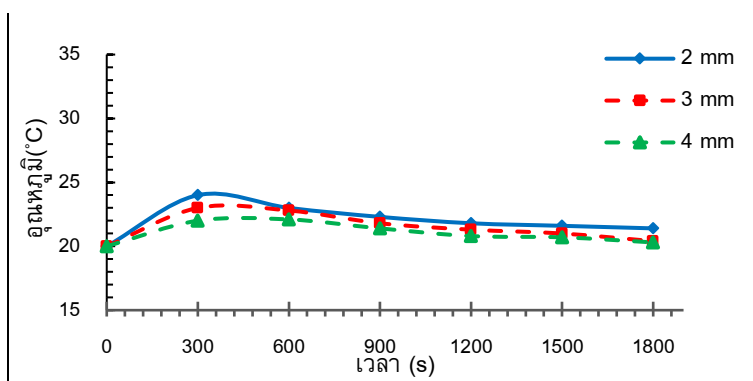
ภายใต้เงื่อนไขการอัดประจุ 1C โดยเพิ่มอุณหภูมิอากาศเข้าเป็น 30°C และความเร็วลม 5 m/s ดังรูปภาพที่ 11 พบว่า ระยะห่าง 4 mm ให้การระบายความร้อนสูงสุดที่ 1.0 W ขณะที่ระยะ 3 mm และ 2 mm อยู่ที่ 0.6 W และ 0.5 W ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิดังรูปภาพที่ 12 ที่ระยะห่าง 4 mm อยู่ในช่วง 30–35°C ซึ่งต่ำกว่าระยะอื่น ๆ สะท้อนให้เห็นถึงการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในสภาวะเดียวกัน

2. ผลการทดลองการระบายความร้อนแพ็กแบตเตอรี่ด้วยอากาศและอุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ ขณะมีการระบายความร้อนที่อัตราการชาร์จ 2C

ผลการทดลองนี้ จะเป็นผลการทดลองที่แตกต่างของระยะห่างของผิวแบตเตอรี่ ที่ใช้อุณหภูมิในการระบายความร้อน 20 25 และ 30 °C

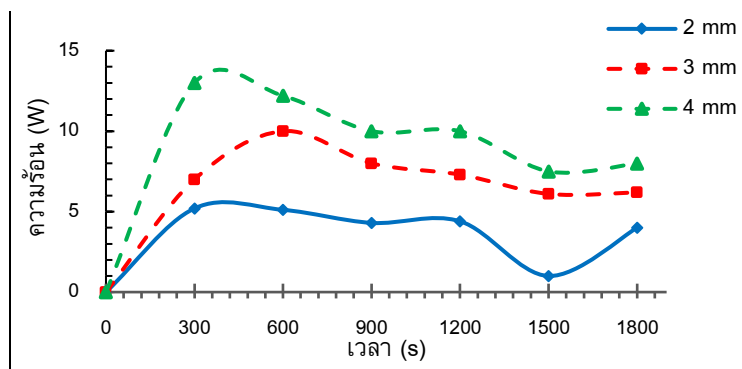


ภาพที่ 13 ความร้อนที่ถูกระบายออกที่อัตราการชาร์จ 2 C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 20 °C

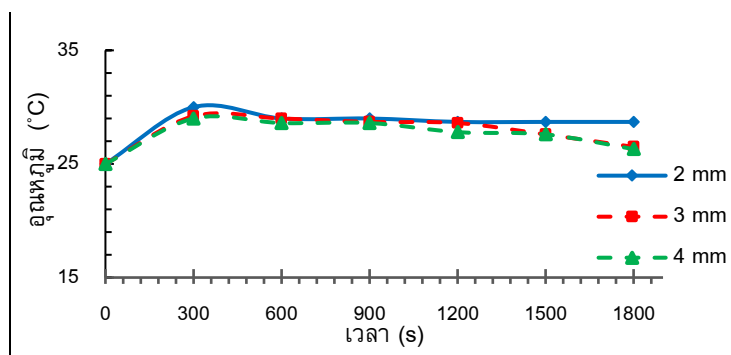


ภาพที่ 14 อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 2C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 20 °C

จากภาพที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแพ็กแบตเตอรี่ ภายใต้สภาวะการชาร์จที่อัตรา 2C โดยมีอุณหภูมิอากาศขาเข้า 20°C และความเร็วลม 5 m/s ผลการทดลองพบว่า แพ็กแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 มม. สามารถระบายความร้อนได้สูงสุดที่ 2.2 W ซึ่งสูงกว่าระยะห่าง 3 มม. 2.0 W และ 2 มม. 1.9 W สำหรับอุณหภูมิที่ผิวเซลล์แบตเตอรี่ พบว่า ระยะห่าง 4 มม. ส่งผลให้อุณหภูมิผิวต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่าง 3 มม. และ 2 มม. ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 14 โดยอุณหภูมิผิวอยู่ในช่วง 20–30 °C

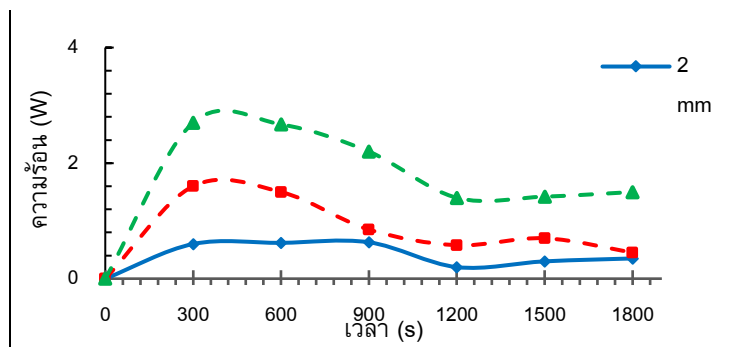


ภาพที่ 15 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ 2C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 25 °C

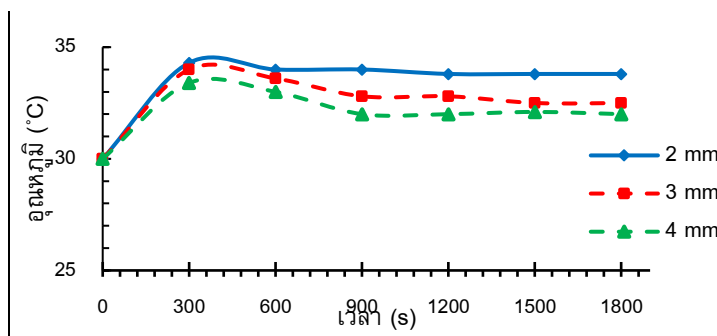


ภาพที่ 16 อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 2C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 25 °C

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าเป็น 25 °C ภายใต้สภาวะการชาร์จที่อัตรา 2C และความเร็วลม 5 m/s เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแพ็คเกจแบตเตอรี่ ดังภาพที่ 18 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แพ็คเกจแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm มีอัตราการระบายความร้อนสูงสุดที่ 12.1 W ซึ่งสูงกว่าระยะห่าง 3 mm ที่สามารถระบายความร้อนได้สูงสุด 10 W และระยะห่าง 2 mm ที่ระบายความร้อนได้เพียง 6 W นอกจากนี้ในภาพที่ 16 พบว่า อุณหภูมิที่ผิวเซลล์ของแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm มีค่าต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับระยะห่าง 3 mm และ 2 mm โดยอุณหภูมิผิวอยู่ในช่วง 25–30°C ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้



ภาพที่ 17 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ 2C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 30 °C

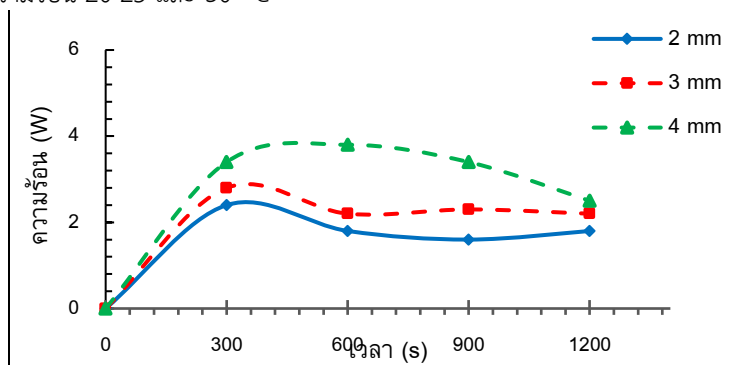


ภาพที่ 18 อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 2C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 30 °C

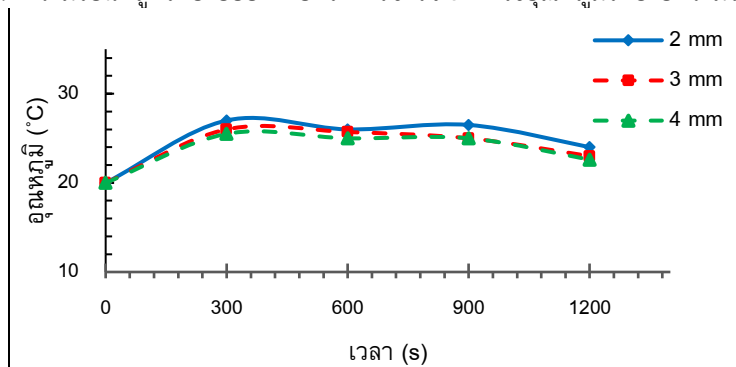
ส่วนภาพที่ 17 เป็นแสดงผลการทดลองที่เปรียบเทียบการระบายความร้อนของแพ็คเกจแบตเตอรี่ ภายใต้การอัดประจุที่ 2C อุณหภูมิอากาศเข้า 30°C และความเร็วลม 5 m/s พบว่า แพ็คเกจแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm และ 3 mm มีการระบายความร้อนสูงสุดเท่ากันที่ 3.0 W ส่วนระยะห่าง 2 mm ระบายความร้อนได้น้อยกว่าที่ 1.0 W อุณหภูมิผิวแบตเตอรี่ดังรูปภาพที่ 17 และสอดคล้องกับรูปที่ 18 พบว่า แบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm มีอุณหภูมิผิวต่ำที่สุด อยู่ในช่วง 30–35°C

3. ผลการทดลองการระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ด้วยอากาศและอุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อนที่อัตราการชาร์จ 3 C

ผลการทดลองนี้จะเป็นผลการทดลองที่แตกต่างของระยะห่างของผิวแบตเตอรี่ที่ใช้อุณหภูมิในการระบายความร้อน 20 25 และ 30 °C

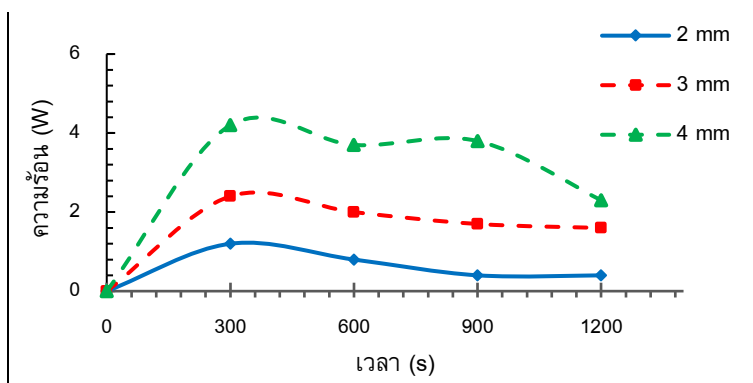


ภาพที่ 19 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ 3C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 20 °C

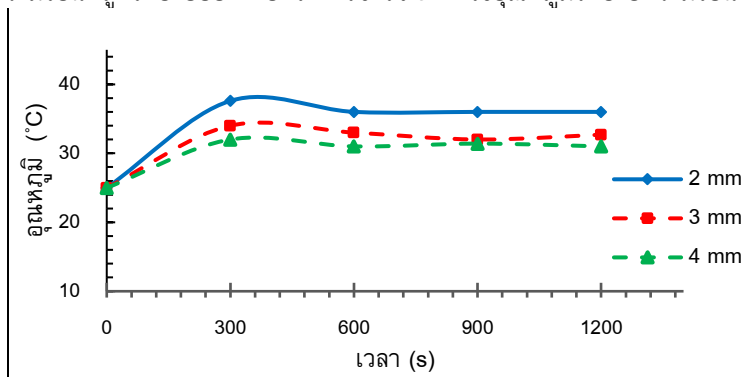


ภาพที่ 20 อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 3C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 20 °C

จากภาพที่ 18 พบว่าแพ็กแบตเตอรี่ที่มีระยะห่างระหว่างผิวเซลล์ 4 mm มีอัตราการระบายความร้อนสูงสุด โดยสูงสุดที่ประมาณ 4 W ขณะที่ระยะ 3 mm มีอัตราสูงสุดประมาณ 3.5 W และระยะ 2 mm อยู่ที่ประมาณ 2 W ก่อนที่จะลดลงเล็กน้อยในช่วงหลัง ในช่วงเวลาประมาณ 300–600 วินาที แสดงให้เห็นว่าแต่ละระยะห่างเข้าสู่ช่วงที่อัตราการระบายความร้อนสูงสุด และมีแนวโน้มคงที่หรือลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป แสดงถึงการเข้าสู่สภาวะสมดุลทางความร้อน ส่วนอุณหภูมิผิวแบตเตอรี่พบว่าแบตเตอรี่ที่มีระยะห่างระหว่างผิวเซลล์ 4 mm มีอุณหภูมิผิวต่ำที่สุดตลอดช่วงเวลา โดยอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 26.5°C รองลงมาคือระยะ 3 mm ที่ประมาณ 27°C และ 2 mm สูงที่สุดที่ประมาณ 28°C ดังรูปภาพที่ 20 มีแนวโน้มของกราฟชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิของผิวแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0–300 วินาที และค่อย ๆ คงที่หลังจากนั้น ซึ่งแสดงถึงการเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลความร้อน



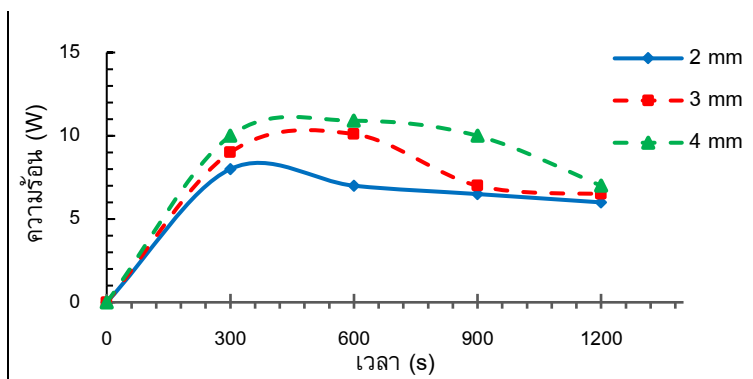
ภาพที่ 21 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ 3C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 25 °C



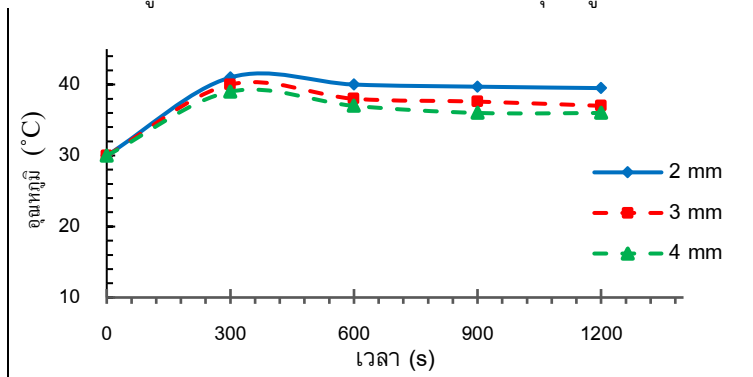
ภาพที่ 22 อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 3C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 25 °C

การเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่ถูกระบายออก ของแพ็กแบตเตอรี่เมื่อเวลาผ่านไป ภายใต้ระยะห่างระหว่างเซลล์ 2, 3 และ 4 mm อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 25 °C อัตราการชาร์จ 3C ดังภาพที่ 21 แสดงให้เห็นว่าแพ็กแบตเตอรี่ที่มีระยะห่างระหว่างเซลล์ 4 mm มีพลังงานความร้อนที่ถูกระบายออกสูงที่สุดตลอดช่วงเวลาการทดลอง โดยค่าสูงสุดประมาณ 4.1 W ที่เวลาประมาณ 300 วินาที จากนั้นค่าค่อย ๆ ลดลง แต่ยังคงสูงกว่าแพ็กที่มีระยะห่าง 2 และ 3 mm อย่างชัดเจน ในขณะที่แพ็กแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 3 mm มีค่าการระบายความร้อนสูงสุดที่ประมาณ 2.5 W และระยะห่าง 2 mm. มีค่าต่ำที่สุด โดยค่าสูงสุดประมาณ 1.3 W การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวของแพ็กแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง

ระหว่างเซลล์ 2, 3 และ 4 mm ภายใต้การชาร์จที่อัตรา 3C ดังภาพที่ 22 พบว่า แพ้กที่มีระยะห่าง 4 mm ให้ค่าอุณหภูมิผิวต่ำที่สุดตลอดช่วงเวลา โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 33°C ขณะที่ระยะ 3 และ 2 mm มีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 35°C และ 39°C ตามลำดับ และมีแนวโน้มอุณหภูมิคงที่หลังจาก 600 วินาที สะท้อนถึงภาวะสมดุลทางความร้อน



ภาพที่ 23 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ 3C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 30 °C



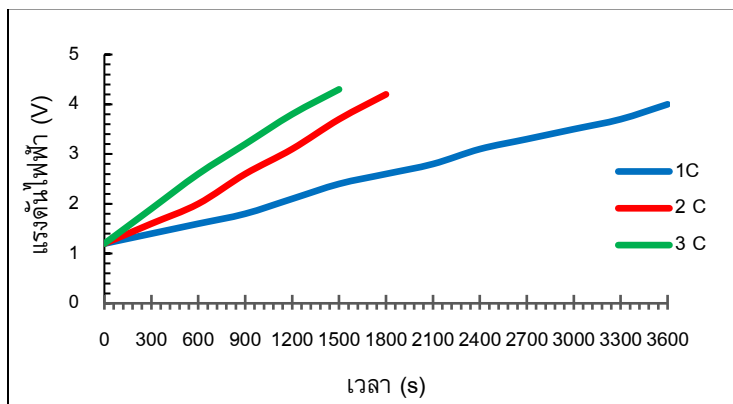
ภาพที่ 24 ความร้อนที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 3C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 30 °C

เมื่อทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้าเป็น 30 °C ดังภาพที่ 23 แสดงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่ถูกระบายออก เปรียบเทียบการระบายความร้อนของแพ็คเกจเตอรี่ที่มีระยะห่างระหว่างผิวภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ พบว่าแพ็คเกจเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm มีความร้อนที่ถูกระบายออก สูงสุดอยู่ที่ 12 W มากกว่า 3 mm ที่มีความร้อนที่ถูกระบายออกสูงสุดอยู่ที่ 11 W และ 2 mm มีความร้อนที่ถูกระบายออก 8 W ส่วนอุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ดังภาพที่ 24 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ระยะ 4 mm จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าระยะ 3 mm และ 2 mm ซึ่งมีแนวโน้มดังภาพที่ 24 และอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30 - 40 °C และอุณหภูมิคงที่หลังจาก 600 วินาที สะท้อนถึงภาวะสมดุลทางความร้อน

4. เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า (V) และเวลา (t) ในการอัดประจุ

แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เมื่อชาร์จด้วยอัตรา 1C, 2C และ 3C ดังรูปภาพที่ 27 เป็นการเปรียบเทียบค่าแรงดันในแต่ละอัตราการชาร์จ พบว่า แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในทุกอัตราการชาร์จ โดยอัตรา 3C มีการเพิ่มของแรงดันรวดเร็วที่สุด ใช้เวลาประมาณ 1,500 วินาที จนถึงแรงดันสูงสุด รองลงมาคืออัตรา 2C และ 1C ที่ใช้เวลาชาร์จจนานที่สุดประมาณ 3,600 วินาที พบว่า อัตราการ

ชาร์จที่สูงขึ้นช่วยลดเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่ได้อย่างมีนัยสำคัญอย่างไรก็ตาม อัตราการชาร์จที่สูงขึ้นอาจทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในเซลล์มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง



ภาพที่ 25 เวลาที่ใช้ในการอัดประจุกับเวลาที่ใช้ในแต่ละอัตรา

สรุปผล

การทดลองศึกษาการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 18650 โดยเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างเซลล์ที่ 2 mm, 3 mm และ 4 mm ภายใต้การชาร์จที่อัตรา 1C, 2C และ 3C ที่อุณหภูมิอากาศ 20°C, 25°C และ 30°C ผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ระยะห่าง 4 mm ให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนสูงสุดในทุกกรณี โดยที่อุณหภูมิ 25°C ความร้อนที่ระบายได้อยู่ที่ 12.1 W มากกว่าระยะห่าง 3 mm และ 2 mm ซึ่งอยู่ที่ 3.0 W และ 2.2 W ตามลำดับ ขณะที่อุณหภูมิผิวแบตเตอรี่อยู่ในช่วง 20–40°C ซึ่งเหมาะสมต่อการทำงานของแบตเตอรี่ สรุปได้ว่า ระยะห่างที่มากขึ้นช่วยให้อากาศไหลผ่านได้ดีขึ้น ลดความดันและเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ส่งผลให้การระบายความร้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากอุณหภูมิมีความสำคัญกับผลการทดลองอย่างมาก ควรตรวจสอบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ให้พร้อมก่อนทำการทดลอง เช่น อุณหภูมิผิวแบตเตอรี่ก่อนทำการทดลอง และอุณหภูมิอากาศที่ใช้ระบาย ควรใกล้เคียงกันทำการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ รวมทั้งแหล่งความรู้ในการสืบค้นงานวิจัย และสาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน และการปรับอากาศที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ในงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- เชษฐวิทย์ มุสิกศิริ. (2562). “มาตรการทางกฎหมายในการประกอบกิจการสถานีอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า”. *วารสารบัณฑิตศึกษานิติศาสตร์*, 12(1), 1-10.
- เชษฐวิทย์ มุสิกศิริ. (2552) “มาตรการทางกฎหมายในการประกอบกิจการสถานีอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า”. *Graduate Law Journal*, 12(1), 1-10.
- อนุสรณ์ สุขเกษม, ไพศาล นาผล, จุฑารัตน์ ครุเจริญ, และพิชัย อัญมณกุล. (2006). การถ่ายเท ความร้อนโดยการพาของกลุ่มครีบท่งทรงกรวย. *วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระ จลจอมเกล้า*, 4(1), 229-235.

- สราวุฒิ สิริเกษมสุข สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ และไพศาล นาผล. (2564). ทบทวนการจัดการความร้อนในแบตเตอรี่ลิเทียมสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 16(1), 93-107.
- บุญยวีร์ สุขสุสร สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ และไพศาล นาผล (2564). การระบายความร้อนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยโมดูลการทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 16(1), 50-58.
- โครงการศูนย์การเรียนรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า. (2564.July.5) *การศึกษาและพัฒนาระบบหล่อเย็นสำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย*: www.thaiauto.or.th
- พิมพ์ ลิ้มทองกุล และคณะ. (2021.July.5) *การวิจัยแบตเตอรี่ต้นแบบสำหรับรถยนต์นั่งไฟฟ้า* [ระบบออนไลน์] www.thaiauto.or.th
- สุริยา พันธุ์พาณิชย์. (2549) *การทดสอบแบตเตอรี่*. วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยนเรศวร
- กรรชัย เทียงลิ้ม. (2562) *การศึกษามูลกระทบของการระบายความร้อนที่ขั้วแบตเตอรี่ลิเทียม*. วิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ดร.วรวิศ กอปรสิริพัฒน์ (2022 Aug 6) *สารพันความร้อนด้านพลังงาน* [Online] <https://www2.mtec.or.th>
- Z. Rao, Z. Qian, Y. Kuang, & Y. Li. (2017) *Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface*. *Appl. Therm. Eng.*, vol. 123, pp. 1514–1522,
- Sadighi Dizaji, H., Jafarmadar, S., Khalilarya, S., & Moosavi, A. (2016). An exhaustive experimental study of a novel air-water based thermoelectric cooling unit. *Applied Energy*, 181, 357-366
- Rao,Z, & Wang,S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554-4571
- Z. Lu, X. Z. Meng, L. C. Wei, W. Y. Hu, L. Y. Zhang, & L. W. Jin, “Thermal management of densely-packed EV battery with forced air cooling strategies,” *Energy Procedia*, vol. 88, pp. 682–688, 2016
- L. H. Saw, Y. Ye, A. A. O. Tay, W. T. Chong, S. H. Kuan, & M. C. Yew, “Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling,” *Appl. Energy*, vol. 177, pp. 783–792, 2016
- Quantumscape (2021.July.5) *Distinguishing Charge rates For next-generation batteries* [Online] <https://www.quantumscape.com>
- AEC Hybrid Plus (2022 Aug 5) *Series and parallel battery connection* [Online] <https://th.aec-rnginerring.com>

Translated Thai References

- Chetthawit Musikasiri. (2009) “Legal Measures Related To The Operation Of Charging Stations For Electric Vehicles”. *Graduate Law Journal*, 12(1), 1-10.

- Anusorn Sukkasem, Paisarn Naphon, Chutarat Kuruchaoen, & Pichai Athamongkhon. (2006). On the Convective Heat Transfer of the Cylindrical Taper Pin Fins Array. *Chulachomklao Royal Military Academy*, 4(1), 229-235.
- Sirikasemsuk, S., Naphon, P., & Wiriyasart, S. (2021). Review Thermal Management System of Battery for Electrical Vehicles. *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 16(1), 93-107.
- Suksusron, P., Wiriyasart, S., & Naphon, P. (2021). Electrical Vehicle Battery Cooling by Thermoelectric Cooling Module . *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 16(1), 50-58.
- The Learning Center Project for Technology and Innovation Development in the Electric Vehicle Industry (July 5, 2021). *A Study and Development of a Cooling System for Electric Vehicle Batteries in Thailand*. www.thaiauto.or.th
- Limthongkul, P., & colleagues. (2021, July 5). *A study on prototype battery development for electric passenger cars*. www.thaiauto.or.th
- Phanpanit, S. (2006). *Battery testing* (Unpublished bachelor's thesis). Naresuan University, Department of Electrical Engineering.
- Thianglim, K. (2019). *A study on the effects of cooling at the terminals of lithium batteries* (Unpublished master's thesis). Kasetsart University, Department of Mechanical Engineering.
- Korpsiripat, W. (2022, August 6). *Various thermal issues in energy*. <https://www2.mtec.or.th>

Received: Apr 10, 2025

Revised: Jun 18, 2025

Accepted: Jun 21, 2025

การผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB โดยใช้กังหันน้ำเพลตัน ELECTRICITY GENERATION FROM UASB-TREATED WASTEWATER USING A PELTON TURBINE

phanupong samol¹, akeratana noppakant², numchoke wattananaiya³, chayporn supahitanukool¹, supapradit marsong^{1*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยปทุมธานี

²คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธนบุรี

³คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Phanupong Samol¹, Akeratana Noppakant², Numchoke Wattananaiya³,

Chaiporn Supahitanukool¹ and Supapradit Marsong^{1*}

¹Faculty of Engineering and Technology, Pathumtani University

²Faculty of Engineering, Thonburi University

³Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Corresponding author: e-mail supapradit.m@ptu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB) โดยใช้กังหันน้ำชนิดเพลตัน (Pelton Turbine) ในการออกแบบและพัฒนาด้านแบบระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ชุดทดสอบที่ใช้มีขนาดความยาว 0.70 เมตร ความกว้าง 3.68 เมตร และความสูง 1.55 เมตร โดยใช้กังหันน้ำเพลตันขนาด 50 วัตต์ ทดสอบภายใต้ช่วงอัตราการไหลของน้ำตั้งแต่ 500 ถึง 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง

ผลการทดลองพบว่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำ โดยสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเฉลี่ย 15.01 วัตต์ ที่อัตราการไหล 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อประเมินศักยภาพของระบบในระดับการใช้งานจริง ที่อัตราการไหล 50,000 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 574.53 วัตต์ โดยมีประสิทธิภาพไม่เกินร้อยละ 50 ของค่าทางทฤษฎี และสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 3,018 กิโลกรัมต่อปี ระบบดังกล่าวมีความคุ้มค่าในการลงทุน โดยมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 0.87 ปี ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากน้ำเสียที่ผ่านระบบ UASB โดยใช้กังหันน้ำเพลตันขนาดเล็ก เป็นแนวทางที่เป็นไปได้ทั้งในด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ อีกทั้งยังเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ภายในระบบบำบัดน้ำเสีย ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนเพื่อความยั่งยืนในระยะยาว

คำสำคัญ ระบบผลิตไฟฟ้าต้นแบบขนาดเล็ก การผลิตไฟฟ้าจากน้ำเสีย กังหันน้ำเพลตัน

Abstract

The objective of this research aimed to investigate the feasibility of generating electricity from wastewater treated by Upflow Anaerobic Sludge Blanket system (UASB) using a Pelton turbine. A small-scale prototype was designed and constructed with dimensions of 0.70 m x 3.68 m x 1.55 m to evaluate the performance of a 50-watt Pelton water turbine at water flow rates ranging from 500 to 1,000 liters per hour.

The experimental results showed that the electricity output increases with the flow rate, reaching a maximum average power of 15.01 watts at a flow rate of 1,000 liters per hour. A practical-scale evaluation using a UASB system with a flow rate of 50,000 liters per hour estimated a potential generation of 574.53

watts, with an efficiency of up to 50% of the theoretical value. The system also had the potential to reduce carbon dioxide emissions by approximately 3,018 kilograms per year. From an economic perspective, the power generation system proved to be viable, with a payback period of only 0.87 years. The findings confirmed the technical and economic wastewater, enhance energy efficiency, and promote renewable energy usage for long-term sustainability.

Keywords: Small-scale Power Generation System, Wastewater-to-Energy, Pelton Turbine

บทนำ

ในปัจจุบัน พลังงานไฟฟ้านับเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและคุณภาพชีวิตของประชาชน อย่างไรก็ตาม การพึ่งพาพลังงานจากแหล่งที่ไม่สามารถหมุนเวียนได้ เช่น เชื้อเพลิงฟอสซิล ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและภาวะโลกร้อน ส่งผลให้แนวทางการผลิตพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น (Dirma et al., 2024) โดยเฉพาะแนวทางที่สามารถบูรณาการเข้ากับกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่มีอยู่แล้ว เช่น การนำของเสียจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ประโยชน์ ซึ่งนอกจากจะลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานอีกด้วย หนึ่งในของเสียที่มีศักยภาพในการนำกลับมาใช้คือ น้ำเสีย โดยเฉพาะจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน เช่น ระบบยูเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB) ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถรองรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง ใช้พลังงานต่ำ และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในกระบวนการ (Mainardis et al., 2020) อย่างไรก็ตาม น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบนี้ มักถูกปล่อยทิ้งโดยไม่มีการนำกลับมาใช้ แม้จะยังมี ศักยภาพทางพลังงาน ที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้ ทั้งจากแรงดันจากการตกของน้ำและอัตราการไหลของน้ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของระบบ แม้จะมีแนวโน้มความสนใจในด้านการผลิตพลังงานจากน้ำเสียเพิ่มขึ้น แต่ในปัจจุบันยังขาดการศึกษาเชิงลึกและการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสม กังหันน้ำเพลตัน (Pelton Turbine) เป็นกังหันน้ำแบบแรงดันสูงที่เหมาะสมกับแหล่งน้ำที่มีอัตราการไหลต่ำแต่มีความสูงตกต่างมาก (Ibrahim et al., 2021) ซึ่งตรงกับลักษณะการไหลของน้ำที่ผ่านระบบ UASB การประยุกต์ใช้กังหันน้ำเพลตันในการผลิตไฟฟ้าจากน้ำเสียจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถแปลงพลังงานศักย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Paish, 2002; Samol et al., 2024) และอาจส่งผลเชิงบวกทั้งในด้านการประหยัดพลังงาน ลดต้นทุนการดำเนินงาน และลดปริมาณของเสียในระบบอุตสาหกรรม นอกจากนี้ แนวคิดด้านการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในระดับอาคารหรือสถานประกอบการก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญที่สนับสนุนการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้านพลังงานในทางปฏิบัติ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดความสูญเสียได้อย่างชัดเจน แนวทางดังกล่าวสามารถนำมาปรับใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจากน้ำเสีย โดยเฉพาะในด้านการควบคุมและบริหารจัดการการผลิตไฟฟ้าให้เกิดความเสถียรและคุ้มค่ามากที่สุด (เอกรัตน์ นกานต์ และคณะ, 2022)

จากปัญหาและช่องว่างทางองค์ความรู้ดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบ UASB โดยใช้กังหันน้ำเพลตันเป็นกลไกหลักในการแปลงพลังงาน ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ด้านเทคนิค ประสิทธิภาพการทำงาน และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบในบริบทการใช้งานจริง ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจากน้ำเสียในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบ UASB โดยใช้กังหันน้ำเพลตันเป็นกลไกในการแปลงพลังงาน
2. เพื่อออกแบบและสร้างชุดทดสอบแบบระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด
3. เพื่อประเมินศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและผลกระทบต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบต้นแบบ
4. เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กจากน้ำเสีย

ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบ UASB โดยใช้กังหันน้ำเพลตันเป็นกลไกหลักในการแปลงพลังงาน

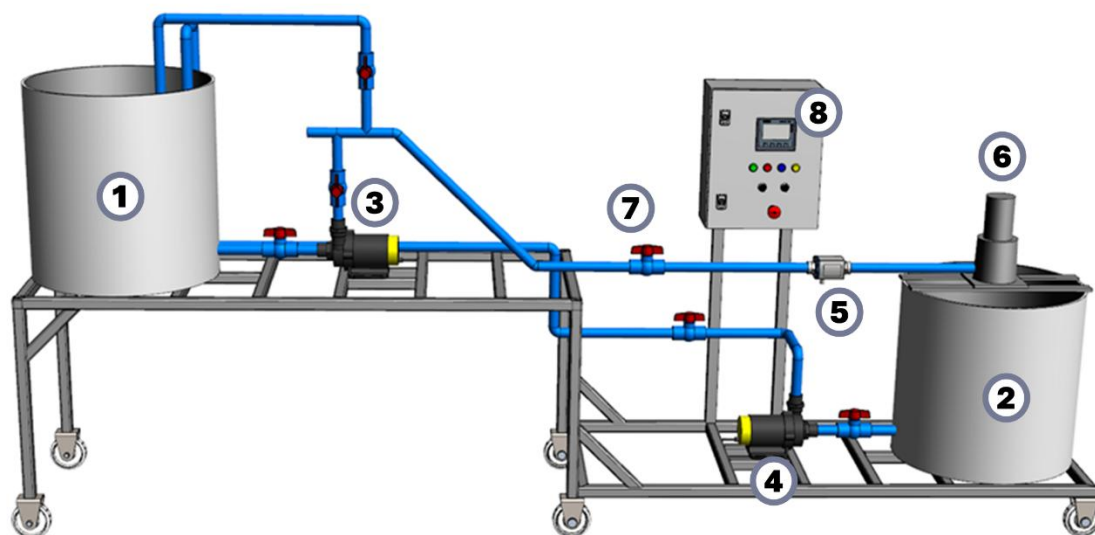
2. การทดลองดำเนินการโดยสร้างชุดทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก มีขนาดจำกัด เพื่อจำลองการไหลของน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสีย
3. การทดสอบประสิทธิภาพของกังหันน้ำเพลตันดำเนินการที่อัตราการไหลระหว่าง 500 ถึง 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง
4. ขอบเขตของงานวิจัยนี้ไม่รวมถึงการออกแบบ ปรับปรุง หรือพัฒนาโครงสร้างของระบบ UASB เดิม แต่จะมุ่งเน้นเฉพาะการใช้ประโยชน์จากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในการผลิตไฟฟ้า
5. การวิจัยนี้ครอบคลุมการประเมินศักยภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) รวมถึงการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าดังกล่าว
6. งานวิจัยนี้ใช้คุณสมบัติของน้ำหลังการบำบัดจากระบบ UASB ที่มีความเสถียรและไม่มีการปนเปื้อนที่ส่งผลต่อการทำงานของกังหันน้ำ โดยไม่ครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำเสียที่รุนแรงหรือมีองค์ประกอบเฉพาะทางอุตสาหกรรมที่อาจส่งผลกระทบต่อกังหัน

วิธีการดำเนินการวิจัย

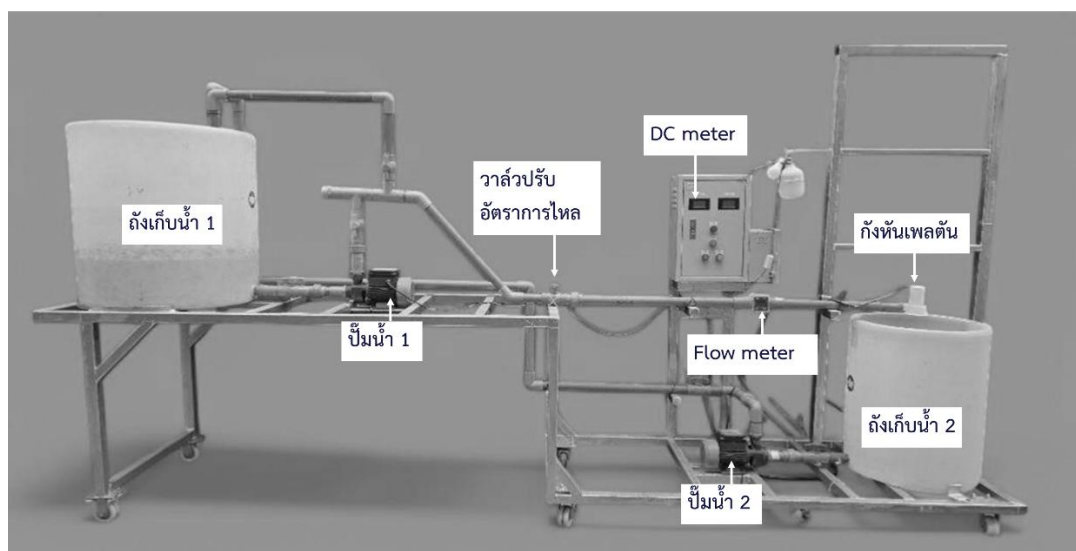
การดำเนินงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การศึกษาและออกแบบระบบต้นแบบ การสร้างชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกังหันน้ำเพลตัน และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ดังนี้

1. การศึกษาและออกแบบระบบต้นแบบ ผู้วิจัยทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB รวมถึงคุณสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัด และลักษณะการไหลของน้ำ เพื่อนำมาวิเคราะห์ความเหมาะสมในการนำมาก่อให้เกิดพลังงานศักย์ จากนั้นดำเนินการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กโดยใช้กังหันน้ำแบบเพลตัน (Pelton Turbine) ซึ่งเหมาะสมกับอัตราการไหลต่ำแต่มีแรงดันสูง โดยคำนวณและกำหนดขนาดของอุปกรณ์ให้สอดคล้องกับสถานะของน้ำที่ได้จากระบบ UASB

2. การสร้างชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าในการทดลอง มีขนาดความยาว 0.70 เมตร ความกว้าง 3.68 เมตร และความสูง 1.55 เมตร โดยใช้กังหันน้ำเพลตันขนาด 50 วัตต์เป็นกลไกหลักในการผลิตไฟฟ้า ระบบประกอบด้วยถังเก็บน้ำ ท่อส่งน้ำ กังหันเพลตัน เครื่องวัดอัตราการไหล และระบบควบคุมการวัดผลการผลิตไฟฟ้า ตามภาพที่ 1 และ 2



ภาพที่ 1 แบบจำลองชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยโปรแกรม Solidworks



ภาพที่ 2 ชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

ชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กตามภาพที่ 1 และ 2 ประกอบด้วยวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง ดังนี้

2.1 ถังเก็บน้ำ ขนาดความจุ 200 ลิตร จำนวน 2 ใบ ใช้สำหรับเก็บน้ำที่ใช้ในการทดสอบ หมายเลข 1 และ 2 ตามภาพที่ 1 โดยใส่น้ำที่ใช้ทดสอบ 150 ลิตร

2.2 ปั๊มน้ำชนิดหอยโข่ง จำนวน 2 เครื่อง หมายเลข 3 และ 4 ตามภาพที่ 1 โดยมีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 5 ถึง 40 ลิตรต่อวินาที ทำหน้าที่สูบน้ำเข้าสู่ระบบและควบคุมการไหลของน้ำ

2.3 ชุดวัดอัตราการไหลแบบดิจิทัล (Flow meter) หมายเลข 5 ตามภาพที่ 1 ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำในระบบ โดยสามารถวัดอัตราการไหลได้ในช่วง 0 ถึง 120 ลิตรต่อวินาที เพื่อความแม่นยำในการควบคุมการทดสอบปรับอัตราการไหลโดยใช้วาล์วปรับอัตราการไหล หมายเลข 7 ตามภาพที่ 1

2.4 เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า (DC Meter) หมายเลข 8 ตามภาพที่ 1 สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันน้ำ

2.5 ชุดกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าเพลตันขนาดเล็ก หมายเลข 6 ขนาด 50 วัตต์ จำนวนใบพัด 17 ใบพัด ตามภาพที่ 3 และตารางที่ 1

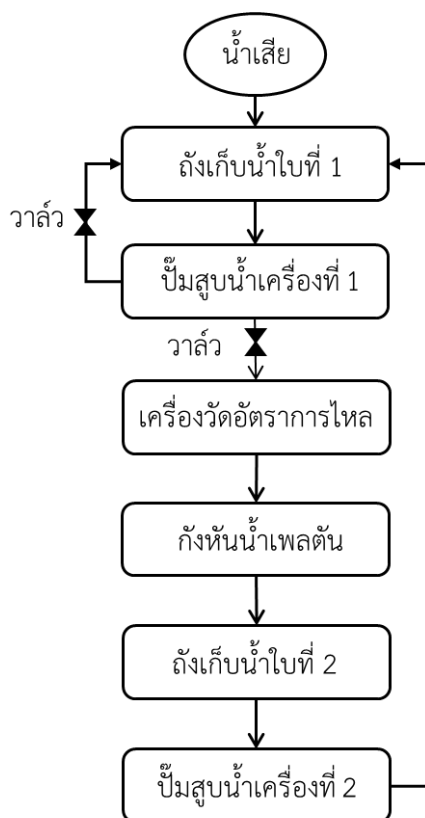


ภาพที่ 3 กังหันน้ำเพลตันที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 1 สมบัติกังหันเพลตันที่ใช้ทดสอบ

รายการ	สมบัติ
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	50 W
ขนาด	8.1x10 cm
แรงดันไฟฟ้า	1-36 V
จำนวนใบพัด	17

3. การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกังหันน้ำเพลตัน ทำการทดลองโดยใช้น้ำจำลองที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบ UASB ทดสอบการทำงานของระบบภายใต้อัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกันในช่วง 500 ถึง 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง โดยวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันน้ำเพลตัน ในแต่ละอัตราการไหล นอกจากนี้ ยังมีการ ประเมิน ศักยภาพของระบบในขนาดจริง โดยใช้ข้อมูลจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB ที่มีอัตราการไหล 50,000 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อนำไปคำนวณการผลิตไฟฟ้าในระดับใช้งานจริง โดยอิงจากผลการทดลองที่ได้จากต้นแบบ การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกังหันเพลตัน โดยใช้ชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก มีขั้นตอนการทดสอบดัง ภาพที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการทดสอบการผลิตไฟฟ้า

ภาพที่ 4 แสดงขั้นตอนการทดสอบการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันน้ำเพลตัน ซึ่งขั้นตอนการทดลองถูกออกแบบเพื่อจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด โดยลำดับการดำเนินการสามารถสรุปได้ดังนี้

3.1 นำน้ำที่ใช้สำหรับการทดสอบใส่ลงถังเก็บน้ำใบที่ 1

3.2 ทำการทดสอบการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันน้ำเพลตันโดยเริ่มต้นจากการเปิดใช้งานปั๊มน้ำเครื่องที่ 1 และควบคุมอัตราการไหลของน้ำโดยการปรับวาล์วร่วมกับการตรวจสอบค่าที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล โดยกำหนดช่วงอัตราการไหลระหว่าง 500 ถึง 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง เพิ่มขึ้นครั้งละ 100 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อควบคุมน้ำให้ไหลผ่านกังหันเพลตันตามค่าที่กำหนด

3.3 ดำเนินการเปิดปั๊มน้ำเครื่องที่ 2 เพื่อสูบน้ำที่ไหลผ่านกังหันเพลตันและถูกเก็บรวบรวมในถังเก็บน้ำใบที่ 2 กลับเข้าสู่ถังเก็บน้ำใบที่ 1 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาระดับน้ำให้คงที่ตลอดระยะเวลาการทดสอบ

3.4 บันทึกข้อมูลกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า จากเครื่องวัดอัตราการไหล ทุก 30 นาที รวม 8 ครั้งต่ออัตราการไหลที่กำหนด

4. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ผลการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของระบบ และเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี นอกจากนี้ ยังดำเนินการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อประเมินความคุ้มค่าของระบบ

ผลการดำเนินการ

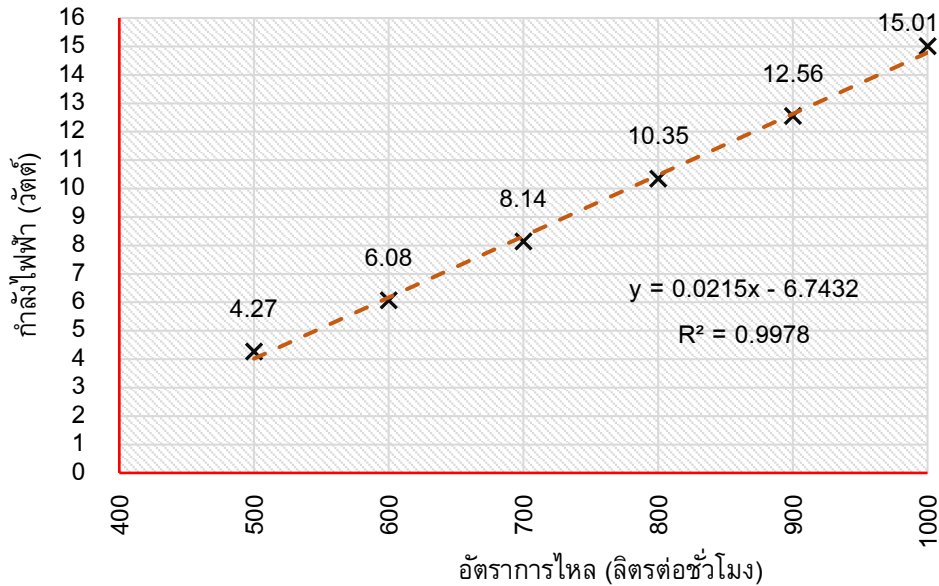
1. ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการทดสอบสมรรถนะของกังหันเพลตันโดยใช้ชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าทดสอบขนาดเล็กเพื่อประเมินศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่ควบคุมได้ โดยทำการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่สำคัญ ได้แก่ กำลังไฟฟ้า (วัตต์) แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) และกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมป์) ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานศักย์ของน้ำให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ผลการทดสอบสามารถสรุปและแสดงได้ตามรายละเอียดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกังหันผลิตไฟฟ้าเพลตัน

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมป์)
500	4.27	12.20	350
600	6.08	13.50	450
700	8.14	14.80	550
800	10.35	15.92	650
900	12.56	17.20	730
1000	15.01	18.30	820

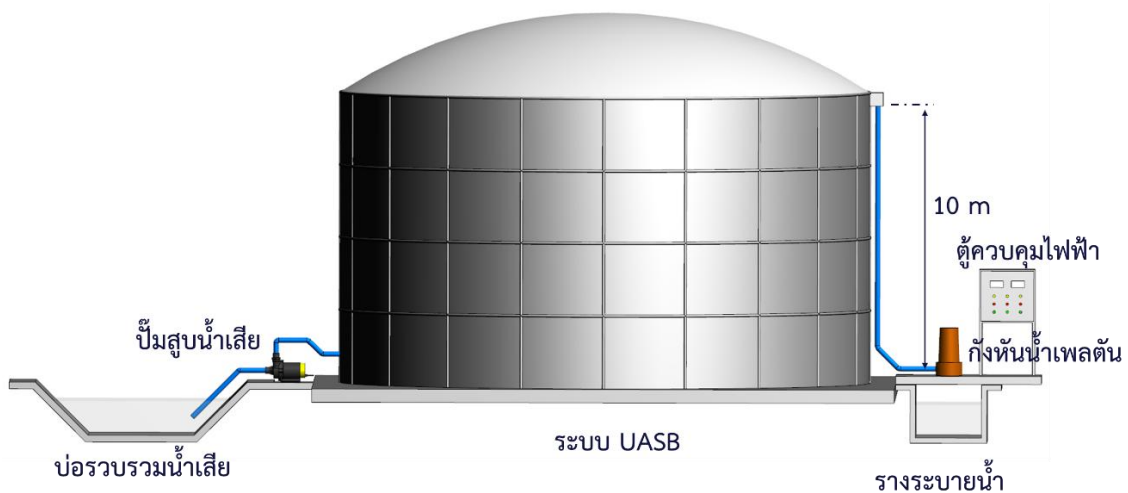
จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 2 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันน้ำเพลตัน โดยใช้ น้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดแบบ UASB ที่มีอัตราการไหลตั้งแต่ 500 ถึง 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามอัตราการไหลของน้ำ และสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 500 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 4.27 วัตต์ เพิ่มขึ้นเป็น 15.01 วัตต์ ที่อัตราการไหล 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อทำการคำนวณพลังงานไฟฟ้า (จากสมการ $P = IV$) พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากแรงดันและกระแสใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ต่ำมาก เฉลี่ยไม่เกิน $\pm 0.1\%$ แสดงถึงความน่าเชื่อถือของระบบการวัดผลและการแปลงพลังงานของชุดต้นแบบ เมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล กับ กำลังไฟฟ้า ได้ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับกำลังไฟฟ้า

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Flow rate) กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Power) ของกังหันน้ำ โดยพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ $y = 0.0215x - 6.7432$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.9978$ แสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองเชิงเส้นในการทำนายค่ากำลังไฟฟ้า ความชันของสมการมีค่าเท่ากับ 0.0215 หมายความว่า ทุกการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหล 1 ลิตรต่อชั่วโมง จะทำให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 0.0215 วัตต์ และจากข้อมูลพบว่าที่อัตราการไหล 1000 ลิตรต่อชั่วโมง กังหันสามารถผลิตพลังงานได้สูงสุดถึง 15.01 วัตต์ สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกังหันในช่วงอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น

2. ผลการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าต้นแบบขนาดเล็ก



ภาพที่ 6 แบบจำลองระบบการผลิตไฟฟ้าต้นแบบขนาดเล็ก

ภาพที่ 6 แสดงแบบจำลองระบบการผลิตไฟฟ้าต้นแบบขนาดเล็กประกอบด้วยส่วนประกอบหลักหลายส่วน ได้แก่ บ่อรวบรวมน้ำเสีย ที่ทำหน้าที่รวมน้ำเสียก่อนจะถูกสูบโดยปั๊มสูบน้ำเสีย ไปยังระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB ซึ่งกระบวนการบำบัดจะเกิดจากการไหลของน้ำเสียจากด้านล่างขึ้นไปยังด้านบน น้ำที่ผ่านการบำบัดจะไหลออกจากท่อน้ำที่ด้านบนและตกลง

สู่พื้นผ่านกังหันเพลดันผลิตไฟฟ้าซึ่งกังหันน้ำจะเปลี่ยนพลังงานจากการไหลของน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกส่งไปยังตู้ควบคุมไฟฟ้า เพื่อนำพลังงานไฟฟ้ากลับมาใช้ในกระบวนการต่างๆ ภายในระบบ

จากแบบจำลองระบบการผลิตไฟฟ้าต้นแบบขนาดเล็ก (รูปที่ 6) วิเคราะห์พลังงานไฟฟ้า (P) ที่ผลิตได้โดยใช้ทฤษฎี และสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Q) กับกำลังไฟฟ้า (P) ของกังหันเพลดัน ได้ดังนี้

2.1 การวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าต้นแบบขนาดเล็กสามารถทำได้โดยใช้สมการพลังงานศักย์ของของไหล ดังแสดงในสมการที่ (1) โดยกำหนดให้ประสิทธิภาพของกังหัน (η) เท่ากับ 100% ระดับน้ำเหนือกังหันมีความสูง (H) เท่ากับ 10 เมตร และอัตราการไหลของน้ำ (Q) เท่ากับ 50,000 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 0.014 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เมื่อนำค่าดังกล่าวแทนในสมการ จะสามารถคำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากสมการ (1) ดังนี้

$$P = \eta \rho g H Q \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร (1,000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร)

η คือ ประสิทธิภาพของกังหัน มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

H คือ ความสูง เมื่อวัดจากจุดอ้างอิงมีหน่วยเป็นเมตร (เมตร)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที² (9.81 เมตรต่อวินาที²)

เมื่อนำค่าเข้าแทนในสมการที่ (1) จะได้

$$P = 1373.4 \text{ วัตต์}$$

2.2 วิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบการผลิตไฟฟ้าต้นแบบขนาดเล็ก โดยใช้กังหันน้ำกังหันเพลดัน จากผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เมื่อนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Q) และกำลังไฟฟ้า (P) ได้สมการเชิงเส้น ดังนี้

$$P = 0.0116Q - 4.1654 \quad (2)$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์) และ Q คือ อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง) เมื่อแทนค่า Q = 50,000 ลิตรต่อชั่วโมง ลงในสมการที่ (2) จะได้:

$$\begin{aligned} P &= 0.0116(50,000) - 4.1654 \\ &= 574.53 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

2.3 การวิเคราะห์การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

จากการที่ระบบบำบัดน้ำเสียมีการปล่อยน้ำอย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันน้ำเพลดันสามารถดำเนินการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ตลอดทั้งวัน โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวันสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พลังงานต่อวัน} &= 574.53 \text{ วัตต์} \times 24 \text{ ชั่วโมง} \\ &= 13.79 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน} \end{aligned}$$

ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิลมีค่าแตกต่างกันตามประเภทของเชื้อเพลิง โดยถ่านหินมีค่าการปล่อยประมาณ 1.0 กิโลกรัม CO₂ ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และก๊าซธรรมชาติประมาณ 0.4 ถึง 0.5 กิโลกรัม CO₂ ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับประเทศไทย ค่าการปล่อยโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.5 ถึง 0.6 กิโลกรัม CO₂ ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ดังนั้น ในการวิเคราะห์นี้จึงเลือกใช้ค่าเฉลี่ยที่ 0.6 กิโลกรัม CO₂ ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (Global Economic Insights, 2024) ค่าการลดการปล่อยก๊าซ CO₂ จากการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบกังหันน้ำสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{การลดค่า CO}_2 \text{ ต่อวัน} &= 13.79 \times 0.6 \text{ กิโลกรัม CO}_2 \text{ ต่อวัน} \\ &= 8.27 \text{ กิโลกรัม CO}_2 \text{ ต่อวัน} \\ &= 3,018 \text{ กิโลกรัม CO}_2 \text{ ต่อปี} \end{aligned}$$

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันน้ำเพลตันจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของระบบในการมีส่วนร่วมในการลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และสามารถนำไปพิจารณาในการขอรับสิทธิประโยชน์จากคาร์บอนเครดิตในอนาคตได้

3. ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากแบบจำลองระบบการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจากระบบบำบัดน้ำเสีย UASB ที่ได้ นำมาทำการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์โดยใช้หลักการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ เป็นการพิจารณาว่าผลประโยชน์ของโครงการมากกว่าหรือน้อยกว่าต้นทุน สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

3.1 ต้นทุนการติดตั้งกังหันพลังน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กต้นทุนเฉลี่ยประมาณ 60,000 บาท ต่อκιโลวัตต์ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559; ศูนย์วิจัยพลังงานแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555; Chompookham & Boon-Long, 2010) ดังนั้นต้นทุนของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 574.53 วัตต์ เท่ากับ 34,472 บาท

3.2 การวิเคราะห์ผลประโยชน์ของโครงการ

ผลประโยชน์ที่ได้จากโครงการ คือ การลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้า จากการผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก มาช่วยลดปริมาณการใช้ไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ไฟฟ้า (Q) และกำลังไฟฟ้า (P) ของกังหัน สามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ได้ค่าพลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 574.53 วัตต์ และนำมาคำนวณผลประโยชน์จากการผลิตไฟฟ้าได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลประโยชน์จากการผลิตไฟฟ้า

รายการ	ผลลัพธ์	หน่วย
1 พลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้	574.53	วัตต์
2 ระยะเวลาทำงานของระบบ	24	ชั่วโมง
3 พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบ = $[(1) \times (2) / 1000] \times 30$	413	หน่วยต่อเดือน
4 Ft.	0.9112	-
5 ค่าพลังงานไฟฟ้า	4.1839	บาทต่อหน่วย
6 ค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด = $\{[(3) \times (5)] + [(3) \times (4)] + \text{Vat } 7\% \} \times 12$	39,429	บาทต่อปี

จากตารางที่ 4 พบว่า ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากน้ำเสียสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เฉลี่ย 574.53 วัตต์ และมีระยะเวลาการทำงาน 24 ชั่วโมงต่อวัน เมื่อคำนวณรวมในระยะเวลา 30 วัน จะได้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดประมาณ 413 หน่วยต่อเดือน โดยพิจารณาอัตราค่าไฟฟ้าพื้นฐาน (Ft) เท่ากับ 0.9112 และค่าไฟฟ้าหน่วยละ 4.1839 บาท จะได้มูลค่าค่าไฟฟ้าทั้งปี เท่ากับ 39,429 บาท ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบดังกล่าวมีศักยภาพในการสร้างผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจในระดับที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง

3.3 ระยะเวลาคืนทุน (Payback period: PB) เป็นเกณฑ์ทางเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ประเมินความสามารถในการคืนต้นทุนของโครงการภายในระยะเวลาที่กำหนด โดยพิจารณาจากช่วงเวลาที่ผลประโยชน์หรือรายได้ที่เกิดขึ้นจากการดำเนินโครงการสามารถชดเชยต้นทุนเริ่มแรกที่ลงทุนไปได้อย่างครบถ้วน ซึ่งเป็นตัวชี้วัดเบื้องต้นที่นิยมใช้ในการตัดสินใจลงทุน โดยเฉพาะในโครงการด้านพลังงานหรือระบบเทคโนโลยีที่มีความเสี่ยง การคำนวณระยะเวลาคืนทุนสามารถทำได้จากสมการที่ (3) ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{PB} &= \frac{\text{TC}}{\text{AB}} & (3) \\
 &= 34,472 / 39,429 \\
 &= 0.87 \text{ ปี}
 \end{aligned}$$

โดยที่ PB คือ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB)
 TC คือ ต้นทุนทั้งหมด (Total Cost)
 AB คือ ผลประโยชน์เฉลี่ยต่อปี (Average Benefit / Year)

จากการคำนวณพบว่า ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากน้ำเสียต้นแบบมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 0.87 ปี หรือประมาณ 10 เดือน แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าและศักยภาพในการลงทุนด้านเศรษฐศาสตร์.

สรุปและการอภิปรายผล

จากการวิจัยพบว่า การผลิตไฟฟ้าจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบ UASB โดยใช้กังหันน้ำเพลตันเป็นกลไกในการแปลงพลังงาน เป็นแนวทางที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงในโรงบำบัดน้ำเสีย โดยอาศัยพลังงานจากการไหลของน้ำที่มีอยู่แล้วในระบบ ผลการทดลองจากชุดต้นแบบระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กแสดงให้เห็นว่า ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอัตราการไหลของน้ำ โดยสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดเฉลี่ย 15.01 วัตต์ ที่อัตราการไหล 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง และเมื่อจำลองสภาพการทำงานจริงที่อัตราการไหล 25,000 ลิตรต่อชั่วโมง ระบบสามารถผลิตพลังงานได้สูงสุดประมาณ 574.53 วัตต์ แม้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานจะอยู่ที่ไม่เกินร้อยละ 50 ของค่าทางทฤษฎี แต่ก็ถือว่าเหมาะสมกับลักษณะของระบบที่ใช้พลังงานจากของเสีย ทั้งนี้ ระบบยังแสดงศักยภาพในด้านสิ่งแวดล้อม โดยสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 3,018 กิโลกรัมต่อวัน นอกจากนี้ การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า ระบบมีความคุ้มค่าในการลงทุน โดยมีระยะเวลาคืนทุนเพียง 0.87 ปี ซึ่งถือว่ารวดเร็วและส่งผลดีต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในพื้นที่ที่มีการระบายน้ำเสียอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ระบบผลิตไฟฟ้าดังกล่าวมีความเป็นไปได้ทั้งในเชิงเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม และสามารถใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบพลังงานหมุนเวียนจากของเสียได้อย่างยั่งยืน

ข้อเสนอแนะ

ควรทดสอบระบบในระยะยาวภายใต้สภาพน้ำจริงจาก UASB เพื่อประเมินผลกระทบจากตะกอนหรือสิ่งเจือปน ควรขยายการทดลองสู่ระดับกึ่งอุตสาหกรรมหรือภาคสนามเพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานจริง ควรศึกษาการรวมระบบผลิตไฟฟ้ากับแหล่งพลังงานอื่น เช่น ก๊าซชีวภาพจากกากตะกอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวม และควรประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืน (Zhang et al., 2022; Li et al. 2020)

กิตติประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.ศุภประดิษฐ์ มาสงค์ และ ดร.ชัยพร สุภาหิตานุกุล ที่ช่วยแนะนำ ให้ความรู้ สนับสนุนข้อมูลประกอบการวิจัย ตลอดจนคำแนะนำอื่น ๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ทีมช่าง บริษัท เอโอเอส เอ็นจิเนียริง (ประเทศไทย) จำกัด ที่ช่วยจัดหาอุปกรณ์ สร้างแบบจำลอง และ สนับสนุนด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณครอบครัว คุณแม่สมพงษ์ สามล และ คุณอรพิน พะนารินทร์ ผู้คอยให้กำลังใจและสนับสนุนด้วยดีตลอดมา ตลอดจนบุคคลท่านอื่นที่ไม่ได้เอ่ยนาม ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2559). คู่มือการพัฒนาโครงการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก. กระทรวงพลังงาน. <http://www.dede.go.th>
- ศูนย์วิจัยพลังงานแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2555). รายงานการศึกษาความเหมาะสมของการใช้พลังงานน้ำในพื้นที่ท่าอากาศยาน. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (กรุงเทพฯ).
- เอกรัตน์ นกานต์, บุญยัง ปลั่งกลาง และศุภวัฒน์ ลาวัลย์วิสุทธิ. (2022). การบริหารจัดการพลังงานในอาคารโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี, 6(1), 1–12.
- Chompookham, T., & Boon-Long, S. (2010). Micro hydropower development in Thailand: Case studies and policy implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1991–1995. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.026>
- Dirma, V., Neverauskienė, L. O., Tvaronavičienė, M., Danilevičienė, I., & Tamošiūnienė, R. (2024). The impact of renewable energy development on economic growth. *Energies*, 17(24), 6328. <https://doi.org/10.3390/en17246328>

- Global Economic Insights. (2024). Carbon dioxide emission per electricity generation – Thailand. CEIC Data. Retrieved March 26, 2025, from <https://www.ceicdata.com/en/thailand/carbon-dioxide-emissions-statistics/carbon-dioxide-emission-per-electricity-generation>
- Ibrahim, H. I., Abdullah, H. B., Othman, M. Y. H., & Ariffin, M. K. A. (2021). Experimental studies of Pelton hydropower using waste water. *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (JFFHMT)*, 8, 10–16. <https://jffhmt.avestia.com/2021/PDF/002.pdf>
- Lettinga, G., Van Velsen, A. F. M., Hobma, S. W., de Zeeuw, W., & Klapwijk, A. (1980). Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, 22(4), 699–734. <https://doi.org/10.1002/bit.260220402>
- Li, Y., Gao, X., Wang, X., Zhang, Y., & Guo, L. (2020). Long-term performance of UASB and AnMBR for treating wastewater containing N, N-dimethylformamide (DMF): Focus on operational stability and microbial. *Journal of Environmental Management*, 273, 111095. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111095>
- Mainardis, M., Buttazzoni, M., & Goi, D. (2020). Up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) technology for energy recovery: A review on state-of-the-art and recent technological advances. *Bioengineering*, 7(2), 43. <https://doi.org/10.3390/bioengineering7020043>
- Paish, O. (2002). Small hydro power: Technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(6), 537–556. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00006-0)
- Samol, P., Limsakul, C., & Wichitnithad, N. (2024). Techno-economic feasibility study of electricity generation from industrial wastewater treatment system. *Journal of Engineering Research and Materials Utilization Technology*, 12(1), 45–56. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt/article/view/259237>
- Zhang, X., Yang, G., Zhang, Y., Wang, H., & Li, J. (2022). Environmental and economic assessment of biogas and sludge energy utilization from UASB system using life cycle assessment. *Energy*, 257, 124770. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124770>

Translated Thai References

- Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2016). *Handbook for the development of small hydropower projects*. Ministry of Energy. <http://www.dede.go.th>
- Chulalongkorn University Energy Research Center. (2012). *Feasibility study report on the use of hydropower in remote areas*. Chulalongkorn University: Bangkok.
- Noppakant, A., Plangklang, B., & Lawanvisut, S. (2022). the building energy management using microprocessor control. *Journal of Science and Technology, Thonburi University*, 6(1), 1–12.

Received: Jan 17, 2025

Revised: Jun 18, 2025

Accepted: Jun 21, 2025

การควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดสำหรับวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์

SLIDING MODE CONTROL FOR SINGLE PHASE BRIDGE RECTIFIER CIRCUIT WITH POWER FACTOR IMPROVEMENT OF BOOST CONVERTER

ปิยะนัฐ ใจตรง¹ กำจัด ใจตรง^{2*}¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยามPiyanat Jaitrong¹ Kumjat Jaitrong²¹ Faculty of Engineering, Thonburi University² Faculty of Engineering and Technology, Siam Technology College

Corresponding author: e-mail kumjatj@siamtechno.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนากลยุทธ์การควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์เพื่อลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกของกระแสและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่ง โดยใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟและวิธีการควบคุมกระแสแบบสไลด์ดิ้งโหมดเพื่อให้ประสิทธิภาพการติดตามที่ดีและความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ รวมทั้งใช้ตัวควบคุมพีไอเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ผลการจำลองการทำงานพบว่าวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์ที่มีการควบคุมกระแสแบบสไลด์ดิ้งโหมดสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าคงที่ 400 V ที่โหลดสูงสุดขนาด 1,500 W ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกของกระแสและแรงดันจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.10 % และ 0.02 % ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับ 1.0 และค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 88.58 % อีกทั้งกระแสฮาร์โมนิกได้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 61000-3-2:2019 ทุกประการ

คำสำคัญ: การควบคุมกระแสแบบสไลด์ดิ้งโหมด, วงจรแปลงผันแบบบูสต์, การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

Abstract

This research aimed to develop a control strategy for a single-phase bridge rectifier circuit with power factor improvement of boost converter to reduce current harmonic distortion and to improve the power factor correction nearly to unity power factor. This action is accomplished by using active RLC high-frequency harmonic filters and a sliding mode current control method that provides good tracking performance and robustness with respect to parameter variations including the use of a PI controller to regulate the DC voltage. The simulation results showed that the single-phase bridge rectifier circuit with power factor improvement of boost conversion circuit with sliding mode current control demonstrates impressive performance in maintaining a constant voltage of 400 V even under a maximum load of 1,500 W. The harmonic distortion values of the current and voltage have an average value of 2.10 % and 0.02 %, respectively. As a result, the power factor value is equal to 1.0, the average efficiency value is equal to 88.58%. Additionally, the current harmonics comply with the requirements of the IEC 61000-3-2:201

Keywords: Sliding mode control, Boost converter, Power factor improvement

บทนำ

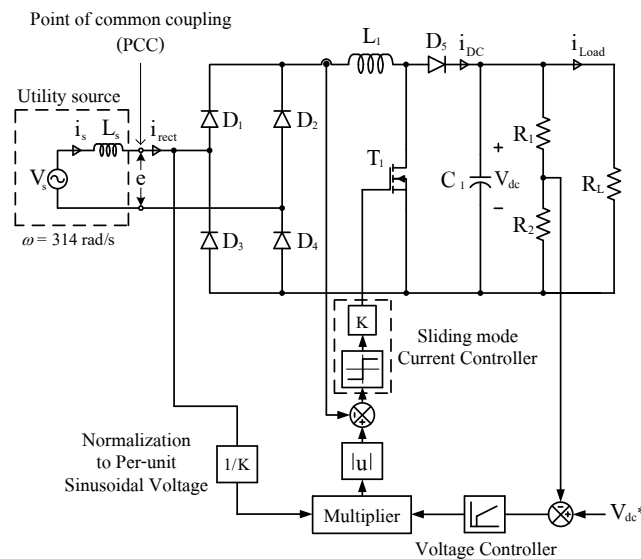
การควบคุมพลังงานไฟฟ้าหรือการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากรูปแบบหนึ่งไปยังอีกรูปแบบหนึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็น ซึ่งการแปลงพลังงานไฟฟ้าเหล่านั้นจะใช้คอนเวอร์เตอร์กำลังเป็นตัวแปลงพลังงานโดยใช้วงจรเรียงกระแสด้วยไดโอดแบบบริดจ์เป็นตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่และเป็นโครงสร้างที่ใช้มากที่สุดเนื่องจากวงจรไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำและความน่าเชื่อถือสูง (S. S. Sayed and A.M. Massoud, 2022) ในการประยุกต์ใช้งานดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่เพื่อลดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่นั้นจะทำให้มีการบิดเบือนอย่างมากและเกิดกระแสไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์เนื่องจากผลของกระแสฮาร์มอนิกปะปนเข้าไปในกระแสรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 50 Hz จึงเป็นผลทำให้กระแสอินพุตมีฮาร์มอนิกสูงและกระแสฮาร์มอนิกจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหาต่างๆขึ้น เช่น รูปคลื่นแรงดันมีการเพี้ยน ความร้อนในระบบมีค่ามาก สัญญาณรบกวนมีค่าสูงและค่าความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแหล่งจ่ายมีค่าลดลง (Chen et al., 2021; Chen et al., 2021) ถ้าหากกำลังไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้ามีค่าต่ำๆ ปัญหาเหล่านี้สามารถขจัดให้ลดน้อยลงได้โดยใช้วิธีการพัฒนาตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้นและรูปแบบที่นิยมมากที่สุดคือวิธีการแปลงผันด้วยวงจรบูสต์เพราะการพัฒนาตัวประกอบกำลังด้วยวิธีแบบนี้ทำให้ได้ประสิทธิภาพกับค่าตัวประกอบกำลังมีค่าสูงเมื่อเทียบกับวิธีอื่น (Valipour et al., 2020) นอกจากนี้การขับเคลื่อนยังสามารรถทำได้ง่ายและตัวเหนี่ยวนำที่วางไว้ด้านหน้าอุปกรณ์สวิตช์จะช่วยทำให้กระแสอินพุตมีค่าเรียบมากๆ เทคนิคการควบคุมด้วยวงจรบูสต์มีหลายรูปแบบและรูปแบบหนึ่งที่ (ดำรง จินขาวขำ และ ประสิทธิ์ จันทรมนตรี, 2550) ได้นำเสนอคือการป้อนกลับแบบตรวจจับสนะวึกการลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันด้วยการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟแทนการใช้ตัวกรองด้านเข้าอาร์แอลซีแบบพาสซีฟมีผลทำให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่งและทำให้ประสิทธิภาพของวงจรสูงขึ้น (กำจัด ใจตรง และคณะ, 2562) และยังมีการพัฒนาการควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟด้านเข้าตัวกรองแบบแอลซีของวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์เพื่อลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่งโดยใช้เทคนิคพีดับลิวเอ็มและใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟรวมทั้งใช้การควบคุมสวิตช์ในวงจรเพื่อปรับรูปคลื่นกระแสให้เข้าใกล้รูปคลื่นไซน์อ้างอิง อีกทั้งมีวิธีการลดการแกว่งแบบอาร์แอลซีเสมือนเป็นวิธีลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก ของกระแสและแรงดันด้วยการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟแทนการใช้ตัวกรองด้านเข้าอาร์แอลซีแบบพาสซีฟมีผลทำให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่งและทำให้ประสิทธิภาพของวงจรสูงขึ้น (กำจัด ใจตรง และ ปิยะนัฐ ใจตรง, 2562) ส่วนการควบคุมแบบสไลดิงโหมดถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมการปรับรูปคลื่นแบบแอคทีฟของวงจรกรองแอคทีฟ โดยการควบคุมนี้สามารถใช้งานได้จริงและติดตั้งง่าย ไม่จำเป็นต้องคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงหรือกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากกระแสโหลด (Saetieo et al., 1994) อีกทั้งการควบคุมแบบสไลดิงโหมดยังมีปัญหาเรื่องการสั่น (chattering) จึงได้นำสัญญาณพีดับลิวเอ็มมาใช้เพื่อสร้างกฎการสวิตช์แบบความถี่คงที่ สัญญาณพีดับลิวเอ็มจะปรับสัญญาณควบคุมแบบไม่ต่อเนื่องจะถูกทำให้เรียบ ซึ่งเกิดจากการควบคุมแบบสไลดิงโหมด (Abrishamifar et al., 2012)

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาการควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์เพื่อลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่ง เนื่องจากกระแสอินพุตของวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่ต่อกับวงจรแปลงผันแบบบูสต์ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ทำให้กระแสอินพุตมีฮาร์มอนิกสูงส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำและยังทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าต่ำด้วย ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟแทนการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบพาสซีฟเพื่อลดพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบพาสซีฟและยังสามารถลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตได้ อีกทั้งยังใช้วิธีการควบคุมกระแสแบบสไลดิงโหมดเพื่อลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแส โดยวิธีที่นำเสนอนี้สามารถลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตที่เกิดขึ้นให้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 61000-3-2:2019 ทุกประการ

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถแสดงระบบในภาพรวมดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งเป็นวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์ เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นกับวงจรแปลงผันแบบบูสต์ โดยวงจรเรียงกระแสเป็นตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนวงจรแปลงผัน

แบบบัสต์ทำหน้าที่ปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเอาต์พุตตามที่กำหนดไว้ โดยมีการทำงานดังต่อไปนี้ เมื่อ e เป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากแหล่งจ่าย i_{rect} เป็นกระแสของโหลดซึ่งเกิดจากความผิดเพี้ยนเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของ โหลด วงจรแปลงผันแบบบัสต์ที่ควบคุมแบบพีดีบีลิวเอ็มจะสวิตช์ให้กระแสไฟฟ้ามีเฟสตามแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ในขณะเดียวกันจะมีการควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่คร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่โดยเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมตัวเก็บประจุกับค่าที่กำหนด ค่าความแตกต่างจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีโอเพื่อให้ได้เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการคงค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุ เมื่อกระแสไฟฟ้างกล่าวคุณกับแรงดันเฟสจะได้กระแสอ้างอิง ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างกระแสอ้างอิงกับกระแสอินพุตที่ป้อนกลับจะถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบสไลดิงโหมดเพื่อสร้างพัลส์พีดีบีลิวเอ็มไปควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัสต์เพื่อให้กระแสอินพุตติดตามกระแสอ้างอิง ซึ่งจะทำให้กระแสอินพุตอินเฟสกับแรงดันอินพุต



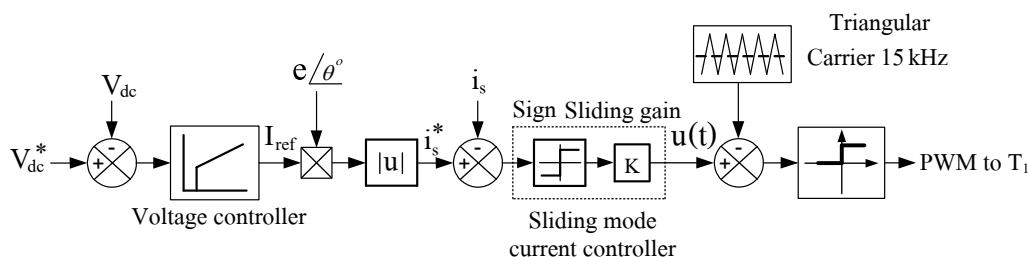
ภาพที่ 1 วงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันแบบบัสต์

ความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันมีผลต่อค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัสต์ ดังแสดงในสมการที่ 1

$$PF = \frac{V_1 I_1 \cos \theta_1 + \sum_{h=2}^n V_h I_h \cos \theta_h}{\sqrt{V_1^2 + \sum_{h=2}^n V_h^2} \times \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^n I_h^2}} \quad (1)$$

โดยที่ V_1 แทน แรงดันอาร์เอ็มเอสอินพุตของแหล่งจ่ายที่ความถี่หลักมูลหรือลำดับฮาร์มอนิกที่ 1(V)
 V_h แทน แรงดันอาร์เอ็มเอสอินพุตของแหล่งจ่ายที่ความถี่ลำดับฮาร์มอนิก h ใดๆ (V)
 I_1 แทน กระแสอาร์เอ็มเอสอินพุตของแหล่งจ่ายที่ความถี่หลักมูลหรือลำดับฮาร์มอนิกที่ 1(A)
 I_h แทน กระแสอาร์เอ็มเอสอินพุตของแหล่งจ่ายที่ความถี่ลำดับฮาร์มอนิก h ใดๆ (A)
 θ_1 แทน มุมต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความถี่หลักมูลหรือลำดับฮาร์มอนิกที่ 1(องศา)
 θ_h แทน มุมต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความถี่ลำดับฮาร์มอนิก h ใดๆ (องศา)
 h แทน ลำดับฮาร์มอนิกใดๆ
 n แทน จำนวนลำดับฮาร์มอนิกใดๆ

การวิเคราะห์ระบบควบคุม



ภาพที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบูสต์

จากภาพที่ 2 วงจรแปลงผันแบบบูสต์ สามารถแบ่งตามการควบคุมได้ดังนี้

ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage Controller)

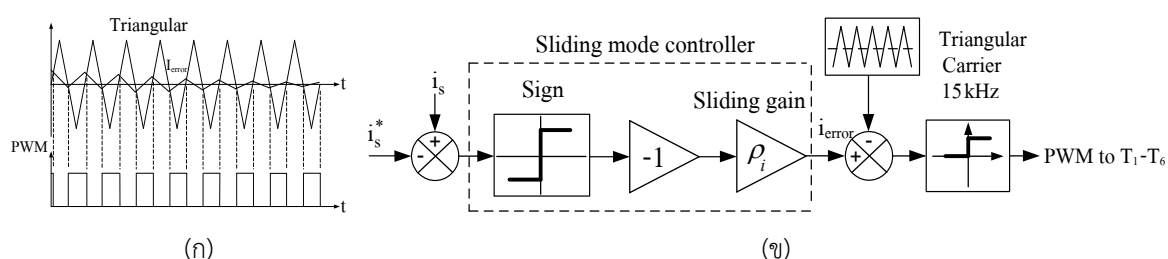
การทำงานของวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันแบบบูสต์ จำเป็นต้องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมตัวเก็บประจุให้มีค่าคงที่ตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด เพื่อที่จะทำให้การทำงานของวงจรแปลงผันแบบบูสต์สวิตช์ให้กระแสไฟฟ้ามีเฟสตามแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีโอเข้ามาควบคุมความแตกต่างระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมตัวเก็บประจุ ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_{ref}(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (V_{dc}^*(s) - V_{dc}(s)) \quad (2)$$

เมื่อ V_{dc}^* และ V_{dc} คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดและค่าแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมตัวเก็บประจุ โดยที่ K_p และ K_i คือ อัตราขยายเทอมสัดส่วนและอัตราขยายเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าตามลำดับ

การควบคุมสไลด์ิงโหมดแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าจะนำเอาสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมกระแส (i_{error}) จากการควบคุมแบบสไลด์ิงโหมดของความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าที่กำหนดกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์กับกระแสไฟฟ้าที่กำหนดไปมอดูเลตกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม ความถี่สูง สัญญาณพัลส์บลิวเอ็มทีที่เกิดจากการเปรียบเทียบจุดตัดของสัญญาณทั้งสอง ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบูสต์ดังแสดงในภาพที่ 3 (ก)



ภาพที่ 3 (ก) หลักการสร้างสัญญาณพัลส์บลิวเอ็มทีที่มีการควบคุมแบบสไลด์ิงโหมดแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

(ข) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

จากภาพที่ 3 (ข) เป็นบล็อกไดอะแกรมการทำงานของการควบคุมสไลด์ิงโหมด โดยกฎการควบคุมของสไลด์ิงโหมดเป็นไปตามสมการที่ 3 หรือ 4 ซึ่งแสดงใน (ทวีศักดิ์ ทองแสนธีรยุทธ ชาติชนะยีนยง และ ญัฐภูมิสุวรรณหา, 2558: 18-31)

$$i_{error}(t) = -\rho_i \text{sgn}(s(x,t)) \quad (3)$$

หรือ

$$i_{\text{error}}(t) = \begin{cases} -p_i & \text{if } s(x,t) > 0 \\ p_i & \text{if } s(x,t) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

โดยที่ p_i คือ การขยายสัญญาณสไลด์ของกระแสไฟฟ้า $\text{sgn}(\cdot)$ คือ ชิกนัมหรือฟังก์ชันเครื่องหมาย และ $s(x,t)$ คือ ฟังก์ชันสวิตช์

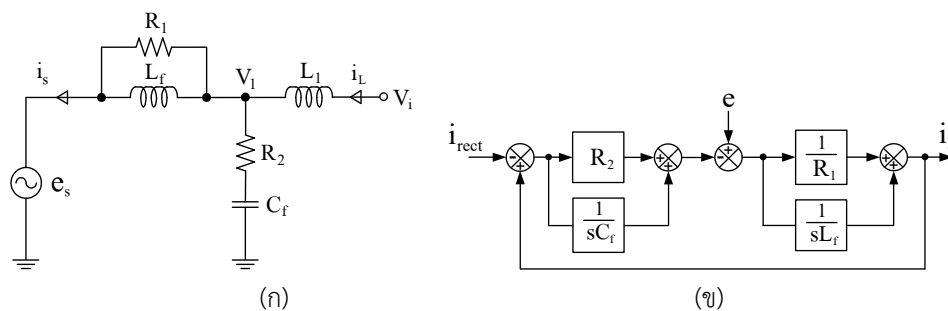
$$s(x,t) = e_i \quad (5)$$

โดย e_i คือ ค่าผิดพลาดของกระแสไฟฟ้า และ x คือ สภาวะของระบบ

ส่วนการสร้างสัญญาณพัลส์ดับลิวเอ็ม ได้มาจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่มาจากการควบคุมแบบสไลด์กับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 15 kHz ทำให้ได้สัญญาณพัลส์ดับลิวเอ็มความถี่ 15 kHz เพื่อไปขับสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบูสต์

การวิเคราะห์ตัวกรองแอลซีแบบแอคทีฟและตัวควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟ

ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟเป็นแนวคิดของตัวต้านทานเสมือนดังที่แสดงใน (P.A. Dahono, 2002: 1630-1635) การวิเคราะห์ตัวกรองแบบแอลซีและตัวควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟเพื่อหาความสัมพันธ์ในการลดกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่เรโซแนนท์ โดยในการควบคุมจะสร้างตัวกรองแอลซีแบบแอคทีฟทำงานร่วมกับตัวควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟ เพื่อลดการใช้ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟ ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลแบบเฟสเดียวดังแสดงในภาพที่ 4(ก) และเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมเพื่อใช้ในการสร้างเป็นตัวควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟได้ดังแสดงในภาพที่ 4(ข)



ภาพที่ 4 (ก) วงจรสมมูลแบบเฟสเดียวทางด้านเอซีของวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียว

(ข) บล็อกไดอะแกรมของวงจรสมมูลทางด้านเอซีของวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียว

จากภาพที่ 4(ก) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์เพื่อหากระแสที่จ่ายให้วงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียว (กำจัดไจตรง, ฉัตรชัย เอียฤทธิ์ และปิยะนัฐ ไจตรง, 2562:15-24) โดยใช้สมการโนดวิเคราะห์ได้ผลดังนี้

$$V_i(s) = \frac{((R_1 + L_f s)(R_2 C_f s + 1)L_1)E(s) + (R_1 L_f (R_2 C_f s + 1))V_i(s)}{(R_1 + R_2)L_1 L_f C_f s^2 + ((R_1 R_2 C_f (L_1 + L_f)) + L_1 L_f)s + R_1 (L_1 + L_f)} \quad (6)$$

จากวงจรในภาพที่ 4(ก) สามารถหาค่า $I_s(s)$ ได้เป็น

$$I_s(s) = \frac{(L_f C_f R_2 s^2 + (C_f R_1 R_2 + L_f)s + R_1)V_i(s)}{(R_1 + R_2)L_1 L_f C_f s^3 + ((R_1 R_2 C_f (L_1 + L_f)) + L_1 L_f)s^2 + R_1 (L_1 + L_f)s} - \frac{(L_1 L_f C_f s^3 + (L_1 C_f R_1 + L_f C_f R_2)s^2 + (C_f R_1 R_2 + L_f)s + R_1)E(s)}{(R_1 + R_2)L_1 L_f C_f s^3 + ((R_1 R_2 C_f (L_1 + L_f)) + L_1 L_f)s^2 + R_1 (L_1 + L_f)s} \quad (7)$$

แทนค่า $V_i(s) = K(I_s^*(s) - I_s(s))$ ในสมการที่ 7 จะได้

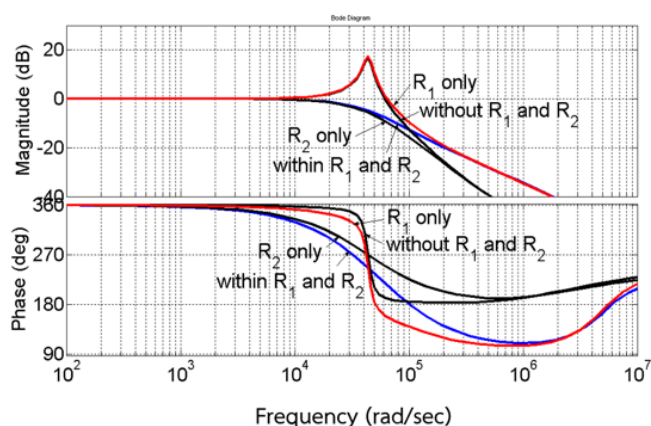
$$I_s(s) = \frac{AI_s^*(s) - BE_s(s)}{C} \quad (8)$$

โดยที่ $A = R_2 L_f C_f K s^2 + K(R_1 R_2 C_f + L_f)s + R_1 K$

$B = L_1 L_f C_f s^3 + (R_1 L_1 C_f + R_2 L_f C_f)s^2 + (R_1 R_2 C_f + L_f)s + R_1$

$C = L_1 L_f C_f (R_1 + R_2)s^3 + (R_1 R_2 C_f (L_1 + L_f) + L_1 L_f + R_2 L_f C_f K)s^2 + (R_1 (L_1 + L_f) + (R_1 R_2 C_f + L_f)K)s + R_1 K$

จากสมการที่ 8 การปรับตัวควบคุมการแกว่งแบบแอททิฟทำได้โดยการปรับค่า R_1 และ R_2 ในภาพที่ 4(ข) ซึ่งผลตอบสนองที่ได้จากการปรับค่า R_1 และ R_2 ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสเฟอริงฟังก์ชันของกระแสอินพุต ดังสมการที่ 8

สรุปผลการวิจัย

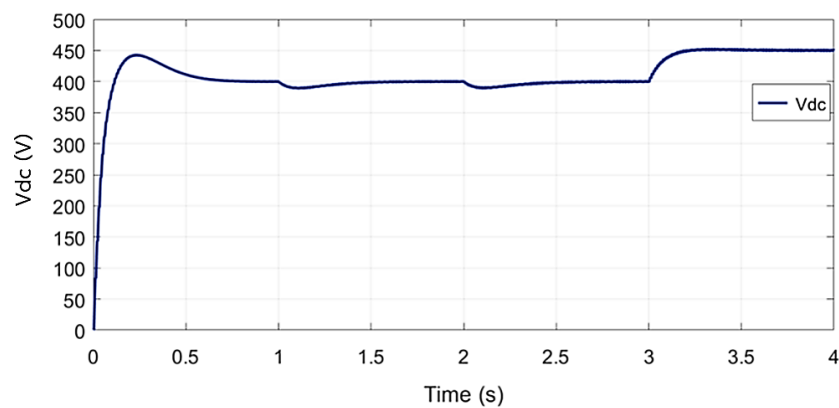
เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแนวคิดที่ได้นำเสนอจะจำลองการทำงานของวงจรที่มีโครงสร้างดังในภาพที่ 1 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป โดยค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์วงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุ่งค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์

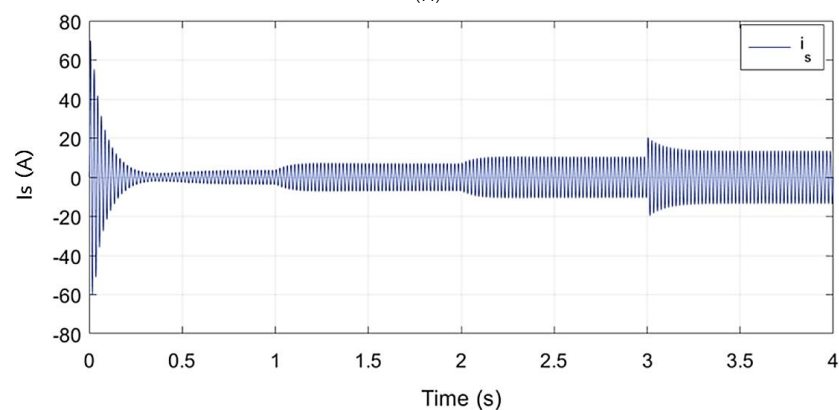
ตัวแปร	ค่าที่ใช้	ตัวแปร	ค่าที่ใช้
พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต	1,500 W	อัตราขยายเทอมสัดส่วนของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (K_p)	0.2
แรงดันไฟฟ้า	220 V _{L-N}	อัตราขยายเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (K_i)	1
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	400 V _{dc}	ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงแอลแบบแอททิฟ (L_f)	1 mH
ตัวเหนี่ยวนำ (L_1)	1 mH	ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงซีแบบแอททิฟ (C_f)	1 uF
ตัวเก็บประจุ (C_{dc})	3,000 uF	ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แบบแอททิฟ (R_1)	1
ความถี่ในการสวิตช์ (f_s)	15 kHz	ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แบบแอททิฟ (R_2)	0.5
		อัตราขยายสัญญาณสไลด์ของกระแสไฟฟ้า (p_1)	1

ผลการจำลองการทำงานสามารถแบ่งออกได้ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะชั่วครู่ เมื่อใช้ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอททิฟ (L_f , C_f , R_1 และ R_2) กับตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์โหมด ดังแสดงในภาพที่ 6 ถึง ภาพที่ 9 และส่วนกรณีที่ 2 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอททิฟ (L_f , C_f , R_1 และ R_2) กับตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์โหมดเทียบกับการใช้ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพที่ 10

กรณีที่ 1 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะชั่วคราว เมื่อใช้ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟ (L_f , C_f , R_1 และ R_2) กับตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์ดิ้งโหมด



(ก)

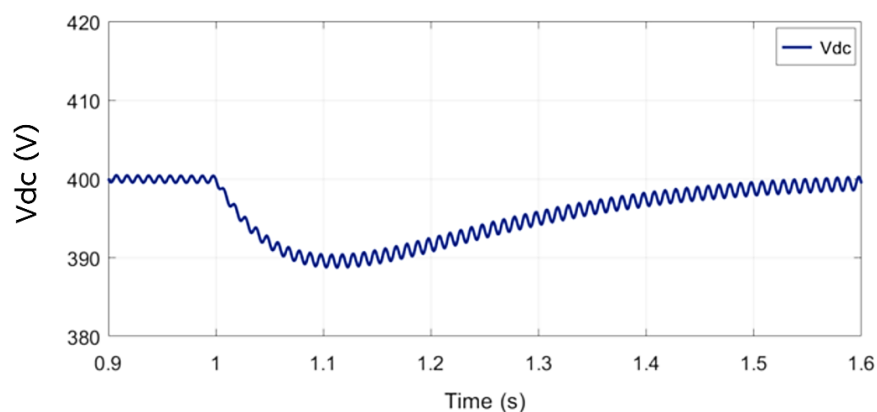


(ข)

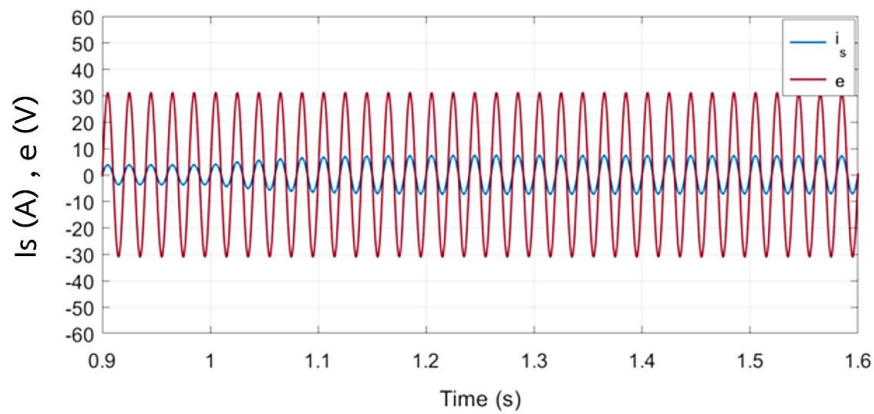
ภาพที่ 6 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับโหลด

(ข) กระแสไฟฟ้าอินพุต

จากภาพที่ 6 (ก) เป็นผลการจำลองการทำงานของวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวในช่วงเวลา 0 - 4 s โดยผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับโหลด เมื่อเพิ่มโหลดอย่างฉับพลันจาก 500 W เป็น 1,000 W ที่เวลา 1 s และ 1,000 W เป็น 1,500 W ที่เวลา 2 s ปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 400 V เป็น 450 V ที่เวลา 3 s ในส่วนของกระแสอินพุตในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) โดยในแต่ละช่วงเวลาสามารถแสดงเป็นส่วนๆ ได้ดังแสดงในภาพที่ 7 ถึงภาพที่ 9



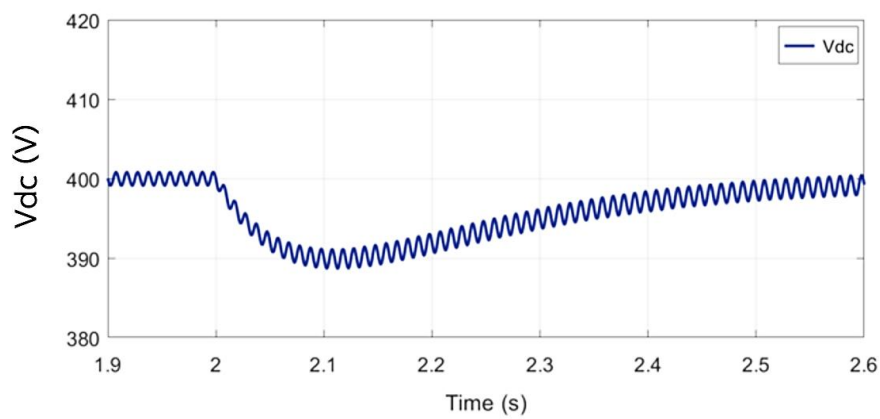
(ค)



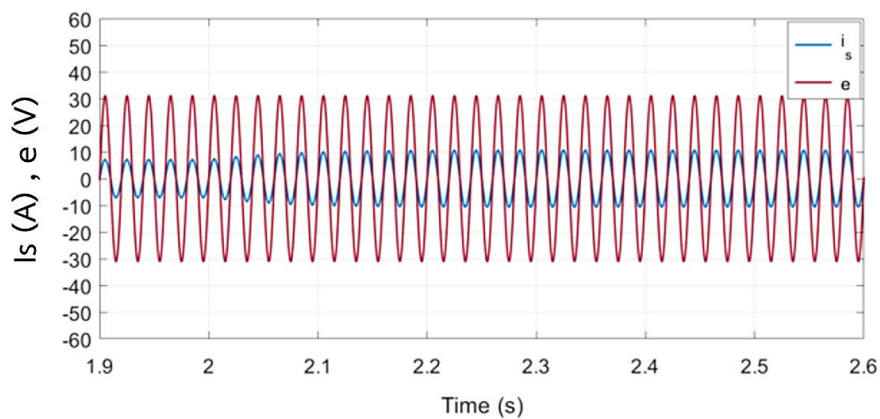
(ก)

ภาพที่ 7 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับโหลดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 500 W เป็น 1,000 W ที่เวลา 1 s

(ข) กระแสอินพุตและแรงดันอินพุต



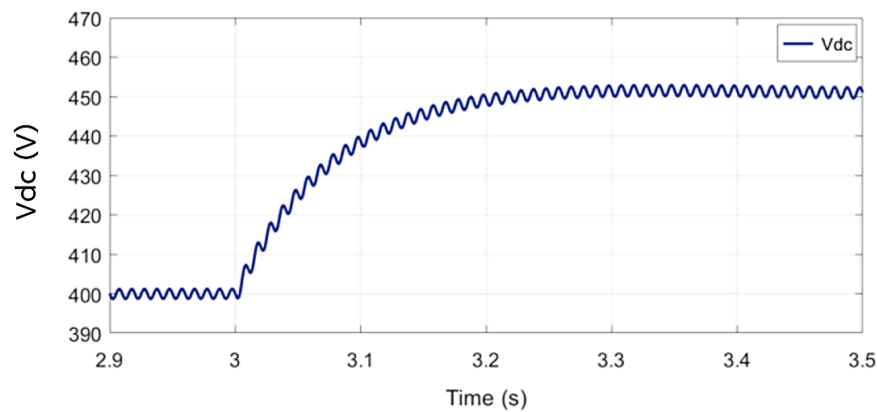
(ข)



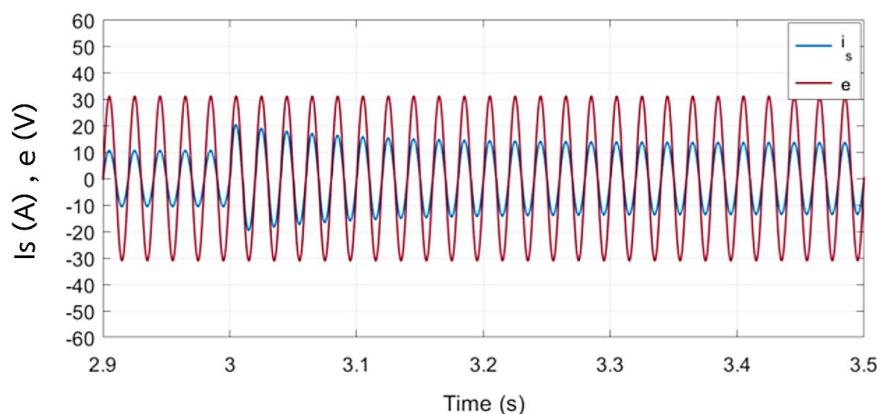
(ค)

ภาพที่ 8 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับโหลดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 1,000 W เป็น 1,500 W ที่เวลา 2 s

(ข) กระแสอินพุตและแรงดันอินพุต



(ก)



(ข)

ภาพที่ 9 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับโหลดเมื่อปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 400 V เป็น 450 V
(ข) กระแสอินพุตและแรงดันอินพุต

จากภาพที่ 7 เป็นผลการจำลองการทำงานของวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียว ในช่วงเวลา 0.9 – 1.6 s โดยผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับโหลดและผลตอบสนองของกระแสอินพุตและแรงดันอินพุต เมื่อเพิ่มโหลดอย่างฉับพลันจาก 500 W เป็น 1,000 W ที่เวลา 1 s จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(V_{dc}) ลดลง ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เข้าสู่สภาวะเดิมได้ในเวลาประมาณ 500 ms และเมื่อเพิ่มโหลดอย่างฉับพลันจาก 1,000 W เป็น 1,500 W ที่เวลา 2 s จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(V_{dc}) ลดลง ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เข้าสู่สภาวะเดิมได้ในเวลาประมาณ 500 ms ดังแสดงในภาพที่ 8 และเมื่อปรับเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 400 V เป็น 450 V ที่เวลา 3 s จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(V_{dc}) เพิ่มขึ้น ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เข้าสู่สภาวะเดิมได้ในเวลาประมาณ 200 ms ดังแสดงในภาพที่ 9

ตารางที่ 2 ผลการจำลองวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันแบบบูสต์และใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟและใช้ตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์โหมด

โหลด (W)	I_s (A)	THD _i (%)	$V_{S,(L-N)}$ (V)	THD _v (%)	P.F	P_{in} (W)	P_{loss} (W)	η (%)
500	2.641	2.40	220	0.02	1.00	590	90	84.75
1,000	4.972	1.98	220	0.02	1.00	1,113	113	89.85
1,500	7.265	1.91	220	0.02	1.00	1,646	146	91.13

ตารางที่ 3 ผลการจำลองวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันแบบบูสต์และใช้ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟ (กำจัด ใจตรง และ ปิยะนัฐ ใจตรง, 2562: 1-10)

โหลด (W)	I_s (A)	THD _i (%)	V_s (V)	THD _v (%)	P.F	P_{in} (W)	P_{loss} (W)	η (%)
500	4.421	33.10	220	4.89	0.73	710	210	70.42
1,000	8.418	32.65	220	4.77	0.73	1,352	352	73.96
1,500	12.222	32.42	220	4.73	0.73	1,963	463	76.41

ตารางที่ 4 ผลการจำลองวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันแบบบูสต์และใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟ (กำจัด ใจตรง และ ปิยะนัฐ ใจตรง, 2562: 1-10)

โหลด (W)	I_s (A)	THD _i (%)	$V_{s(L-N)}$ (V)	THD _v (%)	P.F	P_{in} (W)	P_{loss} (W)	η (%)
500	2.713	2.91	220	0.1	1.00	600	100	83.33
1,000	5.019	2.52	220	0.1	1.00	1,130	130	88.50
1,500	7.301	2.38	220	0.1	1.00	1,670	170	89.82

จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกของกระแสและแรงดันของวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์และใช้ตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์ดิ้งโหมดจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.10 % และ 0.02 % ตามลำดับ และค่าตัวประกอบกำลังโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 และค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 88.58 % เมื่อเปรียบเทียบกับผลของงานวิจัยใน (กำจัด ใจตรง และ ปิยะนัฐ ใจตรง, 2562: 1-10) ที่แสดงในตารางที่ 3 และ ตารางที่ 4 พบว่าผลการจำลองวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันแบบบูสต์และใช้ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟในตารางที่ 3 มีค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกของกระแสและแรงดันโดยเฉลี่ยเท่ากับ 32.60% และ 4.78% ตามลำดับ และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.73 และค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 74.57 % ส่วนตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกของกระแสและแรงดันของวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์ที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแบบแอคทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.62% และ 0.1% ตามลำดับ และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 และค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 88.01 % จากการเปรียบเทียบผลที่ได้พบว่าวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันแบบบูสต์ที่ใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟและใช้ตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์ดิ้งโหมดให้ผลที่ดีกว่า โดยมีค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกของกระแสและแรงดันโดยเฉลี่ยมีค่าต่ำกว่าค่าตัวประกอบกำลังโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 และค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ตัวควบคุมกระแสแบบพีโอทั้งแบบที่ใช้ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟและแบบใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟ

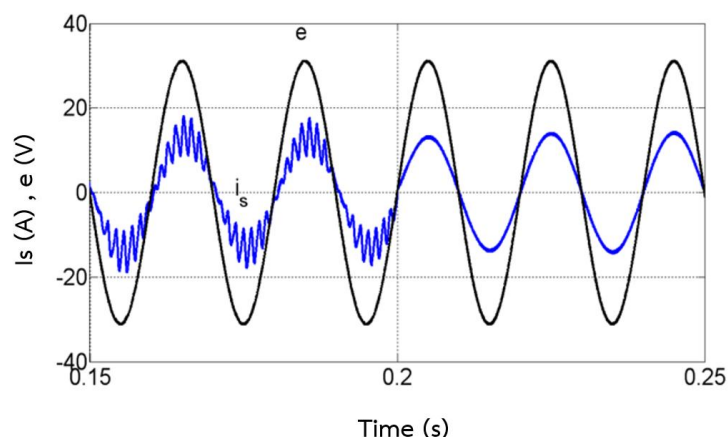
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลการจำลองวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟกับแบบที่ใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟ

กระแสฮาร์โมนิกมาตรฐาน IEC 61000-3-2:2019		ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟ และใช้ตัวควบคุมกระแส แบบพีโอ			ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูง อาร์แอลซีแบบแอคทีฟและใช้ ตัวควบคุมกระแสแบบพีโอ			ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูง แอลซีแบบแอคทีฟและใช้ตัว ควบคุมกระแสแบบสไลด์ดิ้งโหมด		
ฮาร์โมนิก ลำดับที่	ค่ากระแสฮาร์ โมนิกสูงสุด (A)	ค่ากระแสฮาร์โมนิกที่โหลด (A)			ค่ากระแสฮาร์โมนิกที่โหลด (A)			ค่ากระแสฮาร์โมนิกที่โหลด (A)		
		500 W	1,000 W	1,500 W	500 W	1,000 W	1,500W	500 W	1,000 W	1,500 W
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3	2.300	0.37	0.39	0.28	0.11	0.35	0.44	0.10	0.11	0.11
5	1.140	1.34	0.56	0.64	0.23	0.50	0.22	0.21	0.20	0.20

กระแสมอนิก มาตรฐาน IEC 61000-3- 2:2019		ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟ และใช้ตัวควบคุมกระแส แบบพีไอ			ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูง อาร์แอลซีแบบแอคทีฟและ ใช้ตัวควบคุมกระแสแบบ พีไอ			ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูง อาร์แอลซีแบบแอคทีฟและใช้ ตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์ โหมด		
ฮาร์โมนิก ลำดับ ที่	ค่ากระแสมอนิก สูงสุด (A)	ค่ากระแสมอนิกที่โหลด (A)			ค่ากระแสมอนิกที่โหลด (A)			ค่ากระแสมอนิกที่โหลด (A)		
		500 W	1,000 W	1,500 W	500 W	1,000 W	1,500W	500 W	1,000 W	1,500 W
7	0.770	0.07	0.44	0.23	0.16	0.40	0.41	0.15	0.16	0.12
9	0.400	0.08	0.25	0.16	0.08	0.11	0.03	0.07	0.06	0.05
11	0.330	0.49	0.27	0.08	0.11	0.04	0.06	0.10	0.11	0.10
13	0.210	0.27	0.12	0.09	0.03	0.05	0.06	0.04	0.05	0.06
15	0.150	0.26	0.39	0.18	0.10	0.05	0.03	0.10	0.04	0.06
17	0.130	0.51	0.44	0.28	0.10	0.11	0.06	0.09	0.10	0.10
19	0.120	0.21	0.45	0.20	0.09	0.10	0.03	0.09	0.08	0.08

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟกับแบบที่ใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันแบบบูสต์และใช้ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟ มีค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสมอนิกที่ลำดับใดๆต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 61000-3-2:2019 เนื่องจากมีบางฮาร์โมนิกลำดับที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ส่วนวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันแบบบูสต์และใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟที่มีตัวควบคุมกระแสแบบพีไอและตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์โหมดมีค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสมอนิกที่ลำดับใดๆต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 61000-3-2:2019 ทุกประการ

กรณีที่ 2 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้ตัวกรองแบบฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟ (L_f , C_f , R_1 และ R_2) กับตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์โหมดเทียบกับการใช้ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 10 กระแสอินพุต (i_s : 20A/div) และแรงดันอินพุต (e : 200V/div) ที่โหลดขนาด 1,500 W เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบสไลด์โหมดและใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟ (L_f , C_f , R_1 และ R_2) ที่เวลา 0.2 s

จากภาพที่ 10 เมื่อใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟที่เวลา 0.2 s จะเห็นว่ากระแสอินพุตและแรงดันอินพุตมีความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกลดลง จากการจำลองการทำงานเมื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟ ดังแสดงผลที่ได้ในตารางที่ 2

อภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาการควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์เพื่อลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่ง โดยใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟ (L_f , C_f , R_1 และ R_2) และวิธีการควบคุมกระแสแบบสไลด์ดิ้งโหมดที่ให้ประสิทธิภาพการติดตามที่ดีและความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ รวมทั้งใช้ตัวควบคุมพีโอเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ผลการจำลองการทำงานพบว่าวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์ที่มีการควบคุมกระแสแบบสไลด์ดิ้งโหมดสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าคงที่ 400 V ที่โหลดสูงสุดขนาด 1,500 W ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.10 % และ 0.02 % ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับ 1.0 และค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 88.58 % อีกทั้งกระแสฮาร์มอนิกได้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 61000-3-2:2019 ทุกประการ จากการเปรียบเทียบผลที่ได้พบว่าวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันแบบบูสต์ที่ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟและใช้ตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์ดิ้งโหมดให้ผลที่ดีกว่า โดยมีค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันโดยเฉลี่ยมีค่าต่ำกว่า ค่าตัวประกอบกำลังโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 ค่ากำลังสูญเสียในวงจรมีค่าต่ำกว่า และค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยมีค่าสูงกว่า เมื่อเทียบกับการใช้ตัวควบคุมกระแสแบบพีโอทั้งแบบที่ใช้ตัวกรองอาร์แอลซีแบบพาสซีฟและแบบใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟ โดยแบบจำลองและวิธีการควบคุมในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบและพัฒนาต้นแบบจริง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนา การปรับปรุงเทคนิคการควบคุม รวมถึงการใช้เป็นส่วนหนึ่งในการจำลองการทำงานร่วมกับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังสมัยใหม่ เช่น แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และ ชาร์จเจอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- กำจัด ไจตรง, ฉัตรชัย เอียรหิรัญ, และ ปิยะนัฐ ไจตรง. (2562). กลยุทธ์การควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟด้านเข้าตัวกรองแบบอาร์แอลซีของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพิตับบลิวเอ็ม. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม*, 6(1), 15-24.
- กำจัด ไจตรง และ ปิยะนัฐ ไจตรง. (2562). วงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันแบบบูสต์. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี(วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*, 3(2), 1-10.
- ดำรง จินขาวขำ และ ประสิทธิ์ จันทรมนตรี. (2550). วงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการพัฒนาค่าตัวประกอบกำลังด้วยการแปลงผันแบบบูสต์. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 17(2), 43-51
- ทวีศักดิ์ ทองแสน,ธีรยุทธ ขาติชนะยีนยง, และณัฐวุฒิสวรรธนา.(2558). การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดสำหรับอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตเพื่อแก้ไขแรงดันไม่สมดุลแรงดันตกชั่วขณะและแรงดันเกินชั่วขณะในระบบไฟฟ้า สามเฟสโดยใช้อัลกอริทึมแบบเร็ว. *วารสารวิจัย มข*, 15(1), 18-31.
- Abrishamifar, A., Ahmad, A., and Mohamadian, M. (2012). Fixed Switching Frequency Sliding Mode Control for Single-Phase Unipolar Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(5), 2507-2514.
- H. Valipour, M. Mahdavi and M. Ordonez. (2020). Resonant bridgeless AC/DC rectifier with high switching frequency and inherent PFC capability. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(1), 232-246.
- P.A. Dahono. (2002). A control method to damp oscillation in the input LC-filter. in *Proceedings PowerElectronics Specialist Conference*, vol. 4, 1630-1635.
- S. S. Sayed and A.M. Massoud. (2022). Review on state-of-the-art unidirectional non-Isolated power factor correction converters for short /long-distance Electric Vehicles. *IEEE Access*, 10(1), 11308-11340.
- S. Saetieo, R. Devaraj and D. A. Torrey. (1994). The design and implementation of a three-phase active power filter based on sliding mode control," *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 2, 1135-1142. doi: 10.1109/IAS.1994.377571.
- Z. Chen, B. Liu, Y. Yang, P. Davari and H. Wang. (2021). Bridgeless PFC topology simplification and design for performance benchmarking. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(5), 5398-5414.

- Z. Chen, B. Liu, P. Davari and H. Wang. (2021). Single-phase Bridgeless PFC topology Derivation and performance benchmarking. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(9), 9238-9250.

Translated Thai References

- Chinkhaokham, D., & Chanmontri, P. (2550). 1- ϕ Bridge Rectifier Circuit with Boost Converter Power Factor Development. *Journal of KMITNB*, 17(2), 43-51
- Jaitrong, K., Dhienhirun, C., & Jaitrong, P. (2019). A Control Strategy to Actively Damp Oscillation in the Input LC Filter of Three-Phase PWM Rectifier. *Journal of Energy and Environment Technology*, 6(1), 15-24.
- Jaitrong, K., & Jaitrong, P. (2019). Single Phase Bridge Rectifier Circuit with Power Factor Correction of Boost Converter. *Journal of Thonburi University (Science and Technology)*, 3(2), 1-10.
- Thongsan, T., Chatchanayuenyong, T., & Suwanta, N. (2015). An Application of Sliding Mode Control for a Dynamic Voltage Restorer to Correct Unbalance Voltage, Voltage Sags and Voltage Swells in Three-Phase System Using Rapid Algorithm. *KKU Research Journal*, 15(1), 18-31.

Received: Feb 11, 2025

Revised: Jun 19, 2025

Accepted: Jun 21, 2025

การทำให้เป็นเชิงเส้นของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองโดยใช้การแปลงเชิงเส้นทั่วไป LINEARIZATION OF SECOND-ORDER ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS BY USING A GENERALIZED LINEARIZING TRANSFORMATION

ศุภกิจ ธรรมชนันท์* กิตติ ศศิวิมลลักษณ์

คณะแพทยศาสตร์วันออก วิทยาลัยเชียงราย

Supakit Tammakun* Kitti Sasivimonlux

^{1,2}Faculty of Oriental Medicine, Chiang Rai CollegeCorresponding Author: e-mail ^{1*}supakit.tammakun@crc.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหาการทำให้เป็นเชิงเส้นของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองที่ไม่เชิงเส้น โดยใช้การแปลงเชิงเส้นทั่วไปเพื่อลดรูปให้อยู่ในรูปเชิงเส้น $X'' + \alpha X = 0$ พร้อมกำหนดเงื่อนไขที่จำเป็นและเงื่อนไขที่เพียงพอสำหรับการแปลงดังกล่าว รวมถึงนำเสนอขั้นตอนการหาฟังก์ชันการแปลงและสัมประสิทธิ์ของสมการเชิงเส้น ตลอดจนยกตัวอย่างการหาผลเฉลยเพื่อประกอบแนวคิดที่เสนอ

คำสำคัญ: ปัญหาการทำให้เป็นเชิงเส้น การแปลงเชิงเส้นทั่วไป สมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองที่ไม่เชิงเส้น

Abstract

This research aimed to study the linearization problem of nonlinear second-order ordinary differential equations by using a generalized linearizing transformation to reduce the equation into the linear form $X'' + \alpha X = 0$. The study establishes the necessary and sufficient conditions for such a transformation, presents a procedure to determine the transformation functions and the coefficients of the linear equation, and provides examples of obtaining solutions to illustrate the proposed concepts.

Keywords: Linearization problem, Generalized linearizing transformation, Nonlinear second-order ordinary differential equations

บทนำ

นักคณิตศาสตร์ร่วมมือกับนักวิทยาศาสตร์ วิศวกร และนักวิจัยจากหลากหลายสาขาวิชาในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายและคาดการณ์ปัญหาในโลกความเป็นจริง รวมถึงปรากฏการณ์ทางกายภาพที่หลากหลาย เช่น การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี กฎการเย็นตัวของนิวตัน ปฏิกริยาเคมี การแพร่กระจายของเชื้อโรค การพยากรณ์อากาศ วงจรไฟฟ้า และประเด็นทางเศรษฐศาสตร์ โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ รวมถึงสมการเชิงอนุพันธ์สามัญไม่เชิงเส้น (nonlinear

ordinary differential equations) ในการจำลองปรากฏการณ์ดังกล่าว อย่างไรก็ตาม การแก้ปัญหาที่อยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้นเป็นเรื่องที่ยาก ด้วยเหตุนี้ นักคณิตศาสตร์จึงดำเนินการวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อพัฒนาวิธีการและแนวทางในการแก้ปัญหาเหล่านี้

เป็นเวลากว่าศตวรรษที่นักคณิตศาสตร์ให้ความสนใจในปัญหาการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization problem) ซึ่งนักคณิตศาสตร์ที่มีชื่อเสียง เช่น Lie และ Cartan ได้ทุ่มเทความพยายามในการศึกษาปัญหาดังกล่าว โดย Lie เป็นผู้เริ่มต้นในการวิเคราะห์ปัญหาการทำให้เป็นเชิงเส้นสำหรับสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสอง เขาได้ค้นพบรูปแบบมาตรฐานของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองที่สามารถแปลงให้เป็นสมการเชิงเส้นได้ผ่านการเปลี่ยนตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า "การแปลงแบบจุด" (point transformation) นอกจากนี้ Lie ยังได้ค้นพบว่า ทุกสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองสามารถลดรูปให้เป็นสมการเชิงเส้นได้โดยไม่จำเป็นต้องมีเงื่อนไขใด ๆ ผ่านการใช้การแปลงแบบคอนแทค (Lie, 1883) ในเวลาต่อมา Liouville และ Tresse ได้นำแนวคิดเรื่องตัวแปรเชิงสัมพัทธ์ (relative invariants) ของกลุ่มสมมูลมาใช้เพื่อวิเคราะห์ความสมมูลของสมการภายใต้การแปลงแบบจุด ซึ่งช่วยให้สามารถลดรูปสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูปเชิงเส้นได้ (Liouville, 1889; Tresse, 1896)

นอกเหนือจากวิธีการที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเทคนิคอื่นที่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการทำให้เป็นเชิงเส้นของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสอง หนึ่งในนั้นคือการประยุกต์ใช้เรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ (differential geometry) ซึ่งพัฒนาโดย Cartan (Cartan, 1924) อีกวิธีที่ได้รับความนิยมคือการแปลงแบบซันด์แมนทั่วไป (generalized Sundman transformation) โดย Duarte, Moreira และ Santos ได้ประยุกต์ใช้รูปแบบบัญญัติของลาเกอแร (Laguerre form) ร่วมกับการแปลงนี้ เพื่อหาวิธีลดรูปสมการให้เป็นสมการเชิงเส้นอย่างง่าย พร้อมทั้งเสนอเงื่อนไขจำเป็นและเพียงพอสำหรับการแปลงดังกล่าว (Duarte, Moreira, & Santos, 1994) อย่างไรก็ตาม Nakpim และ Meleshko พบว่ารูปแบบบัญญัติของลาเกอแรไม่เพียงพอต่อการแก้ปัญหาการทำให้เป็นเชิงเส้นโดยการแปลงแบบซันด์แมนทั่วไป เนื่องจากรูปแบบดังกล่าวใช้ได้เฉพาะกับการแปลงแบบจุดและแบบคอนแทคเท่านั้น ดังนั้นพวกเขาจึงได้เสนอเงื่อนไขใหม่สำหรับการทำให้สมการอยู่ในรูปเชิงเส้นทั่วไป (Nakpim & Meleshko, 2010)

อีกหนึ่งแนวทางในการแก้ปัญหาการทำให้เป็นเชิงเส้นของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสอง คือ การแปลงเชิงเส้นทั่วไป (generalized linearizing transformation) ซึ่งเป็นการขยายแนวคิดจากการแปลงแบบซันด์แมนทั่วไป วิธีการนี้ได้นำเสนอในงานวิจัยของ Chandrasekar, Senthilvelan และ Lakshmanan โดยพวกเขาได้ค้นพบรูปแบบและเงื่อนไขสำหรับการทำให้เป็นเชิงเส้นของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองในกรณี $F_x \neq 0$ (Chandrasekar, Senthilvelan, & Lakshmanan, 2006) ต่อมา Voraka, Suksern และ Donjiwprai ได้นำแนวคิดนี้มาประยุกต์ในกรณี $F_x = 0$ เพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้สมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองลดรูปเป็นสมการเชิงเส้นอย่างง่าย (Voraka, Suksern, & Donjiwprai, 2020) ในปัจจุบันการวิจัยเกี่ยวกับการทำให้เป็นเชิงเส้นของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองโดยใช้การแปลงเชิงเส้นทั่วไปยังคงมีอยู่ในวงจำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหาการทำให้เป็นเชิงเส้นของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองที่ไม่เชิงเส้น โดยใช้การแปลงเชิงเส้นทั่วไปเพื่อลดรูปให้อยู่ในรูปเชิงเส้น $X'' + \alpha X = 0$ พร้อมกำหนดเงื่อนไขที่จำเป็นและเงื่อนไขที่เพียงพอสำหรับการแปลงดังกล่าว รวมถึงนำเสนอขั้นตอนการหาฟังก์ชันการแปลงและสัมประสิทธิ์ของสมการเชิงเส้น ตลอดจนยกตัวอย่างการหาผลเฉลยเพื่อประกอบแนวคิดที่เสนอ

เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการทำให้เป็นเชิงเส้น (Necessary Conditions)

การศึกษานี้เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองทั่วไปในรูป

$$x'' = f(t, x, x') \quad (1)$$

ให้เป็นสมการเชิงเส้นในรูปแบบ

$$X'' + \alpha X = 0 \quad (2)$$

โดยใช้การแปลงเชิงเส้นทั่วไป

$$\begin{aligned} X &= F(t, x), \\ dT &= [G_1(t, x)x' + G_2(t, x)]dt \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ $G_1 \neq 0$ และ α คือค่าคงที่ ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว สามารถสรุปได้เป็นทฤษฎีบทดังนี้

ทฤษฎีบทที่ 1 สมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองใด ๆ ที่สามารถแปลงให้อยู่ในรูปเชิงเส้นได้โดยใช้การแปลงเชิงเส้นทั่วไป จะต้องอยู่ในรูปแบบต่อไปนี้

$$x'' + A_3(t, x)x'^3 + A_2(t, x)x'^2 + A_1(t, x)x' + A_0(t, x) = 0 \quad (4)$$

โดยที่

$$A_3 = (-F_{xx}G_1 + F_xG_{1x} - \alpha FG_1^3)/(F_tG_1 - F_xG_2), \quad (5)$$

$$A_2 = (-2F_{tx}G_1 + F_tG_{1x} - F_{xx}G_2 + F_xG_{1t} + F_xG_{2x} - 3\alpha FG_1^2G_2)/(F_tG_1 - F_xG_2), \quad (6)$$

$$A_1 = (-2F_{tx}G_2 - F_{tt}G_1 + F_tG_{1t} + F_tG_{2x} + F_xG_{2t} - 3\alpha FG_1G_2^2)/(F_tG_1 - F_xG_2), \quad (7)$$

$$A_0 = (-F_{tt}G_2 + F_tG_{2t} - \alpha FG_2^3)/(F_tG_1 - F_xG_2). \quad (8)$$

บทพิสูจน์ ในส่วนนี้จะทำการพิสูจน์ทฤษฎีบทที่ 1 โดยแสดงให้เห็นถึงรูปแบบสมการที่สามารถแปลงเป็นเชิงเส้นได้ ผ่านการใช้การแปลงเชิงเส้นทั่วไป (3) เริ่มจากการคำนวณอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของ $X = F(t, x)$ ดังนี้

$$\begin{aligned} X'(T) &= \frac{D_t F}{D_t \int [G_1 x' + G_2] dt} \\ &= \frac{F_t + x' F_x}{G_1 x' + G_2} \\ &= P(t, x, x'), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X''(T) &= \frac{D_t P}{D_t \int [G_1 x' + G_2] dt} \\ &= \frac{P_t + x' P_x + x'' P_{x'}}{G_1 x' + G_2}, \end{aligned}$$

เมื่อ

$$P_t = \frac{F_{tt}(G_1 x' + G_2) - F_t(G_{1t} x' + G_{2t}) - F_x x'(G_{1t} x' + G_{2t})}{(G_1 x' + G_2)^2},$$

$$P_x = \frac{2F_{tx}(G_1 x' + G_2) + F_{xx} x'(G_1 x' + G_2) - F_t(G_{1x} x' + G_{2x}) - F_x x'(G_{1x} x' + G_{2x})}{(G_1 x' + G_2)^2},$$

$$P_{x'} = \frac{-F_t G_1 + F_x G_2}{(G_1 x' + G_2)^2}$$

และ $D_t = \frac{\partial}{\partial t} + x' \frac{\partial}{\partial x} + x'' \frac{\partial}{\partial x'} + \dots$ คืออนุพันธ์รวม (Total derivative)

เมื่อแทนค่า X และ X'' ลงในสมการเชิงเส้น (2) และทำการจัดรูปสมการ จะได้

$$x'' + \frac{(-F_{xx}G_1 + F_xG_{1x} - \alpha FG_1^3)}{(F_tG_1 - F_xG_2)}x'^3 + \frac{(-2F_{tx}G_1 + F_tG_{1x} - F_{xx}G_2 + F_xG_{1t} + F_xG_{2x} - 3\alpha FG_1^2G_2)}{(F_tG_1 - F_xG_2)}x'^2 \\ + \frac{(-2F_{tx}G_2 - F_{tt}G_1 + F_tG_{1t} + F_tG_{2x} + F_xG_{2t} - 3\alpha FG_1G_2^2)}{(F_tG_1 - F_xG_2)}x' + \frac{(-F_{tt}G_2 + F_tG_{2t} - \alpha FG_2^3)}{(F_tG_1 - F_xG_2)} = 0.$$

ทำการกำหนดค่าของ A_3, A_2, A_1 และ A_0 ตามสมการ (5)–(8) จากนั้นสมการที่ได้จะมีรูปแบบที่เป็นไปตามเงื่อนไขที่จำเป็นดังแสดงในสมการ (4) ตามที่ระบุไว้ในทฤษฎีบทที่ 1 □

เงื่อนไขที่เพียงพอสำหรับการทำให้เป็นเชิงเส้นและการแปลงเพื่อทำให้เป็นเชิงเส้น (Sufficient Conditions and Linearizing Transformation)

จากการวิเคราะห์สมการ (5)–(8) โดยอาศัยทฤษฎีความเข้ากันได้ (compatibility theory) สามารถสรุปเงื่อนไขที่เพียงพอสำหรับการทำให้สมการเป็นเชิงเส้นได้ ดังแสดงในทฤษฎีต่อไปนี้

ทฤษฎีบทที่ 2 เงื่อนไขที่เพียงพอสำหรับสมการ (4) ที่จะสามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยใช้การแปลงเชิงเส้นทั่วไป (3) ภายใต้อิเจน $F_x = 0$ มีดังต่อไปนี้

(ก) กรณีที่ $A_3 \neq 0$ เงื่อนไขต้องสอดคล้องกับสมการ

$$A_{3xxx} = (-6A_{1x}A_3^4 + 2A_{2xx}A_3^3 - 5A_{2x}A_{3x}A_3^2 + 4A_{2x}A_2A_3^3 + 3A_{3tx}A_3^3 - 3A_{3t}A_{3x}A_3^2 \\ + 6A_{3xx}A_{3x}A_3 - 3A_{3xx}A_2A_3^2 - 6A_{3x}^3 + 6A_{3x}^2A_2A_3 - 2A_{3x}A_2^2A_3^2)/A_3^2, \quad (9)$$

$$A_{3tx} = (72A_{2t}A_3^4 + 12A_{2x}A_{3x}A_3^2 - 24A_{2x}A_2A_3^3 + 72A_{3t}A_{3x}A_3^2 - 72A_{3t}A_2A_3^3 - 6A_{3xx}A_{3x}A_3 \\ + 12A_{3xx}A_2A_3^2 + 11A_{3x}^3 - 36A_{3x}^2A_2A_3 - 36A_{3x}A_1A_3^3 + 36A_{3x}A_2^2A_3^2 - 216A_0A_3^5 \\ + 72A_1A_2A_3^4 - 16A_2^3A_3^3)/(36A_3^3), \quad (10)$$

$$A_{0xx} = (648A_{0t}A_3^8 - 216A_{0x}A_2A_3^7 + 216A_{1tx}A_3^7 + 108A_{1t}A_{3x}A_3^6 - 216A_{1t}A_2A_3^7 \\ - 72A_{1x}A_{2x}A_3^6 + 36A_{1x}A_{3xx}A_3^5 - 54A_{1x}A_{3x}^2A_3^4 + 36A_{1x}A_{3x}A_2A_3^5 + 216A_{1x}A_1A_3^7 \\ - 216A_{2tt}A_3^7 + 144A_{2t}A_{2x}A_3^6 - 72A_{2t}A_{3xx}A_3^5 + 108A_{2t}A_{3x}^2A_3^4 - 72A_{2t}A_{3x}A_2A_3^5 \\ - 216A_{2t}A_1A_3^7 + 72A_{2x}A_{3t}A_{3x}A_3^4 - 144A_{2x}A_{3t}A_2A_3^5 - 72A_{2x}A_{3x}A_1A_3^5 \\ - 648A_{2x}A_0A_3^7 + 144A_{2x}A_1A_2A_3^6 - 108A_{3tt}A_{3x}A_3^5 + 216A_{3tt}A_2A_3^6 \\ - 36A_{3t}A_{3xx}A_{3x}A_3^3 + 72A_{3t}A_{3xx}A_2A_3^4 + 36A_{3t}A_{3x}^3A_3^2 - 36A_{3t}A_{3x}^2A_2A_3^3 \\ + 108A_{3t}A_{3x}A_1A_3^5 - 144A_{3t}A_{3x}A_2^2A_3^4 + 1296A_{3t}A_0A_3^7 - 216A_{3t}A_1A_2A_3^6 \\ + 144A_{3t}A_2^3A_3^5 + 36A_{3xx}A_{3x}A_1A_3^4 + 216A_{3xx}A_0A_3^6 - 72A_{3xx}A_1A_2A_3^5 - A_{3x}^5 \\ + 10A_{3x}^4A_2A_3 - 36A_{3x}^3A_1A_3^3 - 40A_{3x}^3A_2^2A_3^2 - 216A_{3x}^2A_0A_3^5 + 36A_{3x}^2A_1A_2A_3^4 \\ + 80A_{3x}^2A_2^3A_3^3 - 216A_{3x}A_0A_2A_3^6 + 144A_{3x}A_1A_2^2A_3^5 - 80A_{3x}A_2^4A_3^4 + 432A_0A_2^2A_3^7 \\ - 144A_1A_2^3A_3^6 + 32A_2^5A_3^5)/(216A_3^7). \quad (11)$$

(ข) กรณีที่ $A_3 = 0$ และ $\lambda_1 = 0$ เงื่อนไขต้องสอดคล้องกับสมการ

$$\lambda_2 = 0. \quad (12)$$

(ค) กรณีที่ $A_3 = 0$ และ $\lambda_1 \neq 0$ เงื่อนไขต้องสอดคล้องกับสมการ

$$\lambda_{2x} = (-A_{2t}\lambda_1^2 + \lambda_{1x}\lambda_2 + \lambda_1^3)/\lambda_1, \quad (13)$$

$$\lambda_{2t} = (-A_{0x}\lambda_1^2 + \lambda_{1t}\lambda_2 - A_0A_2\lambda_1^2 - A_1\lambda_1\lambda_2 - \lambda_2^2)/\lambda_1, \quad (14)$$

เมื่อ

$$\lambda_1 = -A_{1x} + 2A_{2t},$$

$$\lambda_2 = -A_{0xx} - A_{0x}A_2 + A_{2tt} + A_{2t}A_1 - A_{2x}A_0 - \lambda_{1t} - A_1\lambda_1.$$

บทพิสูจน์ เริ่มต้นโดยการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ A_3, A_2, A_1 และ A_0 ตามที่ระบุในทฤษฎีบทที่ 1 ซึ่งเกี่ยวข้องกับฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า F, G_1 และ G_2 เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณเราจึงกำหนดค่า $K(t, x) = -F_tG_1 + F_xG_2$ ซึ่งทำให้ได้ค่าอนุพันธ์ของ F_t คือ

$$F_t = (F_xG_2 - K)/G_1. \quad (15)$$

จากการแก้สมการ (5)-(8) เราสามารถหาค่าของ α, K_x, K_t และ G_{2t} ได้ดังต่อไปนี้

$$\alpha = (-F_{xx}G_1 + F_xG_{1x} + A_3K)/(FG_1^3), \quad (16)$$

$$K_x = (-F_xG_{1t}G_1 + F_xG_{2x}G_1 + 3G_{1x}K - A_2G_1K + 3A_3G_2K)/(2G_1), \quad (17)$$

$$K_t = (-F_xG_{1t}G_1G_2 + F_xG_{2x}G_1G_2 + 4G_{1t}G_1K - 3G_{1x}G_2K + 2G_{2x}G_1K - 2A_1G_1^2K + 3A_2G_1G_2K - 3A_3G_2^2K)/(2G_1^2), \quad (18)$$

$$G_{2t} = (G_{1t}G_1G_2 - G_{1x}G_2^2 + G_{2x}G_1G_2 + A_0G_1^3 - A_1G_1^2G_2 + A_2G_1G_2^2 - A_3G_2^3)/G_1^2. \quad (19)$$

จากนั้นนำค่า α จากสมการ (16) มาคำนวณอนุพันธ์ตามตัวแปร x จะได้

$$F_{xxx} = (2A_{3x}FG_1K + 2F_{xx}F_xG_1^2 + 6F_{xx}G_{1x}FG_1 - 2F_x^2G_{1x}G_1 - F_xG_{1t}A_3FG_1 + 2F_xG_{1xx}FG_1 - 6F_xG_{1x}^2F + F_xG_{2x}A_3FG_1 - 2F_xA_3G_1K - 3G_{1x}A_3FK - A_2A_3FG_1K + 3A_3^2FG_2K)/(2FG_1^2). \quad (20)$$

การเปรียบเทียบอนุพันธ์ผสม $(K_t)_x = (K_x)_t$ จะได้

$$\begin{aligned} G_{2xx} = & (2A_{0x}F_xG_1^4 - 2A_{1x}F_xG_1^3G_2 + 4A_{1x}G_1^3K - 2A_{2t}G_1^3K + 2A_{2x}F_xG_1^2G_2^2 - 6A_{2x}G_1^2G_2K \\ & + 6A_{3t}G_1^2G_2K - 2A_{3x}F_xG_1G_2^3 + 6A_{3x}G_1G_2^2K + 4F_xG_{1tx}G_1^2G_2 - 2F_xG_{1tt}G_1^3 \\ & + 3F_xG_{1t}^2G_1^2 - 8F_xG_{1t}G_{1x}G_1G_2 + 2F_xG_{1t}G_{2x}G_1^2 - 2F_xG_{1t}A_1G_1^3 + 4F_xG_{1t}A_2G_1^2G_2 \\ & - 6F_xG_{1t}A_3G_1G_2^2 - 2F_xG_{1xx}G_1G_2^2 + 4F_xG_{1x}^2G_2^2 + 2F_xG_{1x}A_0G_1^3 - 2F_xG_{1x}A_2G_1G_2^2 \\ & + 4F_xG_{1x}A_3G_2^3 - F_xG_{2x}^2G_1^2 - 2G_{1tx}G_1^2K + 3G_{1t}G_{1x}G_1K - G_{1t}A_2G_1^2K \\ & + 3G_{1t}A_3G_1G_2K + 6G_{1xx}G_1G_2K - 12G_{1x}^2G_2K + 9G_{1x}G_{2x}G_1K \\ & + 6G_{1x}A_2G_1G_2K - 18G_{1x}A_3G_2^2K - 5G_{2x}A_2G_1^2K + 15G_{2x}A_3G_1G_2K \\ & + 6A_0A_3G_1^3K - 6A_1A_3G_1^2G_2K + 6A_2A_3G_1G_2^2K - 6A_3^2G_2^3K)/(4G_1^2K). \end{aligned} \quad (21)$$

การวิเคราะห์ความเข้ากันได้ขึ้นอยู่กับค่าของ F_x ซึ่งการศึกษาทุกกรณีอย่างครบถ้วนอาจเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ในที่นี้เราจะนำเสนอผลลัพธ์ที่ครบถ้วนสำหรับกรณีที่ $F_x = 0$ โดยเฉพาะ

จาก $F_x = 0$ เราทำการเปรียบเทียบอนุพันธ์ผสม $(F_x)_t = (F_t)_x$ จะได้

$$G_{1x} = A_2 G_1 - 3A_3 G_2. \quad (22)$$

จากนั้นนำค่า α จากสมการ (16) มาคำนวณอนุพันธ์ตามตัวแปร t จะได้

$$A_{3t} F G_1^2 - G_{1t} A_3 F G_1 + G_{2x} A_3 F G_1 - A_1 A_3 F G_1^2 + 3A_3^2 F G_2^2 + A_3 G_1 K = 0. \quad (23)$$

การวิเคราะห์ความเข้ากันได้ขึ้นอยู่กับค่าของ A_3 ตามที่ระบุในสมการ (23) ซึ่งจะถูกแยกพิจารณาออกเป็นสองกรณี คือ $A_3 \neq 0$ และ $A_3 = 0$

กรณี (ก) $A_3 \neq 0$

แก้สมการ (23) จะได้

$$G_{2x} = (-A_{3t} F G_1^2 + G_{1t} A_3 F G_1 + A_1 A_3 F G_1^2 - 3A_3^2 F G_2^2 - A_3 G_1 K) / (A_3 F G_1). \quad (24)$$

ทำการแทนค่า $F_x = 0$ ลงใน F_{xxx} จากสมการ (20) จะได้

$$G_2 = G_1(-A_{3x} + 2A_2 A_3) / (6A_3^2). \quad (25)$$

ทำการแทนค่า G_2 จากสมการ (25) ลงใน G_{2x} จากสมการ (24) จะได้

$$\begin{aligned} G_{1t} = & (2A_{2x} A_3^2 F G_1 + 6A_{3t} A_3^2 F G_1 - A_{3xx} A_3 F G_1 + 2A_{3x}^2 F G_1 - 3A_{3x} A_2 A_3 F G_1 \\ & - 6A_1 A_3^3 F G_1 + 2A_2^2 A_3^2 F G_1 + 6A_3^3 K) / (6A_3^3 F). \end{aligned} \quad (26)$$

จากการเปรียบเทียบอนุพันธ์ผสม $(G_{1t})_x = (G_{1x})_t$, $(G_2)_{xx} = G_{2xx}$ และ $(G_{2xx})_t = (G_{2t})_{xx}$ นำไปสู่เงื่อนไข A_{3xxx} , A_{3tx} และ A_{0xx} ตามที่ระบุไว้ในสมการที่ (9)-(11) ของทฤษฎีบทที่ 2 และทำให้สมการ $(F_{xx})_t = (F_t)_{xx}$, $(G_{2x})_x = G_{2xx}$, $(G_{2x})_t = (G_{2t})_x$ และ $(G_2)_t = G_{2t}$ สอดคล้องกัน กล่าวคือ ทั้งสองข้างของสมการมีค่าเท่ากันและเป็นศูนย์ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

กรณี (ข) $A_3 = 0$

เนื่องจาก $A_3 = 0$ ทำให้สมการ (23), $(F_{xx})_t = (F_t)_{xx}$ และ $(F_x)_{xx} = F_{xxx}$ นั้นมีความสอดคล้อง

จากนั้น การเปรียบเทียบอนุพันธ์ผสม $(G_{2xx})_t = (G_{2t})_{xx}$ จะได้

$$G_{2x} \lambda_1 + G_1 \lambda_2 = 0, \quad (27)$$

เมื่อ

$$\lambda_1 = -A_{1x} + 2A_{2t},$$

$$\lambda_2 = -A_{0xx} - A_{0x} A_2 + A_{2tt} + A_{2t} A_1 - A_{2x} A_0 - \lambda_{1t} - A_1 \lambda_1.$$

การวิเคราะห์ความเข้ากันได้ขึ้นอยู่กับค่าของ λ_1 ในสมการ (27) ซึ่งจะถูกแยกพิจารณาออกเป็นสองกรณี ได้แก่ $\lambda_1 = 0$ และ $\lambda_1 \neq 0$ ในที่นี้พิจารณากรณี $\lambda_1 = 0$ การแก้สมการ (27) จะนำไปสู่เงื่อนไขของ λ_2 ตามที่ระบุไว้ในสมการ (12) ของทฤษฎีบทที่ 2

กรณี (ค) $A_3 = 0$

จากเงื่อนไข $A_3 = 0$ และเนื่องจากการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการ (27) ขึ้นอยู่กับค่าของ λ_1 ในที่นี้จึงพิจารณากรณีที่ $\lambda_1 \neq 0$ โดยการแก้สมการ (27) จะได้ว่า

$$G_{2x} = (-G_1\lambda_2)/\lambda_1. \quad (28)$$

จากการเปรียบเทียบอนุพันธ์ผสม $(G_2)_{xx} = G_{2xx}$ และ $(G_{2x})_t = (G_{2t})_x$ จะนำไปสู่เงื่อนไข λ_{2x} และ λ_{2t} ตามที่ระบุในสมการ (13) และ (14) ของทฤษฎีบทที่ 2 จึงสามารถสรุปได้ว่าทฤษฎีบทดังกล่าวได้รับการพิสูจน์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว $\square$

จากกระบวนการพิสูจน์ข้างต้น ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปสู่การสรุปผลเป็นบทแทรกดังต่อไปนี้

บทแทรกที่ 3 ภายใต้เงื่อนไขที่เพียงพอตามทฤษฎีบทที่ 2 การแปลงเชิงเส้น (3) ที่ทำให้สมการ (4) ถูกแปลงเป็นสมการเชิงเส้น (2) สามารถหาได้โดยการแก้ระบบสมการที่เข้ากันได้สำหรับฟังก์ชัน $F = F(t)$, $G_1(t, x)$ และ $G_2(t, x)$ ดังต่อไปนี้

(ก) สมการ (15), (17), (18), (22), (25) และ (26)

(ข) สมการ (15), (17), (18), (19), (21) และ (22)

(ค) สมการ (15), (17), (18), (19), (22) และ (28)

สุดท้ายนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ α ของสมการเชิงเส้น (2) จะถูกกำหนดโดยสมการ (16)

ตัวอย่าง

ในส่วนนี้จะนำเสนอตัวอย่างที่แสดงถึงการใช้ทฤษฎีบทที่ 1, ทฤษฎีบทที่ 2 และบทแทรกที่ 3 ซึ่งช่วยเสริมความเข้าใจในกระบวนการตรวจสอบเงื่อนไขที่จำเป็นและเงื่อนไขที่เพียงพอ ตลอดจนวิธีการหาฟังก์ชันการแปลงเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์ของสมการเชิงเส้น เพื่อแปลงสมการไม่เชิงเส้นให้เป็นสมการเชิงเส้น พร้อมทั้งหาผลเฉลยของสมการนั้น

ตัวอย่างที่ 1 พิจารณาสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองที่ไม่เป็นเชิงเส้น

$$x'' - tx'^3 = 0. \quad (29)$$

สมการ (29) เป็นสมการในรูปแบบที่ (4) ตามที่ได้ระบุไว้ในทฤษฎีบทที่ 1 โดยมีสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

$$A_3 = -t, A_2 = 0, A_1 = 0, A_0 = 0.$$

สามารถตรวจสอบได้ว่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้เป็นไปตามเงื่อนไขในทฤษฎีบทที่ 2 กรณี (ก) ดังนั้นสมการ (29) สามารถทำให้เป็นสมการเชิงเส้นได้โดยการแปลงเชิงเส้นทั่วไป สำหรับการหาฟังก์ชัน F , G_1 และ G_2 จำเป็นต้องทำการแก้สมการในบทแทรกที่ 3 กรณี (ก) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$F_t = \frac{-K}{G_1}, K_x = 0, K_t = \frac{2K(FG_1 + tK)}{tFG_1}, G_{1x} = 0, G_2 = 0, G_{1t} = \frac{FG_1 + tK}{tF}. \quad (30)$$

เราสามารถหาคำตอบเฉพาะของสมการใน (30) ได้ดังนี้

$$G_1 = 1, G_2 = 0, K = 1, F = -t.$$

ดังนั้นจึงได้การแปลงเชิงเส้นในรูปแบบ

$$X = -t, dT = x' dt. \quad (31)$$

และจากบทแทรกที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ α ของสมการเชิงเส้น (2) คือ

$$\alpha = 1.$$

ดังนั้น สมการ (29) จะถูกแปลงโดยการแปลงเชิงเส้น (31) ให้กลายเป็นสมการเชิงเส้น

$$X'' + X = 0. \quad (32)$$

ซึ่งผลเฉลยทั่วไปของสมการ (32) คือ

$$X = c_1 \cos(T) + c_2 \sin(T), \quad (33)$$

โดยที่ c_1 และ c_2 คือค่าคงที่ เมื่อประยุกต์ใช้การแปลงเชิงเส้นทั่วไป (31) กับสมการ (33) จะได้ผลเฉลยทั่วไปของสมการ (29) คือ

$$-t = c_1 \cos(\phi(t)) + c_2 \sin(\phi(t)),$$

โดยที่ฟังก์ชัน $T = \phi(t)$ เป็นผลเฉลยของสมการ

$$\frac{dT}{dt} = x'.$$

ตัวอย่างที่ 2 พิจารณาสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองที่ไม่เป็นเชิงเส้น

$$x'' + \frac{2}{x} x'^2 = 0. \quad (34)$$

สมการ (34) เป็นสมการในรูปแบบที่ (4) ตามที่ได้ระบุไว้ในทฤษฎีบทที่ 1 โดยมีสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

$$A_3 = 0, A_2 = \frac{2}{x}, A_1 = 0, A_0 = 0, \lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0.$$

สามารถตรวจสอบได้ว่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้เป็นไปตามเงื่อนไขในทฤษฎีบทที่ 2 กรณี (ข) ดังนั้นสมการ (34) สามารถทำให้เป็นสมการเชิงเส้นได้โดยการแปลงเชิงเส้นทั่วไป สำหรับการหาฟังก์ชัน F, G_1 และ G_2 จำเป็นต้องทำการแก้สมการในบทแทรกที่ 3 กรณี (ข) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$F_t = \frac{-K}{G_1}, K_x = \frac{2K}{x}, K_t = \frac{K(2G_{1t} + G_{2x})}{G_1}, G_{2t} = \frac{G_2(G_{1t} + G_{2x})}{G_1}, G_{2xx} = \frac{2G_{2x}}{x}, G_{1x} = \frac{2G_1}{x}. \quad (35)$$

เราสามารถหาคำตอบเฉพาะของสมการใน (35) ได้ดังนี้

$$G_1 = x^2, K = x^2, F = -t, G_2 = 0.$$

ดังนั้นจึงได้การแปลงเชิงเส้นในรูปแบบ

$$X = -t, dT = x^2 x' dt. \quad (36)$$

และจากบทแทรกที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ α ของสมการเชิงเส้น (2) คือ

$$\alpha = 0.$$

ดังนั้น สมการ (34) จะถูกแปลงโดยการแปลงเชิงเส้น (36) ให้กลายเป็นสมการเชิงเส้น

$$X'' = 0. \quad (37)$$

ซึ่งผลเฉลยทั่วไปของสมการ (37) คือ

$$X = c_1 T + c_2, \quad (38)$$

โดยที่ c_1 และ c_2 คือค่าคงที่ เมื่อประยุกต์ใช้การแปลงเชิงเส้นทั่วไป (36) กับสมการ (38) จะได้ผลเฉลยทั่วไปของสมการ (34) คือ

$$-t = c_1 \phi(t) + c_2,$$

โดยที่ฟังก์ชัน $T = \phi(t)$ เป็นผลเฉลยของสมการ

$$\frac{dT}{dt} = x^2 x'.$$

ตัวอย่างที่ 3 พิจารณาสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองที่ไม่เป็นเชิงเส้น

$$x'' + 2xx' = 0. \quad (39)$$

สมการ (39) เป็นสมการในรูปแบบที่ (4) ตามที่ได้ระบุไว้ในทฤษฎีบทที่ 1 โดยมีสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

$$A_3 = 0, A_2 = 0, A_1 = 2x, A_0 = 0, \lambda_1 = -2, \lambda_2 = 4x.$$

สามารถตรวจสอบได้ว่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้เป็นไปตามเงื่อนไขในทฤษฎีบทที่ 2 กรณี (ค) ดังนั้นสมการ (39) สามารถทำให้เป็นสมการเชิงเส้นได้โดยการแปลงเชิงเส้นทั่วไป สำหรับการหาฟังก์ชัน F, G_1 และ G_2 จำเป็นต้องทำการแก้สมการในบทแทรกที่ 3 กรณี (ค) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$F_t = \frac{-K}{G_1}, K_x = 0, K_t = \frac{2G_1tK}{G_1}, G_{2t} = \frac{G_1tG_2}{G_1}, G_{1x} = 0, G_{2x} = 2G_1x. \quad (40)$$

เราสามารถหาคำตอบเฉพาะของสมการใน (40) ได้ดังนี้

$$G_1 = 1, G_2 = x^2, K = -1, F = t.$$

ดังนั้นจึงได้การแปลงเชิงเส้นในรูปแบบ

$$X = t, dT = (x' + x^2)dt. \quad (41)$$

และจากบทแทรกที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ α ของสมการเชิงเส้น (2) คือ

$$\alpha = 0.$$

ดังนั้น สมการ (39) จะถูกแปลงโดยการแปลงเชิงเส้น (41) ให้กลายเป็นสมการเชิงเส้น

$$X'' = 0. \quad (42)$$

ซึ่งผลเฉลยทั่วไปของสมการ (42) คือ

$$X = c_1T + c_2, \quad (43)$$

โดยที่ c_1 และ c_2 คือค่าคงที่ เมื่อประยุกต์ใช้การแปลงเชิงเส้นทั่วไป (41) กับสมการ (43) จะได้ผลเฉลยทั่วไปของสมการ (39) คือ

$$t = c_1\phi(t) + c_2,$$

โดยที่ฟังก์ชัน $T = \phi(t)$ เป็นผลเฉลยของสมการ

$$\frac{dT}{dt} = x' + x^2.$$

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัญหาการทำให้เป็นเชิงเส้นของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้การแปลงเชิงเส้นทั่วไป เพื่อเปลี่ยนสมการให้อยู่ในรูป $X'' + \alpha X = 0$ พร้อมกำหนดเงื่อนไขที่จำเป็นตามทฤษฎีบทที่ 1 และวิเคราะห์เงื่อนไขที่เพียงพอตามทฤษฎีบทที่ 2 เพื่อให้มั่นใจว่าสมการสามารถแปลงได้จริง

นอกจากนี้ งานวิจัยยังนำเสนอวิธีการหาฟังก์ชันการแปลงเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์ของสมการเชิงเส้น (α) โดยใช้การแก้ระบบสมการที่เข้ากันได้ตามบทแทรกที่ 3 พร้อมทั้งนำเสนอตัวอย่างเพื่อแสดงขั้นตอนการแปลงและการหาผลเฉลย

สุดท้ายนี้ แม้จะมุ่งเน้นการแปลงสมการให้อยู่ในรูป $X'' + \alpha X = 0$ แต่แนวทางและวิธีการที่นำเสนอยังสามารถประยุกต์ใช้กับการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองที่ไม่เชิงเส้นให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้นอื่น ๆ ได้อีกด้วย ซึ่งเปิดโอกาสให้มีการพัฒนาและศึกษาต่อยอดในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- Lie, S. (1883). Klassifikation und integration von gewöhnlichen differentialgleichungen zwischen x, y, die eine gruppe von transformationen gestatten. III. *Archiv for Matematik og Naturvidenskab*, 8(4), 371-427.
- Liouville, R. (1889). Sur les Invariantes de Certaines Equations. *J. de l'École Poly technique*, 59, 7-88.
- Tresse, A. M. (1896). Détermination des Invariants Ponctuels de l'Équation Différentielle Ordinaire du Second Order $y'' = f(x, y, y')$. *Preisschriften der fürstlichen Jablonowski schen Gesellschaft XXXII*. Leipzig: S.Herzel.
- Cartan, E. (1924). Sur les variétés à connexion projective. *Bull. Soc. Math. France*, 52, 205-241.
- Durate, L. G. S., Moreira, I. C., & Santos, F. C. (1994). Linearisation under nonpoint transformations. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 27(19), L739-L743.
- Nakpim, W., & Meleshko, S. V. (2010). Linearization of second-order ordinary differential equations by generalized Sundman transformations. *SIGMA*, 6(51), 1-11.
- Chandrasekar, V. K., Senthilvelan, M., & Lakshmanan, M. (2006). A unification in the theory of linearization of second-order nonlinear ordinary differential equations. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 39(3), L69-L76.
- Voraka, P., Suksern, S., & Donjiwprai, N. (2020). Linearizability of Nonlinear Second-Order Ordinary Differential Equations by Using a Generalized Linearizing Transformation. *IAENG International Journal of Applied Mathematics*, 50(4), 845-852.