



JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

THONBURI UNIVERSITY

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธนบุรี

Vol 6 No 2 July - December 2022
ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2565



ISSN 2730-3837 (Online)



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี

ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม-ธันวาคม 2565



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. จรัญ แสงราช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ศิริลักษณ์ สุวรรณวงศ์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ สุรัชย์ ธรรมทวีธิกุล	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนิต แต่งศรี	มหาวิทยาลัยธนบุรี

ฝ่ายจัดการ และเลขานุการ

อาจารย์ฐานพิณี วชิรสุรงค์	คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ ผศ.จิระศักดิ์ ส่งบุญแก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ ผศ.ยอดนภา เกษเมือง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ ผศ.สมจินต์ อักษรธรรม	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์วสันต์ ลีละธนาฤกษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์สิทธิศักดิ์ ทองสุข	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์นันทวัน นาคอร่าม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์อรรษาวิ เจ๊ะสะแม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์เอนก นามขันธุ์	ศูนย์คอมพิวเตอร์และสารสนเทศ
อาจารย์สุดาร์ตน์ คงคาชาติ	สำนักวิชาศึกษาทั่วไป
อาจารย์วรารณ สุ่มมาตย์	สำนักวิชาศึกษาทั่วไป

คณะกรรมการกลั่นกรอง (Peer Review)

รศ.ดร.ไพฑูรย์ ศิริโอฬาร

รศ.ดร.ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล

รศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร

รศ. ดร.เฉลิมชาติ มานพ

ผศ.ดร.พิสิตี วิสุทธิเมธีกร

ผศ.ดร.เรวดี ศักดิ์ดุยธรรม

ผศ.ดร. ประสพโชค ให้อทองคำ

ผศ.ดร.เมธา อึ้งทอง

ผศ.ยอดนภา เกษเมือง

ดร.ภรดิษฐ์ แบ่งจิตต์

ผศ.ดร.กัม พรประเสริฐ

ผศ.ดร.ไวรุจน์ อิมโพ

ผศ.ดร.ประเสริฐ ศรีบุญจันทร์

ผศ.จิระศักดิ์ ส่งบุญแก้ว

ผศ.กิตติพงษ์ พุ่มโกษนา

ผศ.บัญชา ศรีวิโรจน์

ผศ. ดร.นิรุช จิรสวรรณกุล

ผศ.ดร.ปัญญา สำราญหันต์

ผศ.ดร.พรรษา เอกพรประสิทธิ์

ผศ.ปัญญา สำราญหันต์

ดร.อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

ดร. ยุทธนา คงจีน

ผศ. วสันต์ เพชรพิมูล

ดร.น่านน้ำ บัวคล้าย

สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยราชพฤกษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยธนบุรี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ได้จัดพิมพ์ขึ้นเป็นปีที่ 6 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยบทความทุกเรื่องได้ผ่านการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา โดยแต่ละบทความจะต้องการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน และทางกองบรรณาธิการยังคงพัฒนาคุณภาพวารสารอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

กองบรรณาธิการของวารสารหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านทุกท่าน และขอขอบคุณที่ท่านผู้อ่านได้ให้ความสนใจวารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) สำหรับผู้อ่านที่มีความประสงค์จะเสนอแนะหรือมีคำติชมประการใด โปรดให้ความเห็นหรือทักท้วงตามที่อยู่ของกองบรรณาธิการ ยินดีตอบรับทุกความคิดเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขให้ดียิ่งขึ้น

ดร.ฐิติพร กรัยวิเชียร

บรรณาธิการวารสาร

สารบัญ

ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม-ธันวาคม 2565

บทความวิจัย

- 1-7 ระดับเสียงของการทำงานในสถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์ เขตเทศบาลอำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์
NOISE OF WORK IN THE CAR GARAGE, SOMDET MUNICIPALITY, KALASIN PROVINCE
อนรรักษ์ ปิ่นทอง, สุรศักดิ์ กิจชำนาญ
- 8-15 การศึกษาชนิดของอิมมูโนโกลบูลินที่ผิดปกติความสัมพันธ์กับโรคและความถี่ของการตรวจในผู้ป่วยโรงพยาบาลศรีนครินทร์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย
THE STUDY OF THE ABNORMAL IMMUNOGLOBULIN TYPES RELATED TO DISEASE AND FREQUENCY OF EXAMINATION IN PATIENTS AT SRINAGARIND HOSPITAL, FACULTY OF MEDICINE, KHON KAEN UNIVERSITY, THAILAND
ทิพาพร จรุงศิริมณีกุล, ปริญญญา ประสงค์ดี, พวงผกา สาดิ, จันทรเพ็ญ ศรีพรรณ, ศรัณย์ ภูนิคม, นันทพันธ์ กนกศิริจุฑา
- 16-23 การลดต้นทุนการขนส่ง กรณีศึกษาบริษัทผลิตไส้กรองน้ำมันเครื่อง
TRANSPORTATION COSTS REDUCATION A CASE STUDY OF OIL FILTER MANUFACTURER
พลอยไพลิน พริกทิม, ไพฑูรย์ ศิริโอฬาร, เพ็ญสินี อาวุธปัญญากุล
- 24-37 การศึกษาเวลามาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานและการจ่ายค่าตอบแทนของแผนกทดสอบวัตถุดิบ กรณีศึกษาบริษัทผลิตชุดชั้นใน
STANDARD TIME STUDY FOR COMPARISON PERFORMANCE AND COMPENSATION IN RAW MATERIAL TESTING DEPARTMENT CASE STUDY UNDERWEAR MANUFACTURING
กวิณ พินสาราย, จิรวดี อินทกาญจน์, รุ่งรวิน ตั้งชัย, สรinya ศรีอินทร์กิจ
- 38-45 การพัฒนาเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร
DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL BEVERAGE FROM BANANA MIXED WITH HERBAL
จันวิภา สุปะกิ่ง
- 46-58 อินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน
7-LEVEL H-BRIDGE CASCADED INVERTER FOR RENEWABLE ENERGY SOURCE
บุญธง วสุรีย์, บัญชา หิรัญสิงห์, อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ
- 59-73 การศึกษาจลนศาสตร์และการสร้างแบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมด้วยโปรแกรมแมทแลป
A STEADY OF KINEMATICS AND MODELING OF INDUSTRIAL ROBOT ARM USING MATLAB PROGRAM
สุรัชย์ เหมหิรัญ, กิตติคม นนท์ประสาท, พงษ์นรินทร์ สว่างวงศ์

- 74-85 กลยุทธ์การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า
DIRECT POWER CONTROL STRATEGY FOR LCL-FILTERED VOLTAGE SOURCE INVERTERS FOR CONNECTED TO THE THREE-PHASE GRID
กำจัด ใจตรง, ปิยะนัฐ ใจตรง
- 86-99 ระบบการตรวจจับร่องน้ำในสวนโดยใช้การประมวลผลภาพเพื่อใช้น้ำทางของเรือดน้ำแบบอัตโนมัติ
THE TRENCH CHANNEL DETECTION WITH IMAGE PROCESSING FOR AUTONOMOUS BOAT WATER SPRAYER
วรุฒิ กังหัน, ภาณุภูมิ ปฐมภาคย์ ศรัณย์ ฉัตรธัญญกิจ, โพธิวัฒน์ งามขจรวิวัฒน์, ธันยวัต สมใจทวีพร
- 100-108 แนวทางในการลดความสูญเสียในอุตสาหกรรมต่อเรือในไทย
A SYSTEMATIC APPROACH TO REDUCING LOSSES IN THE SHIPBUILDING INDUSTRY IN THAILAND
สนธิรัตน์ อินทสนธิ, ศุภพัชร พวงแก้ว, ทัดพล กุลวงศ์
- 109-119 ลดน้ำเชื่อมสูญเสีย จากปัญหาปริมาตรต่ำกว่ามาตรฐาน กระบวนการผลิต 5
REDUCE SYRUP LOSS DUE TO SUBSTANDARD WATER LEVEL PROBLEMS PRODUCTION PROCESS 5
วิทยา ปั่นคำ, สมจินต์ อักษรธรรม, สมศักดิ์ มั่นคร, ชญานิศ เณิมสุข

Received: Mar 8, 2022

Revised: Aug 25, 2022

Accepted: Sep 8, 2022

ระดับเสียงของการทำงานในสถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์ เขตเทศบาลอำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์

NOISE OF WORK IN THE CAR GARAGE, SOMDET MUNICIPALITY, KALASIN PROVINCE

อนรรักษ์ ปิ่นทอง¹ สุรศักดิ์ กิจชำนาญ²^{1,2}คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์Anurak Pintong¹ Surasak Kitchumnarn²^{1,2}Faculty of Science and Health Technology, Kalasin University

E-mail: anurakpintong@hotmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดระดับเสียงของการทำงานในสถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน เปรียบเทียบระดับเสียงของการทำงานในสถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก และผลกระทบของระดับเสียงของการทำงานต่อผู้ปฏิบัติงาน โดยใช้เครื่องวัดเสียงและวิธีการตรวจวัดระดับเสียงของการทำงานตามมาตรฐานของกฎกระทรวงในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่างและเสียง พ.ศ.2549

ผลการศึกษา พบว่า สถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็กมีระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงาน เท่ากับ 75.75 ± 2.70 เดซิเบลเอ และ 78.50 ± 1.38 เดซิเบลเอ ตามลำดับ ระดับเสียงกระแทก เท่ากับ 116.87 ± 4.49 เดซิเบลซี และ 116.75 ± 5.13 เดซิเบลซี ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานและระดับเสียงกระแทกกับค่ามาตรฐาน ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 85 เดซิเบลเอ และ 140 เดซิเบลซี ตามลำดับ พบว่า ระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานและระดับเสียงกระแทกของสถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก มีค่าไม่เกินมาตรฐาน การเปรียบเทียบระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานระหว่างสถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยใช้สถิติ t - test independent ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ค่า p-value < 0.05 ซึ่งหมายความว่า สถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็กมีระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานมากกว่าสถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่ และการสัมภาษณ์พนักงานในสถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก พบว่า เสียงที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการได้ยิน การสื่อสารระหว่างการปฏิบัติงานและสภาพจิตใจของพนักงาน

คำสำคัญ: ระดับเสียงของการทำงาน, อู่ซ่อมรถยนต์, ผลกระทบของเสียง

Abstract

The objectives of this research were to measure the noise of work in the car garage and compare with the standard, to compare the noise of work in the large and small car garage and to study the effect of the noise on the employees. The measure of noise used the sound level meter. The measurement used the method of the noise of work in accordance with the standards of ministerial regulations in the management of occupational safety, health and working environment concerning heat, light and sound (B.E.2549).

The results of the study are as follows. The large and small garage had time weighted average (TWA) as 75.75 ± 2.70 dB(A) and 78.50 ± 1.38 dB(A) respectively, impulse noise as 116.87 ± 4.49 dB(C) and 116.75 ± 5.13 dB(C) respectively. The comparison of TWA and impulse noise to the standard which is not over 85 dB(A) and 140 dB(C) respectively. The comparison TWA between the large and small

car garage using t - test independent at 0.05 of significant founded that p-value < 0.05. The results indicated that the small car garage had TWA rather than the large car garage. The results of interview in the large and small car garage founded that the noise caused by the operation affects the hearing efficiency, communication during working and the mental state of the employees.

Keywords: Noise of Work, Car Garage, Noise Effect

บทนำ

ปัจจุบันมลพิษทางเสียงในสถานประกอบการถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งของผู้ปฏิบัติงานในสถานประกอบการ ซึ่งเสียงดังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของคนงานโดยทางตรงและทางอ้อม หากไม่มีการดำเนินการจัดการป้องกันที่ถูกต้องและเหมาะสม โรงงานที่มีระดับเสียงดังสูง อาทิเช่น โรงงานไม้ บดหรือย่อยหิน โรงงานทอผ้า โรงงานโลหะ และโรงงานซ่อมแซมเครื่องยนต์ ซึ่งระดับเสียงดังขึ้นกับกระบวนการผลิตและเครื่องจักรของโรงงาน (ศิวพันธุ์ ชูอินทร์, 2556) การได้รับหรือสัมผัสเสียงดังในระยะเวลายาวนาน ก่อให้เกิดการสูญเสียการได้ยินหรือความสามารถในการได้ยินเสียงลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคนที่ไม่มีการได้ยินปกติ การสูญเสียการได้ยินเนื่องจากเสียงดังโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ คือ ระดับความดังเสียง ชนิดของเสียง ระยะเวลาที่ได้รับเสียงต่อวันและตลอดอายุ การทำงาน นอกจากนี้ยังพบปัจจัยอื่นที่มีส่วนเกี่ยวข้องทำให้เกิดการสูญเสียการได้ยิน เช่น ความไวต่อเสียงในแต่ละบุคคล อายุ สภาพแวดล้อมของแหล่งเสียง ฯลฯ เสียงดังตลอดเวลาการทำงาน อาจทำให้เกิดอุบัติเหตุในการทำงานได้ ทั้งนี้เพราะเสียงดังทำให้เกิดพฤติกรรมส่วนบุคคลเปลี่ยนแปลง เช่น บางคนอาจรู้สึกเซื่องซึมต่อการตอบสนองต่อสัญญาณต่าง ๆ ความวุ่นใจในการทำงานผิดพลาดจนเกิดอุบัติเหตุขึ้น นอกจากนี้ยังรบกวนการติดต่อสื่อสารทำให้ผู้ปฏิบัติงานไม่ได้ยินสัญญาณอันตรายที่ดังขึ้นหรือไม่ได้ยินเสียงเตือนของเพื่อนพนักงานจนอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุขึ้นได้ (กองความปลอดภัยแรงงาน, 2561) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่สถานประกอบการจะต้องมีมาตรการในการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพ เพื่อจัดการและป้องกันปัญหามลพิษทางเสียงจากการทำงาน โดยเฉพาะสถานประกอบการที่มีกิจกรรมหรือกระบวนการที่ต้องสัมผัสเสียงดัง เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับผู้ปฏิบัติงาน

สถานประกอบการอยู่ซ่อมรถยนต์มีกิจกรรมในการทำงาน ได้แก่ การตัด การเชื่อมโลหะ การยกรถ การทุบ การขัด และการซ่อมอะไหล่ของเครื่องยนต์ และเครื่องจักรในการทำงาน ได้แก่ เครื่องปั๊มลม เครื่องยกเครื่องยนต์ ขาดังซ่อมเครื่องยนต์ แท่นอัดไฮโดรคิก เครื่องถอดน็อต เครื่องเจียร์ และลิฟท์ยกรถยนต์ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดเสียงดังได้ ศิวพันธุ์ ชูอินทร์ (2556) ได้กล่าวถึงเครื่องปั๊มลมและเครื่องเจียร์ในโรงงานซ่อมสร้างรถยนต์ว่าสามารถทำให้เกิดเสียงดังได้และถ้าคนงานได้รับสัมผัสเสียงเป็นเวลานานอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของคนงานในสถานประกอบการต่อไปในอนาคต

ดังนั้นการศึกษาระดับเสียงของการทำงานภายในสถานประกอบการอยู่ซ่อมรถยนต์ เขตเทศบาลอำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์ เพื่อตรวจวัดระดับเสียงของการทำงานภายในสถานประกอบการอยู่ซ่อมรถยนต์ เปรียบเทียบระดับเสียงของการทำงานในสถานประกอบการอยู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก และผลกระทบของระดับเสียงของการทำงานต่อผู้ปฏิบัติงาน โดยผลการศึกษานำมาใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงและป้องกันอันตรายของเสียงดังจากการทำงานแก่ผู้ปฏิบัติงานในสถานประกอบการงานซ่อมรถยนต์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อตรวจวัดระดับเสียงของการทำงานภายในสถานประกอบการอยู่ซ่อมรถยนต์ เขตเทศบาลอำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์
2. เพื่อเปรียบเทียบระดับเสียงของการทำงานภายในสถานประกอบการอยู่ซ่อมรถยนต์กับค่ามาตรฐานกฎกระทรวงในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ.2549
3. เพื่อเปรียบเทียบระดับเสียงของการทำงานภายในสถานประกอบการอยู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก เขตเทศบาลอำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์

4. เพื่อศึกษาผลกระทบของเสียงในการทำงานต่อพนักงานภายในสถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์ เขตเทศบาล อำเภอสามเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาบริบทของพื้นที่ โดยมีการสัมภาษณ์ข้อมูลพื้นฐานของสถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์ในเขตเทศบาล อำเภอสามเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์ 2 แห่ง ได้แก่ คือ อู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่ และอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็กและลักษณะการทำงาน จากผู้ปฏิบัติงานสำรวจข้อมูลเบื้องต้น

2. การดำเนินการตรวจวัดระดับเสียงของการทำงาน

2.1 การเตรียมเครื่องมือวัดเสียง ยี่ห้อ RION รุ่น NL-52

2.1.1 การเปรียบเทียบความถูกต้องของเครื่องวัดระดับเสียงด้วยอุปกรณ์ตรวจสอบความถูกต้อง อะคูสติก คาลิเบรเตอร์ (Acoustic Calibrator)

2.1.2 ปรับมาตรฐานระดับเสียงไว้ที่วงจรถ่วงน้ำหนัก A and C (Weighting Network A and C) และที่ลักษณะความไวตอบรับเสียง Slow (Dynamic Characteristics Slow)

2.2 ตั้งค่าการตรวจวัดระดับเสียงของการทำงานและเวลาเก็บการข้อมูล ได้แก่

2.2.1 ระดับเสียงเฉลี่ย (LAep) ในช่วงระยะเวลาของการทำงาน 8 ชั่วโมง

2.2.2 ระดับเสียงกระแทก (Lpeak) ในช่วงระยะเวลาของการทำงาน 8 ชั่วโมง

2.2.3 ปริมาณเสียงสูงสุด (Lmax) ในช่วงระยะเวลาของการทำงาน 8 ชั่วโมง

2.2.4 ปริมาณเสียงต่ำสุด (Lmin) ในช่วงระยะเวลาของการทำงาน 8 ชั่วโมง

2.3 ระยะเวลาการตรวจวัดเสียงของการทำงาน จะดำเนินการตรวจวัดระดับเสียงเฉลี่ยในพื้นที่สถานประกอบการ จำนวน 12 ครั้ง

2.4 การตรวจวัดระดับเสียงของการทำงาน โดยทำการตรวจวัด 4 พารามิเตอร์

3. ประมวลผลข้อมูลระดับเสียงของการทำงาน ตามประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง หลักเกณฑ์ วิธีการตรวจวัด และการวิเคราะห์สภาวะการทำงานเกี่ยวกับระดับความร้อน แสงสว่าง หรือเสียง รวมทั้งระยะเวลาและประเภทกิจการที่ต้องดำเนินการ โดยคำนวณ

3.1 ปริมาณเสียงสะสม (%D)

3.2 ระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงาน

4. ประเมินระดับเสียงของการทำงาน โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานกฎกระทรวงการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2549 ซึ่งค่ามาตรฐานระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงาน กำหนดไว้ไม่เกิน 85 เดซิเบลเอและระดับเสียงกระแทก กำหนดไว้ไม่เกิน 140 เดซิเบลซี

5. เปรียบเทียบระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานระหว่างอู่ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยสถิติ t - test independent ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

6. สัมภาษณ์แบบเชิงลึกถึงผลกระทบของระดับเสียงที่ส่งผลต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์ โดยใช้แบบสัมภาษณ์ลักษณะกึ่งโครงสร้างเกี่ยวกับผลกระทบของระดับเสียงรบกวนที่ส่งผลต่อผู้ปฏิบัติงาน

ผลการวิจัย

1. ระดับเสียงของการทำงานในสถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์

1.1 สถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์อู่ขนาดใหญ่

สถานประกอบการอู่ซ่อมรถยนต์อู่ขนาดใหญ่ มีเครื่องจักรที่มีกำลัง 50 แรงม้าขึ้นไป ประกอบไปด้วยเครื่องปั๊มลม จำนวน 2 เครื่อง เครื่องยกเครื่องยนต์ จำนวน 2 เครื่อง ขาตั้งซ่อมเครื่องยนต์ จำนวน 2 เครื่อง แท่นอัดไฮโดรริก จำนวน 2 เครื่อง เครื่องถอดน็อต จำนวน 2 เครื่อง เครื่องเจียร์ จำนวน 2 เครื่อง และลิฟท์ยกรถยนต์ จำนวน 4 ตัว ลักษณะการทำงานที่

ใช้เครื่องจักรและวัสดุอุปกรณ์ในการทำงานซ่อมแซมบำรุงรักษารถยนต์ จะมีการปล่อยเสียงตลอดเวลาของการทำงาน ผลการตรวจวัดระดับเสียงของการทำงานในสถานประกอบการอยู่ช่อมรณต์ขนาดใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับเสียงของการทำงานในสถานประกอบการอยู่ช่อมรณต์ขนาดใหญ่

ครั้งที่	ระดับเสียงเฉลี่ย (LAeq) (dBA)	ระดับเสียงกระแทก (Lpeak) (dBC)	ปริมาณเสียงสูงสุด (Lmax) (dBA)	ปริมาณเสียงต่ำสุด (Lmin) (dBA)	ปริมาณการสัมผัสเสียงสะสม (D%)	ระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) (dBA)
1	69.85	110.5	91.3	44.4	3.02	69
2	75.85	112.3	91.2	45.0	22.42	78
3	76.6	114.3	103.2	45.5	14.57	76
4	80.34	112.2	112.1	45.3	34.12	80
5	74.30	117.6	104.6	44.5	8.44	74
6	75.74	120.5	100.3	44.3	11.78	75
7	77.81	124.3	100.2	44.2	19.03	77
8	75.52	124.5	98.5	50.1	11.21	75
9	75.33	118.3	101.5	44.1	10.73	75
10	76.45	116.4	100.1	44.3	13.88	76
11	78.11	116.3	100.3	45.3	20.39	78
12	76.63	115.3	99.1	44.2	14.47	76
ค่าเฉลี่ย	76.04±2.50	116.87±4.49	100.20±5.52	45.10±1.65	15.30±8.00	75.75±2.70

ผลการตรวจวัดระดับเสียง พบว่า ระดับเสียงเฉลี่ย (LAeq) เท่ากับ 76.04 ± 2.50 เดซิเบลเอ ระดับเสียงกระแทก (Lpeak) เท่ากับ 116.87 ± 4.49 เดซิเบลซี ปริมาณเสียงสูงสุด (Lmax) เท่ากับ 100.20 ± 5.52 เดซิเบลเอ ปริมาณเสียงต่ำสุด (Lmin) เท่ากับ 45.10 ± 1.65 เดซิเบลเอ ปริมาณการสัมผัสเสียงสะสม (D%) เท่ากับ 15.30 ± 8.00 % และระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงาน เท่ากับ 75.75 ± 2.70 เดซิเบลเอ

1.2 สถานประกอบการอยู่ช่อมรณต์ขนาดเล็ก

สถานประกอบการอยู่ช่อมรณต์ขนาดเล็ก มีเครื่องจักรที่มีกำลังน้อย 50 แรงม้า ซึ่งภายในพื้นที่ช่อมรณต์จะประกอบไปด้วย เครื่องปั๊มลม จำนวน 1 เครื่อง เครื่องยกเครื่องยนต์ จำนวน 2 เครื่อง ขาตั้งซ่อมเครื่องยนต์ จำนวน 2 เครื่อง แท่นอัดไฮโดรริก จำนวน 1 เครื่อง เครื่องถอดน็อต จำนวน 1 เครื่อง เครื่องเจียร์ จำนวน 1 เครื่อง และลิฟท์ยกรถยนต์ จำนวน 2 ตัว ซึ่งลักษณะงานที่ใช้เครื่องจักรและวัสดุอุปกรณ์ในการทำงานซ่อมแซมบำรุงรักษารถยนต์ ซึ่งทำให้เกิดเสียงตลอดเวลาของการทำงาน ผลการตรวจวัดระดับเสียงของการทำงานในสถานประกอบการอยู่ช่อมรณต์ขนาดเล็ก ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับเสียงของการทำงานในสถานประกอบการอยู่ช่อมรณต์ขนาดเล็ก

ครั้งที่	ระดับเสียงเฉลี่ย (LAeq) (dBA)	ระดับเสียงกระแทก (Lpeak) (dBC)	ปริมาณเสียงสูงสุด (Lmax) (dBA)	ปริมาณเสียงต่ำสุด (Lmin) (dBA)	ปริมาณการสัมผัสเสียงสะสม (D%)	ระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) (dBA)
1	78.52	110.5	95.5	44.4	22.42	78

ครั้งที่	ระดับเสียงเฉลี่ย (LAeq) (dBA)	ระดับเสียงกระแทก (Lpeak) (dBC)	ปริมาณเสียงสูงสุด (Lmax) (dBA)	ปริมาณเสียงต่ำสุด (Lmin) (dBA)	ปริมาณการสัมผัสเสียงสะสม (D%)	ระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) (dBA)
2	80.07	120.2	115.1	54.1	32.04	80
3	77.95	118.1	107.1	49.5	19.63	77
4	75.35	120.2	107.5	50.3	10.77	75
5	79.61	109.3	101.5	50.3	28.81	79
6	79.90	115.1	107.3	48.3	30.81	79
7	79.25	111.3	100.3	52.1	26.53	79
8	79.78	111.3	99.3	49.1	29.97	79
9	79.97	118.4	103.5	49.5	31.32	79
10	80.31	120.3	103.5	47.5	33.87	80
11	79.49	121.1	105.3	50.3	28.02	79
12	78.49	125.3	105.3	49.5	22.24	78
ค่าเฉลี่ย	79.05±1.37	116.75±5.13	104.26±4.98	49.57±2.36	26.40±6.80	78.50±1.38

ผลการตรวจวัดระดับเสียง พบว่า ระดับเสียงเฉลี่ย (LAeq) เท่ากับ 79.05 ± 1.37 เดซิเบลเอ ระดับเสียงกระแทก (Lpeak) เท่ากับ 116.75 ± 5.13 เดซิเบลซี ปริมาณเสียงสูงสุด (Lmax) เท่ากับ 104.26 ± 4.98 เดซิเบลเอ ปริมาณเสียงต่ำสุด (Lmin) เท่ากับ 49.57 ± 2.36 เดซิเบลเอ ปริมาณการสัมผัสเสียงสะสม (D%) เท่ากับ 26.40 ± 6.80 % และระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงาน เท่ากับ 78.50 ± 1.38 เดซิเบลเอ

2. การเปรียบเทียบระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานกับค่ามาตรฐาน

การเปรียบเทียบระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานในสถานประกอบการอยู่ช่อมรณต์กับค่ามาตรฐานกฎกระทรวงในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2549 พบว่า สถานประกอบการอยู่ช่อมรณต์ขนาดใหญ่มีระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงาน เท่ากับ 75.75 ± 2.70 เดซิเบลเอ และระดับเสียงกระแทก 116.87 ± 4.49 เดซิเบลซี และสถานประกอบการอยู่ช่อมรณต์ขนาดเล็กมีระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงาน เท่ากับ 78.50 ± 1.38 เดซิเบลเอ และระดับเสียงกระแทก 116.75 ± 5.13 เดซิเบลซี เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานและระดับเสียงกระแทก ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 85 เดซิเบลเอ และ 140 เดซิเบลซี ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า สถานประกอบการอยู่ช่อมรณต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็กมีระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานและระดับเสียงกระแทกไม่เกินค่ามาตรฐาน

3. การเปรียบเทียบระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานระหว่างสถานประกอบการ

ผลเปรียบเทียบระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานระหว่างสถานประกอบการขนาดใหญ่และสถานประกอบการขนาดเล็ก โดยใช้สถิติ T - test independent ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ผลการเปรียบเทียบระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานระหว่างสถานประกอบการ 2 แห่ง มีค่า p-value เท่ากับ 0.005 ซึ่งหมายความว่า สถานประกอบการขนาดใหญ่และสถานประกอบการขนาดเล็ก มีค่าเฉลี่ยระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นั่นคือสถานประกอบการอยู่ช่อมรณต์ขนาดเล็ก (78.50 ± 1.38 เดซิเบลเอ) มีระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานมากกว่าสถานประกอบการอยู่ช่อมรณต์ขนาดใหญ่ (75.75 ± 2.70 เดซิเบล)

4. ผลการสัมภาษณ์พนักงานในสถานประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์

ผลการสัมภาษณ์พนักงานในสถานประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ซึ่งเป็นการสัมภาษณ์เป็นแบบเชิงลึกเกี่ยวกับลักษณะการทำงานที่ส่งผลกระทบต่อพนักงาน พบว่า พนักงานได้รับผลกระทบของเสียงจากการปฏิบัติงานโดยมีผลกระทบต่อการได้ยินและทำให้พนักงานมีอาการหูอื้อเป็นบางครั้ง และมีความรู้สึกหงุดหงิด รำคาญในช่วงเวลาที่ใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ในการปฏิบัติงาน และเสียงจากการปฏิบัติงานส่งผลกระทบต่อสื่อสารในระหว่างการปฏิบัติงานในบางครั้ง ปัจจุบันพนักงานทั้งหมดไม่มีการใช้อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลในการป้องกันผลกระทบจากเสียง

สรุปผลวิจัยและอภิปรายผล

การตรวจวัดระดับเสียงของการทำงาน พบว่า สถานประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์ขนาดใหญ่ มีค่าระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงาน เท่ากับ 75.75 ± 2.70 เดซิเบลเอ และระดับเสียงกระแทก 116.87 ± 4.49 เดซิเบลซี สถานประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์ขนาดเล็ก มีค่าระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงาน เท่ากับ 78.50 ± 1.38 เดซิเบลเอ และระดับเสียงกระแทก 116.75 ± 5.13 เดซิเบลซี ซึ่งระดับเสียงของการทำงานทั้ง 2 อยู่มีการใช้เครื่องจักรในการทำงานอาทิเช่น เครื่องถอดน็อต บั้มลม แท่นไฮโดรริก และกิจกรรมในการทำงานอาทิเช่น การเคาะ การทุบ การเจียร ซึ่งทั้งเครื่องจักรและกิจกรรมในการทำงานถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดเสียงภายในสถานที่ประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์ได้ ซึ่งคิวพันธ์ ชูอินทร์ (2556) ได้กล่าวถึงระดับเสียงของเครื่องจักรในโรงงานซ่อมสร้างรถยนต์ว่าเครื่องบั้มลม มีระดับเสียง 92.8 – 93.2 เดซิเบลเอและเครื่องเจียร 87.0 - 98.0 เดซิเบลเอ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำงานที่มีการใช้เครื่องจักรและกิจกรรมจากการทำงานในสถานประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์เป็นแหล่งกำเนิดเสียงดัง

การเปรียบเทียบระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงาน เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน พบว่า ค่าเฉลี่ยระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงาน ของสถานประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์ขนาดใหญ่ เท่ากับ 75.75 ± 2.70 เดซิเบลเอ และระดับเสียงกระแทก 116.87 ± 4.49 เดซิเบลซี และค่าเฉลี่ยระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงาน ของสถานประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์ขนาดเล็ก เท่ากับ 78.50 ± 1.38 เดซิเบลเอ และระดับเสียงกระแทก 116.75 ± 5.13 เดซิเบลซี เมื่อนำค่าเฉลี่ยระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงาน และเสียงกระแทกที่ตรวจวัดได้เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 90 เดซิเบลเอ และ 140 เดซิเบลซี ตามลำดับ พบว่า มีค่าไม่เกินมาตรฐาน สาเหตุที่ระดับเสียงเฉลี่ยที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานและระดับเสียงกระแทกของสถานประกอบการขนาดใหญ่และสถานประกอบการขนาดเล็กค่าไม่เกินมาตรฐานเป็นเพราะในช่วงเวลาของการตรวจวัดระดับเสียงปริมาณงานและความถี่ในการทำงานไม่ได้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 8 ชั่วโมงการทำงาน จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ระดับเสียงเฉลี่ยที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานไม่เกินมาตรฐาน

การเปรียบเทียบระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานระหว่างสถานประกอบการขนาดใหญ่ (75.75 ± 2.70 เดซิเบลเอ) และสถานประกอบการขนาดเล็ก (78.50 ± 1.38) ใช้สถิติ T - test independent ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า p-value มีค่าเท่ากับ 0.005 ซึ่งหมายความว่า ค่าระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานทั้ง 2 สถานประกอบการมีความแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าสถานประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์ขนาดเล็ก มีค่าระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานมากกว่าสถานประกอบการขนาดใหญ่ เนื่องจากบริบทของสถานประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์ขนาดเล็ก มีพื้นที่ในปฏิบัติงาน 200 ตารางเมตร ซึ่งน้อยกว่าประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์ขนาดใหญ่ และการจัดวางเครื่องจักรในการปฏิบัติงานอยู่ติดกัน อีกทั้งพื้นที่ในการปฏิบัติงานเป็นลักษณะพื้นที่ปิดจึงทำให้เสียงที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานมีการกระจายสู่พื้นที่ภายนอกได้น้อย และบริบทของสถานประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์ขนาดใหญ่ มีพื้นที่ในปฏิบัติงาน 525 ตารางเมตร ซึ่งมากกว่าสถานประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์ขนาดเล็กและการจัดวางเครื่องจักรในการปฏิบัติงานมีระยะห่างกัน อีกทั้งพื้นที่ในการปฏิบัติงานเป็นลักษณะพื้นที่เปิดจึงทำให้เสียงที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานมีการกระจายสู่พื้นที่ภายนอกได้มากกว่า จึงทำให้มีค่าระดับเสียงที่สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (TWA) ของการทำงานของสถานประกอบการขนาดเล็ก มีค่ามากกว่าสถานประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์ขนาดใหญ่

การสัมภาษณ์พนักงานในสถานประกอบการอุ้มอภรณ์ยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก พบว่า เสียงที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการได้ยิน การสื่อสารระหว่างการปฏิบัติงานและสภาพจิตใจของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งวิทยายุทธ (2552) ได้อธิบายถึงอันตรายของการสัมผัสกับเสียงดังมากเกินไปว่าจะเสียงดังจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพร่างกาย ได้แก่

สมรรถภาพในการได้ยินลดลง หูอื้อ หูตึงและหูหนวก อันตรายต่อสุขภาพจิต ได้แก่ ไม่มีสมาธิ รำคาญและเกิดความเบื่อหน่าย และอันตรายต่อประสิทธิภาพในการทำงาน ได้แก่ ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง การผิดพลาดในการทำงาน รบกวนการสนทนาสื่อความหมาย ซึ่งจะส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุจากการทำงาน

มาตรการจัดการเสียงในสถานประกอบการอยู่ซ่อมรถยนต์ สามารถดำเนินการได้ดังนี้

1. ควรมีมาตรการควบคุมเสียงที่แหล่งกำเนิด ได้แก่ การบำรุงรักษาเครื่องจักรและการติดตั้งอุปกรณ์ลดความสั่นสะเทือน

2. ควรสนับสนุนให้ผู้ปฏิบัติงานสวมเครื่องป้องกันเสียงส่วนบุคคล

3. ควรมีการตรวจวัดและติดตามสมรรถภาพการได้ยินของผู้ปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่อง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ประกาศกระทรวงแรงงาน เรื่อง มาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2559. (2559, 7 ตุลาคม). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่ม 133 ตอนที่ 91 ก.
- [2] ประกาศกองความปลอดภัยแรงงาน กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน กระทรวงแรงงาน เรื่อง แนวทางการตรวจวัดและประเมินสภาพแวดล้อมในการทำงานและการดำเนินการตามพระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554. (2561).
- [3] ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง มาตรฐานระดับเสียงที่ยอมให้ลูกจ้างได้รับเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงานในแต่ละวัน. (2560, 13 ธันวาคม). *ราชกิจจานุเบกษา* เล่ม 135 ตอนพิเศษ 19 ง.
- [4] ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง หลักเกณฑ์ วิธีการตรวจวัด และการวิเคราะห์สภาวะการทำงานเกี่ยวกับระดับความร้อน แสงสว่าง หรือเสียง รวมทั้งระยะเวลาและประเภทกิจการที่ต้องดำเนินการ. (2561, 8 กุมภาพันธ์). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่ม 135 ตอนพิเศษ 57 ง.
- [5] วิทยา อยู่สุข. (2552). *อาชีวอนามัยและความปลอดภัย*. พิมพ์ครั้งที่ 4. หจก.เบสท์ กราฟฟิค เพรส. กรุงเทพฯ.
- [6] ศิวพันธุ์ ชูอินทร์. (2556). *ความรู้เบื้องต้นด้านมลพิษทางเสียง*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

Received: Mar 10, 2022

Revised: May 20, 2022

Accepted: May 25, 2022

การศึกษาชนิดของอิมมูโนโกลบูลินที่ผิดปกติความสัมพันธ์กับโรคและความถี่ของการตรวจใน
ผู้ป่วยโรงพยาบาลศรีนครินทร์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย
THE STUDY OF THE ABNORMAL IMMUNOGLOBULIN TYPES RELATED TO DISEASE
AND FREQUENCY OF EXAMINATION IN PATIENTS AT SRINAGARIND HOSPITAL,
FACULTY OF MEDICINE, KHON KAEN UNIVERSITY, THAILAND

ทิพาพร จรูญศิริมณีกุล¹ ปริญญา ประสงค์ดี² พวงผกา สาดี³ จันทร์เพ็ญ ศรีพรรณ⁴

คัชรินทร์ ภูนิคม⁵ นันทพันธ์ กนกศิริจุสยา⁶

¹⁻⁴สังกัดงานห้องปฏิบัติการเวชศาสตร์ชั้นสูง โรงพยาบาลศรีนครินทร์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

⁵ภาควิชาเภสัชวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

⁶ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

Thipaporn Jaroonsirimaneeekul¹ Prinya Prasongdee² Puangpaka Sadee³ Chanpen Sripan⁴

Kutcharin Phunikhom⁵ Nunthaphan Kanoksirujisaya⁶

¹⁻⁴Diagnostic Laboratory, Sringarind Hospital, Faculty of Medicine, Khon Kaen University

⁵Department of Pharmacology, Faculty of Medicine, Khon Kaen University

⁶Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University

E-mail: nunthaphan@thonburi-u.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาชนิดของอิมมูโนโกลบูลินที่ผิดปกติความสัมพันธ์กับโรคและความถี่ของการตรวจในผู้ป่วยโรงพยาบาลศรีนครินทร์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาหา MM. (Multiple Myeloma) ของผู้ป่วยเป็นโรคมะเร็งทางโลหิตวิทยา ที่เกิดจากความผิดปกติของพลาสมาเซลล์ ซึ่งเป็นกลุ่มของเซลล์เม็ดเลือดขาว ในผู้ป่วยโรคเอ็มเอ็มพลาสมาเซลล์จะมีการเจริญเติบโตที่ผิดปกติไป ส่งผลให้เกิดความผิดปกติในร่างกาย ส่วนมากสร้างและตรวจพบ อิมมูโนโกลบูลิน ที่ผิดปกติ ซึ่งสามารถตรวจแยกชนิดและยืนยันได้ด้วย การตรวจ IFE. (Immunofixation Test) ซึ่งในขณะเดียวกัน IFE. ก็ไม่ใช่การทดสอบ สำหรับตรวจกรองโรคเป็นแค่การทดสอบเพื่อตรวจยืนยันชนิดโรค ในโรงพยาบาลขนาดเล็กอาจไม่มีการตรวจในลักษณะนี้ เพื่อรองรับการให้บริการ ทั้งนี้ราคาค่าบริการในการตรวจ IFE. ในระบบกรมบัญชีกลางเรียกเก็บสูงถึง 3,000 บาทต่อครั้ง ดังนั้นผลของการศึกษา IFE. เหมาะที่จะใช้ตรวจ เพื่อยืนยันชนิดโรคและควรส่งตรวจไม่เกิน 2 ครั้งต่อปี เนื่องจากรูปแบบของ อิมมูโนโกลบูลิน มักไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง สำหรับคนไข้โรคใดที่มีการส่งตรวจ IFE. ปีละ 1 ครั้ง ถือว่าเหมาะสมเนื่องจากคนไข้ MM. มักมีอาการนำด้วยภาวะการทำงานของไตบกพร่องร่วมด้วย จากการศึกษาพบว่าคนไข้ที่ไม่เป็น Non Specific Diagnosis นั้น มีการตรวจ IFE. อาจเพราะแพทย์ต้องการตรวจสอบว่าหรือแยกวินิจฉัยเพื่อตัดความเสี่ยงต่อการเป็น MM. ออก ในขณะเดียวกัน การใช้ SPEP เพื่อตรวจติดตามคนไข้ ก็มีประโยชน์มาก และราคาก็แตกต่างมากกับการตรวจ IFE. โดยที่ SPEP ราคา 300 บาทต่อครั้ง และโดยเฉพาะในกลุ่ม MM. แล้วพบว่าสามารถใช้ผล SPEP ประเมินคนไข้ได้ถึง 95.8%

คำสำคัญ: MM. (Multiple Myeloma), IFE. (Immunofixation Test)

Abstract

The study of the abnormal immunoglobulin types related to disease and frequency of examination in patients at Srinagarind Hospital, Faculty of Medicine, Khon Kaen University, Thailand aimed to study Multiple Myeloma (MM.) of patients with hematological cancer caused by abnormalities in

plasma cells which is a group of white blood cells. In Multiple Myeloma patients, plasma cells grow abnormally. Resulting in abnormalities in the body. Most of them are created and detected abnormal immunoglobulins, which can be distinguished and confirmed with an Immunofixation Test (IFE.), while at the same time IFE is not a test. For screening, it's just a test to confirm the type of disease. In smaller hospitals, tests of this nature may not be available to support the service. However, the fee for IFE. examination in the Comptroller General's Department system is charged up to 3,000 baht per time, so the results of the IFE. study are suitable for examination to confirm the type of disease and should be tested no more than 2 times a year due to the form of immunoglobulin often does not change. For patients with Nephrotic Syndrome, an IFE. test once a year is considered appropriate since MM. patients are often predisposed to impaired renal function. The study also found that in patients with no non specific diagnosis, IFE. was tested, possibly because the doctor wanted to determine or exclude the diagnosis to rule out the risk of MM. At the same time, SPEP was used to monitor patients. It can help a lot. And the price is very different from IFE examination, where SPEP costs 300 baht per time, and especially in the MM. group, it was found that the SPEP results can be evaluated by up to 95.8% of patients.

Keywords: Multiple Myeloma (MM.) , Immunofixation Test (IFE.)

บทนำ

อิมมูโนโกลบูลิน เป็นโปรตีนที่ร่างกายสร้างขึ้นเพื่อเป็นภูมิคุ้มกันหรือ antibody ไว้ต่อสู้กับเชื้อโรค แบคทีเรีย ไวรัส เชื้อราและมะเร็ง ซึ่ง อิมมูโนโกลบูลิน มีอยู่ 5 ชนิด (Kyle R.A., et.al., 2003) ได้แก่

1.1 อิมมูโนโกลบูลิน A (IgA) พบมากบนเยื่อเมือก โดยเฉพาะเยื่อเมือกในระบบทางเดินหายใจ ทางเดินอาหาร ช่องคลอด น้ำตา และน้ำลาย ซึ่ง IgA จะช่วยป้องกันร่างกายจากสิ่งแวดล้อม

1.2 อิมมูโนโกลบูลิน G (IgG) เป็นชนิดที่พบมากที่สุดในร่างกายพบทั่วไปในของเหลวในร่างกาย ช่วยป้องกันการติดเชื้อแบคทีเรีย และไวรัส และสามารถถ่ายทอดทางรก จากแม่ไปยังทารกในครรภ์ได้

1.3 อิมมูโนโกลบูลิน M (IgM) เป็น antibody ที่พบในน้ำเหลืองและเลือด ที่ร่างกายสร้างขึ้น เพื่อต่อสู้กับเชื้อโรค

1.4 อิมมูโนโกลบูลิน E (IgE) เป็น antibody ที่เกี่ยวข้องกับการแพ้ เช่น ละอองเกสร หรือการแพ้ขนสัตว์ พบในปอด ผิวหนัง และเยื่อเมือก

1.5 อิมมูโนโกลบูลิน D (IgD) เป็น antibody ที่ยังไม่ทราบหน้าที่ชัดเจน และมีรายงานการตรวจพบน้อย

Multiple myeloma

Myeloma cell มีลักษณะจำเพาะที่แตกต่างจากมะเร็งอื่น ๆ คือ มีการสร้าง monoclonal อิมมูโนโกลบูลินออกมาในกระแสเลือดทำให้การตรวจวัดโปรตีนเหล่านี้ สามารถใช้วินิจฉัยและติดตามการรักษาได้ โดยการตรวจวินิจฉัย Multiple myeloma นั้น ใช้เกณฑ์วินิจฉัย (O'Connell T.X., et.al., 2005) ดังนี้

Symptomatic myeloma

- 1) การตรวจพบ Monoclonal protein ในเลือดหรือปัสสาวะ
- 2) การตรวจพบ Monoclonal plasma cell ในเลือดและไขกระดูก
- 3) ลักษณะอาการทางคลินิก ได้แก่ ภาวะ Calcium สูง ภาวะไตวาย (Renal insufficiency) ภาวะซีด (Anemia) Bone Lesion (ย่อว่า CRAB Syndrome) หรือ ภาวะ Amyloidosis Asymptomatic myeloma (Smoldering myeloma)
- 4) การตรวจพบ Monoclonal protein ในเลือดหรือปัสสาวะ $> 3 \text{ g/dL}$
- 5) การตรวจพบ Monoclonal plasma cell ในไขกระดูก $> 10\%$
- 6) ไม่พบลักษณะอาการทางคลินิก

การตรวจหา Monoclonal protein

การตรวจ Monoclonal protein (Kyle R.A., et.al., 2015) มีหลายวิธี ได้แก่ การตรวจ Bence Jones protein

ในเลือดหรือปัสสาวะ การตรวจ protein electrophoresis ในเลือดหรือปัสสาวะ การตรวจ Serum electrophoresis และการตรวจ Immunofixation electrophoresis ในเลือดหรือปัสสาวะ การตรวจเหล่านี้ใช้วิธี Semi-automated ซึ่งค่อนข้างยุ่งยาก ต้องอาศัยความชำนาญในการตรวจมาก และเป็นวิธีที่มีความไวค่อนข้างต่ำ ซึ่งความไวมีความจำเป็นในการตรวจหาโรคเล็กน้อยที่เหลืออยู่หลังจบการรักษา (Minimal residual disease) ซึ่งยังไม่สามารถวัดเป็นปริมาณได้ ซึ่งต้องใช้การเปรียบเทียบปริมาณ อิมมูโนโกลบูลิน ก่อนและหลังการรักษาในการติดตามผลการรักษา ดังนั้น ถ้าต้องการวัดปริมาณต้องส่งตรวจระดับ อิมมูโนโกลบูลิน ซึ่งการตรวจระดับ อิมมูโนโกลบูลิน ก็ไม่สามารถบอกได้ว่า อิมมูโนโกลบูลิน ที่ตรวจได้นั้น เป็น Monoclonal protein หรือไม่ ต่อมาจึงมีการพัฒนาการตรวจ Total serum K/L assays symptomatic myeloma (Milani P., et.al., 2017) เพื่อให้สามารถตรวจได้โดยใช้เครื่องอัตโนมัติและวัดเป็นแบบปริมาณได้ (Fouquet G., et.al., 2014) แต่วิธีนี้ยังมีข้อด้อยตรงที่ความจำเพาะต่ำ และยังไม่เปิดให้บริการในโรงพยาบาลศรีนครินทร์

Immunofixation Test (IFN) หรือ Immunofixation electrophoresis Test (IFE)

เป็นการตรวจหา Monoclonal protein ที่สามารถจำแนก ชนิดของ Monoclonal protein ได้ โดยใช้หลักการของ Protein electrophoresis (Barnidge D.R., et.al., 2014) ในการแยกส่วนประกอบโปรตีนในเลือดออก เป็น 5 โซน แล้วจึงนำ Antiserum จำเพาะต่อโปรตีนแต่ละชนิด ได้แก่ Antiserum ต่อ IgG, IgA, IgM, kappa และ lambda Light chain มาทำปฏิกิริยากับโปรตีนบนแผ่น Agarose gel ถ้ามีโปรตีนใดมากกว่าปกติจะเกิด Immune complex ระหว่าง Antiserum กับ อิมมูโนโกลบูลิน หรือ Light chain นั้น ๆ แล้วตกตะกอนอยู่บนแผ่น Agarose gel (ดังรูปที่ 1) ข้อจำกัดของ IFE คือ เมื่อมี อิมมูโนโกลบูลิน ในปริมาณมาก ๆ อาจจะไม่สามารถตรวจพบความผิดปกติได้ เนื่องจาก ปริมาณแอนติเจนที่สร้างออกมานั้นมากเกินไปทำให้ Antigen-antibody complex ถูกล้างออกในระหว่างกระบวนการ เพราะฉะนั้น ในกรณีที่ผู้ป่วยมีปริมาณ อิมมูโนโกลบูลิน สูงมาก (Gertz M.A., Kyle R.A., 1995) ควรมีการเจือจางในสัดส่วน 1:3 ถึง 1:10 และในกรณีที่ Monoclonal บางตัวจับกับ antisera ทั้ง 5 ชนิด ให้สังเกต band ที่ชัดที่สุด คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริง

หน่วยภูมิคุ้มกันและเคมีคลินิก งานห้องปฏิบัติการเวชศาสตร์ชั้นสูงตร โรงพยาบาลศรีนครินทร์ คณะแพทยศาสตร์ ให้บริการการตรวจ IFE โดยการรายงานผล class และ type ของ อิมมูโนโกลบูลิน ที่ผิดปกติ เพื่อใช้ร่วมในการวินิจฉัยและการติดตามการรักษาในผู้ป่วยที่มีภาวะ monoclonal gammopathy เช่น multiple myeloma ซึ่งผู้ป่วยในกลุ่มนี้ ต้องตรวจเลือดเพื่อดูชนิดและระดับของเอ็มโปรตีน (M Protein) และอิมมูโนโกลบูลิน (Barnidge D.R., et.al., 2014) ตัวอื่น ๆ รวมไปถึงระดับ Serum Free Light Chain (Katzmann J.A., et.al., 2015) ในกระแสเลือดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งงานห้องปฏิบัติการเวชศาสตร์ชั้นสูงตรต้องรายงานผลอย่างถูกต้อง เพื่อช่วยให้กระบวนการรักษาและการติดตามการรักษาสัมฤทธิ์ผล ปัจจุบัน ในระยะเวลา 10 เดือนที่ผ่านมา (1 ม.ค.-31 ต.ค.63) มีผู้ป่วยจำนวน 199 ราย ที่ส่งตรวจ IFE ในหน่วยภูมิคุ้มกันและเคมีคลินิก งานห้องปฏิบัติการเวชศาสตร์ชั้นสูงตร ซึ่งพบว่าผู้ป่วยมากกว่าร้อยละ 80 จะเป็นผู้ป่วยรายเดิมที่มาทำการตรวจอย่างต่อเนื่อง เพื่อวินิจฉัยและติดตามการรักษา ซึ่งทางหน่วยงานให้ความสำคัญ ในขั้นตอนการตรวจ และคาดหวังถึงการรายงานผลที่ถูกต้อง >99% ซึ่งเมื่อรายงานผลกลับแสดงว่าไม่พบ อิมมูโนโกลบูลิน ที่ผิดปกติ สำหรับกรณีที่รายงานผลเป็นบวก การแปลผลการทดสอบจะบ่งชี้ว่า มีการพบ อิมมูโนโกลบูลิน ที่ผิดปกติ ซึ่งนอกเหนือจาก Multiple myeloma แล้ว อาจมีข้อบ่งชี้อื่นๆ เช่น immune system disorder อาจเกี่ยวข้องกับมะเร็งชนิดอื่น ๆ หรือ Waldenstrom's macroglobulinemia (Dispenzieri A., et.al., 2010)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาชนิดของ อิมมูโนโกลบูลิน ผิดปกติที่ตรวจพบในผู้ป่วย MM ที่ส่งตรวจ IFE ในโรงพยาบาลศรีนครินทร์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในช่วงมกราคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2564
2. เพื่อศึกษาอัตราการตรวจพบ อิมมูโนโกลบูลิน ผิดปกติในผู้ป่วยอื่นๆ นอกเหนือจาก MM
3. เพื่อศึกษาความถี่ที่เหมาะสมในการส่งตรวจ IFE ในการติดตามการรักษาผู้ป่วย MM
4. เพื่อเปรียบเทียบผลการตรวจ IFE และ Serum protein electrophoresis (SPEP) ของผู้ป่วย MM เพื่อใช้ในการติดตามการรักษา

ผลที่จะได้รับ

1. สามารถรายงานผลการตรวจอย่างถูกต้อง เพื่อสนับสนุนการวินิจฉัยอย่างเป็นเลิศ
2. หน่วยงานสามารถใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ เผยแพร่ให้เป็นประโยชน์ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จัดตั้งศูนย์การตรวจ immunization test ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อสนับสนุนนโยบายความเป็นเลิศ ของโรงเรียนแพทย์ และสร้างประโยชน์แก่มวลมนุษยชาติ โดยเฉพาะสร้างคุณภาพการตรวจ เพื่อสนับสนุนการวินิจฉัยที่ถูกต้องในโรงพยาบาลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
3. บุคลากรสามารถเรียนรู้ การพัฒนา และเห็นองค์รวมของ lab correlation จากงานประจำที่ปฏิบัติประจำวัน สามารถสร้างงานวิจัย ประเภท Routine to research (R2R) ซึ่งสามารถต่อยอดความคิด และพัฒนาไปสู่การเขียนนิพนธ์ต้นฉบับเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ได้ทั้งในวารสารในและต่างประเทศ

ทบทวนเอกสารและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Easter Cooperative Oncology Group ได้รับรองการตรวจหาปริมาณ Free light chain (FLC) โดยใช้ Polyclonal latex-conjugated anti-free light chain ซึ่งผลการตรวจที่ได้ จะรายงานออกมาเป็น antibody ที่จำเพาะต่อบริเวณ Hidden Surface (เป็นบริเวณที่ซ่อนอยู่ระหว่าง Light chain และ Heavy chain chain ของ FLC) และสามารถตรวจหาปริมาณต่ำสุดในเลือดได้ถึง 0.3 mg/L ของค่า Kappa และ 0.5 mg/L ของ Lambda

U.S. Food and Drug Administration (FDA) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้รับรองให้ใช้ค่าปกติในกรณีวินิจฉัย และตรวจติดตามการดำเนินโรคของผู้ป่วย Multiple myeloma, Lymphocytic neoplasm, Waldenström's macroglobulinemia, AL amyloidosis และ Light Chain Deposition Disease โดยอ้างอิงค่าปกติ ดังนี้ Kappa (95% range) 3.3-19.4 mg/L, Lambda (95% range) 5.7-26.3 mg/L และ K/L (100% range) 0.26-1.65

Tomer Mark และคณะ (2013) New York Presbyterian Hospital–Cornell Medical Center, New York, NY, USA. รายงานว่า M-protein เป็นมาตรการอ้างอิงที่สำคัญสำหรับการตอบสนองใน multiple myeloma (MM) และการตีความที่ถูกต้องเป็นกุญแจสำคัญในการจัดการทางคลินิก Atypical M-Protein ที่พบใน serum immunofixation electrophoresis มีความแตกต่างอย่างชัดเจนในส่วนประกอบของ heavy chain และ light chain จากโปรตีน M-spike ดั้งเดิมและเรียกว่ารูปแบบการสร้างภูมิคุ้มกันแบบผิดปกติ ในการศึกษาการรวมกันของระบบภูมิคุ้มกันบกพร่อง หรือ BiRD (lenalidomide and dexamethasone with clarithromycin) และ atypical serum immunofixation patterns (ASIPs) พบว่า ผู้ป่วย 4/72 (33%) ที่รักษาด้วย BiRD จะพัฒนาไปเป็น ASIPs เมื่อเทียบกับผู้ป่วยที่ได้รับ BiRD ที่ไม่มี ASIPs มีการตอบสนองโดยรวมที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (100% เทียบกับ 85%) และอัตราการตอบสนองที่สมบูรณ์ (71% เทียบกับ 23%)

Christopher Heaton และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษาใน Medical College of Georgia ในผู้ป่วยทั้งหมด 237 คนที่ได้รับการทดสอบและบันทึกประวัติรวม 1,503 ครั้ง สำหรับ การทดสอบสำหรับหนึ่งหรือ มากกว่า 1 ครั้ง ในการตรวจ serum protein electrophoresis (SPEP) , serum immunofixation electrophoresis (IFE) และ serum free light chain assays (SFLCA) พบว่า 46% ของการตรวจ SPEP และ 42% ของการตรวจ SFLCAได้รับการรับการตรวจ ซึ่ง SPEP, IFE และ SFLCA คือการทดสอบที่สำคัญในการสร้างการวินิจฉัยและการติดตามผลของ monoclonal gammopathies

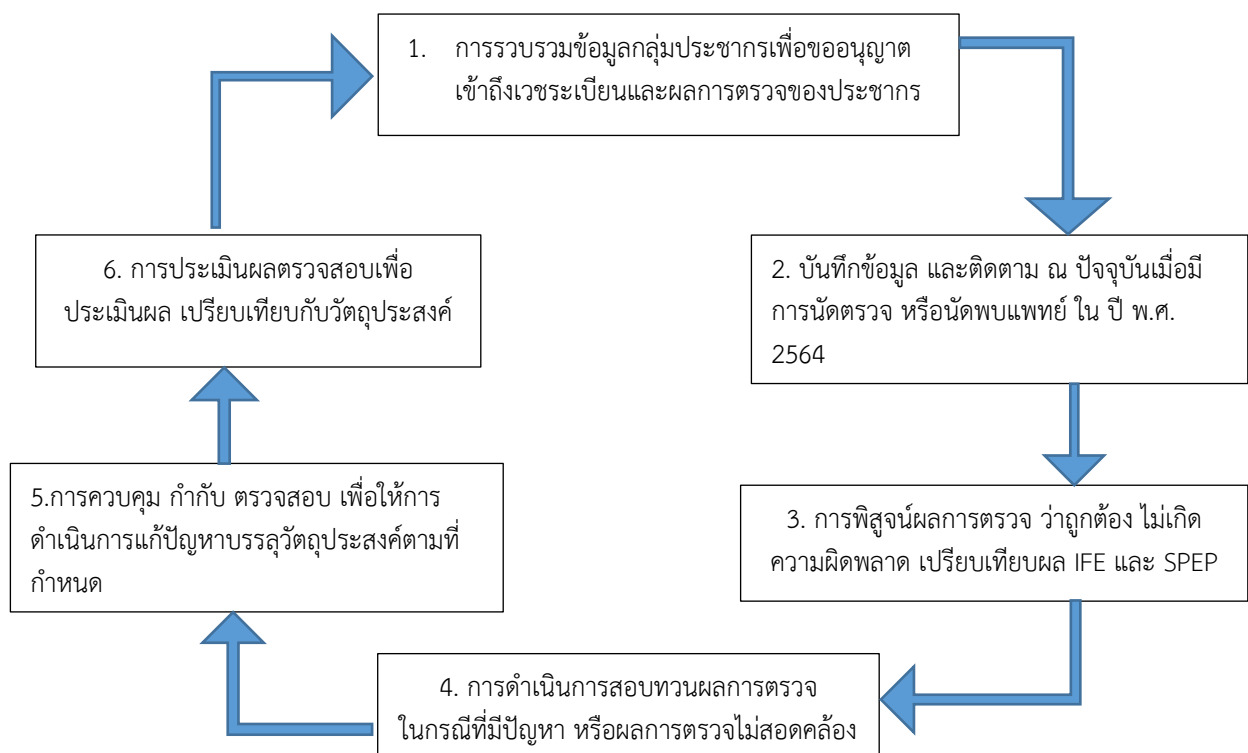
วิธีการดำเนินการและวิธีแก้ปัญหา

1. วิธีการทดสอบ

การศึกษาเชิงวิเคราะห์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ ปัจจัย (exposure) กับ โรค (disease) หรือ ผลลัพธ์ (outcome) ที่ต้องการศึกษา ในกลุ่มประชากร ผู้ป่วยที่ถูกส่งตรวจ IFE ในโรงพยาบาลศรีนครินทร์ ระยะเวลาตั้งแต่ 1 มกราคม – 30 สิงหาคม พ.ศ. 2564 ผู้วิจัยเริ่มทำการศึกษาโดยแบ่งกลุ่มที่จะศึกษาออกตามลักษณะของการตรวจพบชนิดของ อิมมูโนโกลบูลิน ความสอดคล้องกันของผลการวินิจฉัยโรค และผลการตรวจทางห้องปฏิบัติการ ความถี่ในการส่งตรวจ IFE ผลการตรวจติดตามโรค และความสอดคล้องของผล SPEP กับผล IFE

2 รูปแบบการวิจัย

ทำการรวบรวมข้อมูลผู้ป่วยที่ส่งตรวจ IFE ทุกรายในช่วงมกราคม ถึงสิงหาคม พ.ศ. 2564 เพื่อบันทึกข้อมูลผลการตรวจ และติดตามเวชระเบียนเพื่อดูผลสรุปในการวินิจฉัยโรค จากนั้น บันทึกผลการตรวจ IFE ทุกราย ในแบบบันทึกข้อมูล (excel worksheet) และจำแนกแยกประเภทผู้ป่วยตามผลการวินิจฉัย โดย พิจารณาแยกผู้ป่วย MM เพื่อศึกษาถึงผลการตรวจ IFX จำนวนครั้งที่ส่งตรวจ และตรวจสอบข้อมูลผล SPEP เพื่อดูความสอดคล้อง หรือความแตกต่างกัน ในรายที่ผล IFE ตรวจไม่ตรงกัน หรือขัดแย้งกันให้ทำการตรวจซ้ำก่อนสรุปผล IFE ที่ถูกต้อง จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูล และประเมินผลเพื่อตอบคำถามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ และสรุปรายงานผลการวิจัย ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภูมิแสดงการสรุปรายงานผลการวิจัย

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ประชากร (Population) และตัวอย่าง (Sample)

- หลักเกณฑ์ในการคัดเลือก ประชากรและตัวอย่าง ใช้ประชากรทั้งหมด ที่มีการส่งตรวจ IFX ในปี พ.ศ. 2564

- การสังเกตและการวัด (Observation & Measurement)

3.2 ตัวแปรในการวิจัยนี้ คือ บุคลากรที่ทำการตรวจ IFX มีมากกว่า 1 คน ด้วยเหตุผลนี้

บุคลากรที่เกี่ยวข้องในการตรวจ IFX ต้องปฏิบัติตามขั้นตอนการตรวจ ตามระเบียบ SOP/WI การปฏิบัติงานอย่างเคร่งครัด ดังนั้น ทุกคน (ตัวแปร) จึงต้องทำข้อตกลง และลงนามรับทราบข้อปฏิบัติร่วมกัน

3.3 แบบบันทึก (Record form) การตรวจทางห้องปฏิบัติการ ที่ชัดเจน และถูกต้อง ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานการปฏิบัติงานเวชศาสตร์ชันสูตร และบันทึกข้อมูลข้อสรุปผลการตรวจ IFX และประวัติผู้ป่วยลงใน excel

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการบันทึกจากแบบบันทึก ลงในโปรแกรม excel เพื่อใช้ข้อมูลที่ได้ ในการคำนวณหาค่าความถี่ ร้อยละ และความสัมพันธ์ของข้อมูล กรณีวิเคราะห์ความสอดคล้องของผลการตรวจว่าเป็นไปในทางเดียวกันกับผลการวินิจฉัย เลือกใช้สถิติ McNemar Test ในการวิเคราะห์

ผลการวิจัย

ในการส่งตรวจ IFX ในช่วงมกราคม ถึงสิงหาคม 2564 พบว่า มีคนไข้ที่ส่งตรวจ IFX ทั้งหมด จำนวน 205 ราย โดยมีการส่งตรวจรวมทั้งสิ้นจำนวน 348 ครั้ง พบว่าสามารถแจกแจงกลุ่มคนไข้ตามชนิดของโรค และลักษณะอาการที่วินิจฉัยออกเป็น 7 กลุ่มโรค ดังนี้ คนไข้ multiple myeloma (MM) จำนวน 116 ราย (56.6%) คนไข้ไตวายเรื้อรังจำนวน 17 ราย (8.3%) คนไข้เนื้องอกและมะเร็งชนิดอื่นๆ จำนวน 11 ราย (5.4%) คนไข้เบาหวานจำนวน 8 ราย (3.9%) คนไข้กลุ่มโรค autoimmune จำนวน 4 ราย (2.0%) คนไข้โรคกระดูกพรุนจำนวน 5 ราย (2.4%) และคนไข้ทั่วไปที่ไม่ระบุอาการเฉพาะของโรค จำนวน 44 ราย (21.5%) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำนวนผู้ป่วยที่ส่งตรวจ IFE แยกตามกลุ่มโรค

ข้อสรุปการวินิจฉัยหรือกลุ่มโรค	จำนวนคนไข้	%	จำนวนครั้งที่ส่งตรวจ IFE
Multiple myeloma	116	56.6	244
Chronic renal disease	17	8.3	18
Benign and other carcinoma	11	5.4	20
autoimmune	4	2.0	4
Diabetes mellitus	8	3.9	8
Osteoporosis	5	2.4	5
Non specific diagnosis	44	21.5	49
รวม	205	100	348

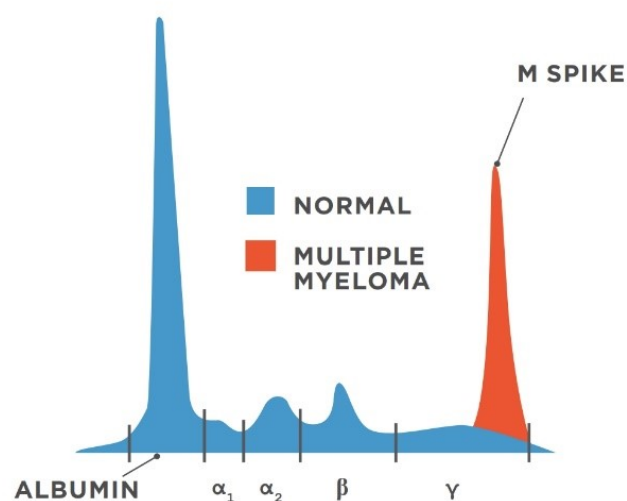
ในคนไข้ MM ที่มีการส่งตรวจ IFE พบว่า มักจะทำการส่งตรวจ serum protein electrophoresis (SPEP) ร่วมด้วย พบผลการตรวจ 84 รายจากคนไข้ MM จำนวน 116 ราย (72.4%) ในคนไข้ MM 116 รายนั้น พบว่าส่งตรวจ IFE จำนวน 244 ครั้ง และพบว่า มี 39 ราย (33.6%) ที่ส่งตรวจ IFE มากกว่า 2 ครั้งต่อปี จากคนไข้ MM ทั้งหมดที่ส่งตรวจ IFX ตรวจไม่พบ อิมมูโนโกลบูลิน ที่ผิดปกติ จำนวน 44 ราย (37.9%) ชนิดของ M protein ที่ตรวจพบ IgA kappa จำนวน 11 ราย IgA lambda จำนวน 7 ราย IgG kappa จำนวน 33 ราย IgG lambda จำนวน 19 ราย และ พบ free light chain จำนวน 2 ราย อัตราการตรวจพบ อิมมูโนโกลบูลิน ที่ผิดปกติในคนไข้ MM อยู่ที่ 62.1% (72 รายจาก 116 ราย) ซึ่ง รายที่ตรวจพบ อิมมูโนโกลบูลิน ผิดปกติ (รูปที่ 1) จะพบผลการตรวจ SPEP ผิดปกติด้วย (รูปที่ 2) และพบ 69 รายที่การตรวจ SPEP ให้ผลผิดปกติ จาก 72 รายที่ IFE ให้ผลผิดปกติ หรือ 95.8% ผลการทดสอบความเป็นอิสระต่อกันของการตรวจทั้ง 2 วิธี พบว่า วิธี SPEP และ IFE ไม่เป็นอิสระต่อกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% (99 CI, $p < 0.01$) และ อิมมูโนโกลบูลิน ผิดปกติที่ตรวจพบหลัก คือ IgG พบ 72.2% เป็น IgG kappa และ lambda เป็น 45.8% และ 26.4% ตามลำดับ รองลงมา คือ IgA ผิดปกติตรวจพบ 25.0% เป็น IgA kappa และ lambda เป็น 15.3% และ 9.7% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 จำนวนผู้ป่วยที่ตรวจพบ M-protein ชนิดต่างๆ และ จำนวนผู้ป่วยที่รายงานผล no monoclonal อิมมูโนโกลบูลิน

Immunophenotyping	Type kappa (n,%)	Type lambda(n,%)	Total (n,%)
M-proteins positive (N=72,62.1%)			
Type IgG	33 (45.8%)	19 (26.4%)	52 (72.2%)
Type IgA	11 (15.3%)	7 (9.7%)	18 (25.0%)
Type IgM	0	0	0
Light chain type	1(1.4%)	1(1.4%)	2 (2.8%)
Total positive	45(62.5%)	27(37.5%)	72 (100%)
M-protein negative or no monoclonal อิมมูโนโกลบูลิน (N=44, 37.9%)			



ภาพที่ 2 ผล IFE ที่ตรวจพบ อิมมูโนโกลบูลิน หรือ M-protein ที่ผิดปกติ



ภาพที่ 3 ผล SPEP ในรายที่ตรวจพบ abnormal อิมมูโนโกลบูลิน

สรุปผลอภิปรายและข้อเสนอแนะ

ผู้ป่วย MM ส่วนมากสร้างและตรวจพบ อิมมูโนโกลบูลิน ที่ผิดปกติ ซึ่งสามารถตรวจแยกชนิดและยืนยันได้ด้วยการส่งตรวจ IFE ซึ่งในขณะเดียวกัน IFE ไม่ใช้การทดสอบสำหรับตรวจกรองโรคเป็นการทดสอบเพื่อตรวจยืนยันชนิดโรค และในโรงพยาบาลขนาดเล็กอาจไม่มีการตรวจในลักษณะนี้เพื่อรองรับการให้บริการ ทั้งนี้ราคาค่าบริการในการตรวจ IFE ในระบบกรมบัญชีกลางเรียกเก็บสูงถึง 3,000 บาทต่อครั้ง ดังนั้น IFE เหมาะที่จะใช้ตรวจ เพื่อยืนยันชนิดโรคและควรส่งตรวจไม่เกิน 2 ครั้งต่อปี เนื่องจากรูปแบบของ อิมมูโนโกลบูลิน มักไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง สำหรับคนไข้โรคไตที่มีการส่งตรวจ IFE ปีละ 1 ครั้งถือว่าเหมาะสมเนื่องจากคนไข้ MM มักมีอาการนำด้วยภาวะการทำงานของไตบกพร่องร่วมด้วย และจากการศึกษาครั้งนี้ ยังพบว่าในคนไข้ไม่เป็น non specific diagnosis นั้น มีการตรวจ IFE อาจเพราะแพทย์ต้องการตรวจสอบว่าหรือแยกวินิจฉัยเพื่อตัดความเสี่ยงต่อการเป็น MM ออก ในขณะเดียวกัน การใช้ SPEP เพื่อตรวจติดตามคนไข้ ก็มีส่วนช่วยได้มาก และราคาก็แตกต่างกันมากกับการตรวจ IFE โดยที่ SPEP ราคา 300 บาทต่อครั้ง และโดยเฉพาะในกลุ่ม MM แล้วพบว่า สามารถใช้ผล SPEP ประเมินคนไข้ได้ถึง 95.8%

เอกสารอ้างอิง

- [1] Barnidge, D.R., Dasari, S., Botz, C.M. (2014). Using mass spectrometry to monitor monoclonal immunoglobulins in patients with a monoclonal gammopathy. *Journal of Proteome Research*. 13(3), 1419-1427.
- [2] Barnidge, D.R., Dasari, S., Ramirez-Alvarado, M. (2014). Phenotyping polyclonal kappa and lambda light chain molecular mass distributions in patient serum using mass spectrometry. *Journal of Proteome Research*. 7;13(11), 5198-205.
- [3] Christopher H., Shikhar G.V., Gurmukh S. (2016). Audit of Use and Overuse of Serum Protein Immunofixation Electrophoresis and Serum Free Light Chain Assay in Tertiary Health Care: A Case for Algorithmic Testing to Optimize Laboratory Utilization. *American Journal of Clinical Pathology*. 145, 531-537.
- [4] Dispenzieri, A., Katzmann, J.A., Kyle, R.A. (2010). Prevalence and risk of progression of light-chain monoclonal gammopathy of undetermined significance: a retrospective population-based cohort study. *The Lancet*. 375(9727), 1721-1728.
- [5] U.S. Food & Drug Administration. (2021 March, 27). *FDA Approves First Cell-Based Gene Therapy for Adult Patients with Multiple Myeloma*. <https://www.fda.gov/news-events/pressannouncements/fda-approves-first-cell-based-gene-therapy-adult-patients-multiple-myeloma>
- [6] Fouquet, G., Schraen, S., Faucompre, J.L. (2014). Hevylite® to monitor response to therapy in multiple myeloma. *American Society of Hematology*. 124(21), 20-21.
- [7] Gertz, M.A., Kyle, R.A. (1995). Hyperviscosity syndrome. *Journal of Intensive Care Medicine*. 10(3). 128-141.
- [8] Katzmann, J.A., Willrich, M.A.V., Kohlhagen, M.C. (2015). Monitoring IgA multiple myeloma: immunoglobulin heavy/light chain assays. *Clinical Chemistry*. 61(2), 360-367.
- [9] Kyle, R.A., Child, J.A., Anderson, K. (2003). Criteria for the classification of monoclonal gammopathies, multiple myeloma and related disorders: a report of the International Myeloma Working Group. *British Journal of Haematology*. 121(5), 749-757.
- [10] Kyle, R.A., Katzmann, J.A., Lust, J.A., Dispenzieri, A. (2002). *Clinical indications and applications of electrophoresis and immunofixation*. ASM Press: Washington DC.

- [11] Milani, P., Murray, D.L., Barnidge, D.R. (2017). The utility of MASS-FIX to detect and monitor monoclonal proteins in the clinic. *American Journal of Hematology*. 92(8), 772-779.
- [12] Mills, J.R., Barnidge, D.R., Murray, D.L. (2015). Detecting monoclonal immunoglobulins in human serum using mass spectrometry. *Methods*. 81, 56- 65.
- [13] O'Connell, T.X., Horita, T.J., Kasravi, B. (2015). Understanding and interpreting serum protein electrophoresis. *American Family Physician*. 71(1), 105-112.
- [14] Tomer, M. (2021). A first-in-human study of FOR46 in patients with triple refractory Multiple Myeloma. <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Tomer-M-Mark-38176968>.

Received: May 17, 2022

Revised: Oct 25, 2022

Accepted: Sep 1, 2022

การลดต้นทุนการขนส่ง กรณีศึกษาบริษัทผลิตไส้กรองน้ำมันเครื่อง

TRANSPORTATION COSTS REDUCATION A CASE STUDY OF OIL FILTER MANUFACTURER

พลอยไพลิน พรภักดิ์^{1*}, ไพฑูรย์ ศิริโอฬาร², เพ็ญสินี อาวุธปัญญากุล³^{1,2,3} คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์Ploypailin Phrikthim^{1*}, Paitoon Siri-O-Ran², Pensinee Arvutpanyakul³^{1,2,3} Faculty of Engineering and Technology, Panyapiwat Institute of Management

E-mail: ploypailinphr@pim.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการประกอบธุรกิจขึ้นส่วนยานยนต์มีการแข่งขันสูงขึ้น แต่ละบริษัทจำเป็นต้องหาแนวทาง กลยุทธ์ต่างๆ เพื่อให้บริษัทของตนได้เปรียบทางการแข่งขัน ซึ่งปัจจัยในเรื่องการขนส่ง นับว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อธุรกิจในยุคปัจจุบัน สาเหตุมาจากการที่ในหลายๆ บริษัทนั้นมีความจำเป็นต้องจัดส่งสินค้าจากผู้ผลิตไปยังลูกค้า ถือเป็นการตอบสนองความต้องการของลูกค้า รูปแบบหนึ่ง ซึ่งบริษัทกรณีศึกษาเป็นผู้ผลิตและจัดจำหน่ายสินค้าประเภทไส้กรองสำหรับยานพาหนะหลายชนิด ดังนั้นกลุ่มลูกค้าของบริษัทจึงมีหลากหลายกลุ่มและกระจายตัวครอบคลุมทุกจังหวัดทั่วประเทศ ซึ่งต้นทุนในการขนส่งของบริษัทนั้นค่อนข้างสูงโดยในการขนส่งสินค้านั้นบริษัทจะทำการขนส่งสินค้าไปยังบริษัทขนส่งเพื่อส่งสินค้าไปยังลูกค้าต่อไป การวางแผนการจัดเส้นทางขนส่งนั้นอาศัยความชำนาญของพนักงานในการจัดเส้นทางขนส่ง จากการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นระยะเวลา 3 เดือน ปี พ.ศ.2564 ได้แก่ เดือนกันยายน – พฤศจิกายน ซึ่งในแต่ละเดือนไม่ได้มีความต้องการสินค้าในทุกวัน พบว่า การจัดเส้นทางขนส่งสินค้ายังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ส่งผลให้ระยะทางในการขนส่งโดยรวมทั้ง 3 เดือน อยู่ที่ 3,045.12 กิโลเมตร และต้นทุนการขนส่งแปรผันโดยรวมอยู่ที่ 21,072.23 บาท การลดต้นทุนในการขนส่งของบริษัทกรณีศึกษาโดยประยุกต์ใช้วิธีอัลกอริทึม แบบประหยัด (Saving Algorithm) ด้วยโปรแกรม VRP Spreadsheet Solver เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ หากการจัดเส้นทางขนส่งที่เหมาะสม สามารถลดระยะทางในการขนส่งรวม 3 เดือนลงได้ 1,647.51 กิโลเมตร ซึ่งคิดเป็น 54.10% และต้นทุนการขนส่งสินค้านั้น 3 เดือนลดลง 11,400.77 บาท ซึ่งคิดเป็น 54.80% คำสำคัญ: ต้นทุนการขนส่ง ปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะ อัลกอริทึมแบบประหยัด

Abstract

At present, each company needs to come up with different strategies to give their company a competitive advantage, which factors in transportation that is one of the factors that play an important role in today's business. This is due to the fact that in many the company is obliged to deliver the goods from the manufacturer to the customer. It is considered to be a response to customer requirement. A case study company is a manufacturer and distributor of oil filter products for many types of vehicles. Therefore, the company's customer groups are diverse and spread across all provinces throughout the country. The cost of transportation of the company is high. The company transport the goods to the freight forwarder to deliver the goods to customers. Transportation planning relies on the skill of the staff in routing arrangement. From collecting data for 3 months in 2021, September - November, it was found that the shipping route arrangement was not as efficient as it should be. The total transportation distance of 3 months was 3,045.12 kilometers and the total variable transportation cost was 21,072.23 baht. Researcher aimed to reduction transportation cost in case study we apply and economical algorithm and

using VRP spreadsheet solver software to arranging suitable routing. At the result, researcher can reduce the transport distance over 1,647.51 kilometers for 3 months, which is 54.10%, and the total cost of transportation for 3 months is reduced by 11,400.77 baht, or 54.80%.

Keywords: Transportation Costs, Vehicle Routing Problem, Saving Algorithm

บทนำ

ในปัจจุบันการประกอบธุรกิจชิ้นส่วนยานยนต์มีการแข่งขันทางด้านการค้ามากขึ้น ทำให้บริษัทต่าง ๆ ต้องมีการวางแผนและบริหารจัดการที่ลดต้นทุนของตนเอง ปัจจัยต้นทุนการขนส่งเป็นตัวแปรสำคัญ และส่งผลกระทบต่อต้นทุนราคาขายของสินค้า ทำให้บริษัทต่าง ๆ หันมาสนใจเกี่ยวกับการวางแผนการจัดการระบบโลจิสติกส์ให้มีประสิทธิภาพ เพื่อต้องการที่จะลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการขนส่งสินค้าไปยังลูกค้าให้ได้มากที่สุด โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงก็คือ ค่าน้ำมันที่ใช้ในการขนส่งสินค้าไปยังลูกค้าแต่ละแห่ง การปรับปรุงระบบการขนส่งให้ได้ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ก็จะนำมาซึ่งผลกำไรที่เพิ่มขึ้น โดยถ้าบริษัทมีแผนการส่งสินค้าโดยการจัดการเส้นทางการขนส่งให้ขนส่งสินค้าได้จำนวนชิ้นที่มากขึ้นต่อรอบ และลดระยะทางในการวิ่งของรถขนส่งสินค้าลง ส่งผลให้ต้นทุนการจัดส่งสินค้าลดลง ทำให้บริษัทมีโอกาสในการแข่งขันทางการค้ามากยิ่งขึ้น

บริษัททรนศึกษาบริษัทผู้ประกอบธุรกิจผลิตและจำหน่ายสินค้าประเภทไส้กรอง เช่น ไส้กรองน้ำมันเครื่อง ไส้กรองอากาศ ไส้กรองน้ำมันเชื้อเพลิง ไส้กรองน้ำมันไฮดรอลิก และไส้กรองเครื่องปรับอากาศ รวมถึงน้ำยาหล่อเย็นเครื่องยนต์ ซึ่งสินค้าของบริษัทที่ทำการซื้อขายนั้นนั้นครอบคลุมรถทุกประเภททั้งรถยนต์ รถบรรทุก รถเก๋ง รถจักรยานยนต์บิ๊กไบค์ เรือ และเครื่องจักรกลหนัก ตัวอย่างสินค้าของบริษัททรนศึกษา ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สินค้าประเภทไส้กรอง (ฟลอยไฟลิน และคณะ, 2564)

กลุ่มลูกค้าของบริษัทจึงมีหลากหลายกลุ่มและกระจายตัวครอบคลุมทุกจังหวัดทั่วประเทศ ทำให้การขนส่งถือเป็นเรื่องของบริษัททรนศึกษา เนื่องจากบริษัททำการขนส่งสินค้าไปยังลูกค้าโดยไม่มีการวางแผนการขนส่งเพื่อกำหนดเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสมย่อมส่งผลเสียตามมา เช่น ไม่สามารถส่งสินค้าให้กับลูกค้าได้ตามเวลาที่กำหนด ส่งผลต่อภาพลักษณ์ของบริษัท นอกจากนี้ยังอาจเกิดต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากความผันผวนของราคาน้ำมัน และระยะทาง ซึ่งเกิดเป็นต้นทุนในส่วนของการขนส่งที่ทางบริษัทไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นบริษัทจึงพยายามที่จะลดต้นทุนในส่วนนี้ โดยมุ่งเน้นที่การลดต้นทุนด้านการจัดส่งสินค้าไปยังลูกค้าเป็นหลักในปัจจุบันเส้นทางการขนส่งของบริษัทถูกตัดสินใจโดยพนักงานขับรถ ส่งผลให้ระยะทาง และเวลาในการขนส่งนานเกินกว่าเวลาที่กำหนด เกิดต้นทุนในการขนส่งเพิ่มขึ้น ค่าล่วงเวลาเป็นประจำ รวมถึงต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากความผันผวนของราคาน้ำมัน ทำให้ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญและผลเสียที่จะเกิดขึ้นกับบริษัทในอนาคต

จึงมีความต้องการปรับปรุงระบบการขนส่งของบริษัท ในการจัดส่งสินค้าไปยังกลุ่มบริษัทขนส่งซึ่งทำการจัดส่งสินค้าต่อให้กับกลุ่มลูกค้า โดยมีการวางแผนการจัดการเส้นทางการเดินทางขนส่งสินค้าใหม่ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้อาศัยโปรแกรมเอ็กเซล โซลเวอร์ (Excel Solver) เข้ามาช่วยในการวางแผนเส้นทางการเดินทางขนส่ง เป้าหมายในการลดต้นทุนการขนส่งให้ได้อย่างน้อย 10%

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาปัจจัยในการลดต้นทุนการขนส่งสินค้า
2. เพื่อหาแนวทางในการจัดเส้นทางขนส่งที่เหมาะสมยิ่งขึ้นของบริษัทกรณีศึกษา

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นฐานความรู้สำหรับการศึกษาโดยมีประเด็นการค้นคว้าเป็นดังต่อไปนี้

แนวคิดการขนส่งและการจัดการโลจิสติกส์และซัพพลายเชน

1. การขนส่ง (ณกร อินทร์พุง, 2548) การส่งชิ้นส่วนวัตถุดิบจากผู้ผลิต (Supplier หรือ Vendor) ไปยังโรงงานที่ผลิตสินค้า (Factory Plant) หรือการขนส่งสินค้าไปยังคลังเก็บสินค้า (Warehouse) หรือการส่งสินค้าไปยังลูกค้า (Customer)

2. โลจิสติกส์ (logistics) เป็นระบบการจัดการการส่งสินค้าข้อมูล และทรัพยากร งานที่กระจายงานตามหน้าที่ (Functional Area) ในบริษัท งานตามหน้าที่ประกอบด้วยหน้าที่ตามธุรกิจต่างๆ (Business Function) ซึ่งหน้าที่ทางธุรกิจมีความเกี่ยวข้องกับกิจกรรมโลจิสติกส์การศึกษาโลจิสติกส์และซัพพลายเชนจะต้องมีความเข้าใจหน้าที่ทางธุรกิจและกระบวนการธุรกิจ (Business Process) เพราะกระบวนการโลจิสติกส์และซัพพลายเชนเป็นกระบวนการทางธุรกิจ

ความแตกต่างระหว่างระบบขนส่งและระบบโลจิสติกส์

ระบบขนส่งเป็นเหมือนตัวขับเคลื่อนพื้นฐานของระบบโลจิสติกส์ แต่ระบบโลจิสติกส์นั้นเปรียบเสมือนคนขับรถแข่งที่มีทักษะในการควบคุมและใช้ประสิทธิภาพได้อย่างเต็มที่ โดยที่รถแข่งนั้นคือระบบขนส่งนั่นเองการเปรียบเทียบนี้จะชี้ให้เห็นว่าระบบโลจิสติกส์ต้องการการวางแผนเพื่อไปวัดประสิทธิภาพให้กับการขนส่งอีกที แต่ระบบขนส่งนั้นเป็นแค่ตัวส่งสินค้าหรือบริการจากจุดหนึ่งไปจุดหนึ่งเท่านั้นไม่ได้มีระบบวางแผนที่ซับซ้อนจะเห็นได้ระบบขนส่งเป็นแค่ส่วนส่วนหนึ่งในระบบโลจิสติกส์เท่านั้น (พัชรดา โอภาส และกาญจนา ชูเปลื้อง, 2562) หากบริษัทที่มีความสามารถทางโลจิสติกส์จะสามารถลดต้นทุนและสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าแต่ความสำเร็จในการจัดการโลจิสติกส์ของบริษัทเพียงอย่างเดียวไม่ใช่สิ่งที่รับประกันได้ว่าการเคลื่อนย้ายและเก็บรักษาสินค้านั้นมีประสิทธิภาพ ประสิทธิภาพจะเกิดขึ้นได้เพื่อทุกขั้นตอน (Stage) ของซัพพลายเชนมีส่วนร่วม ในการเพิ่มคุณค่าผลิตภัณฑ์สร้างกำไรสูงสุดและผู้บริโภคมีความพึงพอใจในระดับการบริการที่กำหนด

ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ

ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ (Vehicle routing problem: VRP) เป็นปัญหาที่มีการศึกษามายาวนานในการประยุกต์ใช้แก้ปัญหาด้านการขนส่ง โดยมีการเพิ่มเงื่อนไขและข้อจำกัดต่างๆ จนทำให้ปัญหา VRP มีความหลากหลาย แต่เดิมปัญหา VRP ใช้การเดินทางของยานพาหนะที่ขนส่งเริ่มจากจุดเริ่มต้นไปยังลูกค้าต่างๆ ที่ทราบแน่นอน โดยจุดรับสินค้าจากลูกค้าแต่ละรายสามารถรับบริการในการขนส่งสินค้าได้เพียงครั้งเดียวด้วยรถคันเดียว และปริมาณความต้องการขนส่งของทุกจุดรับสินค้าในแต่ละเส้นทางเมื่อรวมกันจะต้องไม่เกินความจุของยานพาหนะ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลรวมของระยะทางหรือต้นทุนที่ใช้ในการเดินทางมีค่าน้อยที่สุด (ณัฐนิชา รุ่งโรจน์ชัชวาล, อินทอร ศรีสว่าง และวนัฐมพงษ์ คงแก้ว, 2559:18-31)

เนื่องจากปัญหา VRP วิธีการสำหรับการค้นหาคำตอบของเส้นทางเดินรถมีอยู่หลากหลายวิธีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะปัญหาและรายละเอียดของแต่ละกรณีศึกษา วิธีการที่ได้รับความนิยมและเข้าใจง่ายในการจัดเส้นทางเดินรถ คือ วิธีการแบบประหยัด (Savings algorithm) ซึ่งเสนอโดย Clarke and Wright นักวิจัยในประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ. 1964 เป็นวิธีที่พิจารณาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีความจุหลายขนาด เพื่อตอบสนองจุดความต้องการของลูกค้าหลายราย โดยส่งสินค้าออกจากคลังสินค้าเพียงแห่งเดียว และผลที่ได้จากการแก้ปัญหานี้คือทำให้ทราบจำนวนยานพาหนะที่จะใช้ในการขนส่งและปริมาตรสินค้าที่ขนส่งโดยยานพาหนะแต่ละคัน (Clarke, G. and Wright J.W, 1964:568-581)

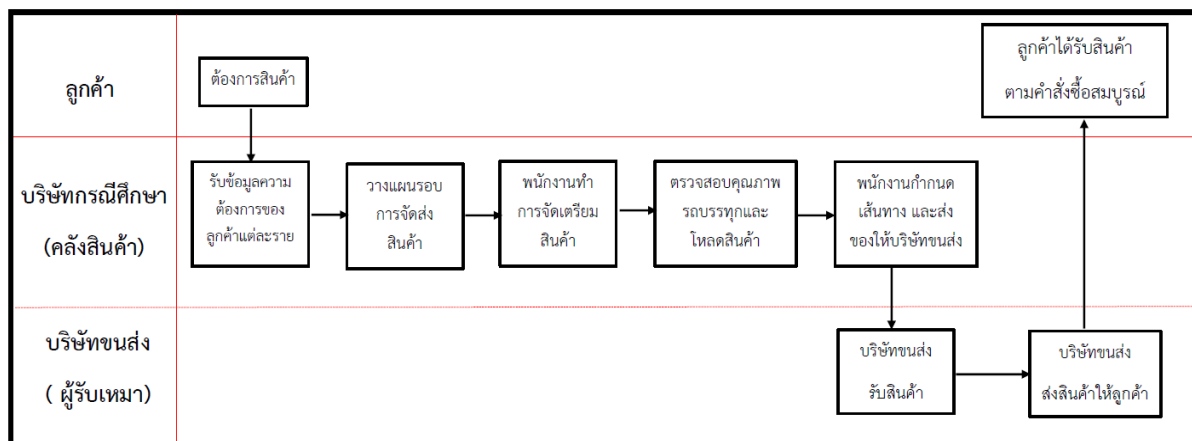
วิธีดำเนินการวิจัย

การคัดเลือกและกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างจะพิจารณาจาก การขนส่งสินค้าของบริษัทให้กับบริษัทคู่สัญญาขนส่งในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเท่านั้น โดยทางบริษัททำการส่งสินค้าวันจันทร์ - เสาร์ ในวันที่มีรอบการส่งของเท่านั้น มิได้ทำการจัดส่งทุกวัน บริษัทกรณีศึกษานั้นมีรถขนส่งเพียง 1 คันเท่านั้น ขนาดรถบรรทุก 6 ล้อ ยี่ห้อ ISUZU FTR ขนาดเครื่องยนต์ 240 แรงม้า ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด 10,320 กิโลกรัม

การศึกษาภาพรวมของปัญหาและสภาพปัจจุบัน

ทำการศึกษาภาพรวมของปัญหาและเก็บข้อมูลของบริษัทผลิตไส้กรองน้ำมันเครื่อง เพื่อให้ทราบถึงกระบวนการ และวิธีในการดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งไปยังบริษัทขนส่งโดยอาศัยการลงพื้นที่ในการเก็บข้อมูลจริง และใช้วิธีการสังเกตการณ์การทำงานจริง ในช่วงเวลาปฏิบัติงาน และสอบถามผู้รับผิดชอบในหน้าที่นั้น โดยมีประเด็นในการเก็บรวบรวมข้อมูล ดังนี้เมื่อทราบกระบวนการและวิธีในการดำเนินการแล้วจะนำข้อมูลที่ได้นำมาแสดงผ่านทาง รูปแบบของ Swimlane Diagram ตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ โดยการใช้ Swimlane Diagram นั้นใช้เพื่อระบุขั้นตอนการทำงานในแต่ละขั้นตอน โดยแผนภาพจะถูกแบ่งการทำงานเป็นช่อง ขั้นตอนการทำงานที่มีการระบุไว้อย่างชัดเจนภายในช่องนั้นๆ โดยกระบวนการขนส่งไส้กรองน้ำมันเครื่องในส่วนของบริษัทผู้ผลิตถูกแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2: แผนภูมิกระบวนการขนส่งไส้กรองน้ำมันเครื่องในส่วนของบริษัทผู้ผลิต

โดยทางบริษัทจะนำส่งสินค้าให้กับบริษัทขนส่ง แล้วบริษัทขนส่งนำส่งสินค้าให้ลูกค้าต่อไป ดังนั้นการจัดส่งของบริษัท จะทำการรวมยอดสั่งซื้อแล้วจึงจัดส่งเป็นรอบ โดยมีคลังสินค้า 1 แห่ง และมีรถขนส่งสินค้าสำหรับจัดส่งสินค้าในกรุงเทพฯ และปริมณฑล 1 คันเท่านั้น บริษัทมีขั้นตอนตั้งแต่การรับข้อมูลความต้องการสินค้า จนถึงขั้นตอนการส่งสินค้าให้กับบริษัทขนส่ง

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการจัดเส้นทางการเดินทางของกรณีศึกษาครั้งนี้ คือ

1. โปรแกรมกูเกิล แมพส์ (Google Maps) คือบริการเกี่ยวกับแผนที่ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ของกูเกิล (Google) สามารถเรียกใช้ได้จากคอมพิวเตอร์ทั่วไป โดยระบุพิกัดละติจูดและลองจิจูดตำแหน่งวัดต่างๆ จากนั้นทำการขอระยะทางระหว่างจุดเดียวกันกับงานวิจัย (ไพฑูริย์ ศิริโอฬาร และภักดี ใจเชื้อ. 2562:7-14)
2. โปรแกรมบิง แมพส์ (Bing Maps) บริการเกี่ยวกับแผนที่ซึ่งพัฒนาโดยเครือข่าย Microsoft สำหรับการสร้างแผนที่จำลองเส้นทางการเดินทางบนไมโครซอฟท์เอ็กเซล
3. โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft Excel) การคำนวณเกี่ยวกับตัวเลขต่างๆ โดยเราจะใช้ไมโครซอฟท์เอ็กเซลเพื่อคำนวณหาเส้นทางที่เหมาะสมในการจัดเส้นทางการเดินทางที่เหมาะสมในการ จัดเส้นทางการเดินทางด้วย โปรแกรมเอ็กเซล โซลเวอร์ (Excel Solver) เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีใช้ทั่วไป

4. วิธีการสร้างแบบจำลองโปรแกรมการจัดหาเส้นทางการขนส่งโดยวิธีการแบบประหยัด (Savings algorithm) การจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีความต้องการของลูกค้าหลายราย และยานพาหนะมีความจุหลายขนาดส่งสินค้าออกจากคลังพัสดุแห่งเดียว

การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากการปรับปรุงการจัดเส้นทางขนส่ง เพื่อลดต้นทุนการขนส่ง จะต้องมีการวัดประสิทธิภาพของเส้นทางในการขนส่งโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกันระหว่างก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงโดยสามารถวัดได้ ดังนี้

1. การเปรียบเทียบระยะทางจากโปรแกรมการจัดเส้นทางขนส่งกับค่าข้อมูลจริงจากการบันทึกผล
2. การเปรียบเทียบต้นทุนก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงการจัดเส้นทางขนส่ง

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ระดับเสี่ยงของการทำงานในสถานประกอบการอยู่ช่อมรณต์

จากการศึกษาการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าประเภทน้ำมันเครื่อง และสำรวจสภาพปัญหา พบว่าในการขนส่งสินค้าได้ถูกจัดส่งโดยอาศัยความเคยชินและความชำนาญของพนักงาน เส้นทางและระยะทางในการขนส่งที่เกิดขึ้นจึงไม่ใช่เส้นทางและระยะทางที่เหมาะสม มีผลการดำเนินงานมีดังนี้

ส่วนที่ 1 ข้อมูลการจัดเส้นทางเดินรถขนส่งก่อนปรับปรุง

ในส่วนนี้จะทำการสอบถามข้อมูลจากทางหัวหน้างานถึงการจัดเส้นทางในการขนส่งสินค้าของทางบริษัทกรณีศึกษา โดยสามารถแจกแจงระยะทางที่ใช้ในการขนส่งที่เกิดขึ้นก่อนทำการปรับปรุง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1: สรุปเส้นทางเดินรถก่อนปรับปรุงช่วงเดือน กันยายน – พฤศจิกายน 2564

เดือน	วัน/เดือนปี/	ระยะทางก่อนปรับปรุง	ระยะทางรวม (ต่อเดือน)
กันยายน	วันที่ 6 กันยายน 2564	226.34	1,172.95
	วันที่ 10 กันยายน 2564	263.45	
	วันที่ 13 กันยายน 2564	221.17	
	วันที่ 23 กันยายน 2564	153.3	
	วันที่ 28 กันยายน 2564	308.69	
ตุลาคม	วันที่ 4 ตุลาคม 2564	219.7	1,032.33
	วันที่ 8 ตุลาคม 2564	216.21	
	วันที่ 14 ตุลาคม 2564	288.24	
	วันที่ 19 ตุลาคม 2564	61.59	
	วันที่ 29 ตุลาคม 2564	246.59	
พฤศจิกายน	วันที่ 2 พฤศจิกายน 2564	172.41	839.84
	วันที่ 11 พฤศจิกายน 2564	291.86	
	วันที่ 18 พฤศจิกายน 2564	229.52	
	วันที่ 24 พฤศจิกายน 2564	69.1	
	วันที่ 29 พฤศจิกายน 2564	76.95	
ระยะทางรวมทั้งหมด (กิโลเมตร)			3,045.12

ส่วนที่ 2 ข้อมูลการจัดเส้นทางเดินรถขนส่งหลังปรับปรุง

ผลการศึกษาการคำนวณจัดเส้นทางเดินรถโดยใช้โปรแกรมเอ็กเซล โซลเวอร์ (Excel Solver) ซึ่งเส้นทางเดินรถขนส่งสินค้าและระยะทางที่ใช้ในการขนส่งที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบการขนส่งหลังปรับปรุง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2: สรุปเส้นทางการเดินหลังปรับปรุงช่วงเดือน กันยายน - พฤศจิกายน 2564

เดือน	วัน/เดือนปี/	ระยะทางก่อนปรับปรุง	ระยะทางรวม (ต่อเดือน)
กันยายน	วันที่ 6 กันยายน 2564	106.06	571.65
	วันที่ 10 กันยายน 2564	111.18	
	วันที่ 13 กันยายน 2564	134.49	
	วันที่ 23 กันยายน 2564	121.19	
	วันที่ 28 กันยายน 2564	98.73	
ตุลาคม	วันที่ 4 ตุลาคม 2564	97.68	446.39
	วันที่ 8 ตุลาคม 2564	88.42	
	วันที่ 14 ตุลาคม 2564	98.62	
	วันที่ 19 ตุลาคม 2564	40.86	
	วันที่ 29 ตุลาคม 2564	120.81	
พฤศจิกายน	วันที่ 2 พฤศจิกายน 2564	98.83	397.57
	วันที่ 11 พฤศจิกายน 2564	98.73	
	วันที่ 18 พฤศจิกายน 2564	114.96	
	วันที่ 24 พฤศจิกายน 2564	35.6	
	วันที่ 29 พฤศจิกายน 2564	31.45	
ระยะทางรวมทั้งหมด (กิโลเมตร)			1,397.61

ส่วนที่ 3 เปรียบเทียบผลการปรับปรุง

ทำการเปรียบเทียบระยะทางที่ใช้ในการขนส่งสินค้า เป็นระยะเวลา 3 เดือน ได้แก่เดือนกันยายน - พฤศจิกายน ปี พ.ศ.2564 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3: สรุปเส้นทางการเดินหลังปรับปรุงช่วงเดือน กันยายน - พฤศจิกายน 2564

เดือน/ปี	ระยะทางก่อนปรับปรุง	ระยะทางหลังปรับปรุง
กันยายน 2564	1,172.95	571.65
ตุลาคม 2564	1,032.33	446.39
พฤศจิกายน 2564	839.84	397.57
ระยะทางรวม (กิโลเมตร)	3,045.12	1,397.61

จากตารางข้างต้นการเปรียบเทียบเส้นทางการเดินรถก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง พบว่าการจัดเส้นทางการเดินรถก่อนปรับปรุง มีระยะทางรวมทั้งหมด 3,045.12 กิโลเมตร ในขณะที่การจัดเส้นทางการเดินรถหลังปรับปรุงนั้น มีระยะทางรวมทั้งหมด 1,397.61 กิโลเมตร สามารถบอกได้ว่าหลังปรับปรุงเมื่อมีการใช้โปรแกรมในการจัดเส้นทางการเดินรถ ผลต่างของระยะทางการขนส่งรวมทั้ง 3 เดือนลดลง 1,647.51 กิโลเมตร หรือคิดเป็น 54.10% จากการจัดเส้นทางการเดินรถก่อนปรับปรุง

ส่วนที่ 4 เปรียบเทียบต้นทุนที่ใช้ในการขนส่ง

ทำการเปรียบเทียบต้นทุนที่ใช้ในการขนส่งสินค้า เป็นระยะเวลา 3 เดือน ได้แก่ เดือนกันยายน - พฤศจิกายน ปี พ.ศ.2564 ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4: การเปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง เดือนกันยายน – พฤศจิกายน 2564

เดือน/ปี	ก่อนปรับปรุงต้นทุนแปรผัน (บาท)	หลังปรับปรุงต้นทุนแปรผัน (บาท)
กันยายน 2564	8,116.81	3,955.82
ตุลาคม 2564	7,143.72	3,089.02
พฤศจิกายน 2564	5,811.69	2,626.62
ระยะทางรวม (กิโลเมตร)	3,045.12	1,397.61
ต้นทุนที่ลดลงรวม 11,400.77 บาท		

จากตารางที่ 4 เปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งที่เกิดขึ้นของการจัดเส้นทางรถก่อนปรับปรุง และต้นทุนการขนส่งที่เกิดขึ้นของการจัดเส้นทางรถหลังปรับปรุง ในช่วงเดือน กันยายน - พฤศจิกายน ปี พ.ศ.2564 โดยบริษัท ทรานส์โลจิสติกส์มีต้นทุนการขนส่งคิดเป็น 6.92 บาท/กิโลเมตร โดยจะเห็นได้ว่าการจัดเส้นทางรถก่อนปรับปรุง มีต้นทุนแปรผันรวมทั้งอยู่ที่ 21,072.23 บาท ในขณะที่การจัดเส้นทางรถหลังปรับปรุง ซึ่งจัดโดยโปรแกรมนี้ มีต้นทุนการขนส่งแปรผันรวมทั้ง 9,671.46 บาท สามารถบอกได้ว่าเมื่อใช้โปรแกรมในการจัดเส้นทางรถ ผลต่างของต้นทุนแปรผันในการขนส่งรวมทั้ง 3 เดือนลดลง 11,400.77 บาท หรือคิดเป็น 54.10% จากต้นทุนการขนส่งก่อนปรับปรุง

สรุปผลวิจัย

จากการศึกษาการจัดเส้นทางรถขนส่งสินค้า ทรานส์โลจิสติกส์ บริษัทผลิตไส้กรองน้ำมันเครื่อง ซึ่งจุดประสงค์หลักของงานวิจัยในครั้งนี้ คือการลดต้นทุนในการขนส่งสินค้าให้กับบริษัททรานส์โลจิสติกส์อย่างน้อย 10% โดยการใช้การปรับปรุงเส้นทางรถด้วยวิธีเซฟวิงอัลกอริทึม (Saving Algorithm) ซึ่งในกรณีนี้ใช้โปรแกรมเอ็กเซล โซลเวอร์ (Excel Solver) มาจัดเส้นทางในการขนส่งสินค้า เพื่อลดระยะทางในการขนส่งโดยรวมในแต่ละวันที่มีการขนส่งสินค้า ช่วงเดือนกันยายน - พฤศจิกายน ปี พ.ศ.264 จำนวน 3 เดือน ซึ่งในแต่ละเดือนไม่ได้มีความต้องการสินค้าทุกวัน จึงมีการขนส่งสินค้าเฉพาะวันที่มีรอบการขนส่งเพียงเท่านั้น โดยสามารถสรุปผลได้ ดังนี้

1. จากการข้อมูลเส้นทางรถขนส่งก่อนปรับปรุงสามารถสรุปได้ว่าใน 3 เดือน คือกันยายน ตุลาคม และ พฤศจิกายน โดยในแต่ละเดือนมีระยะทางที่ใช้ในการขนส่งรวมทั้ง 1,172.95, 1,032.33 และ 839.84 ตามลำดับ ระยะทางรวมทั้ง 3 เดือน เท่ากับ 3,045.12 กิโลเมตร
2. จากการปรับปรุงเส้นทางรถขนส่งสินค้า ในช่วง 3 เดือน คือ กันยายน ตุลาคม และพฤศจิกายน โดยหลังการปรับปรุงระยะทางที่ใช้ในการขนส่งแต่ละเดือนอยู่ที่ 571.65, 446.39 และ 397.57 ตามลำดับ
3. การเปรียบเทียบผลหลังทำการปรับปรุง สามารถสรุปได้ว่าระยะทางหลังปรับปรุง นั้นทำให้เกิดผลประโยชน์ในแง่ของระยะทาง ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการขนส่งที่เกิดขึ้น โดยในส่วนของระยะทางนั้นรวมทั้งสิ้น 3 เดือน ระยะทางก่อนปรับปรุง อยู่ที่ 3,045.12 กิโลเมตร หลังทำการปรับปรุงมีระยะทางรวมทั้งสิ้น 1,397.61 กิโลเมตร สามารถลดระยะทางลงได้ 1,647.51 กิโลเมตร คิดเป็น 54.10% ของการจัดเส้นทางรถก่อนปรับปรุง ซึ่งระยะทางโดยรวมที่ประหยัดได้ส่งผลให้ในส่วนต้นทุนการขนส่งมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน โดยต้นทุนการขนส่งแปรผันของบริษัททรานส์โลจิสติกส์อยู่ที่ 6.92 บาท/กิโลเมตร ซึ่งจากเดิมการจัดเส้นทางรถขนส่งก่อนปรับปรุงโดยพนักงานเกิดต้นทุนรวมทั้งสิ้น 21,072.23 บาท ในขณะที่การจัดเส้นทางรถขนส่งหลังปรับปรุงเกิดต้นทุนรวมทั้งสิ้น 9,671.46 บาท สามารถลดต้นทุนการขนส่งของทั้ง 3 เดือนลงได้ 11,400.77 บาท คิดเป็น 54.10% ของต้นทุนการขนส่งก่อนปรับปรุง ซึ่งต้นทุนการขนส่งแปรผันรวมทั้งประหยัดได้ ทำให้สามารถเพิ่มโอกาสในการลดต้นทุนในการขนส่งและช่วยเพิ่มกำไรในการจัดส่งสินค้าได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Clarke, G., Wright, J.W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery Points. *Operations Research*. 12, 568–581.
- [2] ณกร อินทร์พุง. (2548). การแก้ปัญหาการตัดสินใจในอุตสาหกรรมการขนส่งและลอจิสติกส์. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [3] ณัฐนิชา รุ่งโรจน์ชัชวาล, อินทอร ศรีสว่าง และ วรณัฐพงษ์ คงแก้ว. (2559). การประยุกต์ใช้ปัญหาการจัดเส้นทางในการเก็บขยะมูลฝอย กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่. *วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน*. 4(2).
- [4] ไพฑูรย์ ศิริโอฬาร และ ภักดี ใจซื่อ. (2562). การลดต้นทุนในการขนส่งพวงหรีด Cost Reduction Of Wreaths Delivery. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*. 3(1), 7-14.
- [5] พัชรดา โอภาส และ กาญจนา ชุบเลี้ยง. (2562). การศึกษาการลดต้นทุนในการขนส่ง กรณีศึกษาบริษัทแอลอีดี ไชน์ แอนด์เดคคอร์จำกัด. วิทยาลัยเทคโนโลยีอรรณพวิทยพัฒน์วิชาการ.

Received: Apr 24, 2022

Revised: Oct 10, 2022

Accepted: Oct 20, 2022

การศึกษาเวลามาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานและการจ่ายค่าตอบแทน ของแผนกทดสอบวัตถุดิบ กรณีศึกษาบริษัทผลิตชุดชั้นใน STANDARD TIME STUDY FOR COMPARISON PERFORMANCE AND COMPENSATION IN RAW MATERIAL TESTING DEPARTMENT CASE STUDY UNDERWEAR MANUFACTURING

กวิน พินสำราญ¹ จิรวดี อินทกาญจน์² รุ่งรวิน ตั้งชัย³ สรินยา ศรีอินทร์กิจ⁴, อุทุมพร อยู่สุข⁵
^{1,3,4}สาขาการจัดการโลจิสติกส์ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยธนบุรี
²สาขาการจัดการโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
⁵สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และซัพพลายเชน คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยราชพฤกษ์
 Kawin Pinsamran¹, Jirawadee Intakarn², Rungrawin Tangchai³, Sarinya Sriintakid⁴
 Utumporn Yoosuk⁵

^{1,3,4}Department of Logistics Management, Faculty of Business Administration, Thonburi University

²Department of Logistics Management, Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University

⁵Logistics and Supply Chain Management, Faculty of Business Administration Rajapruk University

E-mail: ¹pinsamran@gmail.com, ²jirawadee.i@pnru.ac.th, ³rungrawinfah.tan123@gmail.com,

⁴bowbas1405@gmail.com

บทคัดย่อ

วิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาเวลามาตรฐานในแผนกทดสอบวัตถุดิบ 2) เพื่อเปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานและการจ่ายค่าตอบแทนในแผนกทดสอบวัตถุดิบ กรณีศึกษาบริษัทผลิตชุดชั้นใน ผลการศึกษา พบว่า กระบวนการทดสอบวัตถุดิบมีเวลามาตรฐาน ดังนี้ 1) กระบวนการทดสอบผ้า 61.84 นาทีต่อชิ้น กระบวนการทดสอบลูกไม้ 40.90 นาทีต่อชิ้น และกระบวนการทดสอบอุปกรณ์ 25.54 นาทีต่อชิ้น เมื่อเปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานและการจ่ายค่าตอบแทนของแผนกทดสอบวัตถุดิบย้อนหลัง 1 เดือน พบว่า มีประสิทธิภาพการปฏิบัติงานร้อยละ 97.27 และประสิทธิภาพการจ่ายค่าตอบแทนตามผลการปฏิบัติงานต่ำกว่าค่าตอบแทนที่จ่ายจริง ร้อยละ 2.73 จากผลการศึกษาทำให้บริษัทกรณีศึกษาสามารถประเมินผลการปฏิบัติงาน และการจ่ายค่าตอบแทนของพนักงาน ซึ่งจะใช้ประโยชน์ในการจัดตารางการผลิต การวางแผนการผลิต การประเมินต้นทุน การควบคุมต้นทุนแรงงานได้

คำสำคัญ: การศึกษางาน เวลามาตรฐาน ประเมินผลการปฏิบัติงาน การจ่ายค่าตอบแทน

Abstract

This research has objectives 1) To study a standard time for raw material testing department. 2) To comparison the performance evaluation and compensation in the raw material testing department case study of underwear company. The results showed that the raw material testing process had a standard time as follows: 1) The fabric testing process was 61.84 minutes per piece, the lacy testing process was 40.90 minutes per piece and the equipment testing process was 25.54 minutes per piece. Comparing the performance and compensation of the raw material testing department for the past 1 month, it was found that the efficiency of work was 97.27% and the efficiency of compensation based on the performance was lower than the compensation of 2.73%. From the results of the study, the case

study companies were able to performance evaluate and compensation. This will be useful in scheduling production. production planning cost estimation labor cost control.

Keywords: Work Study, Standard Time, Performance Evaluation, Compensation

บทนำ

ปัจจุบันผู้บริโภคมีพฤติกรรมการซื้อออนไลน์ที่เพิ่มมากขึ้น อุตสาหกรรมต่างจำเป็นต้องปรับตัวให้ทันต่อความต้องการและเวลา โดยเฉพาะปัจจัยด้านแรงงาน เนื่องจากพนักงานแต่ละคนมีทักษะ ความพยายาม ความสม่ำเสมอ และสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ต่างกัน ทำให้การวางแผนและควบคุมทำได้ยาก ดังนั้น การศึกษาเวลา (Time Study) หรือการวัดผลงาน (Work Measurement) เพื่อคำนวณหาเวลามาตรฐานของพนักงานจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจสำหรับการประยุกต์หลักการศึกษางานในโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อเป็นข้อมูลมาตรฐานให้กับทางโรงงาน ที่สามารถนำมาใช้ในการวางแผนกำลังคน การวางแผนการผลิต และการจ่ายค่าตอบแทนให้กับพนักงานได้ [5]

จากการศึกษาปัญหาแผนกทดสอบวัตถุดิบของบริษัทเคมีศึกษา พบว่าปัจจุบันแผนกทดสอบวัตถุดิบมีอัตราผลผลิต (Productivity) ที่ต่ำและค่าล่วงเวลาที่สูง (OT) ซึ่งสาเหตุเกิดจากที่ทางแผนกยังไม่มีกำหนดเวลาและมาตรฐานการปฏิบัติงาน ทำให้มีความยากในการควบคุมและประเมินผลการปฏิบัติงาน (Performance Evaluation) ตามภาระงานที่กำหนด ผู้วิจัยจึงศึกษางาน (Work Study) และจัดทำเวลามาตรฐาน (Standard Time) เพื่อเปรียบเทียบผลการปฏิบัติงาน และการจ่ายค่าตอบแทนในแผนกทดสอบวัตถุดิบ และสร้างเป็นมาตรฐานปฏิบัติงาน (Standardization) ซึ่งจะใช้ประโยชน์ในการจัดตารางการผลิต การวางแผนการผลิต การประเมินต้นทุน การควบคุมต้นทุนแรงงานได้

วัตถุประสงค์

- 1 เพื่อศึกษาเวลามาตรฐานในแผนกทดสอบวัตถุดิบ
- 2 เพื่อเปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานและการจ่ายค่าตอบแทนในแผนกทดสอบวัตถุดิบ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ โดยกรอบแนวคิดของการวิจัยอยู่ภายใต้ทฤษฎี ดังนี้

1. การศึกษางาน (Work study) หรือที่รู้จักกันในชื่อเดิมว่า การศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา (Motion and Time study) หมายถึง เทคนิคในการวิเคราะห์ขั้นตอนการปฏิบัติงานเพื่อขจัดงานที่ไม่จำเป็นออก และสรรหาวิธีการทำงานที่ดีที่สุดและเร็วที่สุดในการปฏิบัติงานนั้น ๆ ทั้งนี้รวมถึงการปรับปรุงมาตรฐานของวิธีการทำงาน สภาพการทำงานเครื่องมือต่าง ๆ และการฝึกคนงานให้ทำงานด้วยวิธีที่ถูกต้อง การหาเวลามาตรฐานของงานและการบริหารแผนการจ่ายเงินจูงใจระบบต่าง ๆ หรืออีกนัยหนึ่งการศึกษางานคือการวิเคราะห์ขั้นตอนการทำงานที่ใช้ในการทำงานใด ๆ เพื่อวัตถุประสงค์ ในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำงาน และเพื่อวัดมาตรฐานในการปฏิบัติงานนั้นเป็นหน่วยมาตรฐานชั่วโมง ซึ่งพนักงานที่ได้มาตรฐานสามารถทำงานนั้นได้ เพื่อนำไปใช้สร้างแผนการจ่ายค่าตอบแทนอันเหมาะสมและจูงใจให้พนักงานมีผลงานที่ดีกว่ามาตรฐาน [3]

2. การหาเวลามาตรฐาน (Standard time) หรือที่เรียกว่า Work Measurement คือ การคำนวณหาเวลาในการทำงานมาตรฐานสำหรับพนักงานที่ได้รับการฝึกมาดีแล้ว ทำงานที่กำหนดด้วยความเร็วปกติภายใต้สภาพเงื่อนไขที่กำหนดไว้เวลาที่ได้นี้จะเป็นมาตรฐานในการทำงานนั้น ๆ ซึ่งจะใช้ประโยชน์ในการจัดตารางการผลิต การวางแผนการผลิต การประเมินต้นทุน การควบคุมต้นทุนแรงงานและอื่น ๆ ซึ่งการคำนวณหาเวลามาตรฐานมีรายละเอียด ดังนี้ [9]

2.1 หาค่าเฉลี่ยจากเวลาของงานย่อยที่บันทึกไว้

2.2 หาค่าเวลาปกติโดยคำนวณจากสูตร

$$\text{เวลาปกติ (Normal time)} = \text{เวลาเฉลี่ย} \times \text{ค่าประเมินความเร็ว (Rating Factor)} \quad (1)$$

2.3 คำนวณเวลามาตรฐานจากสูตร

$$\text{เวลามาตรฐาน (Standard time)} = \text{เวลาปกติ} + (\text{เวลาปกติ} \times \text{ร้อยละค่าเผื่อ}) \quad (2)$$

3. การคำนวณจำนวนครั้งของการจับเวลาของแต่ละงานย่อย โดยกำหนดโอกาสความผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ $\pm 5\%$ (Kanawaty, 1992) โดยทำการจับเวลาแต่ละงานย่อย (N) จำนวน 10 ครั้ง แล้วจึงนำมาคำนวณหาจำนวนครั้งที่แท้จริงของการศึกษางานย่อย (n) ตามสูตรที่ (3) [1]

$$n = 40 \sqrt{N \sum x^2 - (\sum x)^2} / \sum x \quad (3)$$

เมื่อ n = จำนวนข้อมูลที่แท้จริงของการศึกษางานย่อย

N = จำนวนข้อมูลที่เก็บตัวอย่างของการศึกษางานย่อย

X = เวลาที่จับได้ในแต่ละครั้ง

ค่า n ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่า N แสดงว่าค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำงานอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 5\%$ ของค่าจริง [7]

4. การประเมินอัตราเร็วด้วย วิธี Westinghouse System of Rating เป็นขั้นตอนเพื่อทำการประเมินอัตราความเร็วของพนักงานในการปฏิบัติงาน 4 ด้าน ได้แก่ 1) ทักษะ (Skill) คือ ความสามารถในการทำงานตามกำหนด 2) ความพยายาม (Effort) คือ ความตั้งใจในการทำงาน 3) ความสม่ำเสมอ (Consistency) ในการทำงานแต่ละรอบ 4) สภาพแวดล้อมในการทำงาน (Conditions) คือ สิ่งที่อยู่รอบๆ ในสถานที่ทำงานที่มีผลต่อการทำงาน [4] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางคะแนนในการประเมินอัตราความเร็วตามวิธี Westinghouse [10]

ทักษะ (Skill)			ความพยายาม (Effort)		
+0.15	A1	ชำนาญสูง	+0.13	A1	ชำนาญสูง
+0.13	A2		+0.12	A2	
+0.11	B1	ดีมาก	+0.10	B1	ดีมาก
+0.08	B2		+0.08	B2	
+0.06	C1	ดี	+0.05	C1	ดี
+0.03	C2		+0.02	C2	
0.00	D	เฉลี่ย	0.00	D	เฉลี่ย
-0.05	E1	พอใช้	-0.04	E1	พอใช้
-0.10	E2		-0.18	E2	
-0.16	F1	ควรปรับปรุง	-0.12	F1	ควรปรับปรุง
-0.22	F2		-0.17	F2	
สภาพแวดล้อมในการทำงาน (Conditions)			ความสม่ำเสมอ (Consistency)		
+0.06	A	ดีเยี่ยม	+0.04	A	ดีเยี่ยม
+0.04	B	ดีมาก	+0.03	B	ดีมาก
+0.02	C	ดี	+0.01	C	ดี
0.00	D	เฉลี่ย	0.00	D	เฉลี่ย
-0.03	E	พอใช้	-0.02	E	พอใช้
-0.07	F	ควรปรับปรุง	-0.04	F	ควรปรับปรุง

เมื่อทำการประเมินให้คะแนนในแต่ละปัจจัยเรียบร้อยแล้ว นำค่าที่ได้รวมเข้ากับ 1 และคูณเข้ากับ 100 ก็จะได้ค่าประสิทธิภาพการทำงาน หรือค่าอัตราการทำงานของพนักงานแต่ละคนที่ทำการประเมิน ถ้าค่าที่ได้มีค่ามากกว่า 100 แสดงว่า

พนักงานคนนั้นทำงานได้น้อยกว่าที่เร็วปกติ แต่ถ้าค่าน้อยที่ได้น้อยกว่า 100 แสดงว่าพนักงานทำงานได้ช้ากว่าสภาพปกติ ตามสูตรที่ (4)

$$\text{ค่าประเมินความเร็ว} = (\text{ผลรวมคะแนนประเมินแต่ละปัจจัย} + 1) \times 100 \quad (4)$$

5. การหาค่าเผื่อเวลา (Allowance time) แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ [6]

5.1 เวลาเผื่อสำหรับส่วนบุคคล (Personal Allowance) เป็นเวลาเผื่อเพื่อให้พนักงานทำกิจส่วนตัวเช่น ไปห้องน้ำ ล้างมือ ตีมน้ำ ยืดเส้นยืดสายเป็นต้นเวลาส่วนบุคคลนี้แม้ว่าจะแตกต่างกันในส่วนต่าง ๆ โดยขึ้นกับสภาพแวดล้อมและชนิดของงาน โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ระหว่างร้อยละ 4.5-6.5 แต่ในอุตสาหกรรมทั่วไปมักกำหนดไว้ที่ร้อยละ 5 ของเวลาทำงานทั้งหมด ดังนั้นใน 1 วันหากมีเวลาทำงานใน 8 ชั่วโมงเต็มหรือเท่ากับ 480 นาที จะมีเวลาส่วนบุคคลนี้ = $0.05 \times 8 \times 60 = 24$ นาที ค่าเผื่อสำหรับส่วนบุคคลนี้อาจแปรเปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อมได้ เช่น ของ Mundel (2017) ให้ค่าเผื่อขึ้นกับสภาพแวดล้อมไว้ดังนี้

Comfortable condition	23	นาทีต่อวัน
Warm condition	30	นาทีต่อวัน
Hot, dusty, noisy	50	นาทีต่อวัน

ในสภาวะแวดล้อมของการจัดการสมัยใหม่ซึ่งมีสภาพการทำงานที่ค่อนข้างดี ค่าเผื่อส่วนบุคคลนี้ได้ถูกแปลงมาเป็นการพัก 15 นาทีในครึ่งเช้า และ 15 นาทีในครึ่งบ่ายหรือที่มักจะเรียกว่าพักรับประทานอาหารนั่นเอง

5.2 เวลาเผื่อสำหรับความเครียด (Fatigue Allowance) คือเวลาเผื่อสำหรับความเหนื่อยล้าเนื่องจากการทำงาน ซึ่งโดยหลักการแล้วไม่ว่างานหนักหรืองานเบาย่อมต้องมีความเหนื่อยล้าเกิดขึ้นทั้งสิ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากความยากในการทำงาน ท่าทางในการทำงาน ความน่าเบื่อหน่าย ความซ้ำซากจำเจ ดังนั้นค่าเผื่อสำหรับความเครียดจึงแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

(1) ค่าเผื่อความเครียดพื้นฐาน (Basic Fatigue Allowance) เป็นค่าคงที่สำหรับงานทั่ว ๆ ไป องค์การแรงงานระหว่างประเทศหรือ ILO (2018) ได้กำหนดไว้ที่ร้อยละ 4

(2) ค่าเผื่อความเครียดแปรผัน (Variable Fatigue Allowance) ซึ่งจะแปรผันได้ตามลักษณะงานได้แก่ การยืน ท่าทางการทำงานที่ผิดปกติ น้ำหนักที่กระทำ สภาพแวดล้อมการทำงาน ความซ้ำซากของงาน

5.3 เวลาเผื่อสำหรับความล่าช้า (Delay Allowance) ความล่าช้าอาจเกิดได้ในหลากหลายรูปแบบทั้งแบบหลีกเลี่ยงได้ (Avoidable Delay) และแบบหลีกเลี่ยงไม่ได้ (Unavoidable Delay) ถ้าเป็นความล่าช้าที่หลีกเลี่ยงได้หรือเพราะเกิดจากการจงใจกระทำก็จะไม่ถูกนำมาคิดในการคำนวณเวลามาตรฐาน แต่ถ้าเป็นความล่าช้าซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ก็จะถูกนำมาคิดในการหาเวลามาตรฐาน

6. การประเมินผลการปฏิบัติงาน (Performance Evaluation) คือ กระบวนการที่ผู้บริหารใช้พิจารณาผลการปฏิบัติงานของพนักงานว่าพนักงานปฏิบัติงานได้ในระดับใด เพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่ตั้งไว้ รวมทั้งให้ข้อมูลย้อนกลับแก่พนักงานเพื่อทำให้มีการปรับปรุงการปฏิบัติงานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

โดยวิธีการประเมินผลการปฏิบัติงานที่ยึดผลสำเร็จของงานหรือวัตถุประสงค์เป็นหลัก (Result or Objective Based Approach) เป็นวิธีการประเมินผลการปฏิบัติงานที่มุ่งประเมินผลการปฏิบัติงานของพนักงานในแง่ผลสำเร็จของงานตามวัตถุประสงค์ หรือเป้าหมาย หรือมาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยมักจะประเมินในรูปของปริมาณ คุณภาพ เวลา หรือประสิทธิผลในการปฏิบัติงาน มีทั้งการประเมินตามผลงาน (Appraisal by Result) หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “Management by Objective” ซึ่งถือเอาผลการปฏิบัติงานเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา การพิจารณาจะคำนึงถึงผลงานเป็นหลัก แต่จะไม่คำนึงถึงวิธีการกระทำของแต่ละคน ส่วนวิธีการประเมินโดยใช้ตัวบ่งชี้โดยตรง (The Direct Index) วิธีนี้ถือหลักการประเมินโดยพิจารณาที่ผลงานเพียงด้านเดียว ไม่พิจารณาคุณลักษณะ หรือพฤติกรรมของผู้รับการประเมิน เมื่อรวมจากหลายๆงานก็จะกลายเป็นกลุ่มตัวชี้ที่เป็นตัวเลข (Numerical Index) เพื่อใช้สำหรับวัดผลงานของตำแหน่งใด ตำแหน่งหนึ่ง ดังตัวอย่างเช่น ยอดการขาย ยอดเงินที่จัดเก็บได้ เป็นต้น และสำหรับวิธีการประเมินโดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard of Performance) วิธีนี้จะนำเอาผลการปฏิบัติงานที่ได้จริงมาพิจารณาเปรียบเทียบกับเป้าหมายที่กำหนดไว้ล่วงหน้า [2]

7. การจ่ายค่าตอบแทน (Compensation) คือ การจ่ายให้กับการทำงาน อาจเรียกเป็นค่าจ้างหรือเงินเดือนก็ได้ เงินค่าจ้าง หมายถึง เงินที่คนงานได้รับ โดยถือเกณฑ์จำนวนชั่วโมงที่ทำงาน ค่าจ้างจะขึ้นลงตามชั่วโมงทำงาน ส่วนเงินเดือน ได้แก่ รายได้ที่ได้รับประจำในจำนวนคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนชั่วโมงทำงาน หรือจำนวนผลผลิต โดยปกติขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทำงาน [8]

วิธีการดำเนินการวิจัย

การจัดทำเวลามาตรฐาน และเปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานและการจ่ายค่าตอบแทนของแผนกทดสอบวัตถุดิบ มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ดังนี้

1. การศึกษางานและเวลาของกระบวนการทดสอบวัตถุดิบ จากการศึกษาข้อมูลสภาพการทำงานปัจจุบัน เก็บรวบรวมข้อมูลรายละเอียดกระบวนการทำงาน จำนวนพนักงานประจำ ประเภทของวัตถุดิบ ประเภทกระบวนการทดสอบ อัตราการผลิตปัจจุบัน อัตราผลผลิตที่ผู้บริหารคาดหวัง เก็บบันทึกเวลาของกระบวนการทดสอบวัตถุดิบลงบนแบบฟอร์มบันทึกที่ผู้วิจัยออกแบบ และเก็บบันทึกเวลาดำเนินการจากวิดีโอ โดยคำนวณจำนวนครั้งในการจับเวลาของแต่ละงานย่อยตามสูตรของ Kanawaty (1992) สูตรที่ (3) และประเมินอัตราการทำงานของพนักงานหรือความเร็ว (Rating) ด้วยระบบของเวสต์อิงเฮาส์ (Westinghouse) คำนวณตามสูตรที่ (4)

2. การหาเวลามาตรฐานการปฏิบัติงาน จากการนำเวลาสังเกตการณ์เฉลี่ยของการทำงานสภาวะปกติ และค่าประเมินความเร็ว คำนวณหาค่าเวลาปกติจากสูตรที่ (1) และนำเอาค่าเวลาปกติมาคำนวณร่วมกับค่าเวลาเพื่อที่ผู้วิจัยกำหนดของ Mundel (2013) และ ILO (2018) และคำนวณหาเวลามาตรฐานจากสูตรที่ (2)

3. เปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานและการจ่ายค่าตอบแทน จากการนำเวลามาตรฐานการปฏิบัติงานคำนวณกับอัตราผลผลิตต่อวันเป็นค่าเวลาการทำงานรวม เพื่อเปรียบเทียบเวลาการทำงานรวมกับเป้าหมายที่ผู้บริหารคาดหวังต่อวัน ตามการปรับกำลังการผลิต (จำนวนพนักงานและล่วงเวลา (OT) แต่ละวันไม่เท่ากัน) และคำนวณหาการจ่ายค่าตอบแทนตามเวลาการทำงานรวม เพื่อเปรียบเทียบการจ่ายค่าตอบแทนตามผลการปฏิบัติงานและค่าตอบแทนที่จ่ายจริง โดยใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบย้อนหลัง 1 เดือน ช่วงวันที่ 1-31 มกราคม พ.ศ.2565

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษางานและเวลาของกระบวนการทดสอบวัตถุดิบ

1.1 จากการศึกษากระบวนการทดสอบวัตถุดิบของบริษัทกรณีศึกษา ภายใต้การปฏิบัติงานจริงของพนักงานในแต่ละขั้นตอนการทำงาน พบว่า แผนกทดสอบวัตถุดิบมีพนักงานทั้งหมด 3 คน สุ่มตัวอย่างจากวัตถุดิบที่ถูกส่งมาจากซัพพลายเออร์ทั้งภายในและภายนอกก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิต วัตถุดิบที่ทดสอบ ได้แก่ ผ้า ผ้าลูกไม้ ลูกไม้เส้น ตะขอ ห่วง และยาง กระบวนการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ กระบวนการทดสอบผ้า กระบวนการทดสอบลูกไม้เส้น และกระบวนการทดสอบอุปกรณ์ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงขั้นตอนการทดสอบแบ่งตามประเภทวัตถุดิบ

งานย่อยที่	ทดสอบผ้า (ผ้าและผ้าลูกไม้)	ทดสอบลูกไม้เส้น	ทดสอบอุปกรณ์ (ตะขอ ห่วง และยาง)
1	เตรียมผ้า	เตรียมชิ้นงาน	ติดตั้งชิ้นงานก่อนทดสอบ
2	ตัดเย็บชิ้นงานก่อนทดสอบ	ตัดเย็บชิ้นงานก่อนทดสอบ	Test Washing
3	ซัก Shrinkage	Test Washing	Test Perspiration and Water
4	Test Washing	Test Rubbing	สรุปผลทดสอบ
5	Test Rubbing	Test Perspiration and Water	
6	Weight g/m ²	สรุปผลทดสอบ	
7	Test Perspiration and Water		

8	วัด Shrinkage ดูเปอร์เซ็นต์ยืหด		
9	สรุปผลทดสอบ		

1.2 จากการศึกษาเวลาของกระบวนการทดสอบวัตถุดิบ ภายใต้การทำงานในสภาวะปกติ โดยการเก็บบันทึกข้อมูลเวลาสังเกตการณ์ (Actual Time) ลงแบบฟอร์มบันทึกเวลาที่ทีมผู้วิจัยออกแบบ ในการจับเวลาด้วยนาฬิกาดิจิตอล ได้กำหนดจำนวนครั้งของการจับเวลาที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และค่าความแม่นยำที่ 5% ซึ่งสามารถคำนวณหาจำนวนครั้งจากสูตรที่ (3) การจับเวลาที่คำนวณได้ คือ 17 ครั้ง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงกำหนดการจับเวลาแต่ละงานย่อยเป็น 20 ครั้ง ซึ่งจากค่าเวลาการทำงานของพนักงานที่ศึกษาจะมีค่าที่แตกต่างกันไปตามความสามารถในการทำงานของพนักงานแต่ละคน ค่าเวลาเฉลี่ยของการทำงานปกติ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงเวลาสังเกตการณ์เฉลี่ยจากการจับเวลา 20 ครั้ง

งานย่อยที่	ทดสอบผ้า	เวลาสังเกตการณ์เฉลี่ย (นาท)	ทดสอบลูกไม้เส้น	เวลาสังเกตการณ์เฉลี่ย (นาท)	ทดสอบอุปกรณ์	เวลาสังเกตการณ์เฉลี่ย (นาท)
1	เตรียมผ้า	10.23 ± .33	เตรียมชิ้นงาน	5.53 ± .53	ติดตั้งชิ้นงานก่อนทดสอบ	8.47 ± .65
2	ตัดเย็บชิ้นงานก่อนทดสอบ	12.26 ± .26	ตัดเย็บชิ้นงานก่อนทดสอบ	12.40 ± .87	Test Washing	2.29 ± .28
3	ซัก Shrinkage	5.28 ± .24	Test Washing	2.29 ± .28	Test Perspiration and Water	4.56 ± .48
4	Test Washing	2.38 ± .16	Test Rubbing	3.58 ± .54	สรุปผลทดสอบ	5.62 ± .59
5	Test Rubbing	3.38 ± .70	Test Perspiration and Water	4.58 ± .48		
6	Weight g/m ²	2.30 ± .24	สรุปผลทดสอบ	5.53 ± .58		
7	Test Perspiration and Water	4.39 ± .72				
8	วัด Shrinkage ดูเปอร์เซ็นต์ยืหด	4.27 ± .31				
9	สรุปผลทดสอบ	5.47 ± .54				

1.3 จากเวลาของกระบวนการทดสอบวัตถุดิบที่ศึกษาจะมีค่าที่แตกต่างกันไปตามความสามารถในการทำงานของพนักงานแต่ละคน ผู้วิจัยจึงให้ผู้บริหารทำการประเมินอัตราการทำงานของพนักงานหรือความเร็ว (Rating) ของพนักงานทดสอบวัตถุดิบ เพื่อนำไปหาค่าเวลาปกติด้วยระบบของเวสต์อิงเฮาส์ (Westinghouse) มาใช้ในการประเมิน โดยการพิจารณาปัจจัยถึง 4 ด้าน (Lowry, et al., 1940) จากตารางที่ 1 ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินอัตราการทำงานของพนักงานที่มีลักษณะการทำงานที่ใกล้เคียงกันจากสูตร (4) ซึ่งได้ผลการประเมินแต่ละกระบวนการ แสดงดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4 แสดงค่าคะแนนการประเมินอัตราการทำงานหรือความเร็วพนักงานกระบวนการทดสอบผ้า

ลำดับที่	งานย่อย	จำนวนพนักงาน	เวลาเฉลี่ยสังเกตการณ์	ทักษะ	ความพยายาม	ความสม่ำเสมอ	สภาพแวดล้อมในการทำงาน	ค่าประเมิน
----------	---------	--------------	-----------------------	-------	------------	--------------	-----------------------	------------

		(คน)	(นาทีต่อชิ้น)					ความเร็ว (ร้อยละ)
1	เตรียมชิ้นงาน	1	10.23	+0.06	+0.05	+0.01	+0.02	114
2	ตัดเย็บชิ้นงาน ก่อนทดสอบ	1	12.26	+0.03	+0.02	+0.03	0.00	108
3	Test Shrinkage	1	5.28	+0.03	+0.08	+0.03	0.02	116
4	Test Washing	1	2.38	+0.03	+0.08	+0.03	0.02	116
5	Test Rubbing	1	3.38	+0.03	+0.08	+0.03	0.02	116
6	Test Weight g/m ²	1	2.30	+0.06	+0.02	0.00	+0.02	110
7	Test Perspiration and Water	1	4.39	+0.06	+0.05	+0.01	+0.02	114
8	วัดเปอร์เซ็นต์ยืดยึด	1	4.27	+0.03	+0.02	+0.03	0.00	108
9	สรุปผลทดสอบ	1	5.47	+0.03	+0.08	+0.01	0.02	114

ตารางที่ 5 แสดงค่าคะแนนการประเมินอัตราการทำงานหรือความเร็วของพนักงานในกระบวนการทดสอบลูกไม้เส้น

ลำดับ ที่	งานย่อย	จำนวน พนักงาน (คน)	เวลาเฉลี่ย สังเกตการณ์ (นาทีต่อชิ้น)	ทักษะ	ความ พยายาม	ความ สม่ำเสมอ	สภาพแวดล้อม ในการทำงาน	ค่าประเมิน ความเร็ว (ร้อยละ)
1	เตรียมชิ้นงาน	1	5.53	+0.06	+0.05	+0.01	+0.02	114
2	ตัดเย็บชิ้นงาน ก่อนทดสอบ	1	12.40	+0.03	+0.02	+0.03	0.00	108
3	Test Washing	1	2.29	+0.03	+0.08	+0.03	0.02	116
4	Test Rubbing	1	3.58	+0.03	+0.08	+0.03	0.02	116
5	Test Perspiration and Water	1	4.58	+0.06	+0.05	+0.01	+0.02	114
6	สรุปผลทดสอบ	1	5.53	+0.03	+0.08	+0.01	0.02	114

ตารางที่ 6 แสดงค่าคะแนนการประเมินอัตราการทำงานหรือความเร็วพนักงานในกระบวนการทดสอบอุปกรณ์

ลำดับ ที่	งานย่อย	จำนวน พนักงาน (คน)	เวลาเฉลี่ย สังเกตการณ์ (นาทีต่อชิ้น)	ทักษะ	ความ พยายาม	ความ สม่ำเสมอ	สภาพแวดล้อม ในการทำงาน	ค่าประเมิน ความเร็ว (ร้อยละ)
1	ติดตั้งชิ้นงาน ก่อนทดสอบ	1	8.47	+0.03	+0.02	+0.03	0.00	108
2	Test Washing	1	2.29	+0.03	+0.08	+0.03	0.02	116

3	Test Perspiration and Water	1	4.56	+0.06	+0.05	+0.01	+0.02	114
4	สรุปผลทดสอบ	1	5.62	+0.03	+0.08	+0.01	0.02	114

จากผลการประเมินค่าการประเมินอัตราการทำงานของพนักงานหรือความเร็วของพนักงานในกระบวนการทดสอบ วัดดูด้วยระบบของเวสต์ติ้งเฮาส์ ดังตารางที่ 4-6 พบว่า ค่าประเมินความเร็วของพนักงานมีค่ามากกว่า 100 ทุกงานย่อยของกระบวนการทำงาน แสดงให้เห็นว่าพนักงานแต่ละสถานี่งานทำงานในอัตราที่เร็วปกติ

2. การหาเวลามาตรฐานการปฏิบัติงาน

2.1 การคำนวณหาค่าเวลาปกติจากการนำเวลาสังเกตการณ์เฉลี่ยของการทำงานสภาวะปกติคูณเข้ากับค่าประสิทธิภาพการทำงานหรือค่าประเมินความเร็ว จากตารางที่ 4-6 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{เวลาปกติ} = \text{เวลาเฉลี่ย} \times \text{ค่าประเมินความเร็ว} \quad (1)$$

2.2 การคำนวณหาค่าเวลามาตรฐาน คำนวณได้จากการนำเอาเวลาปกติมาคำนวณร่วมกับเวลาเผื่อทั้งหมดร้อยละ 9 ผู้วิจัยกำหนดเวลาที่เพิ่มให้จากเวลาปกติของคณงานที่เหมาะสมเพื่อลดหย่อนเวลาส่วนตัว 5 เปอร์เซ็นต์ (Mundel, 2013) และความเมื่อยล้าและเวลาลดหย่อนของความล่าช้า 4 เปอร์เซ็นต์ (ILO, 2018) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{เวลามาตรฐาน} = \text{เวลาปกติ} + (\text{เวลาปกติ} \times \% \text{ค่าเผื่อ}) \quad (2)$$

จากการนำเวลาสังเกตการณ์ของพนักงานในอัตราที่เร็วปกติคำนวณหาค่าเวลาปกติ จากสูตร (1) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาเวลามาตรฐาน จากสูตร (2) รายละเอียดเวลามาตรฐานแต่ละกระบวนการ แสดงดังตารางที่ 7-9

ตารางที่ 7 แสดงเวลามาตรฐานของกระบวนการทดสอบผ้า

ลำดับที่	งานย่อย	เวลาเฉลี่ย สังเกตการณ์ (นาทีต่อชิ้น)	ค่าประเมิน ความเร็ว (ร้อยละ)	เวลาปกติ (นาทีต่อ ชิ้น)	ค่าเผื่อ ร้อยละ 9 (นาที)	เวลา มาตรฐาน (นาทีต่อชิ้น)
1	เตรียมชิ้นงาน	10.23	114	11.66	1.05	12.71
2	ตัดเย็บชิ้นงานก่อนทดสอบ	12.26	108	13.24	1.91	15.15
3	Test Shrinkage	5.28	116	6.12	0.55	6.67
4	Test Washing	2.38	116	2.76	0.25	3.01
5	Test Rubbing	3.38	116	3.92	0.35	4.27
6	Test Weight g/m ²	2.30	110	2.53	0.23	2.76
7	Test Perspiration and Water	4.39	114	5.00	0.45	5.45
8	วัดเปอร์เซ็นต์ยืหด	4.27	108	4.61	0.41	5.02
9	สรุปผลทดสอบ	5.47	114	6.24	0.56	6.80
รวม						61.84

จากตารางที่ 7 เวลามาตรฐานของกระบวนการทดสอบผ้า ประกอบด้วย 9 งานย่อย ได้แก่ เตรียมชิ้นงาน ตัดเย็บชิ้นงานก่อนทดสอบ Test Shrinkage Test Washing Test Rubbing Test Weight g/m^2 Test Perspiration and Water วัดเปอร์เซ็นต์ยืหด และสรุปผลทดสอบ มีค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 12.71, 15.15, 6.67, 3.01, 4.27, 2.76, 5.45, 5.02 และ 6.80 ตามลำดับ รวมเวลามาตรฐานการทดสอบต่อหนึ่งชิ้นงาน เท่ากับ 61.84 นาทีต่อชิ้น

ตารางที่ 8 เวลามาตรฐานของกระบวนการทดสอบลูกไม้เส้น

ลำดับที่	งานย่อย	เวลาเฉลี่ย สังเกตการณ์ (นาทีต่อชิ้น)	ค่าประเมิน ความเร็ว (ร้อยละ)	เวลาปกติ (นาทีต่อชิ้น)	ค่าเผื่อ (ร้อยละ 9)	เวลา มาตรฐาน (นาทีต่อชิ้น)
1	เตรียมชิ้นงาน	5.53	114	6.30	0.57	6.87
2	ตัดเย็บชิ้นงานก่อน ทดสอบ	12.40	108	13.39	1.21	14.60
3	Test Washing	2.29	114	2.61	0.23	2.84
4	Test Rubbing	3.58	108	3.87	0.35	4.22
5	Test Perspiration and Water	4.58	115	5.27	0.47	5.74
6	สรุปผลทดสอบ	5.53	110	6.08	0.55	6.63
รวม						40.90

จากตารางที่ 8 เวลามาตรฐานของกระบวนการทดสอบลูกไม้เส้น ประกอบด้วย 6 งานย่อย ได้แก่ เตรียมชิ้นงาน ตัดเย็บชิ้นงานก่อนทดสอบ Test Washing Test Rubbing Test Perspiration and Water และสรุปผลทดสอบ มีค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 6.87, 14.60, 2.84, 4.22, 5.74 และ 6.63 ตามลำดับ รวมเวลามาตรฐานการทดสอบต่อหนึ่งชิ้นงาน เท่ากับ 40.90 นาทีต่อชิ้น

ตารางที่ 9 เวลามาตรฐานของกระบวนการทดสอบอุปกรณ์

ลำดับที่	งานย่อย	เวลาเฉลี่ย สังเกตการณ์ (นาทีต่อชิ้น)	ค่าประเมิน ความเร็ว (ร้อยละ)	เวลาปกติ (นาทีต่อ ชิ้น)	ค่าเผื่อ (ร้อยละ 9)	เวลา มาตรฐาน (นาทีต่อ ชิ้น)
1	ติดตั้งชิ้นงานก่อนทดสอบ	8.47	114	9.66	0.87	10.53
2	Test Washing	2.29	108	2.47	0.22	2.69
3	Test Perspiration and Water	4.56	114	5.20	0.47	5.67
4	สรุปผลทดสอบ	5.62	108	6.10	0.55	6.65
รวม						25.54

จากตารางที่ 9 เวลามาตรฐานของกระบวนการทดสอบผ้า ประกอบด้วย 4 งานย่อย ได้แก่ ติดตั้งชิ้นงานก่อนทดสอบ Test Washing Test Perspiration and Water และสรุปผลทดสอบ มีค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 10.53, 2.69, 5.67 และ 6.65 ตามลำดับ รวมเวลามาตรฐานการทดสอบต่อหนึ่งชิ้นงาน เท่ากับ 25.54 นาทีต่อชิ้น

3. เปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานและการจ่ายค่าตอบแทน

จากการหาเวลามาตรฐานของกระบวนการทดสอบวัตถุดิบ ผู้วิจัยจึงนำเวลามาตรฐานคำนวณกับอัตราผลผลิตที่ได้ต่อวัน เพื่อเปรียบเทียบเวลาการทำงานกับเป้าหมายที่ผู้บริหารคาดหวังต่อวัน (ตามการปรับจำนวนพนักงาน) และคำนวณหาการจ่ายค่าตอบแทนตามเวลาการทำงาน เพื่อเปรียบเทียบการจ่ายค่าตอบแทนตามผลการปฏิบัติงาน แสดงดังตารางที่ 10 ผู้วิจัยใช้ข้อมูลเปรียบเทียบย้อนหลัง 1 เดือน (1-31 มกราคม พ.ศ.2565) หลังหักวันหยุดเท่ากับ 25 วัน บริษัททำงานวันละ 8 ชั่วโมง (ไม่รวม OT) ค่าตอบแทนวันละ 331 บาท

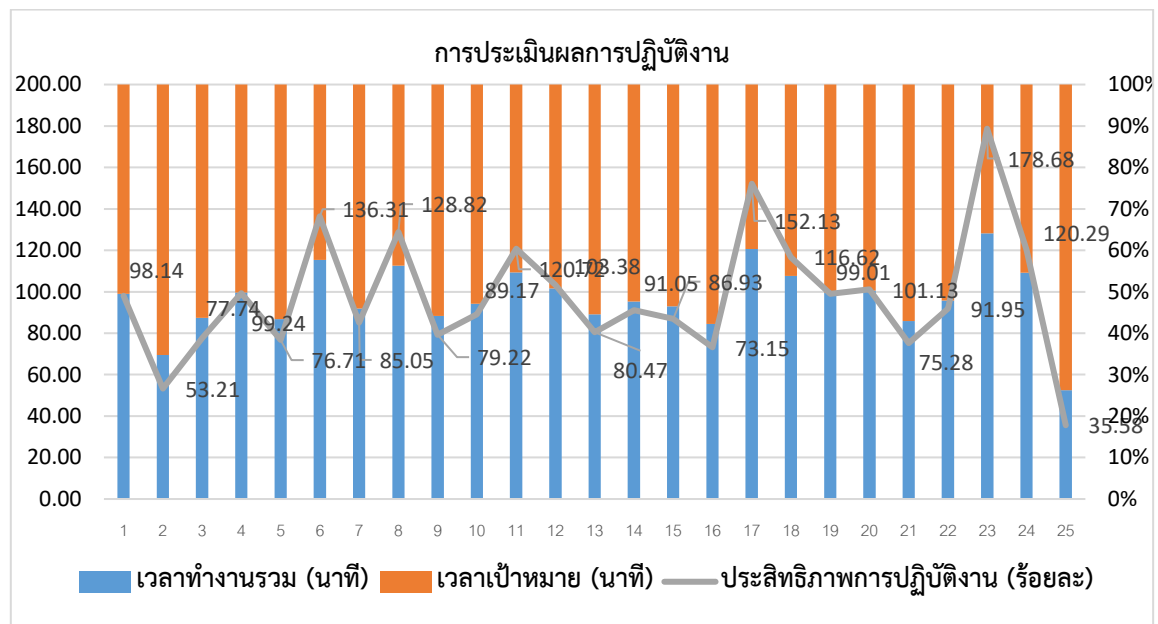
ตารางที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานและการจ่ายค่าตอบแทน

วันที่	จำนวนพนักงาน	OT	อัตราผลผลิต (ชิ้น)			การปฏิบัติงาน			การจ่ายค่าตอบแทน		
			ทดสอบผ้า (61.84)	ทดสอบลูกไม้เส้น (40.90)	ทดสอบอุปกรณ์ (25.54)	เวลาทำงานรวม(นาท)	เวลาเป้าหมาย (นาท)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าตอบแทนต่อเวลาทำงาน (บาท)	ค่าตอบแทนที่จ่ายจริง(บาท)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
1	1	-	2	1	12	471.06	480	98.14 ↓	325.03	331.20	-1.86
2	1	-			10	255.40	480	53.21 ↓	176.23	331.20	-46.79
3	2	4	6		22	932.92	1,200	77.74 ↓	643.71	828.00	-22.26
4	3	1	4	1	47	1,488.64	1,500	99.24 ↓	1,027.16	1,035.00	-0.76
5	3	1	12		16	1,150.72	1,500	76.71 ↓	794.00	1,035.00	-23.29
6	2	-	11	1	23	1,308.56	960	136.31 ↑	902.91	662.40	36.31
7	3	1	7		33	1,275.70	1500	85.05 ↓	880.23	1,035.00	-14.95
8	3	1	12	1	45	1,932.28	1500	128.82 ↑	1,333.27	1,035.00	28.82
9	3	1	6		32	1,188.32	1500	79.22 ↓	819.94	1,035.00	-20.78
10	3	1	8		33	1,337.54	1500	89.17 ↓	922.90	1,035.00	-10.83
11	3	1	14		37	1,810.74	1500	120.72 ↑	1,249.41	1,035.00	20.72
12	2	4	8	2	26	1,240.56	1200	103.38 ↑	855.99	828.00	3.38
13	3	1	3		40	1,207.12	1500	80.47 ↓	832.91	1,035.00	-19.53
14	3	1	13		22	1,365.8	1500	91.05 ↓	942.40	1,035.00	-8.95
15	3	1	12		22	1,303.96	1500	86.93 ↓	899.73	1,035.00	-13.07

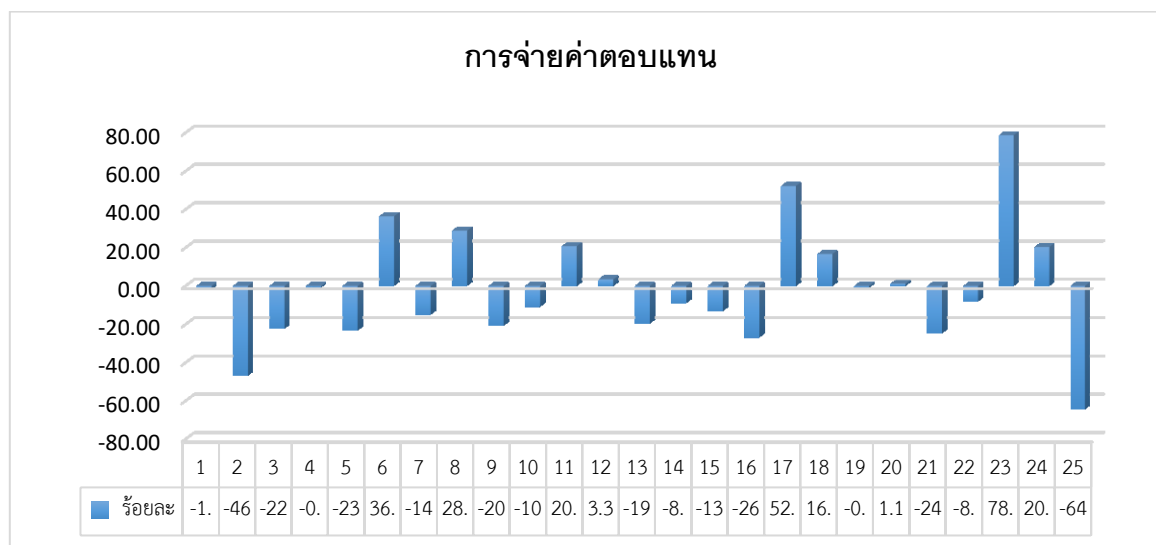
วันที่	จำนวน	OT	อัตราผลผลิต (ชิ้น)			การปฏิบัติงาน			การจ่ายค่าตอบแทน		
16	2	4	8		15	877.82	1200	73.15 ↓	605.70	828.00	-26.85
17	2	5	21	2	21	1,916.78	1260	152.13 ↑	1,322.58	869.40	52.13
18	2	4	9		33	1,399.38	1200	116.62 ↑	965.57	828.00	16.62
19	3	1	7	2	38	1,485.20	1500	99.01 ↓	1,024.79	1,035.00	-0.99
20	3	1	9	1	36	1,516.90	1500	101.13 ↑	1,046.66	1,035.00	1.13
21	3	1	10		20	1,129.20	1500	75.28 ↓	779.15	1,035.00	-24.72
22	2	7	4		40	1,268.96	1380	91.95 ↓	875.58	952.20	-8.05
23	2	-	17		26	1,715.32	960	178.68 ↑	1,183.57	662.40	78.68
24	1	4	5	3	17	866.08	720	120.29 ↑	597.60	496.80	20.29
25	2	4	10	1	22	427	1200	35.58 ↓	294.63	828.00	-64.42
รวม						30,871.96	31,740	97.27 ↓	21,301.65	21,900.60	-2.73

หมายเหตุ : เป้าหมายเวลาการทำงานแต่ละวันจะปรับตามจำนวนพนักงานและจำนวน OT * , ↓ = ทิศทางต่ำกว่าเป้าหมาย, ↑ = ทิศทางสูงกว่าเป้าหมาย

จากตารางที่ 10 แสดงเปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานและการจ่ายค่าตอบแทนของแผนกทดสอบวัตถุดิบย้อนหลัง 1 เดือน พบว่า กระบวนการทดสอบวัตถุดิบทั้งหมด มีเวลาทำงานรวม เท่ากับ 30,871.96 นาที และมีเป้าหมายที่คาดหวังตามจำนวนพนักงาน เท่ากับ 31,740 นาที ทำให้ประสิทธิภาพการปฏิบัติงานมีค่า ร้อยละ 97.27 และมีค่าตอบแทนต่อเวลาทำงาน เท่ากับ 21,301.65 บาท และค่าตอบแทนที่จ่ายจริง เท่ากับ 21,900.60 บาท ทำให้ประสิทธิภาพการจ่ายค่าตอบแทนตามผลการปฏิบัติงานต่ำกว่าค่าตอบแทนที่จ่ายจริง ร้อยละ 2.73 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานและการจ่ายค่าตอบแทนในแต่ละวัน แสดงดังภาพที่ 1-2



ภาพที่ 1 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของแผนกทดสอบวัตถุดิบย้อนหลัง 1 เดือน



ภาพที่ 2 แผนภูมิแสดงประสิทธิภาพการจ่ายค่าตอบแทนของแผนกทดสอบวัตถุดิบย้อนหลัง 1 เดือน

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยห้วงข้อการศึกษาเวลามาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานและการจ่ายค่าตอบแทนของแผนกทดสอบวัตถุดิบ กรณีศึกษาบริษัทผลิตชุดชั้นใน จากการศึกษางานและเก็บข้อมูลแผนกทดสอบวัตถุดิบ พบว่า มีพนักงานทั้งหมด 3 คน ทำหน้าที่สุ่มตัวอย่างจากวัตถุดิบที่ถูกส่งมาจากซัพพลายเออร์ทั้งภายในและภายนอกก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิต วัตถุดิบที่ทดสอบ ได้แก่ ผ้า ผ้าลูกไม้ ลูกไม้เส้น ตะขอ ห่วง และยาง กระบวนการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ กระบวนการทดสอบผ้า กระบวนการทดสอบลูกไม้เส้น และกระบวนการทดสอบอุปกรณ์ การทดสอบวัตถุดิบมีอัตราผลผลิตที่ต่ำและค่าล่วงเวลาที่สูง ซึ่งสาเหตุเกิดจากที่ทางแผนกยังไม่มีกำหนดเวลาและมาตรฐานการปฏิบัติงาน ทำให้มีความยากในการควบคุมและประเมินผลการปฏิบัติงาน (Performance Evaluation) ตามภาระงานที่กำหนด จากการศึกษาห้วงเวลามาตรฐาน

ของกระบวนการทดสอบวัตถุดิบ พบว่า 1) กระบวนการทดสอบผ้ามีค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 61.84 นาทีต่อชิ้น 2) กระบวนการทดสอบลูกไม้เส้นมีค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 40.90 นาทีต่อชิ้น และ 3) กระบวนการทดสอบผ้ามีค่าเวลามาตรฐาน เท่ากับ 25.54 นาทีต่อชิ้น เมื่อเปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานข้อมูลย้อนหลัง 1 เดือน พบว่า ใช้เวลาทำงานรวม เท่ากับ 30,871.96 นาที มีเป้าหมาย เท่ากับ 31,740 นาที ทำให้ประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน เท่ากับ ร้อยละ 97.27 และ คำนวณค่าตอบแทนต่อเวลาทำงาน เท่ากับ 21,301.65 บาท ค่าตอบแทนที่จ่ายจริง เท่ากับ 21,900.60 บาท ทำให้ ประสิทธิภาพการจ่ายค่าตอบแทนตามผลการปฏิบัติงานต่ำกว่าค่าตอบแทนที่จ่ายจริง ร้อยละ 2.73 ซึ่งจากการจัดทำเวลา มาตรฐานการปฏิบัติงาน ทำให้สามารถประเมินผลการปฏิบัติงาน การจ่ายค่าตอบแทน การจัดการการผลิต การวางแผน การผลิต การประเมินต้นทุน และการควบคุมต้นทุนแรงงานได้

ข้อเสนอแนะ

1. ควรพัฒนาการจัดทำเวลามาตรฐานและประเมินผลการปฏิบัติงานในทุกแผนก เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพแรงงานสูงสุด
2. ควรวิเคราะห์หาแนวทางในการลดความสูญเสียเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการทำงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] กิตติชัย อธิกุลรัตน์. (2562). การศึกษาเวลามาตรฐานการติดตั้งแม่พิมพ์ กรณีศึกษา หจก.แมกเนติก แอนเนกซ์ ชัฟฟลาย. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมคลธัญบุรี*. 17(1), 77-90.
- [2] จิตติมา อัครธิติน. (2556). *การประเมินผลการปฏิบัติงาน* [เอกสาร ไม่ได้ตีพิมพ์]. มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา.
- [3] ธัญวรรณ มาศวิวัฒน์. (2559). *การกำหนดเวลามาตรฐานในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเลนส์โดยใช้เทคนิค MOST สาขาวิชา การพัฒนางานอุตสาหกรรม*. [การค้นคว้าอิสระ ไม่ได้ตีพิมพ์]. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [4] ธนะรัตน์ รัตนกุล กันต์ธมน สุขกระจ่าง วันเพ็ญ ลับแสง และ อนุชสิทธิ์ ดั่งเจริญ. (20 กรกฎาคม 2561). เวลามาตรฐาน การปฏิบัติงานของพนักงานบริการ. [เอกสารนำเสนอ]. *การประชุมมหาดไทยวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 9*. จังหวัดสงขลา, ประเทศไทย.
- [5] นุชสรุา เกรียงกรกฎ. (2549). การคำนวณหาเวลามาตรฐานการทำงานของพนักงานในโรงงานตัดเย็บเสื้อผ้า กรณีศึกษา แผนกเย็บกางเกง รุ่น A1314. *วารสารวิชาการ ม.อบ*. 8(1), 79-88.
- [6] รัชต์วรรณ กาญจนปัญญาคม. (2552). *INDUSTRIAL WORK STUDY การศึกษางานอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ.
- [7] ลักขณา โกรธา และ ชาญชัย จารุภาชน. (2559). การศึกษาเวลามาตรฐานและการเปรียบเทียบการจ่ายค่าตอบแทนตาม ผลการปฏิบัติงาน : กรณีศึกษาหน่วยงานบริการและบริหารเภสัชกรรมผู้ป่วยนอกกลุ่มงานเภสัชโรงพยาบาลมหาวิทยาลัย นครราชสีมา. *วารสารเภสัชศาสตร์อีสาน*. 11(ฉบับพิเศษ), 144-155.
- [8] เสนาะ ตีเยาว์. (2543). *หลักบริหาร*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [9] Barnes, Ralph M. (1980). *Motion and Time Study : Design and Measurement of Work* (7th ed.). NY: John Wiley & Sons.
- [10] Salvendy, G. (Ed.). (2001). *Handbook of industrial engineering: technology and operations management*. John Wiley & Sons.

Received: Jun 13, 2022

Revised: Oct 1, 2022

Accepted: Oct 10, 2022

การพัฒนาเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร

DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL BEVERAGE FROM BANANA MIXED WITH HERBAL

จันวิภา สุปะกิ้ง

สาขาวิชาอุตสาหกรรมอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

Janwipa Supaking

Food Industry Program, Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University

E-mail: janwipa.p@dru.ac.th

บทคัดย่อ

กล้วยน้ำว้าเป็นผลไม้ที่คนไทยคุ้นเคย โดยนำมาบริโภคทั้งผลสดและนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ อย่างไรก็ตามกล้วยน้ำว้าเมื่อสุกจะมีอายุการเก็บรักษาสั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร ให้เครื่องดื่มมีอายุการเก็บรักษานานขึ้นและมีสีที่สวยงาม จากการศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องดื่มพบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบเครื่องดื่มที่มีอัตราส่วนระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำ เท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก และที่ระดับความหวาน เท่ากับ 12 องศาบริกซ์ สูงที่สุด จากนั้นประยุกต์ใช้สีธรรมชาติจากสมุนไพร 4 ชนิด มาเป็นส่วนผสม ได้แก่ ใบเตยหอม แก่นฝาง ดอกกระเจี๊ยบแดง และดอกอัญชัน โดยมีสูตรต้นแบบเป็นตัวอย่างควบคุม ได้ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 5 สี ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าผสมกระเจี๊ยบแดงมีคะแนนความชอบด้านสี กลิ่นรสและรสชาติสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าเครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าผสมกระเจี๊ยบแดงมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำที่สุดเท่ากับ 2.5 และมีปริมาณกรดทั้งหมดสูงที่สุดเท่ากับ 0.18% ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และสมบัติการยับยั้ง DPPH radical สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 73.32 mg GAE/100 g และ 278.15 mg ascorbic acid/L ตามลำดับ เครื่องดื่มทั้ง 5 สี ที่บรรจุในขวดแก้ว เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่า ยังคงมีปริมาณจุลินทรีย์ เป็นไปตามข้อกำหนดของประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 356 พ.ศ. 2556 เรื่อง เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิด

คำสำคัญ: เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ กล้วยน้ำว้า สมุนไพร

Abstract

Kluai Namwa is a traditional Thai fruit. It has consumed as fresh fruit or processed products. Unfortunately, a ripe banana has a short shelf life. This research aimed to develop functional beverages from banana mixed with various herbs to extend their shelf lives and to create varieties of beverage colours. From the study of appropriate formula for beverage formation, it was found that the highest overall liking score was the beverage formula with a ratio of banana pulp and water of 1:4 (w/w) and sweetness level of 12°Brix. After that 4 types of natural food colours, including Pandanus Palm, Sappan, Roselle and Butterfly pea, were added into a prototype formula which was used as a control group resulting in 5 different beverage colours. Sensory evaluation results showed that Roselle-banana mixed beverage was the highest scores in terms of colour, odour, and flavour characteristics. The Roselle-banana mixed beverage also showed the lowest pH of 2.5 and the highest acidity of 0.18%. The highest total phenolic content and DPPH radical scavenging activity were 73.32 mg GAE/100 g and 278.15 mg ascorbic acid/L, respectively. In addition, 5 formulas with 5 different colours were stored in glass bottles at 4°C for 12 weeks. It was found that all beverages exhibited acceptable microbiological quality according to the Notification of the Ministry of Public Health entitled "Beverages in Sealed Containers" No. 356 B.E. 2013.

Keywords: Functional beverage, Banana, Herbal

บทนำ

ปัจจุบันผู้บริโภคหันมาใส่ใจต่อสุขภาพมากขึ้น ทั้งในแง่การบริโภคอาหารและการดูแลสุขภาพ โดยเน้นการบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารที่มีปริมาณน้ำตาลและไขมันต่ำ และคำนึงถึงสารอาหารที่ให้ประโยชน์ต่อร่างกาย เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพประกอบด้วยสารให้ประโยชน์เชิงหน้าที่ (functional ingredient) ที่ส่งผลดีต่อสุขภาพ (ธีราพร ปฏิเวธวิฑูร และคณะ, 2563) เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคสูงขึ้น เนื่องจากมีความสะดวกในการบริโภค ดังจะเห็นได้จากผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพที่วางจำหน่ายในท้องตลาด เช่น เครื่องดื่มจากสมุนไพร เครื่องดื่มจากธัญพืช และเครื่องดื่มที่ให้พลังงานต่ำ เป็นต้น

กลัวย่น้ำว่าเป็นผลไม้ที่คนไทยคุ้นเคยและมีการนำกลัวย่น้ำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่อดีต โดยนิยมนำมาบริโภคทั้งผลสดและนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ผลิตภัณฑ์จากแป้งกลัวย่น้ำ แยมกลัวย่น้ำ กลัวย่น้ำบรรจุกระป๋อง ไซรัปกลัวย่น้ำ และกลัวย่น้ำเคลือบช็อกโกแลต เป็นต้น กลัวย่น้ำมีคุณค่าทางโภชนาการสูง อุดมไปด้วยวิตามินซี โพแทสเซียม และใยอาหาร (วลัย หุตะโกวิท และคณะ, 2553) มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต แคลเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก และวิตามินซีสูงกว่ากลัวย่น้ำและกลัวย่น้ำหอม กลัวย่น้ำ 100 กรัม ให้พลังงาน 90-93 แคลอรี ซึ่งเป็นพลังงานที่ร่างกายนำไปใช้ได้ง่าย (Kumar et al., 2013) นอกจากนี้กลัวย่น้ำยังมีประโยชน์ในด้านสมุนไพร ช่วยแก้ปัญหาลำไส้ เป็นยาระบาย และแก้โรคเบาหวาน เป็นต้น (เบญจมาศ ศิลาอ้อย, 2545) และเป็นที่ทราบกันดีว่าพืชสมุนไพรให้สีประกอบด้วยรงควัตถุให้สีชนิดต่าง ๆ จัดเป็นแหล่งสารพฤกษเคมี (phytochemicals) ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ ตัวอย่างของสารพฤกษเคมีที่พบในพืชสมุนไพรให้สี เช่น สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds) ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) และแอนโทไซยานิน (anthocyanins) เป็นต้น ซึ่งสารดังกล่าวมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ ช่วยป้องกันโรคต่าง ๆ เช่น โรคหัวใจ เบาหวาน ความดันโลหิตสูง และโรคมะเร็ง เป็นต้น (สายลม สัมพันธ์เวชโสภาค อภิรติ อุทัยรัตนกิจ และวิทวัส มิ่งวานิช, 2559) ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระจากพืชนั้นถือได้ว่าเป็นความปลอดภัยต่อการบริโภค

ปัญหาที่พบในการผลิตเครื่องดื่มจากกลัวย่น้ำ คือ การเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ สาเหตุเนื่องมาจากการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase) ที่มีอยู่ในกลัวย่น้ำ และการใช้ความร้อนในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำกลัวย่น้ำมาล้างทั้งเปลือกก่อน เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบใช้เอนไซม์ อีกทั้ง การประยุกต์ใช้สีจากธรรมชาติ ได้แก่ พืชสมุนไพรให้สี มาเป็นส่วนผสมในการผลิตเครื่องดื่มจากกลัวย่น้ำ ทำให้เครื่องดื่มที่ได้มีสีสันสวยงาม และมีประโยชน์ต่อสุขภาพ เนื่องจากมีสารพฤกษเคมีที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ

ดังนั้น เพื่อเป็นการนำวัตถุดิบทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม มีประโยชน์ต่อสุขภาพ สะดวกต่อการบริโภค และมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น งานวิจัยนี้จึงนำกลัวย่น้ำมาผสมผสานคุณค่าประโยชน์จากพืชสมุนไพรให้สีที่หาได้ง่าย และราคาไม่แพง ได้แก่ ใบเตยหอม แก่นฝาง ดอกกระเจี๊ยบแดง และดอกอัญชัน ในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพที่มีสีสันสวยงาม เกิดความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งสามารถนำไปผลิตเพื่อการต่อยอดเชิงพาณิชย์ ซึ่งส่งผลต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกลัวย่น้ำผสมสมุนไพร
2. เพื่อศึกษาคุณภาพและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บรักษาสีและรสชาติของเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกลัวย่น้ำผสมสมุนไพร

ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกลัวย่น้ำผสมสมุนไพร แล้วนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาศึกษาความชอบของผู้บริโภค จากนั้นศึกษาคุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลินทรีย์ระหว่างการเก็บรักษาสีและรสชาติของเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกลัวย่น้ำผสมสมุนไพร ตามประกาศ

กระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 356 พ.ศ. 2556 เรื่อง เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร

การศึกษานี้แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำในการผลิตเครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้า โดยนำกล้วยน้ำว้าระดับการสุกที่ 7-8 (เปลือกสีเหลืองเข้มขึ้นและเริ่มมีจุดสีน้ำตาลมากขึ้น ผลนิ่ม มีกลิ่นหอม ฉุน) มาล้างเปลือกด้วยไอน้ำ เป็นเวลา 8.30 นาที ปอกเปลือกเอาเฉพาะส่วนเนื้อ นำไปปั่นละเอียดกับน้ำโดยแปรอัตราส่วนระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 1:3 1:4 และ 1:5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ กรองด้วยผ้าขาวบางหยาบ 1-2 ครั้ง และกรองด้วยผ้าสำลีละเอียด 1-2 ครั้ง แล้วจึงเติมกรดซิตริก 0.3% และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) 0.3% ของน้ำหนักกล้วยน้ำว้า ปรับระดับความหวานด้วยน้ำตาลทรายให้ได้ 12°Brix นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 5 นาที บรรจุขณะร้อนลงในขวดแก้วที่สะอาดผ่านการลวกน้ำร้อนมาแล้วปริมาตร 180 มิลลิลิตร ปิดผนึกฝา และทำให้เย็นทันที นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) (9 หมายถึง ชอบมากที่สุด และ 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด) ในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นรส เนื้อสัมผัสรสชาติและความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบทั่วไปจำนวน 100 คน และขั้นตอนที่ 2 ศึกษาระดับความหวานที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้า โดยใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำจากขั้นตอนที่ 1 มาปรับความหวานของเครื่องดื่มด้วยน้ำตาลทราย 3 ระดับคือ 10 12 และ 14°Brix คำนวณโดยวิธีเพียร์สัน สแคว์ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ ในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นรส เนื้อสัมผัสรสหวาน และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบทั่วไปจำนวน 100 คน เพื่อใช้เป็นสูตรต้นแบบต่อไป

2. การประยุกต์ใช้สีธรรมชาติจากสมุนไพรเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์

การเตรียมน้ำสมุนไพรให้สี ได้แก่ 1) น้ำใบเตยหอม เตรียมโดยใช้ใบเตยหอม ปริมาณ 100 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร ปั่นหยาบเพื่อสกัดสี จากนั้นนำไปต้มจนเดือด แล้วจึงกรองด้วยผ้าขาวบาง (ดัดแปลงจากวิธีของ foodtravel.tv, 2555) 2) น้ำฝางเตรียมโดยใช้แก่นฝาง ปริมาณ 40 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร ต้มจนเดือด จากนั้นกรองสารละลายที่ได้ด้วยผ้าขาวบาง (ดัดแปลงจากวิธีของจิรพร สวัสดิการ และสาวิณี แก้วเกตุ, 2558) 3) น้ำกระเจี๊ยบแดง เตรียมโดยใช้ดอกกระเจี๊ยบแดงแห้ง ปริมาณ 20 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร ต้มจนเดือด จากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบาง (ตามวิธีของนันทราภรณ์ มงคล, 2546) และ 4) น้ำอัญชัน เตรียมโดยใช้ดอกอัญชันแห้งปริมาณ 10 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร ต้มจนเดือด จากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบาง (ดัดแปลงจากวิธีของ สมชาย วงศ์สุริยศักดิ์ และสุวิทย์ โชตินันท์, 2556) นำน้ำสมุนไพรที่ได้ทั้ง 4 สี มาเป็นส่วนผสมในการผลิต โดยใช้สูตรต้นแบบที่ได้จากข้อ 1 เป็นตัวอย่างควบคุม ซึ่งในขั้นตอนการผลิต พบว่า น้ำฝางและน้ำอัญชันจะทำปฏิกิริยากับกรดซิตริกและเปลี่ยนสีของสารละลายจากสีแดงเป็นสีเหลือง และจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินอมม่วง ส่วนสูตรผสมกระเจี๊ยบแดงจะไม่เติมกรดซิตริกในการผลิต เนื่องจากน้ำกระเจี๊ยบแดงมีรสชาติเปรี้ยวอยู่แล้วตามธรรมชาติ การเติมกรดซิตริกจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรสชาติเปรี้ยวเกินไป จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 5 สี ไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ ในด้านสี กลิ่นรส เนื้อสัมผัส รสชาติและความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบทั่วไปจำนวน 100 คน

3. การศึกษาคุณภาพและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร

นำผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร มาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ค่า pH ปริมาณกรดทั้งหมด (total titratable acidity) ในรูปของกรดซิตริก ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ด้วยวิธี Folin's method และการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH scavenging assay ส่วนการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร โดยเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในขวดแก้ว ปริมาตร 180 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 4°C วิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์ ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 356 พ.ศ. 2556 เรื่อง เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท ได้แก่ กลุ่ม E. coli และ Coliforms ปริมาณยีสต์และรา Salmonella spp และ Staphylococcus aureus โดยสุ่มตัวอย่างตรวจสอบคุณภาพทุก ๆ สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) ส่วนการศึกษาคุณภาพและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Randomized Complete Randomized Design, CRD) วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อประเมินผลความแตกต่างระหว่างตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

ผลการทดลอง

1. ผลการศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร

ผลการศึกษาความชอบของผู้ทดสอบต่อเครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าที่มีอัตราส่วนระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำที่แตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ โดยการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (ตารางที่ 1) พบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏไม่แตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ ($p>0.05$) คะแนนความชอบด้านกลิ่นรสและรสชาติ พบว่า ที่อัตราส่วนระหว่างกล้วยน้ำว้าต่อน้ำ เท่ากับ 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนัก มีค่าไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) คะแนนด้านเนื้อสัมผัส พบว่า ที่อัตราส่วนระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำ เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก มีคะแนนต่ำที่สุด ($p\leq 0.05$) เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณเนื้อกล้วยน้ำว้าสูงที่สุด ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดสูงกว่า ส่วนคะแนนด้านความชอบโดยรวม พบว่า เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าที่มีอัตราส่วนระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำ เท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก มีคะแนนสูงที่สุด ($p\leq 0.05$) ดังนั้น จึงเลือกอัตราส่วนระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำ เท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้ในการศึกษาระดับความหวานที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าต่อไป

ตารางที่ 1 คะแนนการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าที่มีอัตราส่วนระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำที่แตกต่างกัน 3 ระดับ*

คุณลักษณะ	อัตราส่วนระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำ		
	1:3	1:4	1:5
ลักษณะปรากฏ ^{ns}	7.28±0.98	7.22±0.97	7.18±0.81
กลิ่นรส	7.04±1.10 ^b	6.60±1.15 ^b	6.49±1.37 ^a
เนื้อสัมผัส	6.65±1.23 ^a	7.23±1.46 ^b	7.47±1.29 ^b
รสชาติ	7.36±0.92 ^b	7.34±0.97 ^b	6.82±1.23 ^a
ความชอบโดยรวม	7.15±1.06 ^a	7.58±1.07 ^b	7.27±1.14 ^a

*อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ผลการศึกษาระดับความหวานที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้า ด้วยการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (ตารางที่ 2) โดยใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำ เท่ากับ 1:4 จากขั้นตอนที่ 1 มาปรับความหวานของเครื่องดื่มด้วยน้ำตาลทราย ที่ความเข้มข้น 3 ระดับ คือ 10 12 และ 14°Brix พบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ ($p>0.05$) คะแนนความชอบด้านกลิ่นรส พบว่า ที่ระดับความหวาน 12°Brix มีค่าไม่แตกต่างจากระดับความหวาน 10 และ 14°Brix ($p>0.05$) ส่วนคะแนนความชอบด้านรสหวานและด้านความชอบโดยรวม พบว่า ที่ระดับความหวาน 12°Brix มีค่าไม่แตกต่างจากระดับความหวาน 14°Brix ($p>0.05$) ดังนั้น จึงเลือกระดับความหวานที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้า เท่ากับ 12°Brix เนื่องจากใช้ปริมาณน้ำตาลทรายน้อยกว่า

ตารางที่ 2 คะแนนการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าที่มีระดับความหวานที่แตกต่างกัน 3 ระดับ*

คุณลักษณะ	ระดับความหวาน		
	10°Brix	12°Brix	14°Brix
ลักษณะปรากฏ ^{ns}	7.30±1.07	7.25±0.98	7.38±0.72
กลิ่นรส	6.77±1.10 ^a	7.02±1.04 ^{ab}	7.10±1.23 ^b
เนื้อสัมผัส ^{ns}	7.18±0.86	7.27±1.32	7.12±1.49
รสหวาน	6.74±1.07 ^a	7.43±0.92 ^b	7.31±0.83 ^b
ความชอบโดยรวม	6.96±1.09 ^a	7.45±1.02 ^b	7.44±1.03 ^b

*อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

2. ผลการประยุกต์ใช้สีธรรมชาติจากสมุนไพรเพื่อเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์

ในการศึกษาการประยุกต์ใช้สีธรรมชาติจากสมุนไพรเป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มสีสันให้แก่ผลิตภัณฑ์ และมีประโยชน์ต่อสุขภาพ เนื่องจากมีสารพฤกษเคมีที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ โดยเลือกใช้สีจากสมุนไพร 4 ชนิด ได้แก่ ใบเตยหอม แก่นฝาง ดอกกระเจี๊ยบแดง และดอกอัญชัน และสีดั้งเดิมของผลิตภัณฑ์ โดยใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำสมุนไพรเท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก และระดับความหวานที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์เท่ากับ 12°Brix ได้ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 5 สี (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าสูตรต้นแบบ (a) สูตรผสมเตยหอม (b) สูตรผสมฝาง (c) สูตรผสมกระเจี๊ยบแดง (d) และสูตรผสมอัญชัน (e)

ผลการศึกษาความชอบของผู้ทดสอบต่อเครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพรทั้ง 5 สี โดยการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (ตารางที่ 3) พบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านสี กลิ่นรสและรสชาติ ในเครื่องดื่มสูตรผสมกระเจี๊ยบแดง สูงที่สุด ส่วนสูตรผสมเตยหอมมีคะแนนต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบเครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าทั้ง 5 สี ในด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$)

ตารางที่ 3 คะแนนการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพรทั้ง 5 สี*

คุณลักษณะ	เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้า				
	สูตรต้นแบบ	ผสมเตยหอม	ผสมฝาง	ผสมกระเจี๊ยบแดง	ผสมอัญชัน
สี	7.16±1.33 ^{ab}	7.03±1.24 ^a	7.46±1.24 ^{bc}	7.58±1.16 ^c	7.36±1.24 ^{abc}
กลิ่นรส	7.48±1.31 ^b	6.99±1.42 ^a	7.17±1.40 ^{ab}	7.47±1.45 ^b	7.15±1.39 ^{ab}

เนื้อสัมผัส ^{ns}	7.50±1.18	7.31±1.24	7.34±1.29	7.31±1.31	7.27±1.38
รสชาติ	7.28±1.36 ^{ab}	7.04±1.31 ^a	7.24±1.23 ^{ab}	7.46±1.28 ^b	7.12±1.30 ^{ab}
ความชอบ	7.54±1.34	7.25±1.21	7.31±1.41	7.42±1.17	7.38±1.14
โดยรวม ^{ns}					

*อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3. ผลการศึกษาคุณภาพและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร

ผลการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร ทั้ง 5 สีส โดยตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี (ตารางที่ 4) พบว่า ค่า pH ของเครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าสูตรต้นแบบ สูตรผสมเตยหอม สูตรผสมฝรั่ง และสูตรผสมอัญชันมีค่าใกล้เคียงกัน ($p > 0.05$) ส่วนสูตรผสมกระเจี๊ยบแดงมีค่าต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$) และสอดคล้องกับปริมาณกรดทั้งหมด ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/100 g) และสมบัตินิการยับยั้ง DPPH radical (mg ascorbic acid/L) พบว่า สูตรผสมกระเจี๊ยบแดงมีค่าสูงที่สุด ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4 คุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร ทั้ง 5 สี*

เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้า	คุณภาพทางเคมี			
	pH	ปริมาณกรดทั้งหมด (%)	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/100 g)	สมบัตินิการยับยั้ง DPPH radical (mg ascorbic acid/L)
สูตรต้นแบบ	3.51±0.01 ^b	0.13±0.01 ^a	11.96±1.41 ^a	35.12±0.38 ^a
สูตรผสมเตยหอม	3.32±0.01 ^b	0.12±0.01 ^a	18.30±0.83 ^b	87.48±0.71 ^b
สูตรผสมฝรั่ง	3.35±0.01 ^b	0.13±0.01 ^a	17.14±1.47 ^b	66.75±0.94 ^b
สูตรผสมกระเจี๊ยบแดง	2.50±0.01 ^a	0.18±0.02 ^b	73.32±0.91 ^d	278.15±1.61 ^d
สูตรผสมอัญชัน	3.07±0.58 ^b	0.13±0.01 ^a	31.48±0.91 ^c	173.61±3.31 ^c

*อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลินทรีย์ระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร ที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่า ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร ทั้ง 5 สี ยังคงมีคุณภาพทางจุลินทรีย์ ได้แก่ ปริมาณ *E. coli* Coliforms ยีสต์และรา *Salmonella* spp. และ *Staphylococcus aureus* เป็นไปตามข้อกำหนดของประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 356 พ.ศ. 2556 เรื่อง เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 คุณภาพทางจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร ทั้ง 5 สี ที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้า	คุณภาพทางจุลินทรีย์				
	<i>E. coli</i> (MPN/ml)	Coliforms (MPN/ml)	ยีสต์และรา (CFU/ml)	<i>Salmonella</i> spp. (CFU/ml)	<i>Staphylococcus aureus</i> (CFU/ml)
สูตรต้นแบบ	ไม่พบ	<0.3	<100	ไม่พบ	ไม่พบ

สูตรผสมเตยหอม	ไม่พบ	<0.3	<100	ไม่พบ	ไม่พบ
สูตรผสมผง	ไม่พบ	<0.3	<100	ไม่พบ	ไม่พบ
สูตรผสมกระเจี๊ยบ	ไม่พบ	<0.3	<100	ไม่พบ	ไม่พบ
สูตรผสมอัญชัน	ไม่พบ	<0.3	<100	ไม่พบ	ไม่พบ

สรุปผลวิจัยและอภิปรายผล

จากการศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร พบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าที่มีอัตราส่วนระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำเท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก สูงที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Moneshkumar (2001) ที่พบว่า อัตราส่วนระหว่างเนื้อกล้วยต่อน้ำเท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก ได้รับคะแนนความชอบจากผู้ทดสอบสูงสุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเจือจางเครื่องดื่มส่งผลให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลน้ำตาลให้มีขนาดเล็กลง (Thomson, 1995) อีกทั้ง เพคตินเป็นสารที่พบมากในกล้วยน้ำว้า ซึ่งถูกห่อหุ้มด้วยเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส กล้วยดิบจึงมีเนื้อแข็ง เพคตินส่วนใหญ่จะไม่ละลายน้ำ ต่อมาเมื่อกล้วยสุกและมีเนื้อสัมผัสนิ่มลง เพคตินจะสามารถละลายกับน้ำได้บางส่วน ดังนั้นในระหว่างกระบวนการผลิต เมื่อเนื้อเยื่อของกล้วยถูกทำลาย เพคติน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสบางส่วนก็จะละลายออกมา บางส่วนก็ยังแขวนลอยอยู่ในน้ำกล้วย ส่งผลให้เครื่องดื่มจากกล้วยมีความหนืด และบางส่วนก็ยังคงอยู่ในผนังเซลล์ (วนิดา โอศิริพันธ์, 2559) ซึ่งสอดคล้องกับคะแนนความชอบของผู้ทดสอบด้านเนื้อสัมผัสที่พบว่า เครื่องดื่มกล้วยน้ำว้าที่มีอัตราส่วนระหว่างเนื้อกล้วยน้ำว้าต่อน้ำเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก มีคะแนนต่ำที่สุด ส่วนระดับความหวานที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าเท่ากับ 12°Brix ทั้งนี้ ปรรัตน์ ศุภมิตรโยธิน (2556) ได้กล่าวว่า การเติมน้ำตาลเพื่อปรับระดับความหวานของเครื่องดื่ม โดยทั่วไปจะเติมไม่เกิน 13°Brix หรืออาจกล่าวได้ว่าจะมีการเติมน้ำตาลซูโครสได้อีกความเข้มข้นไม่เกิน 6-7%

จากการศึกษาความชอบของผู้ทดสอบต่อเครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าที่มีการประยุกต์ใช้สีธรรมชาติจากสมุนไพรมาเป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มสีสันให้แก่ผลิตภัณฑ์ทั้ง 5 สี พบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบเครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพรทั้ง 5 สี ในด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกัน โดยคะแนนความชอบด้านสี กลิ่นรสและรสชาติ พบว่า สูตรผสมกระเจี๊ยบแดงมีคะแนนสูงที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกลิ่นรสและรสชาติของกระเจี๊ยบแดงเป็นที่คุ้นเคยของผู้บริโภค

ผลการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร ทั้ง 5 สี พบว่า ค่า pH ของเครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าสูตรต้นแบบ สูตรผสมเตยหอม สูตรผสมผง และสูตรผสมอัญชันมีค่าใกล้เคียงกัน และสอดคล้องกับปริมาณกรดทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องมาจากการควบคุมปริมาณกรดซิตริกที่เติมลงไปให้มีความเข้มข้นเท่ากัน ส่วนสูตรผสมกระเจี๊ยบแดงมีค่า pH ต่ำที่สุด สอดคล้องกับปริมาณกรดทั้งหมด ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสมบัติการยับยั้ง DPPH radical พบว่า สูตรผสมกระเจี๊ยบแดงมีค่าสูงที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ เอนก หาลี และบุญยกฤต รัตนพันธุ์ (2560) ที่ศึกษาประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระจากพืชผักสมุนไพรพื้นบ้าน 15 ชนิด พบว่า กระเจี๊ยบแดงมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าสมุนไพรชนิดอื่น โดยเฉพาะ DPPH radical ที่มีค่าสูงที่สุด รวมถึงมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงที่สุด ทั้งนี้สารประกอบฟีนอลิกจากธรรมชาติ เป็นสารที่มีประโยชน์และสามารถรับประทานได้ในปริมาณ 20 มิลลิกรัม ถึง 1 กรัมต่อวัน ซึ่งสามารถรับประทานได้มากกว่าวิตามินอี (Vajragupta et al., 2006) แสดงให้เห็นว่าเครื่องดื่มจากกล้วยน้ำว้าผสมกระเจี๊ยบแดงมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงถึง 73.32 (mg GAE/100 g) และอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการบริโภคและมีความปลอดภัย

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลินทรีย์ระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร ที่เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในขวดแก้ว ปริมาตร 180 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่า ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากกล้วยน้ำว้าผสมสมุนไพร ทั้ง 5 สี ยังคงมีคุณภาพทางจุลินทรีย์ ได้แก่ ปริมาณ E. coli Coliforms ยีสต์และรา Salmonella spp. และ Staphylococcus aureus เป็นไปตามข้อกำหนดของประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 356 พ.ศ. 2556 เรื่อง เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท เนื่องจากเครื่องดื่มที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นกรดสูง (pH ต่ำ) จึงไม่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจากงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี ที่ได้รับการเห็นชอบจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ พ.ศ. 2561

เอกสารอ้างอิง

- [1] จิรพร สวัสดิการ และ สาวีณี แก้วเกตุ. (2558, 18-19 มิถุนายน). *การพัฒนาเครื่องดื่มสมุนไพรจากผลไม้สดรสเปรี้ยว*. [Poster presentation]. การประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ “สร้างสรรค์และพัฒนาเพื่อก้าวหน้าสู่ประชาคมอาเซียน” มหาวิทยาลัยนครราชสีมา.
- [2] อธิพร ปฏินันท์, บุญมี กวินเสกสรร, สมบัติ ทิฆัมพร และ อธิพร อธิพรพงศ์. (2563). นวัตกรรมผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มรสเปรี้ยว. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี*. 4(1), 55-63.
- [3] นันทารักษ์ มงคล. (2546). *น้ำผักผลไม้เพื่อสุขภาพ*. สำนักพิมพ์ไพลินบุ๊คเนต กรุงเทพฯ.
- [4] เบญจมาศ ศิลาอ้อย. (2545). *กล้วย*. (พิมพ์ครั้งที่ 3). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [5] ประจักษ์ สุจริตโยธิน. (2556). *เทคโนโลยีผักและผลไม้*. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- [6] กระทรวงสาธารณสุข. (2556). *เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท*. http://food.fda.moph.go.th/law/data/announ_moph/P356.pdf.
- [7] วณิดา โอศิริพันธ์. (2559). การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำกล้วยหอมอัดก๊าซ. *วารสารวิจัยรามคำแหง (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*. 19(1), 40-53.
- [8] วลัย หุตะโกวิท, บุศรา สร้อยระย้า, ชมพูนุช เผื่อนพิภพ และ ดวงกมล ตั้งสฤติพร. (2553). *การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารจากกล้วยตากแห้งด้วยเทคโนโลยีเอกซตรัคชัน*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- [9] สมชาย วงศ์สุริยศักดิ์ และ สุวิทย์ โชติรัตน์. (2556). *การพัฒนาเครื่องดื่มสมุนไพรจากดอกอัญชันและการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์*. <http://j-com-dev-and-life euaoop.cmu.ac.th /uploads/file/bcdfkpru1269.pdf>.
- [10] สายลม สัมพันธ์เวชโสภา, อภิรัตน์ อุทัยรัตนกิจ และวิฑูรย์ มิ่งวานิช. (2559). *การพัฒนาผลิตภัณฑ์กล้วย*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [11] เอนก หาลิ และ บุญยฤดี รัตนพันธ์. (2560). การศึกษาประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระจากพืชผักสมุนไพรพื้นบ้าน 15 ชนิด. *วารสารวิจัยและพัฒนา, มจร*. 40, 283-293.
- [12] Foodtravel.tv. (2555, 26 กุมภาพันธ์). *น้ำใบเตย*. http://www.foodtravel.tv/recfoodShow_Detail.aspx?viewId=1281.
- [13] Kumar, V., Singh, S. K., Kumar, V. and Yadav, A. (2013). Development and Qualitative Evaluation of Banana and Kinnow Based RTS Beverage. *Madras Agricultural Journal*, 100 (7-9), 782-787.
- [14] Moneshkumar, M., P. (2001). *Development of process technology for preparation of banana beverage*. [Master's Thesis], Indira Gandhi Agricultural University.
- [15] Thompson, A. (1995). Banana processing in Bananas and Plantains. *Chapman & Hall Publisher*, 481-492.
- [16] Vajragupta, O., Boonchoong, P., Boonyarat, C. and Utsintong, M., (2006). *Radical Scavenging Agents*. Chulalongkorn University.

Received: Jun 14, 2022

Revised: Sep 20, 2022

Accepted: Sep 27, 2022

อินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน 7-LEVEL H-BRIDGE CASCADED INVERTER FOR RENEWABLE ENERGY SOURCE

บุญธง วสุรีย์¹, บัญชา หิรัญสิงห์^{2,*} และ อนูวัฒน์ จางวนิชเลิศ³¹สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม³ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังBoonthong Wasuri¹, Bancha Hiransing^{2,*} และ Anuwat Jangwanitlert³¹Department of Industrial Art, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University²Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

E-mail: bancha@webmail.npru.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนออินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน วงจรใช้อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ชนิดเอช-บริดจ์ จำนวน 3 ชุด ต่ออนุกรมกัน ส่วนด้านขาเข้านำแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์ ซึ่งแหล่งจ่ายแต่ละชุดแบบแยกอิสระต่อกัน วงจรควบคุมใช้เทคนิคการควบคุมแบบพีดีเบิลยูเอ็มไซน์ชนิดพีดีในการควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ตัวควบคุมการทำงานใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เบอร์ TMS320F28335 ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink กำหนดสัญญาณพีดีเบิลยูเอ็มไซน์ออกมา 12 สัญญาณ วงจรสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกเท่ากับ 180 Vp เพื่อศึกษาถึงระดับความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันไฟฟ้าด้านออก งานวิจัยนี้ใช้การจำลองการทำงานโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อยืนยันผลทดลองจากเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์, อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์, บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล, แหล่งจ่ายพลังงานทดแทน, ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม

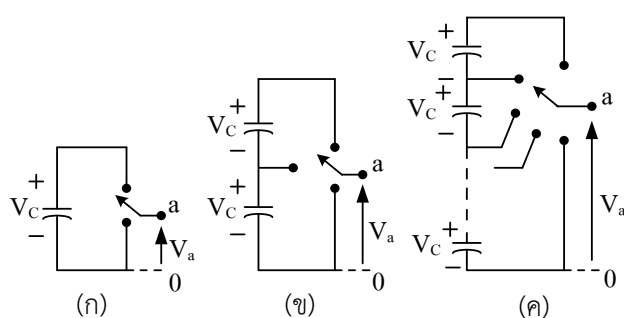
Abstract

This paper presents the 7-level H-bridge cascaded inverter for renewable energy source. The inverter based on 3 H-bridge single phase inverters that are separated is connected in series. The inverter is supplied from the dc source. The control circuit using Sinusoidal Pulse-Width Modulation (SPWM) technique with PD for controlling switches in the inverter. The control signal generated by Digital Signal Processing (DSP) #TMS320F28335 processor with MATLAB/Simulink is provided for 12 SPWM signals to output port. The 7-Level H-Bridge Cascaded Inverter can generate the output ac voltage 180 Vp from dc voltage source and can be measured the total harmonics distortion (THD) with varies modulation index (m_a). The simulation results obtained from the MATLAB/Simulink program have confirmed the proposed circuit.

Keywords: Inverter, H-Bridge Multilevel Inverter, Digital Signal Processing Board, Renewable Energy Source, Total Harmonics Distortion.

บทนำ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) เป็นที่นิยมและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันเช่น การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานไปยังระบบไฟฟ้า (Grid Connect Inverter) การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Drive) กำลังสูงในงานอุตสาหกรรม ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System) และพลังงานทดแทนอื่นๆ เป็นต้น อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีคุณสมบัติคือ ให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกสูงขึ้น ความถี่ของรูปคลื่นไซน์มากยิ่งขึ้นและความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (THD) ต่ำกว่า ด้วยคุณสมบัติที่ดีกว่าในเรื่องของรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกที่ ดังนั้นจึงได้รับความสนใจในการศึกษาและอย่างต่อเนื่อง อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีโครงสร้างพื้นฐานคือ การนำเอาอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังตัวหลายๆ ตัวมาต่ออนุกรมกัน จึงสามารถใช้กับงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งภาพ ก) แสดงสวิตซ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 ระดับ ภาพ ข) แสดงอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ และ ภาพ ค) แสดงอินเวอร์เตอร์หลายระดับ



ภาพที่ 1 พื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับโดยทั่วไปมีการใช้งานในปัจจุบันมี 3 ชนิดหลักๆ คือ อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ (Diode-Clamp Multilevel Inverter) อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาปาซิเตอร์แคลมป์ (Capacitor-Clamp Multilevel Inverter) และอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์คาสเคดเซลล์ (H-Bridge Multilevel Inverter)] นอกจากนี้ยังมีอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดอื่นๆ อีก เช่น อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเจนเนอรัลไลซ์ (Generalized Multilevel Inverter) อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดผสมระดับไฮบริดจ์ (Mixed-Level Hybrid Multilevel Inverter) อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแบ็คทูแบ็คไดโอดแคลมป์ (Back to Back Diode-clamp Multilevel Inverter) เป็นต้น

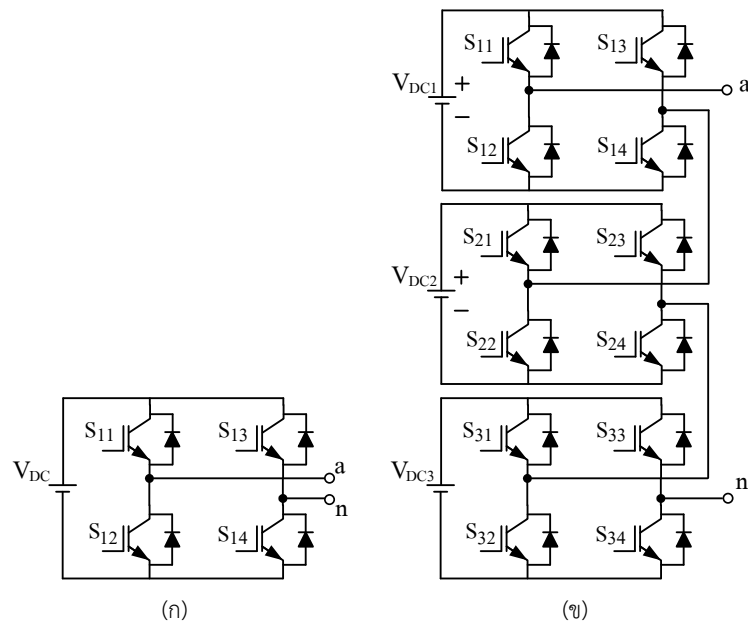
1. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์มีโครงสร้างวงจรที่ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือไดโอดและอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง โดยอุปกรณ์สวิตซ์กำลังจะต่อกันในลักษณะอนุกรมกันเพื่อสร้างขนาดพิคกิ้งของแรงดันด้านขาออกและระดับแรงดันด้านขาออก ระหว่างจุดแรงดันภายในจะถูกต่อด้วยไดโอด 2 ตัวแคลมป์บัสนและบัสล่าง สำหรับคุณสมบัติของไดโอดแคลมป์นั้นจำเป็นต้องมีขนาดพิคกิ้งที่ต่างกันตามระดับแรงดันที่จุดต่อแรงดันภายใน

2. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาปาซิเตอร์แคลมป์

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาปาซิเตอร์แคลมป์หรืออินเวอร์เตอร์หลายระดับฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying Capacitor Multilevel Inverter) มีโครงสร้างคือ ใช้ตัวเก็บประจุต่อแคลมป์เข้ากับอุปกรณ์สวิตซ์เพื่อถ่ายโอนแรงดันไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ไฟฟ้าในวงจร สถานะการสวิตซ์คล้ายกับแบบไดโอดแคลมป์ อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ไดโอดแคลมป์

แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านอินพุต เมื่อทำงานที่ความถี่สวิตช์สูงๆ จะทำให้มีการสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์เกิดขึ้น



ภาพที่ 2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์ (ก) 3 ระดับ (ข) 5 ระดับ

3. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์มีโครงสร้างคือนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์หรืออินเวอร์เตอร์เอช-บริดจ์มาต่ออนุกรมกัน ซึ่งอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดสามารถให้แรงดันด้านขาออกเป็น $+V_{dc}$, 0 และ $-V_{dc}$ โดยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดแยกอิสระต่อกัน จึงสามารถต่อเข้ากับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์เชื้อเพลิง หรือ แบตเตอรี่ ได้

จำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์มีความสัมพันธ์กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าหรือจำนวนเซลล์ของอินเวอร์เตอร์ชนิดเอช-บริดจ์คือ

$$m = 2s + 1 \quad (1)$$

จำนวนอุปกรณ์สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์มีความสัมพันธ์กับจำนวนระดับของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาออกคือ

$$n = 2 \times (m - 1) \quad (2)$$

วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์ แสดงดังภาพที่ 2 (ก) แสดงอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ และภาพ (ข) แสดงอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ และเปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดต่างๆ

ลำดับ	ชนิดอินเวอร์เตอร์หลายระดับ	ไดโอดแคลมป์	ฟลายอิงคาปาซิเตอร์	เอช-บริดจ์คาสเคดเซลล์
1	จำนวนสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	$2 \times (m-1)$	$2 \times (m-1)$	$2 \times (m-1)$
2	จำนวนไดโอดแคลมป์	$(m-1) \times (m-2)$	0	0
3	จำนวนตัวเก็บประจุบัสกระแสดตรง	$(m-1)$	$(m-1)$	$(m-1)/2$
4	ตัวเก็บประจุบาลานซ์	0	$(m-1) \times (m-2)/2$	0
5	การประยุกต์ใช้งาน	- ขับมอเตอร์ - STATCOM	- ขับมอเตอร์ - STATCOM	- ขับมอเตอร์ - PV system - Fuel Cell - Battery System

การควบคุมและวิธีการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

การควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การสวิตช์ที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental Switching Frequency) และการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มความถี่สูง (High Switching Frequency PWM) ดังนี้

1. การสวิตช์ที่ความถี่มูลฐาน

การสวิตช์ที่ความถี่มูลฐานเป็นใช้สัญญาณพัลส์ที่ความถี่การสวิตช์เท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า (50 เฮิร์ตซ์ หรือ 50 เฮิร์ตซ์) ไปขับนำอุปกรณ์สวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีข้อได้เปรียบคือสามารถลดค่าฮาร์โมนิกส์และปรับปรุงค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Total Harmonics Distortion: THD) ลงได้ จึงทำให้ค่าความสูญเสียจากการสวิตช์ (Switching Loss) ต่ำกว่า

2. การสวิตช์แบบสัญญาณคลื่นพาหะหลายระดับพีดับเบิลยูเอ็มไซน์

การสวิตช์แบบสัญญาณคลื่นพาหะหลายระดับพีดับเบิลยูเอ็มไซน์ โดยทั่วไปแล้วในงานอุตสาหกรรมมักนิยมใช้การสวิตช์ความถี่สูงแบบพีดับเบิลยูเอ็มไซน์ โดยสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่คงที่ 4 แบบคือ เทคนิคพีดี (Phase Disposition: PD) ซึ่งมุมเฟสเริ่มต้นในแต่ละคลื่นพาหะมีมุมเฟสตรงกัน เทคนิคพีโอดี (Phase Opposition Disposition: POD) มีมุมเฟสเริ่มต้นในซีกบวกจะแตกต่างกันเท่า 180 องศาและ ส่วนเทคนิคเอพีโอดี (Alternative Phase Opposition Disposition: APOD) มีมุมเฟสเริ่มต้นในแต่ละคลื่นพาหะแตกต่างกันเท่า 180 องศา จากคลื่นพาหะรอบข้างการมอดูเลตความถี่พัลส์ในวงจรอินเวอร์เตอร์จะทำการมอดูเลชันระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณคลื่นพาหะ สามารถหาค่าอัตราการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดและอัตราการมอดูเลตเชิงความถี่ดังนี้

$$m_a = \frac{A_{\text{sine}}}{A_{\text{carrier}}} \quad (4)$$

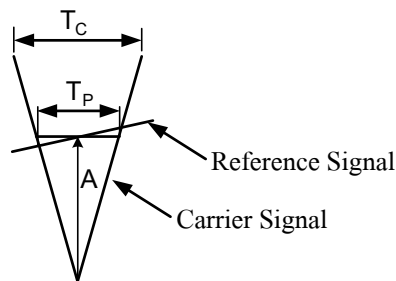
$$m_f = \frac{F_{\text{carrier}}}{F_{\text{sine}}} \quad (5)$$

เมื่อ m_a คือ อัตราการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด, m_f คือ อัตราการมอดูเลตเชิงความถี่, A_{sine} คือ ขนาดสัญญาณไซน์อ้างอิง, A_{carrier} คือ ขนาดสัญญาณคลื่นพาหะสามเหลี่ยม, F_{carrier} คือ ความถี่สัญญาณคลื่นพาหะสามเหลี่ยม, F_{sine} คือ ความถี่สัญญาณไซน์อ้างอิง

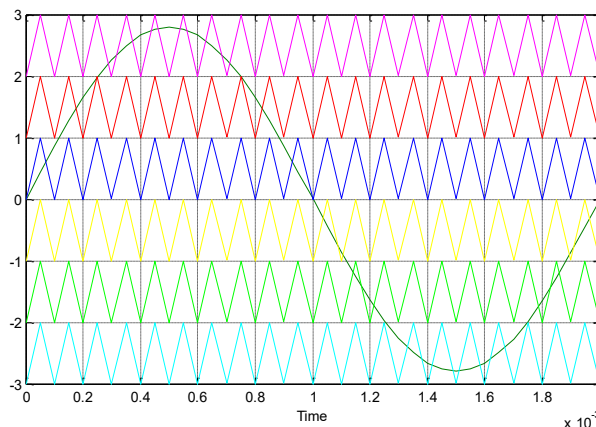
การมอดูเลตความกว้างพัลส์สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้ควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะใช้การมอดูเลชันระหว่างสัญญาณไซน์อ้างอิงกับสัญญาณคลื่นพาหะสามเหลี่ยม โดยค่าความกว้างของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มนั้นจะขึ้นอยู่กับความสูงของสัญญาณไซน์อ้างอิงเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงของสัญญาณคลื่นพาหะ [3] ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณคลื่นพาหะและสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 6

$$\frac{T_P}{T_C} = A \quad ; 0 \leq A \leq 1 \quad (6)$$

เมื่อ T_P คือ ความกว้างพัลส์ของสัญญาณด้านออก, T_C คือ คาบเวลาของสัญญาณคลื่นพาหะ, A คือ ความสูงของสัญญาณอ้างอิง



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณคลื่นพาหะ



ภาพที่ 4 การมอดูเลชันความกว้างพัลส์แบบสัญญาณคลื่นพาหะหลายระดับพีดับเบิลยูเอ็มไซน์พีดี

โดยแรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบแคสเคดเซลล์ จะมีความสัมพันธ์กับดัชนีการมอดูเลต (m_a) และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า (V_{dc}) ตามสมการที่ 7

$$V_{1,Peak} = m_a \cdot V_{dc} \quad ; (m_a \leq 1) \quad (7)$$

โดยที่

$$V_{dc} = sE \quad (8)$$

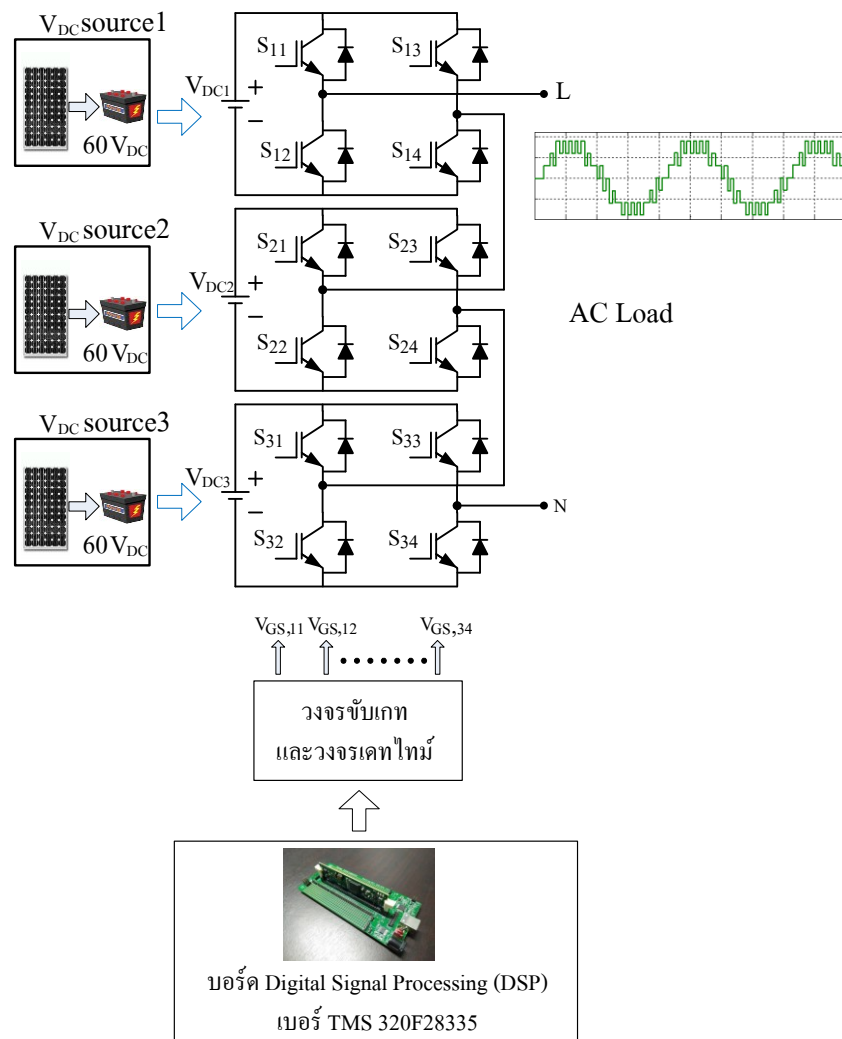
เมื่อ E คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ย่อย, s คือ จำนวนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า

วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบวงจรที่ใช้ในการวิจัย

1. วงจรอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบแคสเคดเซลล์ในการวิจัย

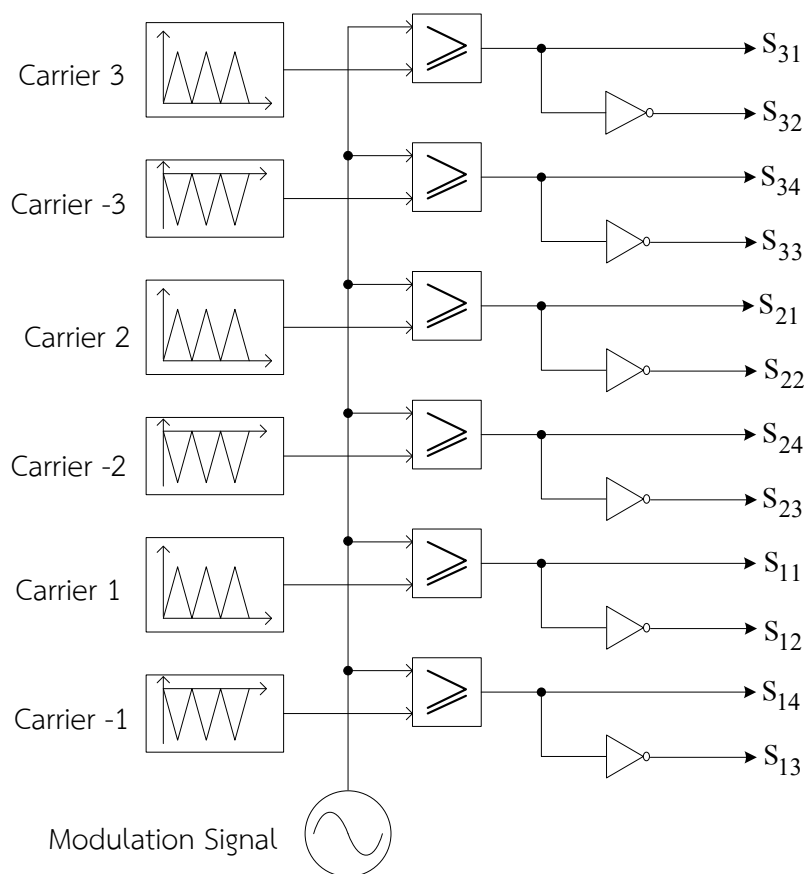
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบแคสเคดเซลล์ ที่มีข้อดีคือโครงสร้างวงจรไม่สลับซับซ้อน ง่ายต่อการออกแบบ แรงดันไฟฟ้าด้านออกคุณภาพสูงและมีค่าฮาร์มอนิกส์ต่ำ เหมาะสมกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าสูง เป็นต้น ภาพที่ 5 แสดงวงจรของงานวิจัยที่นำเสนอ ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 60 Vdc ซึ่งแยกอิสระต่อกันจำนวน 3 ชุด แต่ละชุดป้อนเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบแคสเคดเซลล์แต่ละเซลล์ จำนวน 3 ชุด ด้านออกของแต่ละเซลล์ต่ออนุกรมกัน ทำให้ได้แรงดันด้านออกเป็นไฟฟ้ากระแสสลับมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์คล้ายๆ ขึ้นบันได เพื่อให้สามารถใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับได้ ส่วนวงจรควบคุมใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เบอร์ TMS320F28335 ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink กำเนิดสัญญาณพัลส์เบรียเอเอ็มไซน์ออกมา 12 ชุด เพื่อจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์โดยผ่านชุดวงจรขับเกต วงจรเดทไทม์และวงจรแยกกราวด์ เพื่อความเหมาะสมของสัญญาณและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับอุปกรณ์ในวงจร



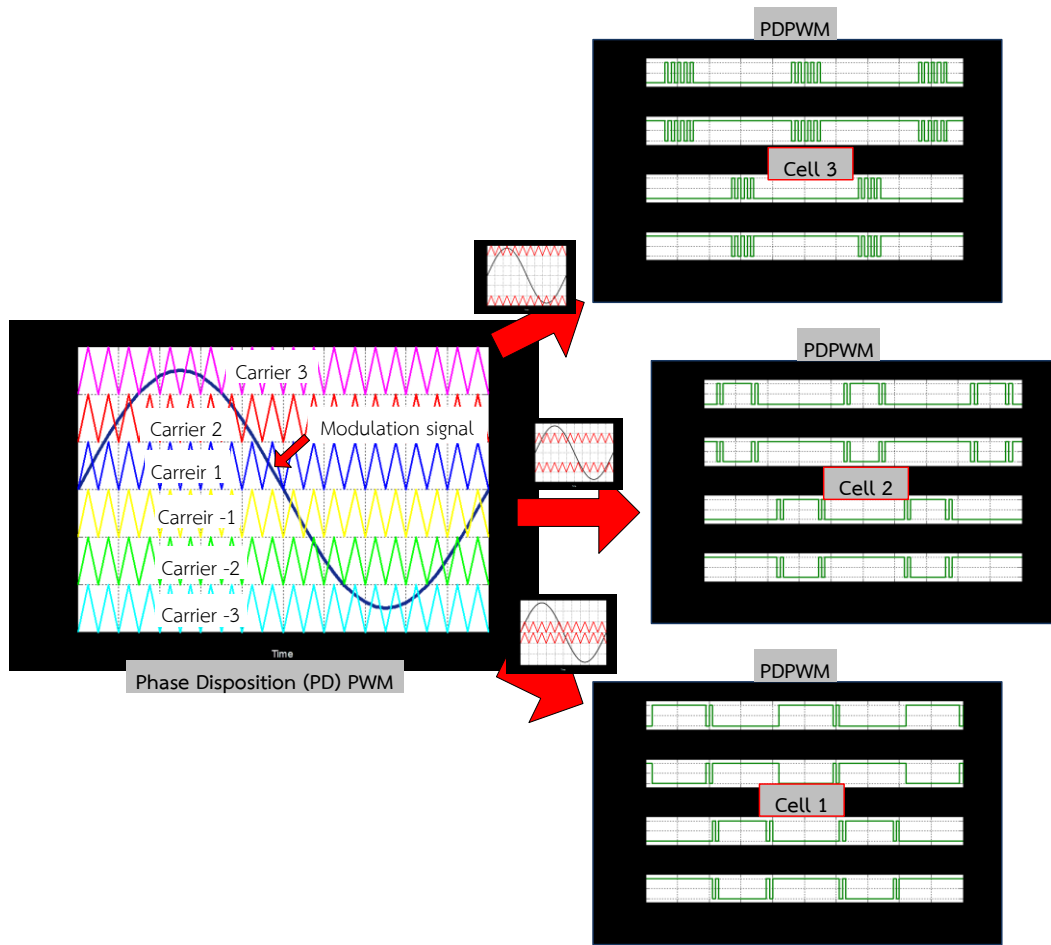
ภาพที่ 5 วงจรของงานวิจัยที่นำเสนอ

2. วงจรควบคุมการสวิตช์

วงจรควบคุมในบทความนี้ใช้สัญญาณคลื่นพาหะหลายระดับพีคเบิเลียมไซน์แบบพีดี ในการขับนำอุปกรณ์สวิตช์ ภาพที่ 6 แสดงแผนผังวงจรลอจิกในการสร้างสัญญาณพีคเบิเลียมไซน์จากหลายๆ สัญญาณคลื่นพาหะ ประกอบด้วย สัญญาณคลื่นพาหะความถี่สูงซีกบวกและซีกลบอย่างละ 3 ชั้น สัญญาณแต่ละชุดจะถูกมอดูเลตโดยสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่มูลฐาน 50 Hz ทำให้ได้สัญญาณพีคเบิเลียมไซน์เพื่อขับนำอุปกรณ์สวิตช์กึ่งนำของอินเวอร์เตอร์แบบเอช - บริดจ์ แต่ละเซลล์และมีการกลับสัญญาณโดยใช้ลอจิกเกตแบบน็อต (NOT Gate) เพื่อขับนำอุปกรณ์สวิตช์กึ่งนำของอินเวอร์เตอร์แบบเอช - บริดจ์แต่ละเซลล์ โดยผ่านวงจรขับเกท แยกกราวด์และวงจรเดดไทม์ ส่วนรูปที่ 7 แสดงสัญญาณควบคุมพีคเบิเลียมไซน์แบบพีดีที่ได้จากการสร้างขึ้นจากวงจรในภาพที่ 6 เพื่อขับนำอินเวอร์เตอร์แบบเอช-บริดจ์ 3 เซลล์



ภาพที่ 6 แผนผังวงจรลอจิกสร้างสัญญาณคลื่นพาหะหลายระดับพีคเบิเลียมไซน์แบบพีดี



ภาพที่ 7 สัญญาณควบคุมแบบคลื่นพาหะหลายระดับพีดีบีเลียมไซน์แบบพีดี

3. การคำนวณเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม

วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีรูปคลื่นใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ที่มีฮาร์โมนิกปนเปื้อนอยู่ ดังนั้นสามารถวิเคราะห์รูปคลื่นไฟฟ้าที่มีความผิดเพี้ยนดังกล่าวด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์รูปคลื่นของฟูรีเยร์ ซึ่งการวิเคราะห์รูปคลื่นที่ไม่ใช่สัญญาณไซน์ (Nonsinusoidal Waveform) และเป็นสัญญาณรายคาบมีค่าความถี่เชิงมุมเท่ากับ ω สามารถนิยามอนุกรมฟูรีเยร์ได้เท่ากับ

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (9)$$

เมื่อสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์คือ

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(n\omega t) d(\omega t), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (10)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(n\omega t) d(\omega t), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (11)$$

หรือเขียนอีกรูปคือ

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (12)$$

เมื่อ

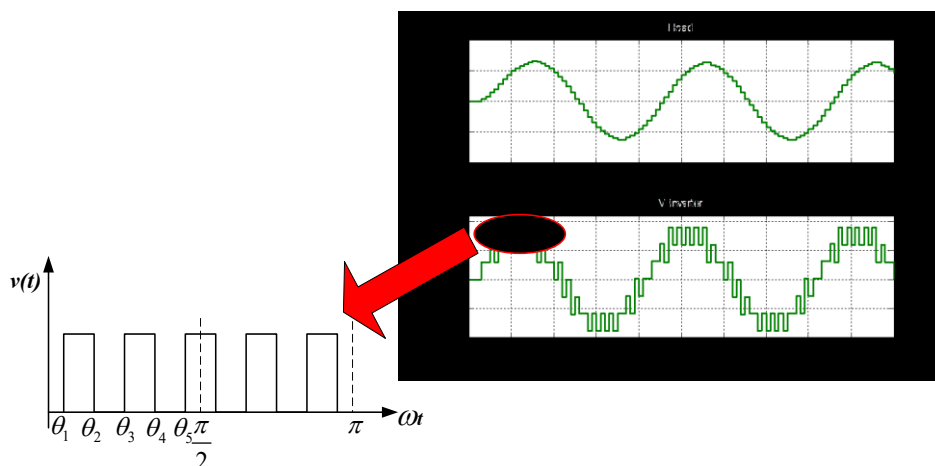
$$\left. \begin{aligned} C_0 &= a_0 \\ C_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \theta_n &= \tan^{-1} \frac{b_n}{a_n} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

สุดท้ายเราจะได้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ในสมการที่ (7) และสามารถนำไปหาค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกคือ

$$\left. \begin{aligned} \text{THD}_I &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \\ \text{THD}_V &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

เมื่อ I_1 คือ ค่าแอมพลิจูดของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 1, V_1 คือ ค่าแอมพลิจูดของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 1, I_n คือ ค่าแอมพลิจูดของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ n , V_n คือ ค่าแอมพลิจูดของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ n

จากรูปคลื่นแรงดันด้านออกดังภาพที่ 8 ใช้สมการฟูรีเยร์สมการที่ (7) – (9) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เพื่อคำนวณหาความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมได้ดังสมการที่ (10)



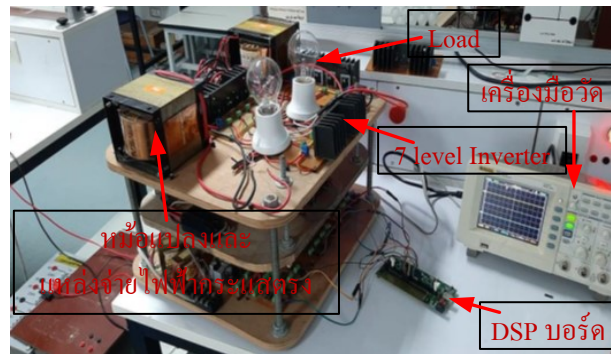
ภาพที่ 8 การวิเคราะห์ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของรูปคลื่นแรงดันด้านออก

ผลการวิจัย

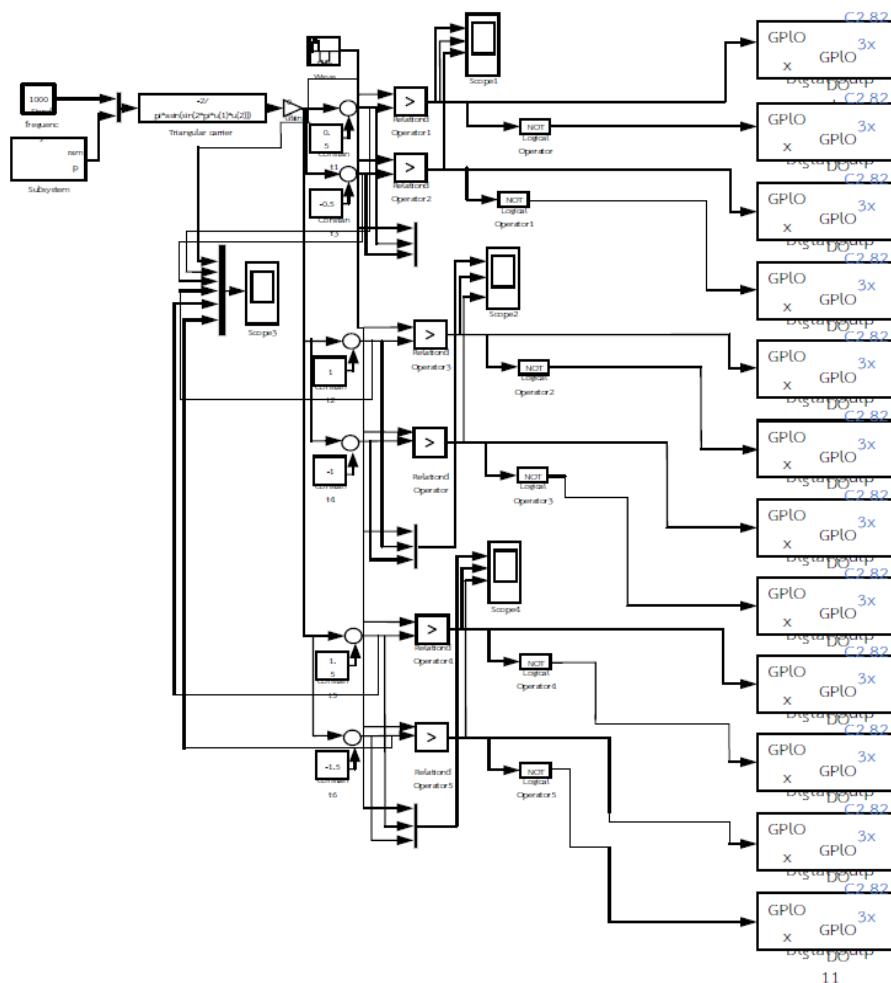
ผลการจำลองและการทดลอง

ทดลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์กับเครื่องต้นแบบซึ่งประกอบด้วย ส่วนวงจรภาคกำลัง วงจรภาคควบคุม แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้า โหลดขนาด 200 วัตต์ (โหลด

หลอดไฟ) และส่วนเครื่องมือวัด เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 9 โดยวงจรสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มไซน์จากบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เบอร์ TMS320F28335 ผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink ออกที่ขาพอร์ต Digital Output ของบอร์ด ดังภาพที่ 10

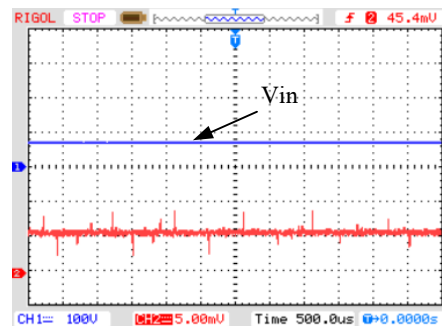


ภาพที่ 9 เครื่องต้นแบบ

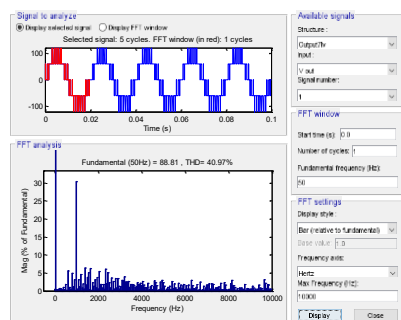


ภาพที่ 10 วงจรสร้างสัญญาณพีคเบิลูเอมไชน์จากบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DSP

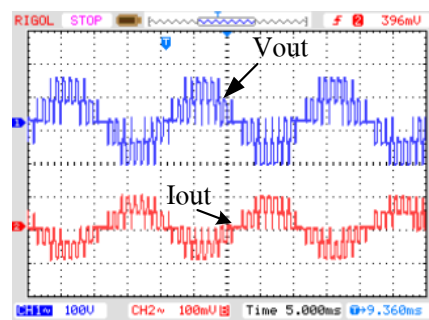
ด้านขาเข้าจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 60 โวลต์ต่อชุด รูปคลื่นแสดงดังภาพที่ 11 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และทดลองจากเครื่องต้นแบบสามารถแสดงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านออกดังภาพที่ 12, 13 และ 14 ผลการจำลองและการทดลองแรงดันไฟฟ้าด้านออกโดยปรับค่าดัชนีการมอดูเลต $m_a=0.5$ (อินเวอร์เตอร์ชนิดเอช-บริดจ์ เซลล์ที่ 3 ไม่ทำงาน), $m_a=0.75$ (อินเวอร์เตอร์ชนิดเอช-บริดจ์ ทั้ง 3 เซลล์ทำงาน) และ $m_a=1.0$ (อินเวอร์เตอร์ชนิดเอช-บริดจ์ ทั้ง 3 เซลล์ทำงาน) ตามลำดับ และวัดค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (THD) โดยการใช้การจำลองจากโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้เท่ากับ 40.97%, 25.03% และ 18.30% ตามลำดับ



ภาพที่ 11 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า

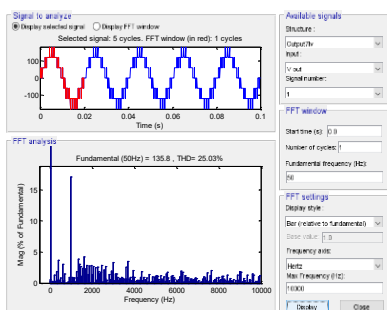


(ก)

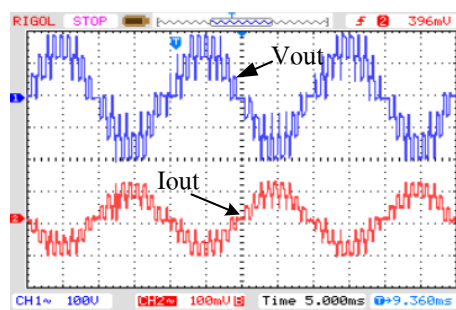


(ข)

ภาพที่ 12 แรงดันด้านออกและค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม $m_a=0.5$ ก) การจำลอง ข) การทดลอง

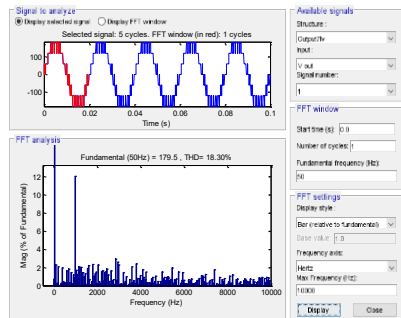


(ก)

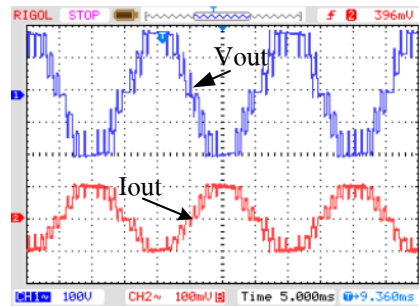


(ข)

ภาพที่ 13 แรงดันด้านออกและค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม $m_a=0.75$ ก) การจำลอง ข) การทดลอง



(ก)



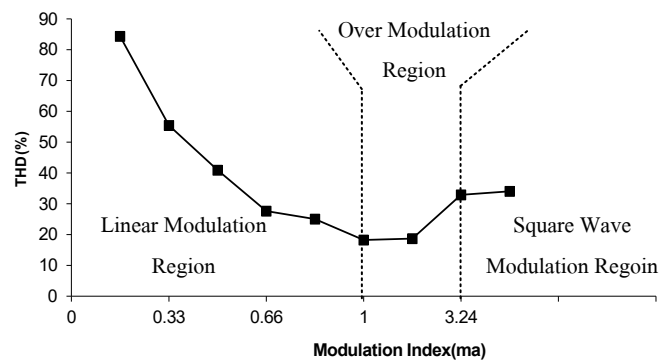
(ข)

ภาพที่ 14 แรงดันด้านออกและค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม $m_d = 1.0$ ก) การจำลอง ข) การทดลอง

จะเห็นว่าเมื่อทดสอบปรับค่าดัชนีการมอดูเลตจากค่าน้อยถึงค่ามากจะทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาออกมีค่ามากขึ้นและทำให้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกมีค่าน้อยลง เนื่องจากรูปแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากขึ้น เมื่อวงจรทำงานในย่านมอดูเลชันเชิงเส้น ส่วนย่านโอเวอร์มอดูเลชันและมอดูเลชันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกจะมีค่าเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการมอดูเลตกับค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกแสดงดังตารางที่ 2 และกราฟความสัมพันธ์แสดงดังภาพที่ 15

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการมอดูเลตกับค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก

ดัชนีการมอดูเลต (m_d)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (THD%)	สถานะการทำงานของเซลล์เอช-บริดจ์	ย่านมอดูเลชัน
0.25	84.34	เซลล์ 1 ทำงาน เซลล์ 2, 3 ไม่ทำงาน	มอดูเลชันเชิงเส้น
0.33	55.46	เซลล์ 1 ทำงาน เซลล์ 2, 3 ไม่ทำงาน	
0.5	40.97	เซลล์ 1, 2 ทำงาน เซลล์ 3 ไม่ทำงาน	
0.66	27.66	เซลล์ 1, 2 ทำงาน เซลล์ 3 ไม่ทำงาน	
0.75	25.03	เซลล์ 1, 2, 3 ทำงาน	
1.0	18.30	เซลล์ 1, 2, 3 ทำงาน	โอเวอร์มอดูเลชัน
1.5	18.76		
3.24	32.93	เซลล์ 1, 2, 3 ทำงาน	มอดูเลชันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม
3.5	34.10		



ภาพที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการมอดูเลตกับค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิก

สรุปผลวิจัย

บทความนี้นำเสนออินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน วงจรใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์หรืออินเวอร์เตอร์เอช-บริดจ์มาต่ออนุกรมกัน จำนวน 3 ชุด ด้านขาเข้าใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแต่ละชุดแบบแยกอิสระต่อกัน วงจรควบคุมใช้เทคนิคการควบคุมแบบฟีดแบ็คเบสเอมไซน์ชนิดพีดีผ่านตัวควบคุมการทำงานใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เบอร์ TMS320F28335 ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink จะเห็นว่าเมื่อทดสอบปรับค่าดัชนีการมอดูเลตจากค่าน้อยถึงค่ามาก ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกมีค่ามากขึ้น แรงดันไฟฟ้าคายอดเพิ่มมากขึ้น และทำให้ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิก (THD) มีค่าน้อยลง เนื่องจากรูปแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากขึ้น วงจรต้นแบบสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกเท่ากับ 180 Vp ตามทฤษฎีข้างต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Rodriguez, J., Lai, J., and Peng, F. Z. (2002). Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Control, and Applications. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 49(4), 296 – 300.
- [2] Malinowski, M., Gopakumar, K., Rodriguez, J. and Pérez, M. A. (2010). A Survey on Cascaded Multilevel Inverters. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 57(7), 2197 – 2206.
- [3] Bhuvaneswari, V., HariKumar, M. E., Shakil Ahmed, A., Vinoth, R., and Singh, A. B. (2014). Multicarrier Sinusoidal PWM Technique Based Analysis of Asymmetrical and Symmetrical 3 Φ Cascaded MLI. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 3(2), 2197 – 2206.
- [4] Khomfoi, S. and Tolbert, L. M. (2007). *Multilevel Power Converters Power Electronics Handbook: Device, circuits, and Applications*. (2nd ed).
- [5] สิทธิพร เจริญนนท์พิสุทธิ์ แลพ วิจิตร กิณเรศ. (2546). อินเวอร์เตอร์สามระดับโดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์โมนิกส์. *วิศวกรรมสารลาดกระบัง*, 20(4), 53 – 59.

Received: May 31, 2022

Revised: Oct 25, 2022

Accepted: Nov 4, 2022

การศึกษาจลนศาสตร์และการสร้างแบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมด้วยโปรแกรมแมทแลป

A STUDY OF KINEMATICS AND MODELING OF INDUSTRIAL ROBOT ARM USING MATLAB

สุรัชชัย เหมหิรัญ กิตติคม นนทประสาธ พงษ์นรินทร์ สว่างวงศ์

กลุ่มวิจัยด้านการควบคุมอัตโนมัติและการจัดการพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Surachai Hemhirun Kittikom Nantprasat Pongnarin Savangvong

Research Section: Automatic Control and Energy Management, Department of Mechanical Engineering,

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep (RMUTK)

E-mail: surachai.h@mail.rmutm.ac.th

บทคัดย่อ

การฝึกอบรมและจัดประสบการณ์ให้กับผู้เรียนเข้าใจการทำงานของหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมด้วยแบบจำลองก่อนที่จะลงมือปฏิบัติจริงมีความสำคัญอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนศาสตร์ไปข้างหน้า จลนศาสตร์ผกผัน และการสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยการดำเนินงานมี 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการสร้างต้นแบบหุ่นยนต์แขนกลจำลองที่มี 5 แกนอิสระด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ ขั้นตอนต่อไปสร้างเมทริกซ์เอกพันธ์ตามหลักการของเดนาวิตและฮาเทนเบิร์ก และใช้โปรแกรมแมทแลปซิมูลิงสร้างแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แขนกล และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบการแสดงผลค่าตำแหน่งปลายแขนกลระหว่างโปรแกรมแมทแลปกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นแสดงผลค่าตำแหน่งปลายแขนกลเช่นเดียวกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ ซึ่งที่ระดับการแสดงผลเป็น 2 จุดทศนิยม ผลการคำนวณมีความถูกต้องสมบูรณ์ นอกจากนี้การแสดงผลของแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถเป็นสื่อการสอนเสมือนจริงให้กับผู้เรียนได้อีกทางเลือกหนึ่งด้วย

คำสำคัญ: หุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรม จลนศาสตร์ไปข้างหน้า จลนศาสตร์ผกผัน การสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์

Abstract

Training aims to provide an experience for learners in order to understand how industrial robots function using simulated robots prior to performing with the one in real world is fairly crucial. Therefore, this research is conducted to study forward kinematics, invert kinematics, and robot modeling using the widely used software, MATLAB. The study consists of three steps: (1) to create a simulated 5-Degree of Freedom (DOF) robot arm using computer-aided design (CAD), (2) to transform the transformation matrix of the robotic arm based on the principles of Denavit-Hartenberg and MATLAB Simulink has been used for kinematics modeling, (3) to validate the model by comparing the end-effector (EE) display between the results from MATLAB and CAD program. The study finds that the created model renders the position of the EE which is consistent with the result yielded by the CAD. Furthermore, with the two-decimal-points display, the result is found to be more accurate. Finally, the displayed results from the model can be used as an effective virtual learning tool for the learners.

Keywords: Industrial robot arm, Forward kinematics, Inverse kinematics, Robot modeling

บทนำ

อุตสาหกรรมหุ่นยนต์ภายใต้กลุ่มอุตสาหกรรมใหม่ (The New S-Curve) ของประเทศไทยจากการเปลี่ยนถ่ายเข้าสู่ยุคอุตสาหกรรม 4.0 ที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องจักรและระบบอัตโนมัติที่ทันสมัยอย่างหุ่นยนต์แขนกลที่เข้ามาทดแทนการใช้แรงงานจากมนุษย์ ตลอดจนการพัฒนาวัฏจักรของหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมที่ใช้ตัวรับรู้ (Sensors) เพื่อรับรู้สัมผัส ต่างๆ รวมกับเทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) ทำให้หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับมนุษย์ (Rahul, Ankush, Ashish, & Ajay, 2017) ซึ่งความก้าวหน้าของเทคโนโลยีสมัยใหม่ดังกล่าวข้างต้นนั้น แรงงานจะต้องมีการพัฒนาสมรรถนะในการทำงานที่มีความรู้ (Knowledge) และทักษะ (Skill) ในการปฏิบัติงานที่สูงขึ้น (Thanyrat & et al., 2021) นั้นเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างมาก เพื่อเป็นกำลังขับเคลื่อนอุตสาหกรรมในอนาคต

ทำให้หลายสถาบันการศึกษาพัฒนาหลักสูตรหรือเพิ่มหน่วยการเรียนรู้เพิ่มเติม รวมถึงจัดหลักสูตรระยะสั้นที่สอดคล้องกับหลักสูตรพัฒนาฝีมือแรงงาน กระทรวงแรงงานให้กับนักศึกษาและผู้สนใจเข้ามาเรียนรู้ เพื่อให้ความรู้และจัดประสบการณ์ให้กับผู้เรียนเข้าใจในภาคทฤษฎีที่ต้องเชื่อมโยงความรู้กับการความคุมการทำงานของหุ่นยนต์ก่อนการจบการศึกษาหรือก่อนการได้ลงมือปฏิบัติงานกับหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจริง แต่หากสถานศึกษาที่ไม่มีครุภัณฑ์หุ่นยนต์แขนกลอาจทำได้เพียงการสอนในภาคทฤษฎีเบื้องต้นเท่านั้น เช่นนี้อาจทำให้ผู้เรียนไม่เกิดความเข้าใจและไม่เห็นภาพความเชื่อมโยงความรู้ระหว่างภาคทฤษฎี (Theoretical) กับภาคปฏิบัติ (Practical) ซึ่งหากขาดความรู้ความเข้าใจอาจเป็นสาเหตุให้เกิดอันตรายต่อผู้เรียนหรือเกิดความเสียหายต่อหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมที่มีราคาต่อหนึ่งหน่วยสูงได้

ดังนั้นผู้วิจัยขอเสนอแนวทางการสอนด้วยสื่อเสมือนจริงด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบร่วมกับโปรแกรมแมทแลป เพื่อทำให้การศึกษาด้านกลศาสตร์ รวมถึงการสร้างแบบจำลองแสดงผลการควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกล ที่ประกอบด้วยการสร้างต้นแบบหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรม การศึกษาด้านกลศาสตร์ไปข้างหน้า กลศาสตร์ผกผัน และการแสดงผลการควบคุมแขนกล ทั้งหมดนี้จะทำให้ผู้เรียนและผู้สนใจด้านวิทยาการหุ่นยนต์เข้าใจการสั่งการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลเบื้องต้นได้

วัตถุประสงค์

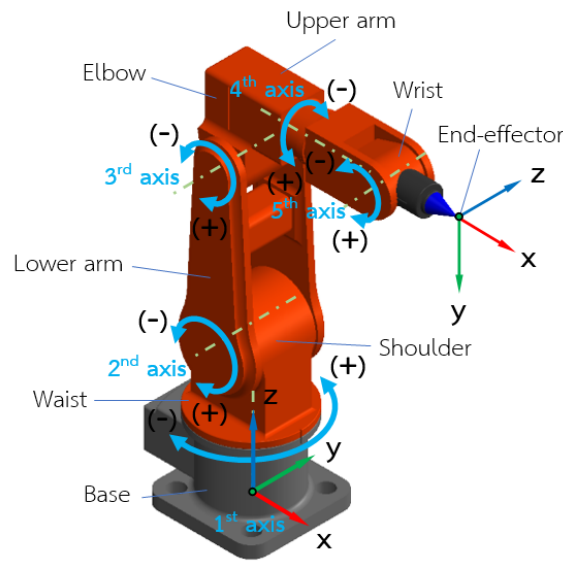
เพื่อศึกษาด้านกลศาสตร์ของหุ่นยนต์และสร้างแบบจำลองแสดงผลการควบคุมแขนกล

วิธีดำเนินการวิจัย

เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถแสดงผลการควบคุมเสมือนจริง มีลำดับการดำเนินการ 3 ขั้นตอน คือ 1) การสร้างต้นแบบหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจำลอง 2) การศึกษาทางกลศาสตร์และการสร้างแบบจำลองสำหรับแสดงผลการควบคุมแขนกล และ 3) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การสร้างต้นแบบหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจำลอง

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการสร้างหุ่นยนต์แขนกลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล (Computer-Aided Design, CAD) จากซอฟต์แวร์ SolidWorks สามารถวาดขึ้นพร้อมกำหนดขนาดและลักษณะของหุ่นยนต์ได้ตามความต้องการหรือสามารถโหลด (Download) ต้นแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจากสังคมออนไลน์ (Farial, 2020) โดยหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจำลองที่ศึกษาเป็นชนิดข้อต่อ (Articulated Robot Arm) ที่เลียนแบบร่างกายมนุษย์ช่วงแขนประกอบด้วยข้อต่อหมุน (Revolute Joints) หรือแกนหมุนอิสระ (Degree of freedom, DOF) จำนวน 5 แกน (5-DOF) นับตามลำดับจากฐาน (Base) หรือส่วนสะเอว (Waist) หัวไหล่ (Shoulder) ข้อศอก (Elbow) ท่อนแขน (Upper arm) และข้อมือ (Wrist) รวมถึงการกำหนดทิศทางท่อนแขน ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 หุ่นยนต์แขนกลจำลองแบบ 5 แกนอิสระ จากซอฟต์แวร์ SolidWorks

2. จลนศาสตร์ และการสร้างแบบจำลอง

ในส่วนนี้ประกอบด้วย พารามิเตอร์ จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แขนกล และการสร้างแบบจำลองสำหรับแสดงผลการควบคุมแขนกล แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 พารามิเตอร์ของหุ่นยนต์แขนกล (Definition of Robot arm's Parameters) หุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจำลอง จากภาพที่ 1 นำชิ้นส่วน (links) มาประกอบ (Assembly) กันแบบอนุกรม (Serial link) รวม 6 ชิ้น ดังตารางที่ 1 พร้อมระบุพารามิเตอร์ (Parameter) ตามหลักวิธีของเดนาวิตและฮาเทนเบิร์ก (Denavit–Hartenberg, D-H) สำหรับการศึกษาทางจลนศาสตร์ ในแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ (Varhegyi, Melik-Merkumians, Steinegger, Halmetschlager-Funek, & Schitter, 2017) ที่ได้นำเสนอพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม รุ่น ABB IRB 120 ซึ่งเหมาะสมกับหุ่นยนต์ที่มีลักษณะข้อต่อใน 2 รูปแบบ คือแบบข้อต่อหมุน (Revolute Joint) กับแบบข้อต่อเลื่อนเข้า-ออก (Prismatic Joint) เท่านั้น โดยพารามิเตอร์ และการกำหนดทิศทางของแกนอ้างอิงหรือกรอบอ้างอิง (frame, $\mathcal{F}_i$) มีดังนี้

1. ข้อต่อหมุนหรือแกนหมุน (Joint angle, θ_i) คือ มุมระหว่างแกน x_{i-1} กับ x_i ที่หมุนรอบแกน z_i
2. ชิ้นส่วนแขนกลที่เอียง (Link offset, d_i) คือ ระยะห่างระหว่างแกน x_{i-1} กับ x_i ที่วัดตามแกน z_i
3. ความยาวชิ้นส่วนแขนกล (Link length, a_i) คือ ระยะเยื้องระหว่างกรอบอ้างอิง $\mathcal{F}_{i-1}$ กับ $\mathcal{F}_i$ ที่วัดตามแกน x_i
4. ชิ้นส่วนแขนกลบิด (Link twist, α_i) คือ มุมระหว่างแกน z_{i-1} กับ z_i ที่หมุนรอบแกน x_i

โดยที่ตัวห้อย (Subscript, i) เริ่มจากฐานนับลำดับเป็น 0 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 นอกจากนี้การกำหนดทิศทางแกน x , y และ z มีกฎ 4 ข้อ คือ 1) ต้องวางแกน z_i ตามแกนหมุนของข้อต่อแขนกล 2) วางแกน x_i ให้ตั้งฉากกับแกน z_{i-1} 3) กำหนดแกน y_i ตามกฎมือขวา (Right-hand rule) และ 4) แนวของแกน x_i ที่กำหนดตามข้อ 2) ต้องตัดกับแนวแกน z_{i-1} (Intersect) ดังภาพที่ 2

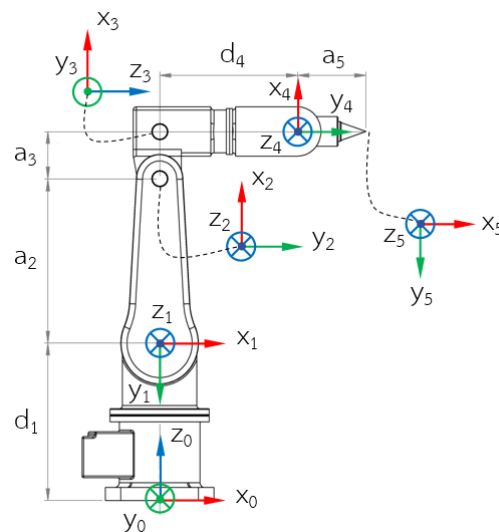
2.2 จลนศาสตร์ (Kinematics) หมายถึงการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดการหมุนของข้อต่อต่างๆ (Joints Coordinate, q) กับพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate, p) ซึ่งเป็นพื้นฐานของการศึกษาสาขาทฤษฎีหุ่นยนต์ เพื่อระบุ ตำแหน่ง (Position) ความเร็ว (Velocity) ความเร่ง (Acceleration) และเวลา (Time) ของการเคลื่อนที่ส่วนปลายแขนกล (End-Effector, EE) โดยไม่พิจารณาแรงที่มากระทำต่อแขนกลหรือแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแขนกลเอง การศึกษาจลนศาสตร์ มี 2 ส่วน คือการสร้างสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้า และการวิเคราะห์หาสมการจลนศาสตร์ย้อนกลับ โดยงานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาจลนศาสตร์เพื่อระบุตำแหน่งของการเคลื่อนที่ส่วนปลายแขนกล เท่านั้น

ตารางที่ 1 ความยาวของชิ้นส่วนแขนกล (Link distance)

Links	Parameters	Distance (mm)
Link 1: Base or waist	-	-
Link 2: Waist to the shoulder	d_1	480
Link 3: Lower arm	a_2	500
Link 4: Upper arm	a_3	145
Link 5: Elbow to the wrist	d_4	445
Link 6: Wrist to the end-effector	a_5	220

ตารางที่ 2 D-H พารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ 5 แกนอิสระและช่วงการหมุนของข้อต่อ

Joint(i)	$\theta_i(deg)$	$d_i(mm)$	$a_i(mm)$	$\alpha_i(deg)$	Range(deg)
1	θ_1	d_1	0	-90	-180 to 180
2	$\theta_2 - 90$	0	a_2	0	-90 to 90
3	θ_3	0	a_3	-90	
4	θ_4	d_4	0	90	
5	$\theta_5 + 90$	0	a_5	0	



ภาพที่ 2 แกนอ้างอิงของหุ่นยนต์

2.2.1 จลนศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematics, FK) หมายถึงการหาค่าตำแหน่งปลายแขนกลในระบบพิกัดฉาก (Position: p_x , p_y และ p_z) และท่าทางของปลายแขนกล (Orientations: θ_x , θ_y และ θ_z) จากการกำหนดมุมการหมุนที่ข้อต่อต่างๆ ในระบบพิกัดเชิงขั้ว โดยใช้การแปลงเมทริกซ์เอกพันธ์ (Homogeneous transformation matrices, T_i^{i-1}) ดังสมการ (1) และ (2) (Iliukhin, Mitkovskii, Bizyanova, & Akopyan, 2017) ทำให้สามารถแทนค่าการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างกรอบอ้างอิงจากฐาน (Base frame, $\mathcal{T}_0$) จนถึงส่วนปลายแขนกล ด้วยการคูณแปลงเมทริกซ์เอกพันธ์ตามลำดับข้อต่อหุ่นยนต์ (Joints, i) ดังสมการที่ (3) ซึ่งผลการแปลงเมทริกซ์ในหลักที่ 4 แถวที่ 1, 2 และ 3 ของสมการที่ (4) แสดงสมการสำหรับคำนวณหาตำแหน่งพิกัดที่ส่วนปลายแขนกล ดังสมการที่ (5), (6) และ (7) ตามลำดับ

เมื่อ $c\theta_i = \cos\theta_i$, $s\theta_i = \sin\theta_i$, $c\alpha_i = \cos\alpha_i$, $s\alpha_i = \sin\alpha_i$ $c\theta_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$ และ $s\theta_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$

$$T_i^{i-1} = Rot_{z_{i-1}, \theta_i} Trans_{z_{i-1}, d_i} Trans_{x_i, \alpha_i} Rot_{x_i, \alpha_i} \quad (1)$$

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & p_i^{i-1} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i \cdot s\theta_i & s\alpha_i \cdot s\theta_i & a_i \cdot c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i \cdot c\theta_i & -s\alpha_i \cdot c\theta_i & a_i \cdot s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_2^1 = \begin{bmatrix} s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & a_2 s\theta_2 \\ -c\theta_2 & s\theta_2 & 0 & -a_2 c\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_3^2 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & -s\theta_3 & a_3 c\theta_3 \\ s\theta_3 & 0 & c\theta_3 & a_3 s\theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_5^4 = \begin{bmatrix} -s\theta_5 & -c\theta_5 & 0 & -a_5 s\theta_5 \\ c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & a_5 c\theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_5^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_{5x}^0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_{5y}^0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_{5z}^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$p_{5x}^0 = c\theta_1 (a_2 s\theta_2 + d_4 c\theta_{23} + a_3 s\theta_{23}) + a_5 c\theta_1 (c\theta_5 c\theta_{23} - s\theta_5 c\theta_4 s\theta_{23}) - a_5 s\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 \quad (5)$$

$$p_{5y}^0 = s\theta_1 (a_2 s\theta_2 + d_4 c\theta_{23} + a_3 s\theta_{23}) + a_5 s\theta_1 (c\theta_5 c\theta_{23} - s\theta_5 c\theta_4 s\theta_{23}) + a_5 c\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 \quad (6)$$

$$p_{5z}^0 = a_2 c\theta_2 + a_3 c\theta_{23} - d_4 s\theta_{23} - a_5 (s\theta_{23} c\theta_5 + c\theta_{23} c\theta_4 s\theta_5) + d_1 \quad (7)$$

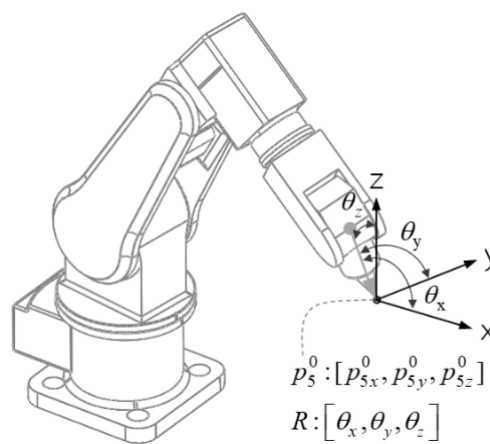
2.2.2 จลนศาสตร์ย้อนกลับ (Inverse Kinematics, IK) หมายถึงการหาค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่างๆ ในระบบพิกัดเชิงขั้ว จากการกำหนดพิกัดปลายแขนกลในระบบพิกัดฉาก และท่าทางของปลายแขนกล ดังภาพที่ 3 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเรขาคณิต (Geometrical Solution Approach) ตามขั้นตอน ดังนี้

- การหาค่ามุมข้อต่อหมุนที่ 1 (θ_1) เริ่มจากปรับมุมมองของหุ่นยนต์ทางด้านข้าง (Side view) กับการหาค่าการแปลงเมทริกซ์ย้อนกลับ (Inverse Transformation Matrix, $\text{inv}(T_i^{i-1})$) จากแกนอ้างอิงที่ 5 ย้อนกลับ

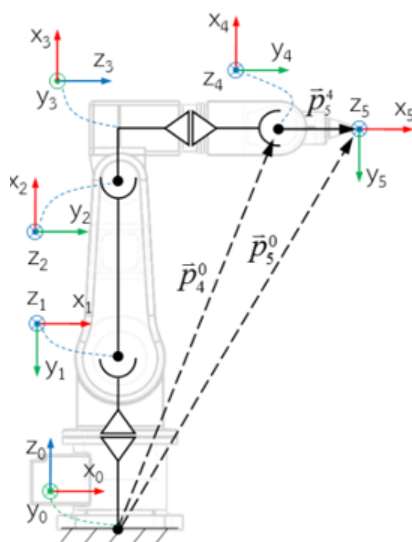
มายังแกนอ้างอิงที่ 4 ที่ข้อต่อหมุน (T_4^0) สมการที่ (8) เพื่อหาค่าตำแหน่งพิกัดที่แกนอ้างอิงที่ 4 เทียบกับแกนอ้างอิงที่ 0 ทำให้สามารถคำนวณค่ามุมข้อต่อหมุนที่ 1 ได้ ดังภาพที่ 5 ด้วยสมการที่ (9)

$$T_4^0 = \text{inv}(T_5^4)T_5^0 = T_4^5T_5^0 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_{4x}^0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_{4y}^0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_{4z}^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

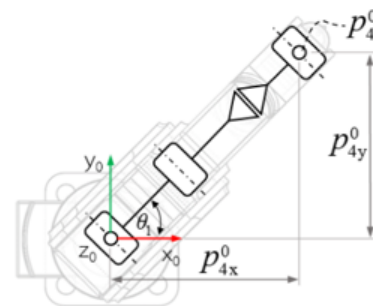
$$\theta_1 = a \tan 2(p_{4y}^0, p_{4x}^0) \quad (9)$$



ภาพที่ 3 การระบุพิกัดและท่าทางของปลายแขนกล



ภาพที่ 4 ภาพฉายด้านข้างของหุ่นยนต์แขนกล



ภาพที่ 5 ภาพฉายด้านบนของหุ่นยนต์แขนกล

- การหาค่ามุมข้อต่อหมุนที่ 2 และ 3 (θ_2 และ θ_3) จากขนาดทางเรขาคณิตของภาพที่ 6 โดยใช้ค่าเวกเตอร์ตำแหน่ง ($\vec{r}_4$) นำมาหาขนาดระยะระหว่างแกนอ้างอิงที่ 4 เทียบกับแกนอ้างอิงที่ 0 จากสามเหลี่ยมด้วยกฎของโคไซน์ (law of cosine) และกฎของไซน์ (law of sine) ดังสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ ทำให้คำนวณหาค่ามุมข้อต่อหมุนที่ 2 และ 3 จากสมการที่ (13) และสมการที่ (14) ตามลำดับ

$$\gamma_1 = a \cos \left[\frac{(|p_4^1|)^2 + (d_1)^2 - (|p_4^0|)^2}{2d_1(|p_4^1|)} \right] \quad (10)$$

$$\beta_2 = a \cos \left[\frac{(a_2)^2 + (l_1)^2 - (|p_4^1|)^2}{2(a_2)(l_1)} \right] \quad (11)$$

$$\frac{l_1}{\sin \beta_1} = \frac{|p_4^1|}{\sin \beta_2} = \frac{a_2}{\sin \beta_3}; \beta_1 = \sin^{-1} \left[\frac{l_1 \sin \beta_2}{|p_4^1|} \right] \quad (12)$$

$$\theta_2 = 180^\circ - \gamma_1 - \beta_1 \quad (13)$$

$$\theta_3 = 180^\circ - \alpha_1 - \beta_2 \quad (14)$$

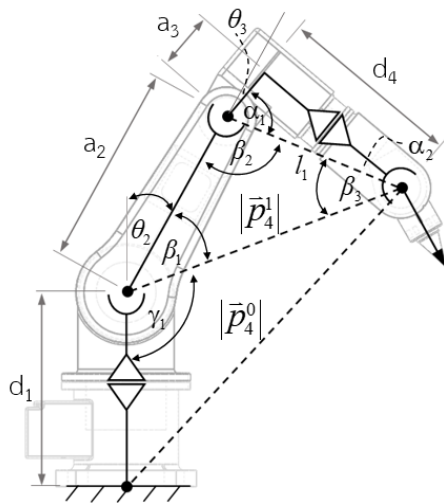
- การหาค่ามุมข้อต่อหมุนที่ 4 และ 5 (θ_4 และ θ_5) จากขนาดของเวกเตอร์ตำแหน่งแกนอ้างอิงที่ 5 เทียบกับแกนอ้างอิงที่ 3 ($\vec{r}_{51}$) ดังภาพประกอบที่ 7 ด้วยการคูณเมทริกซ์เอกพันธ์ ดังสมการที่ (15) ทั้งนี้ในกรณีมุมข้อต่อหมุนที่ 5 ไม่ได้อยู่ที่มุมศูนย์องศา ทำให้สามารถคำนวณหาค่ามุมข้อต่อหมุนที่ 4 และ 5 ได้จากสมการที่ (16), (17) และ (18) ตามลำดับ

$$T_5^3 = T_4^3 T_5^4 \quad (15)$$

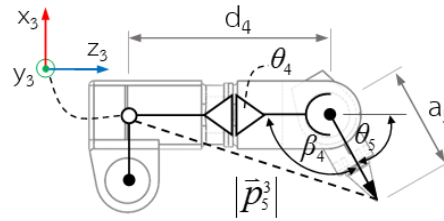
$$\beta_4 = a \cos \left[\frac{(d_4)^2 + (a_5)^2 - (|p_5^3|)^2}{2(d_4)(a_5)} \right] \quad (16)$$

$$\theta_4 = a \tan 2(p_{5y}^4, p_{5x}^4) \quad (17)$$

$$\theta_5 = 180^\circ - \beta_4 \quad (18)$$



ภาพที่ 6 ขนาดทางเรขาคณิตของแขนกล
แกนอ้างอิงที่ 4 เทียบกับแกนอ้างอิงที่ 0



ภาพที่ 7 ขนาดทางเรขาคณิตของแขนกล
แกนอ้างอิงที่ 5 เทียบกับแกนอ้างอิงที่ 3

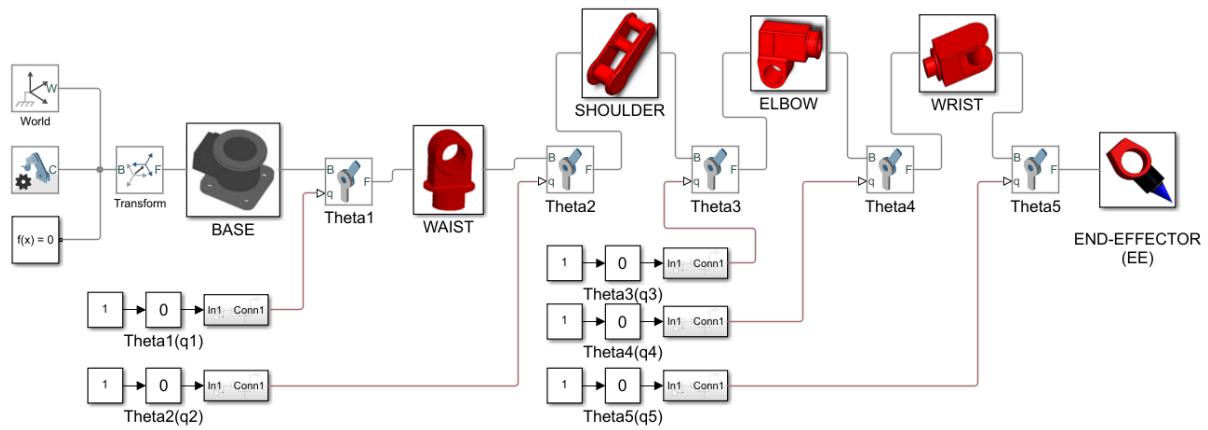
2.2.3 การสร้างแบบจำลองจากซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ประเภทโปรแกรมช่วยคำนวณทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) เช่น โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) ภายใต้โปรแกรมย่อยแมทแลปซิมูลิงค์ (MALAB/Simulink) นำมาประยุกต์ช่วยในการแสดงผลการควบคุมขณะผู้ควบคุม (User) แขนกล มี 2 ขั้นตอน คือ 1) การนำเข้าต้นแบบและการสร้างสั่งการควบคุม และ 2) การสร้างแบบจำลองสำหรับแสดงผลการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์

1. การนำเข้าต้นแบบและการสั่งการควบคุม เริ่มจากการออกแบบหุ่นยนต์แขนกลจำลองหรือต้นแบบหุ่นยนต์ จากนั้นนำออกต้นแบบ (Export) จากโปรแกรม CAD นำเข้า (Import) สู่อุปกรณ์แมทแลป (MATLAB) และสร้างการสั่งการควบคุมดังแผนภาพบล็อกไดอะแกรม ดังภาพที่ 8

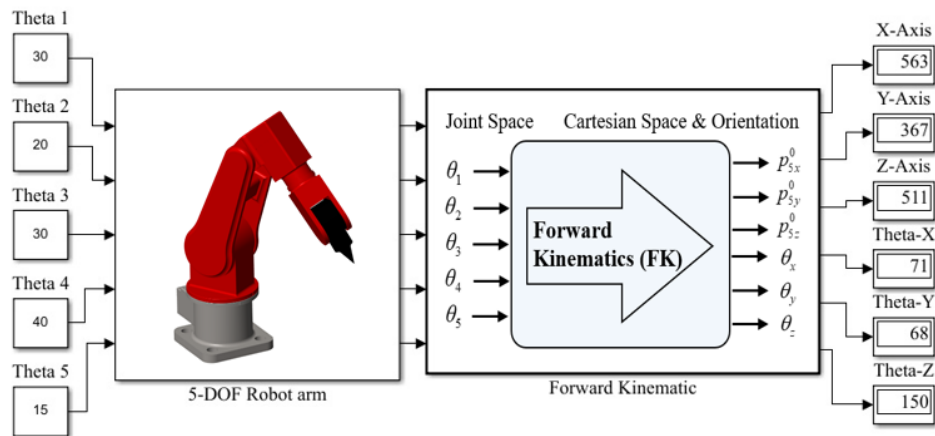
2. การสร้างแบบจำลองแสดงผลการวิเคราะห์จลนศาสตร์ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการคำนวณค่าจลนศาสตร์ไปข้างหน้า เริ่มจากการสร้างบล็อกย่อยของระบบ (Subsystem) ที่รับค่าจากผู้ใช้งาน (User) จากการป้อนค่ามุมการหมุนของข้อต่อทั้ง 5 ($\theta_1 - \theta_5$) ร่วมกับบล็อกชนิดแมทแลปฟังก์ชัน (MATLAB Function) ที่ภายในบรรจุสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้า ดังภาพที่ 9 และส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์ค่าจลนศาสตร์ย้อนกลับ เพื่อแปลงค่าย้อนกลับจากระบบพิกัดฉากของปลายแขนกลกลับไปเป็นค่ามุมการหมุนของข้อต่อทั้ง 5 ดังภาพที่ 10

2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล

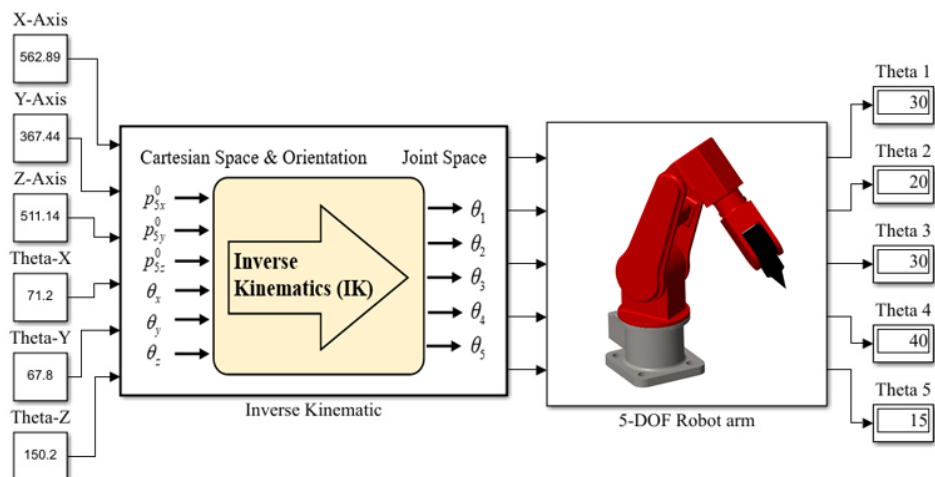
สมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้าใช้คำนวณหาพิกัดที่ส่วนปลายแขนกล (End-effector, EE) จากการระบุค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ และในทางกลับกันการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับเป็นการหาค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ และ θ_5) จากการระบุค่าพิกัดที่ส่วนปลายแขนกลและท่าทางของหุ่นยนต์แขนกล ซึ่งจลนศาสตร์ทั้งสองนี้เป็นส่วนสำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์สร้างส่วนควบคุมของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยใช้การแสดงผลของโปรแกรม CAD แทนการใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมจริง (Shah, Osman, & Zainuddin, 2020) ซึ่งการทดสอบจะระบุค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ ให้กับแบบจำลอง ดังภาพที่ 11 และเก็บข้อมูลการแสดงผลดังตารางที่ 3 (นำเสนอ จำนวน 4 ชุดข้อมูล) จากทั้งหมด 10 ชุดข้อมูล เพื่อเปรียบเทียบกับแสดงผลจากแบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกลที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมแมทแลป ต่อไป



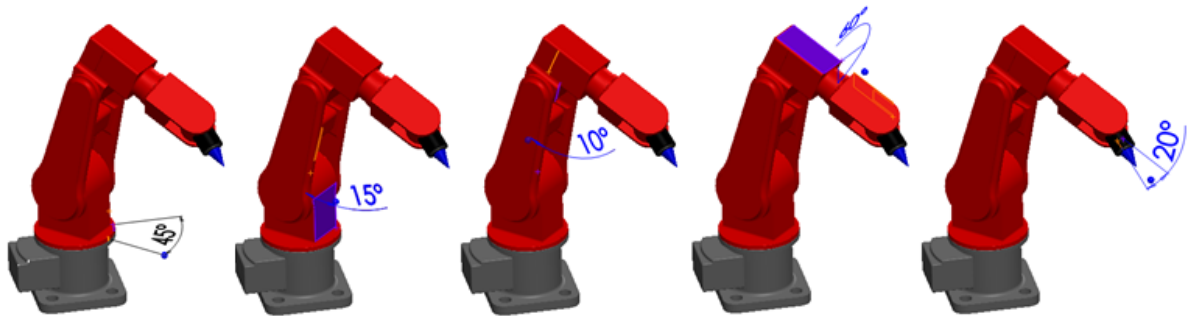
ภาพที่ 8 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมหุ่นยนต์



ภาพที่ 9 แผนภาพบล็อกการวิเคราะห์จลนศาสตร์ไปข้างหน้า

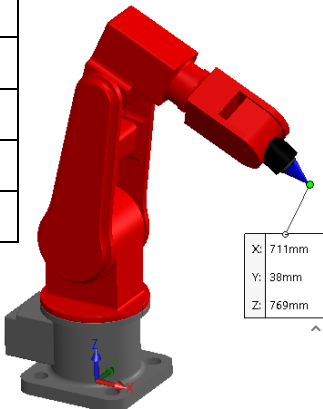
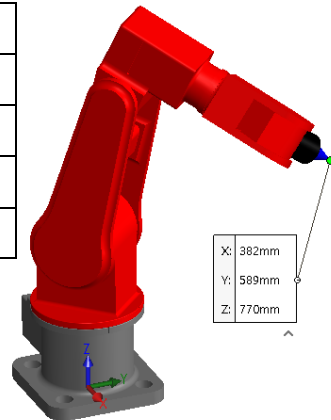
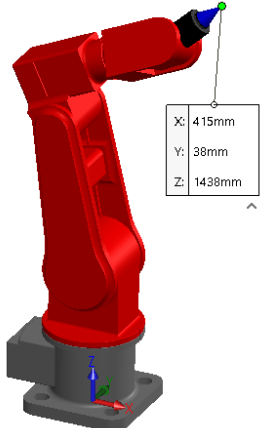
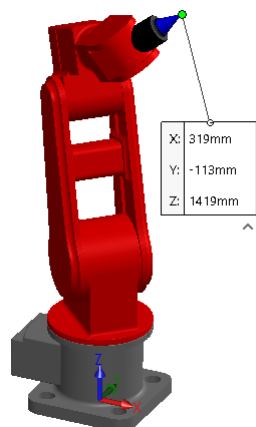


ภาพที่ 10 แผนภาพบล็อกการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ



ภาพที่ 11 การระบุค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ ภายในโปรแกรม CAD

ตารางที่ 3 การแสดงผลของหุ่นยนต์แขนกลตามการระบุค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ

ชุดข้อมูล	การแสดงผลของหุ่นยนต์แขนกลด้วยโปรแกรม CAD (ซอฟต์แวร์ SolidWorks)																					
1, 2	<table><tr><td>q1</td><td>0°</td></tr><tr><td>q2</td><td>10°</td></tr><tr><td>q3</td><td>15°</td></tr><tr><td>q4</td><td>30°</td></tr><tr><td>q5</td><td>20°</td></tr></table> 	q1	0°	q2	10°	q3	15°	q4	30°	q5	20°	<table><tr><td>q1</td><td>45°</td></tr><tr><td>q2</td><td>15°</td></tr><tr><td>q3</td><td>10°</td></tr><tr><td>q4</td><td>60°</td></tr><tr><td>q5</td><td>50°</td></tr></table> 	q1	45°	q2	15°	q3	10°	q4	60°	q5	50°
	q1	0°																				
q2	10°																					
q3	15°																					
q4	30°																					
q5	20°																					
q1	45°																					
q2	15°																					
q3	10°																					
q4	60°																					
q5	50°																					
3, 4	<table><tr><td>q1</td><td>0°</td></tr><tr><td>q2</td><td>-10°</td></tr><tr><td>q3</td><td>-15°</td></tr><tr><td>q4</td><td>-30°</td></tr><tr><td>q5</td><td>-20°</td></tr></table> 	q1	0°	q2	-10°	q3	-15°	q4	-30°	q5	-20°	<table><tr><td>q1</td><td>-45°</td></tr><tr><td>q2</td><td>-15°</td></tr><tr><td>q3</td><td>-10°</td></tr><tr><td>q4</td><td>-60°</td></tr><tr><td>q5</td><td>-50°</td></tr></table> 	q1	-45°	q2	-15°	q3	-10°	q4	-60°	q5	-50°
	q1	0°																				
q2	-10°																					
q3	-15°																					
q4	-30°																					
q5	-20°																					
q1	-45°																					
q2	-15°																					
q3	-10°																					
q4	-60°																					
q5	-50°																					

เมื่อทำการระบุมุมการหมุนของแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์แขนกลต้นแบบเรียบร้อยแล้ว ผู้ควบคุมสามารถทราบถึงตำแหน่งส่วนปลาย (EE) ได้โปรแกรม CAD (SolidWorks) ด้วยการเลือกบนแถบคำสั่ง Evaluate จากนั้นเลือก Measure ทำให้ทราบตำแหน่งในระบบพิกัดฉาก (X, Y และ Z) เทียบกับแกนอ้างอิงที่ฐานของหุ่นยนต์แขนกล

ผลการวิจัย

แบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมที่สร้างขึ้น มีการดำเนินการใน 2 หัวข้อ คือ 1) การเปรียบเทียบการแสดงผลทางจลนศาสตร์ระหว่างโปรแกรม CAD กับแบบจำลอง และ 2) แบบจำลองการควบคุมของหุ่นยนต์แขนกล

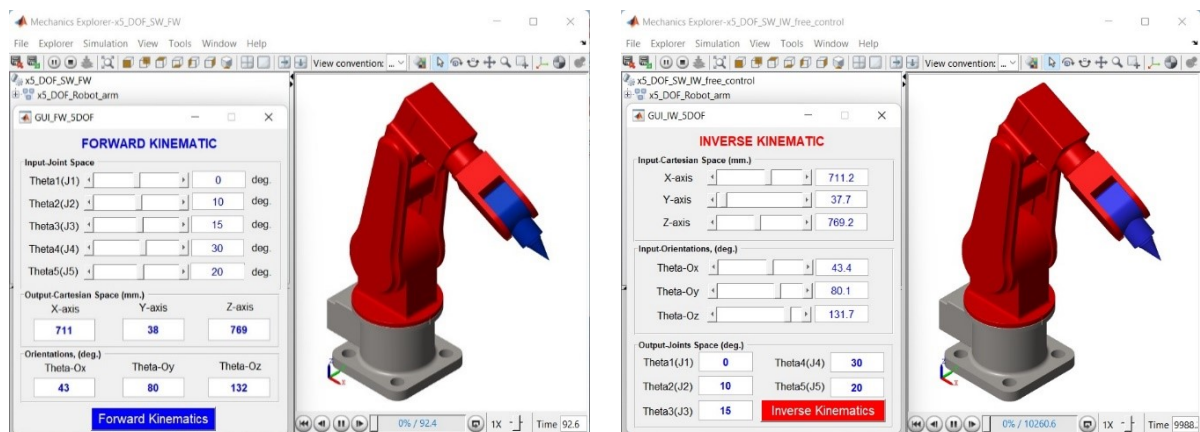
1 การเปรียบเทียบการแสดงผลทางจลนศาสตร์

1.1 แบบจำลองจลนศาสตร์ไปข้างหน้า ตรวจสอบความถูกต้องด้วยการกำหนดค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ (Joints angle) ตามข้อมูลตารางที่ 3 ร่วมกับการกำหนดค่าแบบสุ่ม (random values) ด้วยฟังก์ชันของโปรแกรมแมทแลป “randi” รวมเป็น 10 ชุดข้อมูล (Ting, Hairi, Zaman, Ibrahim, & Moubark, 2021) ดังตารางที่ 4 จากนั้นนำชุดข้อมูลการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ ป้อนลงแบบจำลอง ดังภาพที่ 13 ก) ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ข้อมูลการทดสอบและผลการคำนวณค่าจลนศาสตร์ไปข้างหน้า

ชุดข้อมูล	การระบุค่าจากผู้ใช้ (User input)					ผลการคำนวณของแบบจำลอง (Output of modeling)					
	มุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ (deg)					พิกัดปลายแขนกล (mm)			ท่าทางแขนกล (deg)		
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	Px	Py	Pz	θ_x	θ_y	θ_z
1*	0	10	15	30	20	711	38	769	43	80	132
2*	45	15	10	60	50	382	589	770	100	40	128
3*	0	-10	-15	-30	-20	415	38	1438	43	80	48
4*	-45	-15	-10	-60	-50	319	-113	1419	40	80	52
5	108	44	-21	-41	36	-210	920	640	79	49	136
6	150	-20	48	33	-50	-371	320	927	123	37	75
7	-129	28	53	15	-44	-420	-455	371	129	119	127
8	-135	-14	54	32	28	-248	-326	598	97	118	151
9	126	32	46	-69	1	-317	442	283	96	80	168
10	166	47	38	0	71	-338	84	301	28	103	114

หมายเหตุ: *คือชุดข้อมูลจากแสดงผลของหุ่นยนต์แขนกลจำลองด้วยโปรแกรม CAD



ภาพที่ 13 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ด้วยโปรแกรมแมทแลป ก) จลนศาสตร์ไปข้างหน้า และ ข) จลนศาสตร์ย้อนกลับ

การแสดงผลของแบบจำลองสามารถแสดงค่าพิกัดส่วนปลายแขนกลและท่าทางของแขนกล พร้อมกับแสดงภาพแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมในเวลาเดียวกัน ซึ่งเมื่อนำเข้าสู่ชุดข้อมูลการหมุนของข้อต่อ ตามตารางที่ 4 พบว่าผลการคำนวณค่าพิกัดส่วนปลายแขนกลตรงกับการแสดงผลของโปรแกรม CAD ดังตัวอย่างการแสดงผล ตารางที่ 3 ชุดข้อมูลลำดับที่ 1-4 และจากการทำการสุ่มตัวเลขค่ามุมการหมุนของข้อต่อ จึงสรุปได้ว่าการสร้างตาราง D-H พารามิเตอร์ และการคำนวณค่าการแปลงเมทริกซ์เอกพันธ์ (Homogeneous transformation matrices) เป็นขั้นตอนที่เป็นรูปแบบแน่นอนในการสร้างสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้าของหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมได้ แต่มีความแตกต่างกันเล็กน้อยด้านทิศทางของแกนอ้างอิง (frame) ในแต่ละข้อต่อที่เป็นไปตามกฎการกำหนดทิศทางของแกนอ้างอิงดังที่นำเสนอแล้ว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานบทความวิจัยที่มีจำนวนข้อต่อหมุนเท่ากัน (Qassem, Abuhadrous, & Elaydi, 2010), (Iliukhin et al., 2017) และ (Mehmet, 2021)

1.2. แบบจำลองจลนศาสตร์ย้อนกลับที่สร้างขึ้นมีการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการกำหนดค่าพิกัดปลายแขนกล (Position) และท่าทางของแขนกล (Orientations) จากผลการคำนวณจลนศาสตร์ไปข้างหน้า เมื่อนำค่าดังกล่าวป้อนเข้าสู่แบบจำลองตามตารางที่ 5 ตามลำดับ พบว่าแบบจำลองสามารถแสดงค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ พร้อมกับแสดงภาพแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมในเวลาเดียวกันได้อย่างถูกต้อง และยังพบว่าการปรับตำแหน่งทศนิยม (Decimal place, DP) เช่นการปรับ DP เป็น 0 ผลการคำนวณของชุดข้อมูลที่ 2, 4 และ 10 สามารถแสดงผลการคำนวณและแสดงภาพแบบจำลองที่ถูกต้อง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบก่อนหน้า

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณค่าจลนศาสตร์ย้อนกลับ

ชุดข้อมูล	การระบุค่าจากผู้ใช้ (User input)						ผลการคำนวณของแบบจำลอง (Output of modeling)					ทศนิยม (DP)
	พิกัดปลายแขนกล (mm)			ท่าทางแขนกล (deg)			มุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ (deg)					
	Px	Py	Pz	θ_x	θ_y	θ_z	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	
1*	711	38	769	43	80	132	0	10	15	30	<u>18</u>	0
	711.2	37.7	769.2	43.4	80.1	131.7	0	10	15	30	20	1
2*	382	589	770	100	40	128	45	15	10	60	50	0
3*	415	38	1438	43	80	48	0	-10	-15	-30	<u>-19</u>	0
	414.9	37.7	1438.4	43.4	80.1	48.3	0	-10	-15	-30	-20	1
4*	319	-113	1419	40	80	52	-45	-15	-10	-60	-50	0
5	-210	920	640	79	49	136	108	44	-21	-41	<u>37</u>	0
	-210.2	919.5	639.7	79.0	48.5	136.4	108	44	-21	-41	36	1
6	-371	320	927	123	37	75	150	-20	48	<u>34</u>	-50	0
	-371.0	319.7	927.3	123.0	37.3	74.6	150	-20	48	33	-50	1
7	-420	-455	371	129	119	127	-129	28	53	15	<u>-45</u>	0
	-420.0	-454.9	371.2	128.9	119.2	127.3	-129	28	53	15	-44	1
8	-248	-326	598	97	118	151	-135	-14	54	<u>31</u>	28	0
	-248.3	-325.2	598.1	97.0	118.2	150.8	-135	-14	54	32	28	1
9	-317	442	283	96	80	168	126	32	46	<u>-75</u>	3	0
	-316.9	441.5	283.2	96.0	80.1	168.4	126	32	46	<u>-67</u>	1	1
	-316.92	441.49	283.24	96.04	80.08	168.35	126	32	46	-69	1	2
10	-338	84	301	28	103	114	166	47	38	0	71	0

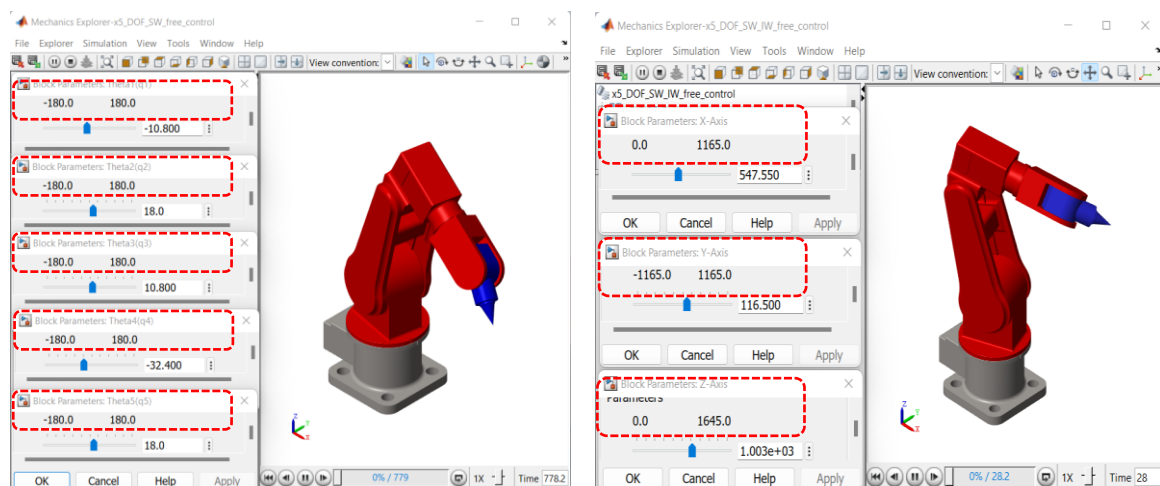
หมายเหตุ: *คือชุดข้อมูลการแสดงผลของหุ่นยนต์แขนกลจำลองด้วยโปรแกรม CAD และผลการคำนวณ xx คือข้อมูลที่คลาดเคลื่อนจากค่าที่ถูกต้อง

หากการแสดงผลของแบบจำลองไม่ปรับจำนวนตำแหน่งทศนิยมให้มีความละเอียดมากขึ้นก็จะทำให้ผลการคำนวณค่าเกิดความคลาดเคลื่อนไป 1-2 องศา และการปรับ DP เป็น 2 เพียงพอต่อการแสดงผลค่าการคำนวณของแบบจำลองจลนศาสตร์ย้อนกลับที่ให้ผลที่ถูกต้อง นอกจากนี้ค่าผลการคำนวณที่เกิดความคลาดเคลื่อนนั้นจะเกิดขึ้นที่มุมการหมุนของข้อต่อส่วนปลาย

แขนกล θ_4 และ θ_5 เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนจากการบิดเศษที่มาจากรำดับของการคำนวณสอดคล้องกับ (Ting et al., 2021) และ (Hemhirun & Tanpradit, 2022)

2. แบบจำลองการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรม

จากแบบจำลองทางจลนศาสตร์ในขั้นตอนก่อนหน้ามาพัฒนา เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเห็นการควบคุมใน 2 แบบ แบบแรก คือแบบควบคุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ (Joint mode) ที่สามารถปรับแถบเลื่อนค่า (Slider bar) หรือระบุเป็นตัวเลขลงในช่องข้อมูล (ช่วงการหมุน ดังตารางที่ 2) ดังภาพที่ 14 ก) รูปแบบนี้ผู้ใช้งานแบบจำลองจะเข้าใจถึงทิศทางการหมุนของข้อต่อแขนกลตามการศึกษาในภาคทฤษฎีการกำหนดแกนอ้างอิง และเห็นถึงขอบเขตของมุมการหมุนที่ไม่สามารถหมุนได้จากการขัดตัวของแขนกล และแบบที่สอง คือการควบคุมแบบเชิงเส้น (Linear mode) ที่ใช้การปรับแถบเลื่อน หรือระบุเป็นตัวเลข (ช่วง Px: -1165 ถึง 1165 มม., Py: -1165 ถึง 1165 มม., Pz: 0 ถึง 1645 มม.) เช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 14 ข) แต่สำหรับรูปแบบนี้ผู้ใช้งานจะเห็นเมื่อท่าทางของปลายแขนกลอยู่ในตำแหน่งใดเมื่อปรับแถบเลื่อนในแนวนอน X-axis, Y-axis และ Z-axis แกนใดแกนหนึ่ง ที่ส่วนปลายแขนกลจะเคลื่อนตามแกนพิกัดอ้างอิงที่ฐาน ทำให้ผู้ใช้งานเห็นการเคลื่อนที่แบบหมุนที่ข้อต่อต่าง ๆ พร้อมกันที่สัมพันธ์กับส่วนปลายที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการสั่งงานให้แขนกลเคลื่อนตามแกนอ้างอิงผ่านจุดที่แขนกลเกิดภาวะเอกฐาน (Singularity) ผลการคำนวณของสมการจลนศาสตร์จะหาคำตอบผิดพลาดและทำให้แบบจำลองหยุดการทำงานที่ต้องมีการหลีกเลี่ยงและแนวทางแก้ไข (Oetomo & Ang Jr, 2009) เพื่อให้เมื่อควบคุมผ่านในจุดที่เกิดภาวะเอกฐานแล้วแบบจำลองจะยังคงสามารถทำงานได้ ทั้งนี้การแสดงผลของแบบจำลองทั้งสองแบบจะแสดงผลตามเวลา (Real time) ขณะเมื่อผู้ใช้ปรับเปลี่ยนค่าการควบคุมแขนกล



ภาพที่ 14 แบบจำลองการควบคุมหุ่นยนต์แขนกล ก) Joints Mode และ ข) Linear Mode

จากขั้นตอนการสร้างต้นแบบแขนกล การศึกษาทางจลนศาสตร์ การสร้างแบบจำลอง และสุดท้ายได้แบบจำลองที่เหมาะสมเป็นสื่อการสอนเสมือนจริงที่ยืดหยุ่น สามารถอธิบายถึงการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมที่เหมาะสมกับนักศึกษา ผู้อบรม ตลอดจนผู้สนใจที่สนใจการสร้างแบบจำลอง การควบคุมหุ่นยนต์แขนกลเบื้องต้น และเป็นพื้นฐานด้านการควบคุม ตลอดจนความตระหนักถึงความปลอดภัยต่อการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจริง (Industrial robot arm) ซึ่งจุดแข็งของงานวิจัยชิ้นนี้คือ 1) การนำเสนอขั้นตอนการนำเข้าต้นแบบที่สนใจศึกษาเข้าสู่การสร้างการแสดงผลของแบบจำลองเสมือนจริง 2) แสดงขั้นตอนวิธีการทางจลนศาสตร์ที่มีภาพประกอบทุกขั้นตอนมีการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และ 3) การประยุกต์ใช้งานกับโปรแกรมพื้นฐานทางวิศวกรรมที่นักศึกษาหรือผู้สนใจสามารถเข้าถึงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในแนวทางเดียวกัน (Alani, Abbar, & Abbood, 2020), (Xia, Xiao, & Ji, 2022) ที่ประยุกต์ใช้โปรแกรมแม่แบบในการสร้างแบบจำลองแต่มีความแตกต่างกันด้านการนำเข้าต้นแบบที่ผู้สนใจต้องการศึกษา และการประยุกต์ใช้โปรแกรม CAD แทนการใช้หุ่นยนต์แขนกลจริงในการทดสอบความถูกต้องของการคำนวณทางจลนศาสตร์ในแนวทางเดียวกัน (Cristoiu & Nicolescu, 2017)

สรุปผลวิจัยและอภิปรายผล

การจำลองการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลเสมือนจริงด้วยโปรแกรมแมทแลป จากการนำเข้าต้นแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ทำให้สามารถเชื่อมโยงองค์ความรู้จากการศึกษาจลนศาสตร์ในภาคทฤษฎีกับภาคปฏิบัติที่ต้องกำหนดทิศทางและสั่งการควบคุมให้กับข้อต่อต่าง ๆ ของหุ่นยนต์แขนกล เพื่อให้แบบจำลองไปในทิศทางที่ถูกต้องและแม่นยำ ทำให้ผู้ใช้งานเข้าใจถึงช่วงขอบเขตการสั่งการควบคุมแบบแยกข้อต่อหมุน และการสั่งการควบคุมแบบเลื่อนตามแกนอ้างอิงหรือแบบเชิงเส้น นอกจากนี้ยังทำให้ผู้ใช้งานเกิดความคุ้นเคยกับการสั่งควบคุมและเกิดความตระหนักต่อการควบคุมผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นขณะการจำลอง ดังนั้นแบบจำลองที่จัดสร้างขึ้นเหมาะเป็นสื่อการสอนทางเลือกแบบเสริมประสบการณ์ในภาคทฤษฎีก่อนการฝึกภาคปฏิบัติกับหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจริงอีกแนวทางหนึ่งด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้การสนับสนุน ซอฟต์แวร์ที่มีลิขสิทธิ์ SolidWorks EDU Edition 2010- 2011 NETWORK Serial Number 25734@rmutk-4c2643252 และขอขอบพระคุณบริษัท MathWorks MATLAB R2021a License 9389346 MathWorks Trial-13 Sep 2021.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alani, T., Abbar, A., & Abbood, M. (2020). Inverse Kinematics Analysis and Simulation of a 5 DOF Robotic Arm using MATLAB. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 16, 10. doi:10.22153/kej.2020.12.001
- [2] Cristoiu, C., & Nicolescu, A. (2017). Validation of forward geometric models for ABB robots using virtual models and the software applications CATIA and ABB Robot Studio. *Proceedings in Journal of Manufacturing Systems*, 12(4), 145-153.
- [3] Fariat, T. (2020). *Robotic Arm*. Retrieved. <https://grabcad.com/library/robotic-arm-226>
- [4] Hemhirun, S., & Tanpradit, D. (2022). Kinematics and Motion Modeling of a Robotic Arm using MATLAB Program. *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 17(1), 40-52.
- [5] Iliukhin, V., Mitkovskii, K., Bizyanova, D., & Akopyan, A. (2017). The modeling of inverse kinematics for 5 DOF manipulator. *Procedia Engineering*, 176, 498-505.
- [6] Mehmet, G. (2021). Kinematic Analysis of Open-Source 5 DoF Robot Arm. *Journal of Soft Computing and Artificial Intelligence*, 2(1), 9-18.
- [7] Oetomo, D., & Ang Jr, M. H. (2009). Singularity robust algorithm in serial manipulators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(1), 122-134.
- [8] Qassem, M. A., Abuhadrous, I., & Elaydi, H. (2010). *Modeling and Simulation of 5 DOF educational robot arm*. [Paper presentation]. ICACC, Shenyang, China.
- [9] Rahul, G., Ankush, G., Ashish, Z., & Ajay, M. (2017). Review on Development of Industrial Robotic Arm. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(3), 1752-1755.
- [10] Shah, N. S. E. B., Osman, K., & Zainuddin, N. (2020). *5-Axis of Mitsubishi RV-2AJ Robotics Arm Modelling Using Solidworks*. [Paper presentation]. 16th IEEE International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA).
- [11] Thanyrat, P., & et al. (2021). Human resource competency development to support the Thailand 4.0. *Nakhon Lampang Buddhist's Journal*, 10(1), 228-243.

- [12] Ting, H. Z., Hairi, M., Zaman, M., Ibrahim, M., & Moubark, A. (2021). Kinematic analysis for trajectory planning of open-source 4-DoF robot arm. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(6), 769-777.
- [13] Varhegyi, T., Melik-Merkumians, M., Steinegger, M., Halmetschlager-Funek, G., & Schitter, G. (2017). A Visual Servoing Approach for a Six Degrees-of-Freedom Industrial Robot by RGB-D Sensing. *Proceedings of the OAGM&ARW Joint Workshop 2017*. DOI: 10.3217/978-3-85125-524-9-14
- [14] Xia, G., Xiao, Z., & Ji, P. (2022, January. 8-9). *ABB-IRB120 Robot Modeling and Simulation Based on MATLAB*. [Paper presentation]. the 2022 International Seminar on Computer Science and Engineering Technology (SCSET).

Received: Apr 10, 2022

Revised: Aug 30, 2022

Accepted: Sep 6, 2022

กลยุทธ์การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า

DIRECT POWER CONTROL STRATEGY FOR LCL-FILTERED VOLTAGE SOURCE INVERTERS FOR CONNECTED TO THE THREE-PHASE GRID

กัจจาด ใจตรง¹ ปิยะนัฐ ใจตรง²¹สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าและระบบควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรีKumjat Jaitrong¹ Piyanat Jaitrong²¹Electrical Technology and Automatic Control System Faculty of Engineering and Technology
Siam Technology College²Electrical Engineering Faculty of Engineering Thonburi University
E-mail: nat.jai.007@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้กลยุทธ์การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงที่นำเสนอเป็นการควบคุมลูปกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ากับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าโดยตรง ส่วนลูปกระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีการตอบสนองที่รวดเร็วในการเข้าสู่สภาวะคงตัว รวมทั้งยังมีกลยุทธ์ในการลดการแกว่งแบบแอททิฟสำหรับตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดฮาร์มอนิกของกระแสเอาต์พุตที่เชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ผลการจำลองการทำงานพบว่า การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลและใช้การลดการแกว่งแบบแอททิฟเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า 380 V ความถี่ 50 Hz โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบได้ 30 kW ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบพีไอสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและแม่นยำในเวลาประมาณ 0.025 s ส่วนค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.92% และ 0.1% ตามลำดับ ซึ่งค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันมีค่าลดลงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 26.21% และ 3.30% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอททิฟ ส่งผลให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

คำสำคัญ: การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรง, อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน, กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

Abstract

The objective of this research is to apply the direct power control strategy for LCL-filtered voltage source inverters for the balanced three-phase connected grid. The proposed direct power control method is a power loop control to direct the power supply to the balanced three-phase grid of electricity. The current loop to control the electric current for a fast response to steady state. An active oscillation reduction strategy is also included for the LCL-filter to reduce the harmonics of the output current connected to the balanced three-phase grid of electricity. The simulation results showed that direct power control for voltage source inverter with the LCL-filter and using the active oscillation reduction connected to the balanced three-phase grid of Electricity at a voltage of 380 V at a frequency of 50 Hz with a power supply of 30 kW to the system. The PI power regulator can accurately control the

power supply to the balanced three-phase grid and accurate in approximately 0.025 s, the harmonic distortion of current and voltage is averaged 1.92% and 0.1% respectively. The harmonic distortion were 26.21% and 3.30% respectively, compared to the absence of an active oscillator. As a result, the harmonic currents are fully subject to the requirements of the IEC1000-3-2 standard.

Keywords: Direct power control, Voltage source inverters, The balanced three-phase grid of electricity

บทนำ

การควบคุมพลังงานโดยตรงเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีข้อดี เช่น การตอบสนองแบบไดนามิกที่รวดเร็ว เป็นต้น ในทางกลับกันความถี่ในการสวิตช์และสเปกตรัมการแพร่กระจายนั้นเป็นข้อเสียของวิธีการควบคุมพลังงานโดยตรงแบบดั้งเดิม แต่ถ้าหากสามารถควบคุมความถี่ในการสวิตช์ให้คงที่ได้ จะทำให้วิธีการควบคุมพลังงานโดยตรงไม่สูญเสียข้อดีนั้นไป ซึ่งแนวคิดพื้นฐานของการควบคุมพลังงานโดยตรงคือการควบคุมโดยตรงของกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟโดยไม่ใช้การควบคุมภายในอย่างใด อย่างไรก็ตามในด้านกริดที่มีความเหนี่ยวนำต่ำมาก(สูงสุด 5%) ซึ่งเป็นเรื่องยากมากที่จะทำให้ได้ตามข้อกำหนดของ IEEE519 ที่ไม่มีตัวกรองแบบแอลซีแอล โดยตัวกรองแบบแอลซีแอลสามารถลดระดับความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตที่ความถี่สวิตช์ให้ต่ำลงได้ แต่ในทางกลับกันตัวกรองแบบแอลซีแอลอาจทำให้เกิดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตที่ความถี่เรโซแนนซ์ขึ้นทั้งในสภาวะไดนามิกและคงที่ได้ ส่วนวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ากับกริดสามเฟสและการกำจัดฮาร์มอนิกที่ไม่ต้องการ ทำให้ประสิทธิภาพการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น (L. A. Serpa, J. W. Kolar, S. Ponnaluri and P. M. Barbosa, 2005: 565-571) อย่างไรก็ตามการใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลจะทำให้การควบคุมอินเวอร์เตอร์ซับซ้อนและความไวต่อฮาร์มอนิกส์ (E. Twining and D. G. Holmes, 2003: 888-895) การกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถละเลยได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีโหลดไม่เชิงเส้นและโหลดอิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อกับกริด นอกจากนี้หากแรงดันไฟฟ้าของกริดนั้นบิดเบี้ยวอาจทำให้อินเวอร์เตอร์สร้างกระแสฮาร์มอนิกขึ้นมา ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมเรโซแนนซ์เพื่อเลือกค่าชดเชยฮาร์มอนิก (Wang Xiongfei, Blaabjerg Frede and Loh Poh Chiang, 2012: 1407-1417) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้เชื่อมต่อกับกริดและลดผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เข้ามารบกวน โดยใช้วิธีการลดการแกว่งแบบอาร์ซีเหมือน ซึ่งวิธีการลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันด้วยการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์ซีแบบแอคทีฟขนานกับตัวกรองแบบซีของตัวกรองแบบแอลซีแอลแบบพาสซีฟ (Wang Xiongfei, Blaabjerg Frede and Loh Poh Chiang, 2015: 4726-4737) และวิธีการลดการแกว่งแบบอาร์แอลซีเหมือนเป็นวิธีลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันด้วยการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟแทนการใช้ตัวกรองด้านเข้าอาร์แอลซีแบบพาสซีฟมีผลทำให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่งและทำให้ประสิทธิภาพของวงจรสูงขึ้น (Vladimir Blasko and Vikram Kaura, 1997: 542-550) อีกทั้งยังสามารถลดการแกว่งแบบแอคทีฟของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยใช้กลยุทธ์การลดการแกว่งแบบแอคทีฟสำหรับตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดฮาร์มอนิกของกระแสเอาต์พุตที่จะเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า (กำจัด ใจตรง, 2563: 27-37)

งานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงที่นำเสนอนี้เป็นการควบคุมลูปกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ากับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าโดยตรง ส่วนลูประแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีการตอบสนองที่รวดเร็วในการเข้าสู่สภาวะคงตัว รวมทั้งยังมีกลยุทธ์ในการลดการแกว่งแบบแอคทีฟสำหรับตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดฮาร์มอนิกของกระแสเอาต์พุตที่เชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยที่กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

วิธีดำเนินการวิจัย

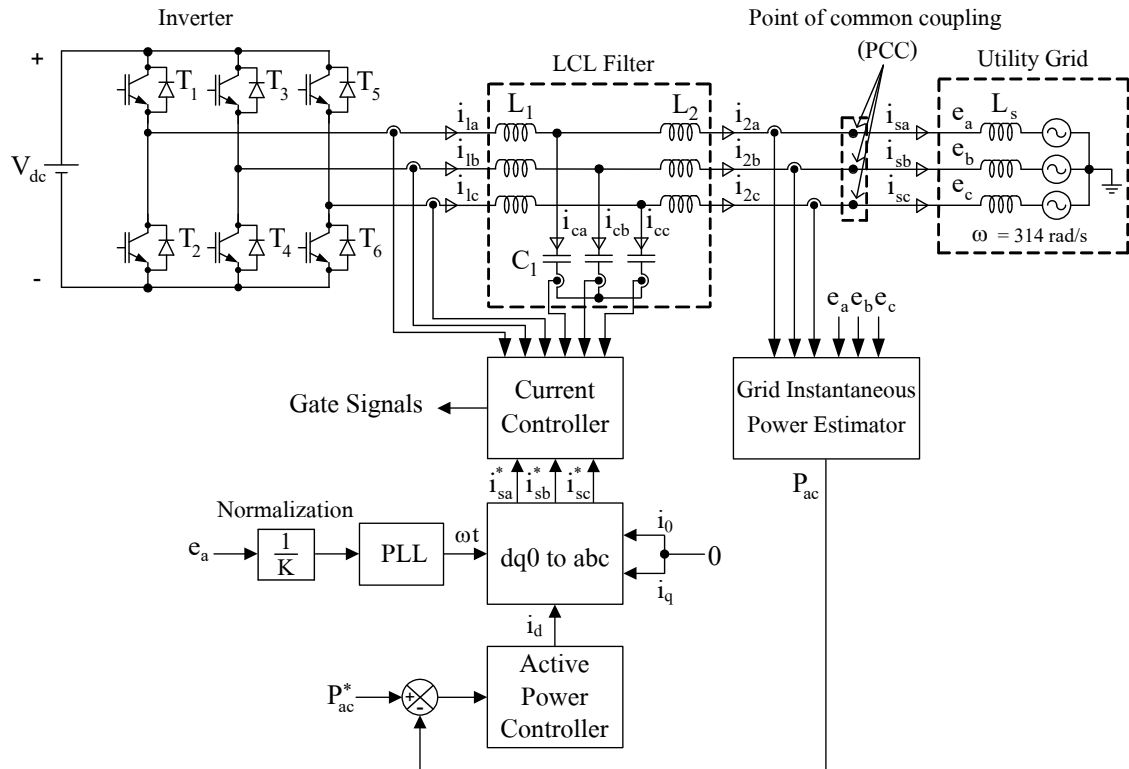
งานวิจัยนี้สามารถแสดงระบบในภาพรวมได้ดังแสดงในภาพที่ 1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้ เมื่อ

e เป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า i_s เป็นกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า และ P_{ac} เป็นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ควบคุมแบบพีดับลิวเอ็มนจะสวิตช์ให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีเฟสตามแรงดันไฟฟ้าที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ในขณะเดียวกันจะมีการควบคุมให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีค่าคงที่ โดยเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนด ค่าความแตกต่างจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีโอเพื่อให้ได้เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการคงค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าง่ายค่าความแตกต่างกับเฟสของแรงดันที่ได้จากเฟสล็อกคลูปจะได้กระแสไฟฟ้าที่กำหนด ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าที่กำหนดกับกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์รวมกับผลคูณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวกรองแบบตัวเก็บประจุกับค่าตัวลดการแกว่งแบบแอกทีฟจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด เพื่อสร้างพัลส์พีดับลิวเอ็มนไปควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟส เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าติดตามกระแสที่กำหนด ซึ่งจะทำการกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าอินเฟสกับแรงดันไฟฟ้าที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

ความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันมีผลต่อค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 1

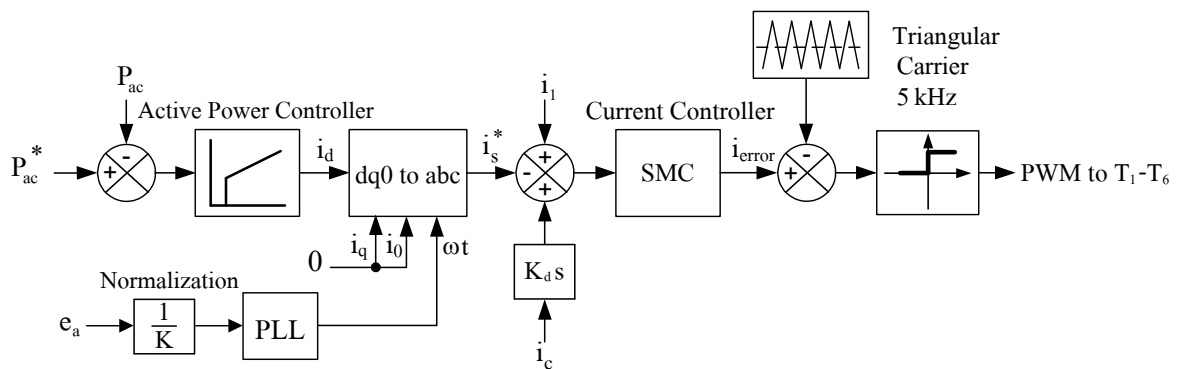
$$PF = \frac{V_1 I_1 \cos \theta_1 + \sum_{h=2}^n V_h I_h \cos \theta_h}{\sqrt{V_1^2 + \sum_{h=2}^n V_h^2} \times \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^n I_h^2}} \quad (1)$$

- 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



ภาพที่ 1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

การวิเคราะห์ระบบควบคุม



ภาพที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

จากภาพที่ 2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน สามารถแบ่งตามการควบคุมได้ดังนี้

ตัวควบคุมระดับกำลังไฟฟ้า

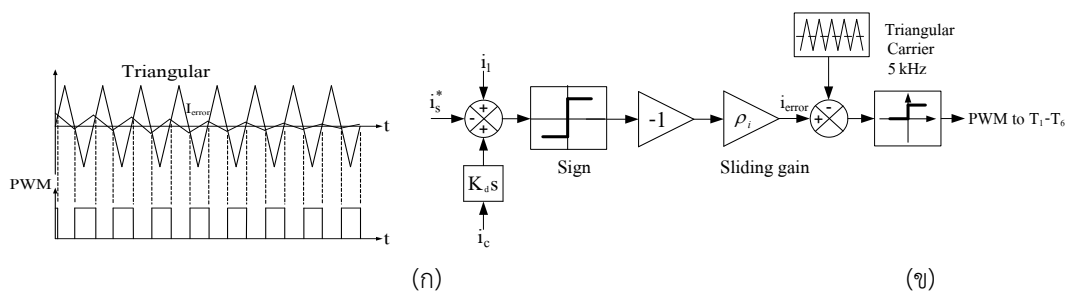
การทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน จำเป็นต้องควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ตามค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนด โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเข้ามาควบคุมความแตกต่างระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนดกับค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_d(s) = (K_p + \frac{K_i}{s})(P_{ac}^*(s) - P_{ac}(s)) \quad (2)$$

เมื่อ P_{ac}^* และ P_{ac} เป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนดและค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าตามลำดับ โดยที่ K_p และ K_i คืออัตราขยายเทอมสัดส่วนและอัตราขยายเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าตามลำดับ

ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าจะนำเอาสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมกระแส (i_{error}) จากการควบคุมแบบสไลด์โหมดของความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าที่กำหนดกับกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์รวมกับสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟไปมอดูเลตกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมความถี่สูง สัญญาณพีดับลิวเอ็มที่เกิดขึ้นจากการเปรียบเทียบจุดตัดของสัญญาณทั้งสอง ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน ดังแสดงในภาพที่ 3 (ก)



ภาพที่ 3 (ก) หลักการทำงานของ การควบคุมสไลด์โหมดแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

(ข) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของ การควบคุมสไลด์โหมดแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

จากภาพที่ 3 (ข) เป็นบล็อกไดอะแกรมการทำงานของ การควบคุมสไลด์โหมด โดยกฎการควบคุมของสไลด์โหมดเป็นไปตามสมการที่ 3 หรือ 4 ซึ่งแสดงใน (ทวีศักดิ์ ทองแสน ธีรยุทธ ขาติชนะยีนยง และณัฐวุฒิ สุวรรณหา, 2558: 18-31)

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

หรือ

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

โดยที่ ρ_i คือการขยายสัญญาณสไลด์โหมดของกระแสไฟฟ้า $\operatorname{sgn}(\cdot)$ คือซิกนัมหรือฟังก์ชันเครื่องหมาย และ $s(x,t)$ คือฟังก์ชันสวิตช์

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

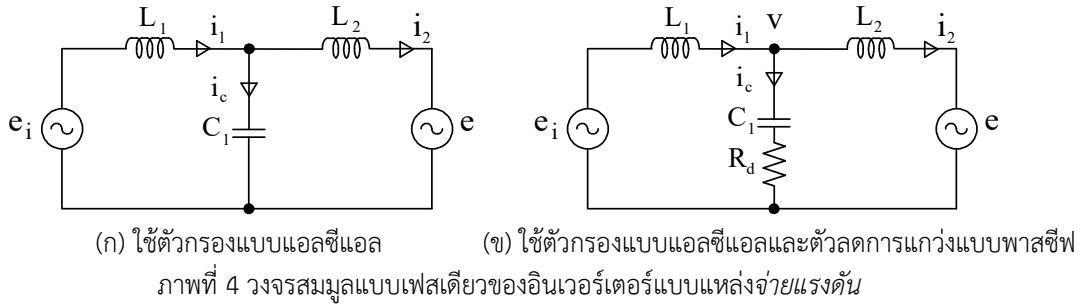
โดย e_i คือ ค่าผิดพลาดของกระแสไฟฟ้า และ x คือ สภาวะของระบบ

ส่วนการกำเนิดสัญญาณพีดับลิวเอ็ม ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณจากการควบคุมแบบสไลด์โหมดกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 5 kHz ทำให้ได้สัญญาณพัลส์ความถี่ 5 kHz เพื่อไปขับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

การวิเคราะห์ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟและการลดการแกว่งแบบแอกทีฟ

ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟเป็นแนวคิดของตัวต้านทานเสมือนดังที่แสดงใน (P.A. Dahono, 2002:1630-1635) การวิเคราะห์ตัวกรองแบบแอลซีแอลและการลดการแกว่งแบบแอกทีฟเพื่อหาความสัมพันธ์ในการลดกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่เรโซแนนท์ โดยในการควบคุมจะสร้างตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟขึ้นมา ซึ่งสามารถพิจารณาจากวงจรสมมูลแบบเฟสเดียวดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) โดยที่ e คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า e_i คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของ

อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน และ L_1, L_2, C_1 คือ ตัวกรองแบบแอลซีแอล ส่วนการวิเคราะห์ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอทที่พจะต้องวิเคราะห์วงจรในภาพที่ 4 (ข) เป็นแนวคิดของตัวควบคุมการแกว่งแบบพาสซีฟ (L. A. Serpa, J. W. Kolar, S. Ponnaluri and P. M. Barbosa, 2005: 565-571) โดยการวิเคราะห์สามารถเริ่มต้นจากการหาความสัมพันธ์ของตัวควบคุมการแกว่งแบบพาสซีฟกับแบบแอทที่พ ซึ่งแสดงใน (กำจัด ใจตรง, 2547: 509-512)



จากภาพที่ 4 (ข) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์เพื่อหากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า (i_s) โดยใช้หลักการวิเคราะห์ของสมการโนด (Node equation) จะได้

$$\frac{V-e}{sL_2} + \frac{V-e_i}{sL_1} + \frac{V}{R_d + \frac{1}{sC_1}} = 0 \quad (6)$$

แก้สมการที่ 6 เพื่อหาค่า V จะได้

$$V = \frac{L_2 C_1 R_d s + L_2}{L_1 L_2 C_1 s^2 + C_1 R_d (L_1 + L_2) s + (L_1 + L_2)} e_i + \frac{L_1 C_1 R_d s + L_1}{L_1 L_2 C_1 s^2 + C_1 R_d (L_1 + L_2) s + (L_1 + L_2)} e \quad (7)$$

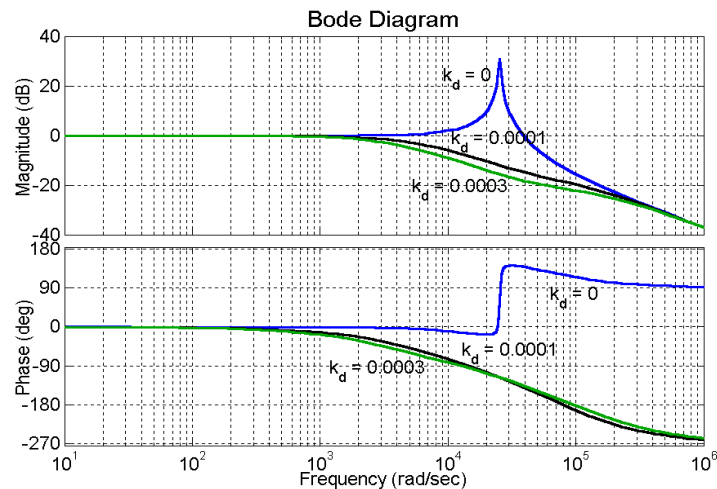
จากวงจรในภาพที่ 4 (ข) สามารถหาค่า i_s ได้ในสมการที่ 8

$$i_s = \frac{A i_s^* - B e}{C s^4 + D s^3 + E s^2 + F s + K_i K_f K} \quad (8)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} A &= C_1 R_d K K_p s^2 + (C_1 R_d K + K K_p) s + K K_i \\ B &= L_1 C_1 s^3 + C_1 R_d s^2 + s \\ C &= L_1 L_2 C_1 \\ D &= C_1 R_d L_1 + C_1 R_d L_2 + K_p K_d K C_1 R_d \\ E &= L_1 + L_2 + K_p K_d K + C_1 R_d K K_p + C_1 R_d K K_d K_i \\ F &= C_1 R_d K_i K + K_p K + K_d K_i K \end{aligned}$$

สมการของระบบตามสมการที่ 8 การปรับตัวควบคุมการแกว่งแบบแอทที่พเพื่อลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสที่เชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า สามารถทำได้โดยการปรับค่า k_d แทนการเพิ่มค่า R_d โดยเมื่อปรับค่า k_d เพิ่มขึ้น มีผลทำให้อัตราขยายของกระแสอินพุตที่ความถี่สูงลดลง ส่งผลทำให้ความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสลดลงด้วย ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสเฟอริงฟังก์ชันของกระแสอินพุตดังสมการที่ 8 เมื่อ k_d เปลี่ยน

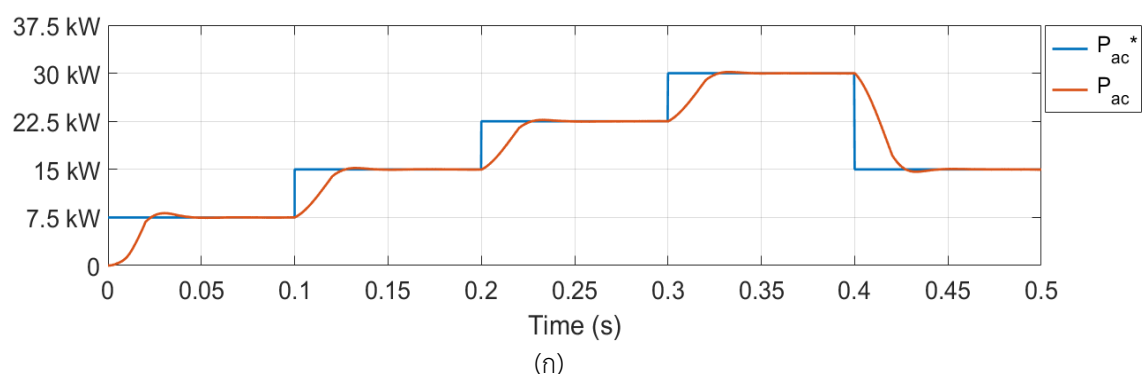
ผลการวิจัย

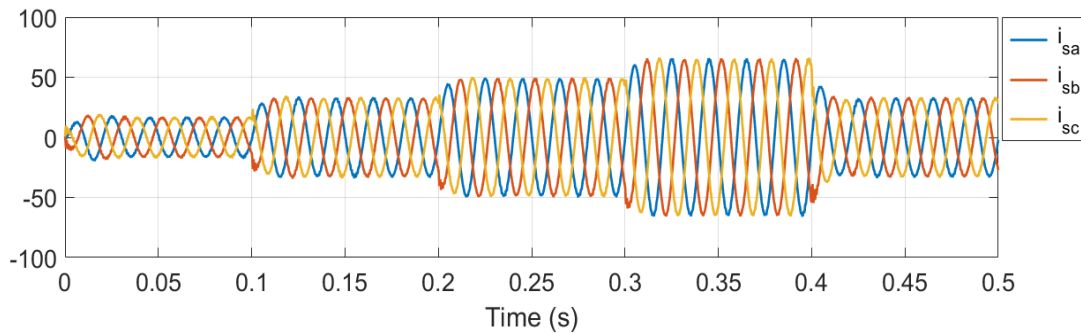
เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแนวคิดที่ได้นำเสนอจากการจำลองการทำงานของวงจรที่มีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 1 ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงาน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันและตัวกรองแบบแอลซีแอล

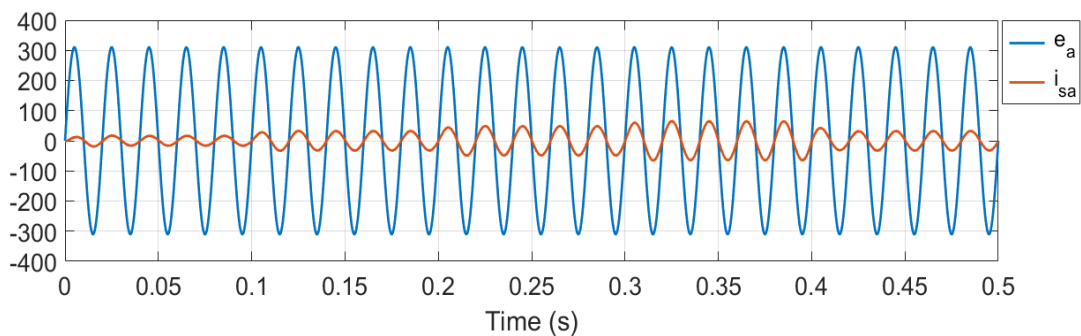
ตัวแปร	ค่าที่ใช้	ตัวแปร	ค่าที่ใช้
พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต	30 kW	ความถี่ในการสวิตช์ (f_s)	5 kHz
แรงดันไฟฟ้า	220 V _{L-N}	อัตราขยายเทอมอนุพันธ์ของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ (K_d)	0.0003
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	900 V _{dc}	อัตราขยายเทอมสัดส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้า (K_p)	25
ตัวเหนี่ยวนำด้านอินเวอร์เตอร์ (L_1)	2 mH	อัตราขยายเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้า (K_i)	5000
ตัวเหนี่ยวนำด้านกริดการไฟฟ้า (L_2)	2 mH	การขยายสัญญาณสไลด์ของกระแสไฟฟ้า (ρ_i)	1
ตัวกรองแบบตัวเก็บประจุ (C_1)	10 μ F		

ผลการจำลองการทำงานดังแสดงในภาพที่ 6 และ 7 ส่วนภาพที่ 8 และ 9 เป็นผลที่ได้จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกัน





(ข)



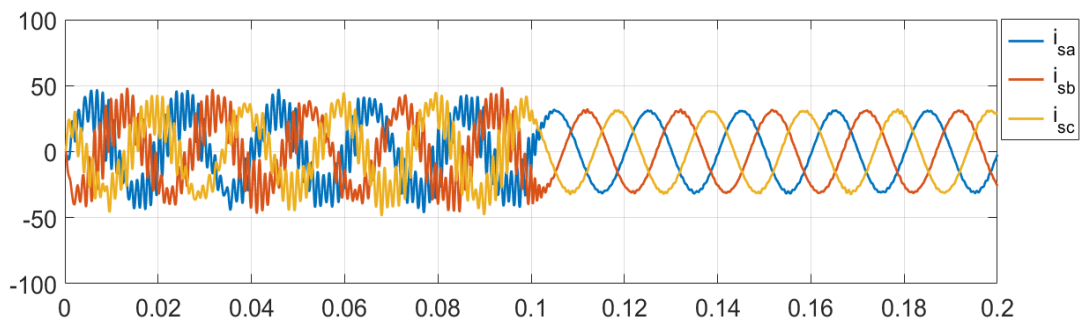
(ค)

ภาพที่ 6 (ก) กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

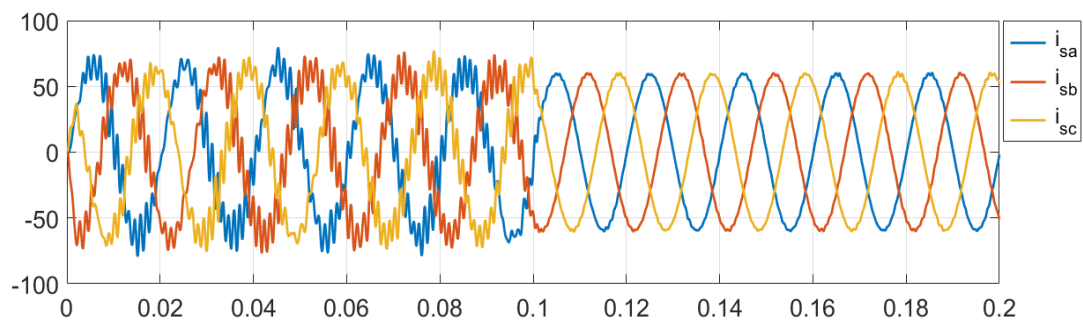
(ข) กระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

(ค) กระแสที่จ่ายให้กริดสามเฟสกับแรงดันเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

จากภาพที่ 6 (ก) เป็นผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า เมื่อตั้งค่าการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันจาก 7.5 kW ไปจนถึง 30 kW เพิ่มขึ้นครั้งละ 7.5 kW ที่เวลา 0.1 s , 0.2 s และ 0.3 s ส่วนที่เวลา 0.4 s ลดการจ่ายกำลังไฟฟ้าลงอย่างฉับพลันจาก 30 kW เป็น 15 kW โดยตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบพีไอสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและแม่นยำในเวลาประมาณ 0.025 s ส่วนกระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าจะแปรผันตามกับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์โหมดจะควบคุมให้กระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าให้มีการตอบสนองที่รวดเร็วในการเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ดังแสดงในภาพที่ 6 (ข) และกระแสที่จ่ายให้กริดสามเฟสอินเฟสกับแรงดันเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้างแสดงในภาพที่ 6 (ค)



(ก) จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าขนาด 15 kW



(ข) จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าขนาด 30 kW

ภาพที่ 7 กระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ (K_d) ที่เวลา 0.1 s

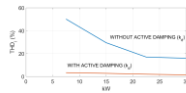
จากภาพที่ 7 เมื่อใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟที่เวลา 0.1 s จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกลดลง จากการจำลองการทำงานเมื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟดังแสดงผลที่ได้ในตารางที่ 2 ส่วนผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ ดังแสดงผลที่ได้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ

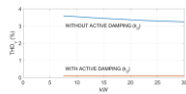
กำลังไฟฟ้าจ่ายให้กริดสามเฟส แบบสมดุลของการไฟฟ้า (kW)	I_s (A)	THD _i (%)	V_s (V)	THD _v (%)	P.F
7.5	11.57	50.12	220	3.59	0.73
15.0	23.44	29.50	220	3.44	0.75
22.5	35.64	16.98	220	3.32	0.77
30.0	46.94	15.92	220	3.24	0.77

ตารางที่ 3 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ

กำลังไฟฟ้าจ่ายให้กริดสามเฟส แบบสมดุลของการไฟฟ้า (kW)	I_s (A)	THD _i (%)	$V_{s,(L-N)}$ (V)	THD _v (%)	P.F
7.5	10.55	2.76	220	0.1	1.00
15.0	22.17	2.19	220	0.1	1.00
22.5	31.35	1.65	220	0.1	1.00
30.0	42.04	1.08	220	0.1	1.00



(ก)

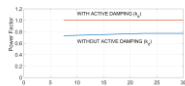


(ข)

ภาพที่ 8 เปรียบเทียบผลของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟที่โหลดต่างๆ กัน

(ก) ผลต่อค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแส (ข) ผลต่อค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของแรงดัน

จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 เมื่อนำไปพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟที่โหลดต่างๆ กัน พบว่าเมื่อไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 28.13% และ 3.40% ตามลำดับ หลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.92% และ 0.1% ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันลดลง ดังแสดงในภาพที่ 8 สำหรับค่าตัวประกอบกำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.76 หลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟทำให้ค่าตัวประกอบกำลังสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบผลของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟที่มีต่อตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่โหลดต่างๆ กัน

ตารางที่ 4 ข้อมูลค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับใดๆ ต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟและกรณีใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟ

มาตรฐาน IEC1000-3-2		ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟ				ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟ			
ฮาร์มอนิกลำดับที่	IEC1000-3-2 Class A	โหลด				โหลด			
		7.5 kW	15 kW	22.5 kW	30 kW	7.5 kW	15 kW	22.5 kW	30 kW
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3	2.300	1.27	3.68	0.79	1.67	0.16	0.14	0.08	0.04
5	1.140	0.76	3.14	2.45	1.29	0.37	0.36	0.18	0.13
7	0.770	1.30	3.09	3.94	0.75	0.14	0.12	0.11	0.09
9	0.400	1.17	4.08	1.83	1.16	0.15	0.09	0.09	0.08
11	0.330	2.02	5.43	0.74	2.17	0.32	0.32	0.12	0.04
13	0.210	0.42	5.67	3.07	3.88	0.20	0.20	0.16	0.10
15	0.150	2.56	5.94	5.73	2.84	0.15	0.15	0.15	0.15
17	0.130	2.98	14.21	5.85	3.35	0.12	0.12	0.10	0.10
19	0.120	4.69	6.73	2.50	0.56	0.12	0.12	0.11	0.10

จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟ มีค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับใดๆ ต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 เนื่องจากมีบางฮาร์มอนิกลำดับที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟ มีค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับใดๆ ต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

สรุปผลวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้กลยุทธ์การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงที่นำเสนอนี้เป็นวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบพีไอเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ากับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าโดยตรง ส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุมแบบสไลด์โหมดเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีการตอบสนองที่รวดเร็วในการเข้าสู่สภาวะคงตัว กลยุทธ์การลดการแกว่งแบบแอคทีฟสำหรับตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดฮาร์มอนิกของกระแสเอาต์พุตที่เชื่อมต่อกับ

กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ผลการจำลองการทำงานพบว่า การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลและใช้การลดการแกว่งแบบแอกทีฟเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า 380 V ความถี่ 50 Hz โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบได้ 30 kW ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบพีไอสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและแม่นยำในเวลาประมาณ 0.025 s ส่วนค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันเมื่อไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 28.13% และ 3.40% ตามลำดับ หลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.92% และ 0.1% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำเปรียบเทียบกับพบว่าค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันจะมีค่าลดลง 26.21% และ 3.30% ตามลำดับ สำหรับตัวประกอบกำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.76 หลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 ซึ่งเมื่อนำเปรียบเทียบกับพบว่าค่าตัวประกอบกำลังหลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าสูงขึ้น 0.24 และค่ากระแสฮาร์มอนิกได้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Twining, E. and Holmes, D. G. (2003). Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18(3), 888-895.
- [2] Serpa, L.A., Kolar, J.W., Ponnaluri, S. and Barbosa, P.M. (2005). A modified direct power control strategy allowing the connection of three-phase inverter to the grid through LCL filters. *Fortieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference*, 1, 565-571.
- [3] P.A. Dahono. (2002). A control method to damp oscillation in the input LC-filter. *Proceedings Power Electronics Specialist Conference*, 4, 1630-1635.
- [4] Vladimir Blasko and Vikram Kaura. (1997). A Novel Control to Actively Damp Resonance in the Input LC Filter of Three-phase Voltage Source Converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33(2), 542-550.
- [5] Wang Xiongfei, Blaabjerg Frede and Loh Poh Chiang. (2012). Synthesis of variable harmonic impedance in inverter-interfaced distributed generation unit for harmonic damping throughout a distribution network. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(4), 1407-1417.
- [6] Wang Xiongfei, Blaabjerg Frede and Loh Poh Chiang. (2015). Virtual RC Damping of LCL-Filtered Voltage Source Converters with Extended Selective Harmonic Compensation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(9), 4726-4737.
- [7] กำจัด ใจตรง. (2547). วิธีควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟด้านเข้าตัวกรองแบบแอล-ซีของวงจรเรกติฟายเออร์สามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็ม. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27.
- [8] กำจัด ใจตรง และปิยะนัฐ ใจตรง. (2563). การลดการแกว่งแบบแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี*, 4(2), 27-37.
- [9] ทวีศักดิ์ ทองแสน ธีรยุทธ ขาดิชนะยีนยง และณัฐวุฒิ สุวรรณทา.(2558). การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบสไลด์โหมดสำหรับอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตเพื่อแก้ไขแรงดันไม่สมดุล แรงดันตกชั่วขณะและแรงดันเกินชั่วขณะในระบบไฟฟ้าสามเฟสโดยใช้อัลกอริทึมแบบเร็ว. *วารสารวิจัย มช*, 15(1), 18-31.

Received: Jul 16, 2022

Revised: Aug 23, 2022

Accepted: Aug 30, 2022

ระบบการตรวจจับร่องน้ำในสวนโดยใช้การประมวลผลภาพเพื่อนำทางของเรือรดน้ำแบบอัตโนมัติ

THE TRENCH CHANNEL DETECTION WITH IMAGE PROCESSING FOR AUTONOMOUS BOAT WATER SPRAYER

วรวิทย์ กังหัน, ภาณุภูมิ ปฐมภาคย์ ศรีณย์ ฉัตรธัญญกิจ, โพธิวัฒน์ งามขจรวิวัฒน์, อันยวัต สมใจทวีพร
สาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

Worawut Kunghun, Pakpoom Patompak, Sarun Chattunyakit, Potiwat

Ngamkajornwivat, Tunyawat Somjaitaweeporn

Department of Robotics and Automation Engineering, Faculty Engineering and Technology,

Panyapiwat Institute of Management

E-mail: worawutkunghun@gmail.com

บทคัดย่อ

การปลูกพืชแบบร่องสวนเป็นหนึ่งในวิธีการปลูกพืชที่ง่ายต่อการบริหารจัดการในเรื่องทรัพยากรน้ำ การรดน้ำแปลงพืชในร่องสวนจำเป็นต้องมีการใช้ทรัพยากรมนุษย์ในการบริหารจัดการ และได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ในการรดน้ำโดยใช้เรือติดปั๊มสูบน้ำเพื่อให้สามารถรดน้ำในปริมาณที่มากและมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามก็ยังไม่สามารถแก้ปัญหาการใช้ทรัพยากรมนุษย์ในการทำซ้ำๆเช่นการรดน้ำได้ ดังนั้นการทำให้เรือรดน้ำสามารถทำงานตามแผนงานและรดน้ำได้ด้วยตัวเองโดยการขับเคลื่อนตัวไปในร่องสวนได้ด้วยตัวเองจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการช่วยบริหารจัดการทรัพยากรมนุษย์ในการทำการเกษตรแบบร่องสวนได้

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบที่ช่วยแก้ปัญหาการนำทางของเรืออัตโนมัติในร่องสวนโดยใช้แค่กล้องในการตรวจจับขอบเขตของร่องน้ำในสวนการเกษตรด้วยการนำระบบแมชชีนวิชัน (Machine Vision) มาประมวลผลภาพ เพื่อหาเส้นแนวทางของร่องสวนทั้งด้านซ้ายและด้านขวาโดยใช้ความแตกต่างของสีของน้ำและขอบดิน เมื่อได้ภาพที่แยกน้ำกับดินก็จะสามารถหาแนวขอบของร่องน้ำด้านซ้ายขวา (Channel Line) เพื่อใช้ในการหาจุดกึ่งกลางจากการตัดกันของแนวขอบของร่องน้ำ กับเส้นแนวระนาบ (Horizontal Line) หลายๆเส้น ทำให้เกิดแนวเส้นนำทางของร่องสวน (Trench Channel Guideline) แนวเส้นนำทางนี้จะบอกถึงทิศทางของร่องสวน และนำมาใช้ในการคำนวณหาองศาการเคลื่อนที่ของเรือ ข้อมูลลงคานนี้จะส่งต่อไปยังระบบควบคุมทำให้เรือสามารถเคลื่อนที่และบังคับการเลี้ยวได้เองอัตโนมัติ

คำสำคัญ: การประมวลผลทางภาพ, การนำทางอัตโนมัติของเรือ, การทำแผนที่ร่องสวน, ร่องสวนการเกษตร

Abstract

Trench Channel agriculture is one of the easiest ways to manage crops in terms of water resources. Watering the crops requires the management of human resources which waste in human hours and labor cost. To reduce the waste and cost in human labor, boat and pump are integrated to be an equipment for watering crops in the field. This equipment be able to drive water in large quantities and efficiently. However, it still need human to maneuver the boat in the trench channel. For the intelligent agriculture, the equipment should be able to control autonomously and possibly to plan and manage without human control.

This research introduces the system to solve the autonomous navigation problem by using camera to detect the trench channel via machine vision by using image processing to determine the trench channel. The concept is to separate the trench channel by using difference color of ground and

water to get the left and right trench channel lines. By using the intersection between the trench channel lines with the number of horizontal lines, the channel guideline can be calculated, which describes the direction of the trench channel. By comparing with the reference center point, the degree of maneuver can be determined and use as the command that send to the control the boat to maneuver autonomously.

Keywords: Image Processing, Autonomous Boat Navigation, Channel Orchard Mapping, Trench Channel Agriculture

บทนำ

เนื่องจากเกษตรกรรมเป็นภาคการผลิตที่สำคัญของประเทศไทยมาเป็นระยะเวลายาวนาน กำลังแรงงานของประเทศที่มีงานทำ 37.78 ล้านคน อยู่ในภาคการเกษตร 10.58 ล้านคน (สำนักงานสถิติแห่งชาติกระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม, 2562) ทั้งนี้การทำการเกษตรในแต่ละประเภทมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของพืช และพื้นที่ปลูกพืช การปลูกพืชแบบร่องสวนเป็นส่วนหนึ่งในวิธีการปลูกพืชเพื่อให้ง่ายต่อการรดน้ำ ซึ่งการรดน้ำเป็นปัจจัยหลักในการเพาะปลูกพืช ดังนั้นการรดน้ำพืชจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างหนึ่งที่เกษตรกรต้องคำนึงถึง ในปัจจุบันการปลูกพืชแบบร่องสวน เกษตรกรจะใช้วิธีการรดน้ำด้วยการตักรดน้ำด้วยมือหรือการใช้ปั๊มสูบน้ำติดตั้งไว้บนเรือที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดร่องโดยวิธีดังกล่าวต้องใช้แรงงานคนในการตักรดน้ำหรือใช้คนในการบังคับเรือ ซึ่งต้องใช้แรงงานคนที่มาก และใช้ระยะเวลานานในการทำงาน ด้วยข้อจำกัดจากการที่เหนื่อยของแรงงานภาคการเกษตรที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง และต้นทุนในการจ้างแรงงานที่สูงขึ้นเรื่อยๆ เรือรดน้ำอัตโนมัติจึงมีส่วนช่วยในการลดต้นทุนด้านแรงงานและระยะเวลาที่รวดเร็วยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตามการพัฒนาเรือรดน้ำอัตโนมัติมีความยากในการพัฒนาเนื่องด้วยอุปกรณ์ตรวจจับต่างๆที่มีราคาแพง และพื้นที่แต่ละพื้นที่และร่องสวนมีลักษณะไม่เหมือนกัน ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้ทางคณะผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงปัญหาจึงได้มีการแก้ไขปัญหาโดยการนำกล้องซึ่งมีราคาไม่สูงมากมาใช้ร่วมกับระบบแมชชีนวิชัน (Machine vision) เพื่อมาประมวลผลภาพหาค่าขอบเขตการมองเห็น (Field of View, FOV) รวมถึงการแยกร่องดินกับร่องน้ำออกจากกันเพื่อให้ได้ เส้นนำทางของร่องสวน (Trench Channel Guideline) เส้นนำทางของร่องสวนนี้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาองศาที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางของร่องสวน ค่าองศาที่เปลี่ยนไปจะนำไปใช้ในการกำหนดการเคลื่อนที่ของเรือให้สามารถเลี้ยวไปตามร่องสวนได้อย่างอัตโนมัติผ่านระบบควบคุมเรือต่อไป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

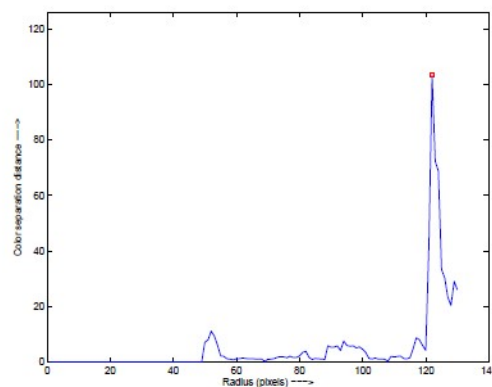
Anbumani Subramanian และคณะ [1] การวิจัยนี้ได้พัฒนาการตรวจจับแนวชายฝั่งในรูปภาพสำหรับการเดินเรืออัตโนมัติ เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ภาพเพื่อช่วยในการเดินเรืออัตโนมัติ ปัญหาคือการกำหนดพื้นที่ของภาคเดินเรือในสภาพแวดล้อมทางน้ำโดยระบุพื้นที่น้ำ หรือแนวชายฝั่งโดยใช้รูปภาพ เนื่องจากภาพของฉากในน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเนื่องจากแสง เงา และการสะท้อน ดังนั้นจึงเป็นเรื่องยากที่จะระบุขอบเขตน้ำในฉากจากภาพ ในบทความนี้ ได้นำเสนอวิธีการที่พัฒนาขึ้นสำหรับการตรวจจับแนวชายฝั่งในภาพรอบทิศทาง เราทดสอบวิธีการด้วยภาพต่างๆ จากแม่น้ำ ทะเลสาบ และสระน้ำ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าวิธีการของเราระบุแนวชายฝั่งในภาพได้อย่างถูกต้องดังภาพที่ 1(ก) การพัฒนาการวิเคราะห์ภาพแนวรัศมีตามวิธีที่รับรู้ได้วิธีการตรวจจับแนวชายฝั่งในภาพจากรอบทิศทางกล้องที่ติดตั้งบนเรืออิสระ วิธีการดังกล่าวจะนำไปใช้ในการช่วยนำทางอัตโนมัติของรถพื้นผิวอิสระ ได้มีการทดสอบวิธีการดังกล่าวกับภาพจากสภาพแวดล้อมของแม่น้ำทะเลสาบ และสระน้ำ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ภาพของเราแสดงให้เห็นว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นระบุแนวชายฝั่งได้ถูกต้อง จึงเหมาะสำหรับการปรับใช้เป็นส่วนประกอบที่เชื่อถือได้ในแบบเรียลไทม์ระบบนำทางของเรือ



(ก)



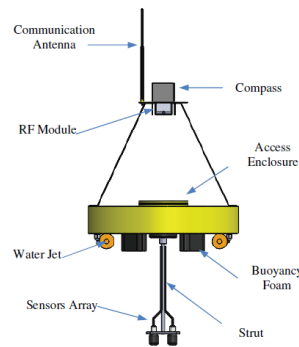
(ข)



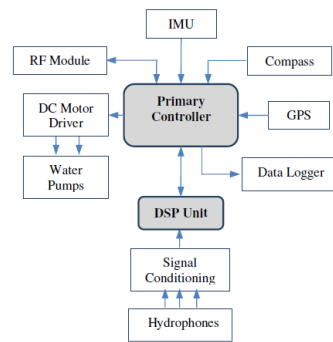
(ค)

ภาพที่ 1 (ก) ภาพถ่ายของยานพาหนะพื้นผิวดำน้ำอัตโนมัติ (ASV) ที่ใช้ในการวิจัย (ข) Radial analysis of local neighborhoods along an angle (shown in green color) (ค) Separation distance of two-color clusters in local neighborhoods for increasing radius along the angle

M. H. A. Majid และ M. R. Arshad [2] ได้ออกแบบยานพาหนะพื้นผิวดำน้ำอัตโนมัติ (ASV) เป็นยานพาหนะทางทะเลขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการความซับซ้อนของกิจกรรมนอกชายฝั่งที่หลากหลายในปัจจุบัน ASVs ได้รับการพัฒนาโดยพื้นฐานจากการออกแบบทั่วไปในโครงสร้าง และความสามารถในการเคลื่อนที่ ในการวิจัยของ ASV ในปัจจุบันคือแอปพลิเคชันการออกแบบ ASV แบบเดิมมีข้อจำกัดที่มีรัศมีวงเลี้ยวขนาดใหญ่ซึ่งไม่เหมาะกับวัตถุประสงค์ในการจับกลุ่มโดยเฉพาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่ขนาดเล็กในบทความนี้ต้นแบบ ASV ใหม่ได้รับการพัฒนาเพื่อรองรับความต้องการของรูปแบบฝูง และความเสถียรในการเคลื่อนที่ ในงานวิจัยนี้ นำเสนอแนวคิดการออกแบบใหม่ของแพลตฟอร์ม ASV สำหรับการใช้งานแบบกลุ่มโดยเฉพาะ หลักมีการกล่าวถึงเกณฑ์การออกแบบ ประการแรก ASV ที่พัฒนาแล้วควรจะมีน้ำหนักเบา ระยะเวลา และพื้นที่ โดยที่ กลไกถูกดัดแปลงเพื่อให้ ASV เสถียร ประการที่สองรัศมีวงเลี้ยวที่เล็กทำได้โดยการเลือกทรงกระบอก รูปร่างสำหรับการออกแบบตัวถัง รัศมีวงเลี้ยวที่เล็กช่วยให้ ASV เป็นการปรับทิศทางตัวเองไปยังมุมหัวเรือที่ต้องการโดยไม่ต้องเปลี่ยนตำแหน่ง ในอนาคตอันใกล้รูปแบบที่สมบูรณ์ของระบบเพื่อวัตถุประสงค์ในการควบคุมระบบ และทำให้แพลตฟอร์มที่ออกแบบใช้งานได้ง่าย



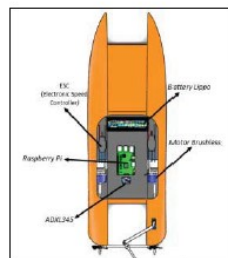
(ก)



(ข)

ภาพที่ 2 (ก) CAD design of the proposed ASV prototype (ข) ASV System block diagram

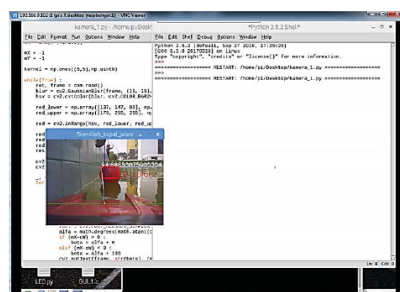
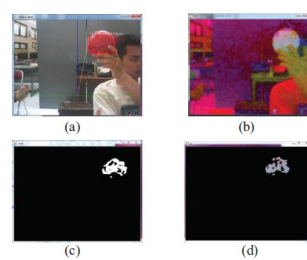
Aqil Aqthobolrobbany และคณะ [3] ของหุ่นยนต์อัตโนมัติคือระบบนำทางที่ถูกฝังอยู่ในระบบอัจฉริยะของหุ่นยนต์ งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบเรือหุ่นยนต์ไร้คนขับซึ่งทั้งหมดระบบทำงานอัตโนมัติโดยมี Raspberry pi เป็นตัวควบคุมและระบบนำทาง ซึ่ง Raspberry pi ใช้ในกระบวนการสร้างภาพการประมวลผลในการตรวจจับเส้นทางเรือโดยใช้กล้องตามวิธีการกรอง HSV วิธีนี้จะตรวจจับเส้นทางเรือตามเกี่ยวกับสีพื้นฐาน ระดับสีความสว่าง และความเข้มของ ที่ตรวจพบ ดังนั้นผลการตรวจจับ การทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือวิธีการประมวลผลภาพผลการทดสอบการประมวลผลภาพแสดงให้เห็นว่ากล้องเซ็นเซอร์สามารถตรวจจับวัตถุลูกบอลสีแดงได้ หน้าจอกล้องคือแบ่งออกเป็นสองส่วน สำหรับตรวจจับวัตถุและสำหรับการปรับการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ ขอบหน้าจอเล็กน้อยยกขึ้นเพื่อเอาชนะข้อผิดพลาดในการอ่านกล้อง เนื่องจากการตรวจจับต้นแบบของร่างกาย การตรวจจับวัตถุต้องดำเนินการตามขั้นตอนต่างๆ (1) RGB to HSV, (2) color filtering, (3) morphology of dilation and erosion, (4) detected contour ขั้นตอนเหล่านี้ส่งผลให้การตรวจจับวัตถุลูกบอลสีแดงแสดงดังภาพที่ 3 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3 (ก) Design of Robot Boat (ข) The results of object detection test (ค) Monitoring result of object detection test at swimming pool

Jinlin Xue และคณะ [4] การพัฒนาวิธีการวิชันซิสเต็มระยะการมองเห็นแบบแปรผันทำให้หุ่นยนต์เพื่อการเกษตรสามารถนำทางระหว่างแถวในทุ่งข้าวโพด ฮาร์ดแวร์วิชันซิสเต็มประกอบด้วยกล้อง และการควบคุมการเคลื่อนไหว ตรวจพบเส้นทางโดยใช้อัลกอริธึมการประมวลผลภาพโดยใช้ลักษณะทางสีฐานวิทยาในมุมมองระยะไกล ใกล้ และด้านข้าง และหุ่นยนต์ถูกนำทางไปตามเส้นเหล่านี้โดยใช้การควบคุมลอจิกคลุมเครือวิธีดังกล่าวได้รับการทดสอบในขณะที่ยานพาหนะสามารถเดินทางผ่านระยะทาง 30 เมตร ไปยังสิ้นสุดแถว เพื่อประเมินประสิทธิภาพคำแนะนำ ข้อมูล RTK-GPS ถูกเก็บรวบรวมแสดงข้อผิดพลาดของคำแนะนำสูงสุด 15.8 มิลลิเมตรซึ่งวิธีการดังกล่าวถึงแม้ว่าจะไม่ใช่นำระบบอัตโนมัติไปใช้ในทางน้ำแต่ซึ่งถือว่าระบบดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับการนำทางในร่องสวนดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 4



(ก)



(ข)

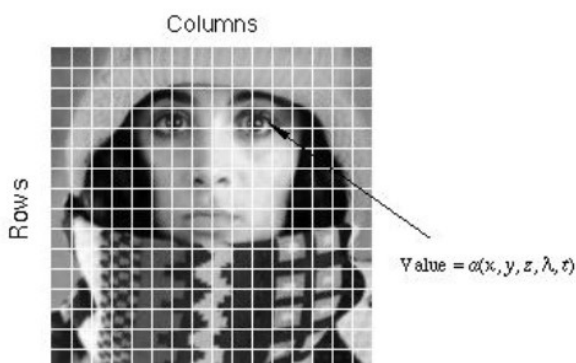
ภาพที่ 4 (ก) Experimental corn field (ข) Far FOV results for 70 cm tall corn

ทฤษฎีการประมวลผลทางภาพ (Image processing theory) [5-7]

ระบบการมองเห็นภาพนั้นจะหมายถึงความรวมถึงทุกสิ่งที่จำเป็นของการได้มา ซึ่งรหัสทางดิจิทัลที่ใช้แทนภาพโดยการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงข้อมูลและรวมทั้งการแสดงผลที่ได้หลังจากการปรับปรุง ซึ่งระบบสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ 3 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นที่ 1 การได้มาซึ่งภาพ (Image acquisition) หมายถึงการแปลงภาพ ลักษณะทางกายภาพนั้นให้เป็นเซตของข้อมูลทางดิจิทัล ซึ่งอาจจะรับภาพนั้นจากกล้องถ่ายรูป , สแกนเนอร์, กล้องวิดีโอที่เป็นอุปกรณ์ดิจิทัล ซึ่งภาพแต่ละภาพที่ได้รับจากอุปกรณ์เหล่านั้นนั้นจะมี รายละเอียดและความคมชัดสูงเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับอัตราในการสุ่มสัญญาณ (sampling rate) ของ อุปกรณ์รับภาพ ขั้นที่ 2 กระบวนการประมวลผลภาพ (Image Processing) มีหน้าที่หลักในการสร้างภาพ ให้ขึ้นมาโดยการแยกแยะส่วนที่เราต้องการหรือสนใจออกจากพื้นหลังหรือสิ่งรบกวนต่างๆ, การหา ขอบภาพ, การกรอง, การ

เปลี่ยนแปลงค่าสีของภาพ, การประมวลผลเชิงตัวเลข ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวนี้ จะถูกนำมาประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์โดยภาพที่นำมาประมวลผลจะถูกแทนด้วยตัวเลขใน รูปแบบของเมตริกซ์ แต่ภาพที่ได้ส่วนมากจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันต่อเนื่อง $f(x,y)$ ในระนาบสองมิติ ขั้นที่ 3 ผลที่ได้และการแสดงผล (Output and Display) รูปแบบของการแสดงผลที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับว่าผู้ใช้งานหรือ ออกแบบจะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ต่อในลักษณะใดหรืออาจจะนำไปแสดงผล หรือคำนวณตัวแปรต่างๆ เป็นต้น

การแทนภาพด้วยข้อมูลแบบดิจิทัล ภาพข้อมูลดิจิทัล (Digital Image) เป็นภาพที่ถูกแปลงมาจากภาพแอนะล็อก (Analog) ให้อยู่ในรูปของตัวเลข โดยการนำภาพแอนะล็อกมาแยกเป็นพื้นที่ที่เล็กลงๆ ที่เรียกว่าพิกเซล (pixel) ในแต่ละพิกเซลจะถูกระบุตำแหน่งโดยพิกัด (x, y) และค่าระดับสีเทาของพิกเซล โดยเราสามารถแปลงรูปภาพเป็นข้อมูลแบบดิจิทัลได้ด้วยขั้นตอนดังนี้เมื่อเรานำสัญญาณอนาล็อกที่ต้องการประมวลผลมาผ่านส่วนที่เรียกว่า ดิจิไทเซอร์ (Digitizer) ซึ่งจะมีหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นหา การควอนไทซ์ (Quantizing) เพื่อที่จะประมวลสัญญาณด้วยคอมพิวเตอร์ ฟังก์ชันของภาพ $f(x, y)$ จะถูกทำให้เป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทั้งระนาบของภาพ ซึ่งเราเรียกว่า การสุ่มภาพ (Image Sampling) ของฟังก์ชันที่ได้เรียกว่าการควอนไทซ์เซชันระดับสีเทา (Grey level quantization) ก็จะได้ข้อมูลที่เป็นดิจิทัล



ภาพที่ 5 แสดงการเก็บภาพข้อมูลแบบดิจิทัล

โมเดลสี (Color Mode) เพื่อให้เข้าใจถึงการผสมสีและระดับความเข้มของแสง จะขอลำถึงโมเดลสี ซึ่งประกอบด้วย 3 แม่สีหลักได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ถ้านำแต่ละแม่สีมาเขียนเป็นกราฟใน Color Space ถ้าแต่ละแม่สีมีขนาด 8 บิต รวมทั้งหมดทั้ง 3 แม่สี จะได้ 24 บิต ซึ่งสามารถสร้างสีใหม่ได้ถึง $2^8 \times 2^8 \times 2^8$ คือ เท่ากับ 16777216 สี และ จะสามารถอ่านค่าภาพดิจิทัลในรูปเมตริกซ์ 2 มิติขนาด $M \times N$ โดยค่าที่ $f(x, y)$ จะอยู่ในช่วงความเข้มที่ประกอบด้วยสีแดง (R) ระดับ 0 จนถึง 255 สีเขียว (G) ระดับ 0 จนถึง 255 สีน้ำเงิน (B) ระดับ 0 จนถึง 255

การแปลงภาพสีความลึก 24 บิต เป็นภาพระดับสีเทา 256 ระดับ ในการแปลงภาพสีให้เป็นภาพระดับสีเทา (Gray scale) จะใช้สมการ

$$f(x, y) = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (1)$$

หรือสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของทั้งสามสีดังนี้ $f(x, y) = (R + G + B) / 3$ จากโมเดลสีในภาพสี RGB ช่วงของระดับสีเทาจะอยู่ในช่วง (0,0,0) ถึง (1,1,1) ของ Color space โดยที่จุด (0,0,0) แทนจุดที่มืดที่สุด (สีดำ) ส่วนจุด (1,1,1) แทนจุดที่มีความสว่างมากที่สุด (สีขาว) ส่วนผลของการแปลงภาพสี 24 บิต เป็นภาพระดับสีเทา 256

การทำเทรชโฮลด์ (Threshold) การทำอิมเมจเทรชโฮลด์ (Image Threshold) เป็นกระบวนการพื้นฐานของการแยกภาพที่ต้องการออกจากพื้นหลัง (Background) ของภาพหรือเรียกว่า Image Segmentation สามารถสรุปได้ว่าค่าของ Threshold จะขึ้นอยู่กับค่าระดับสีเทา ณ พิกัด x, y บนภาพดิจิทัล ค่าเฉลี่ยของระดับสีที่กระจุกตัวรวมกันอยู่ $p(x, y)$ ส่วนภาพที่ถูกทำ Threshold แล้วหรือ $g(x, y)$ สามารถนิยามได้ดังนี้

$$g(x, y) = \begin{cases} 1; & f(x, y) > T \\ 0; & f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (2)$$

การปลูกพืชแบบยกร่อง [8]

การปลูกพืชแบบยกร่อง เป็นวิธีการปลูกพืชด้วยการขุดคันดินล้อมรอบแปลงเกษตร และขุดร่องเป็นร่องแหเพื่อแยกแปลงด้านในให้สูง โดยร่องที่จะใช้สำหรับกักเก็บน้ำ และให้น้ำแก่พืชการปลูกพืชแบบยกร่อง ถูกพัฒนา และดัดแปลงมาจากแนวคิดของเกษตรกรในพื้นที่ลุ่มภาคกลางที่มีการขุดคันดินล้อมรอบแปลงเกษตรเพื่อป้องกันน้ำท่วมในแต่ละปี ด้วยการขุดแนวร่องเพิ่มขึ้นในแปลงเกษตรของตนเองเพื่อให้สามารถกักเก็บน้ำ และเป็นแหล่งน้ำให้แกพืช รวมถึงการเพิ่มความสะดวกในการให้น้ำแก่พืชที่ง่ายขึ้น พืชที่นิยมปลูกด้วยระบบนี้ ได้แก่ ไม้ผล และพืชผักชนิดต่างๆแปลงยกร่องชนิดนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกักเก็บน้ำไว้ใช้สำหรับให้พืช ไม่มีการยกคันดินรอบแปลง เพียงแค่ขุดร่องแปลงทั้งสี่ด้าน เป็นรูปแบบที่พบได้ทั่วไปในพื้นที่ลุ่มภาคกลางที่ไม่ประสบปัญหาน้ำท่วมขัง ร่องน้ำรอบแปลง และในแปลงลึกประมาณ 0.5-1.5 เมตร กว้าง 1-2 เมตร แปลงกว้าง 3-6 เมตรการดูแลรักษาร่องจะต้องทำการขุดลอกร่องน้ำด้วยการตัดโคลนตมจากท้องร่องมาถมบริเวณขอบร่องทุกๆ 1-2 ปี ดังภาพ

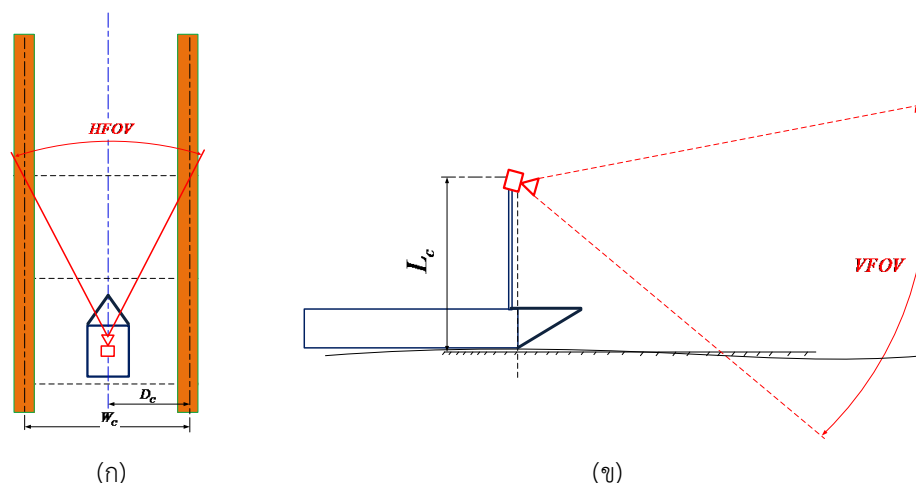


ภาพที่ 6 ลักษณะร่องสวนทางการเกษตร

วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบโมเดลของระบบวิชั่นที่สัมพันธ์กับร่องสวน

การออกแบบโมเดลของเรือในร่องสวนซึ่งสำหรับการออกแบบโดยใช้กระบวนการประมวลผลทางภาพนั้นจำเป็นต้องพิจารณาในส่วนของมุมมองของกล้อง field of view angle (FOV) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากสำหรับการนำทางของเรืออัตโนมัติที่สามารถเคลื่อนที่ในร่องสวนได้อย่างถูกต้องโดยแสดงดังรูปภาพดังต่อไปนี้

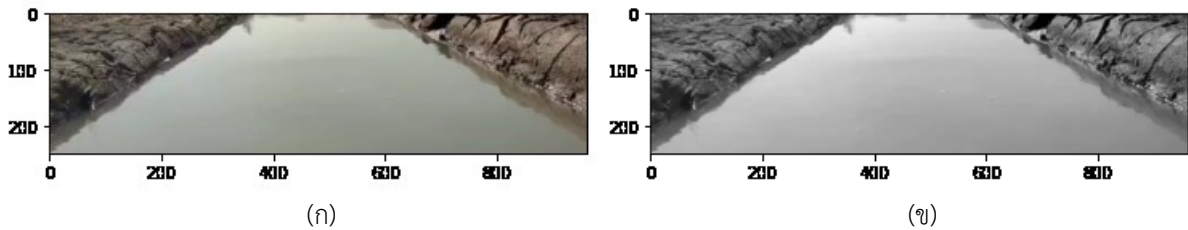


ภาพที่ 7 โมเดลการเคลื่อนที่ของเรือที่สัมพันธ์กับร่องสวน (ก) มุมมองของกล้องในแนวนอน (horizontal field of view angle (HFOV)) (ข) มุมมองของกล้องในแนวตั้ง (vertical field of view (VFOV))

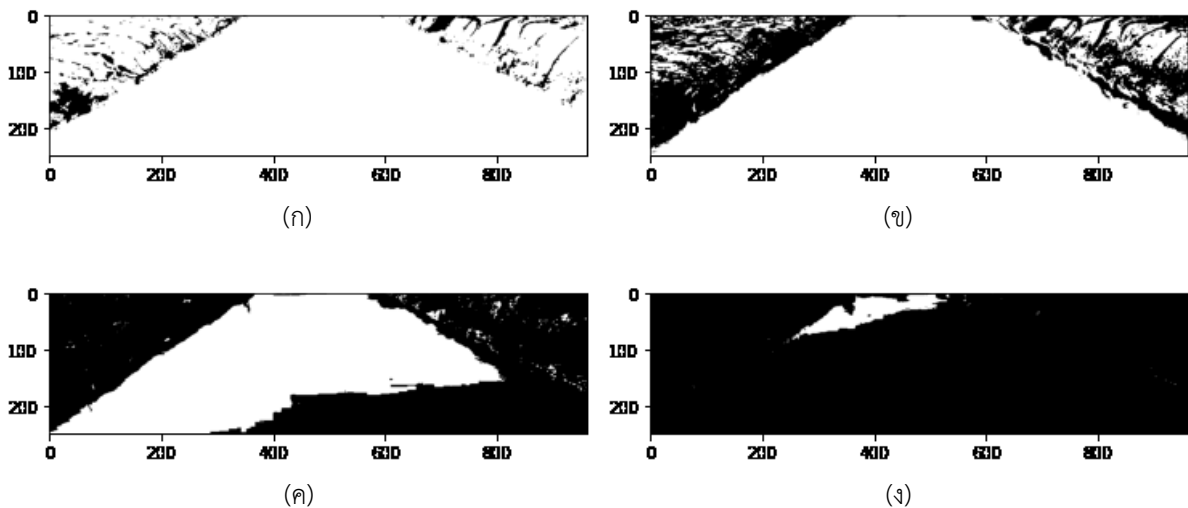
การออกแบบการประมวลผลทางภาพ

ในการประมวลผลภาพเพื่อหาค่าที่ใช้ในการนำทางเริ่มจากการถ่ายภาพเข้าสู่ระบบ โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดขนาดเป็น 960 พิกเซลในแนวแกน X และ 248 พิกเซลในแนวแกน Y จากนั้นทำการแปลงภาพเป็นเฉดสีเทา (Grayscale) โดยใช้

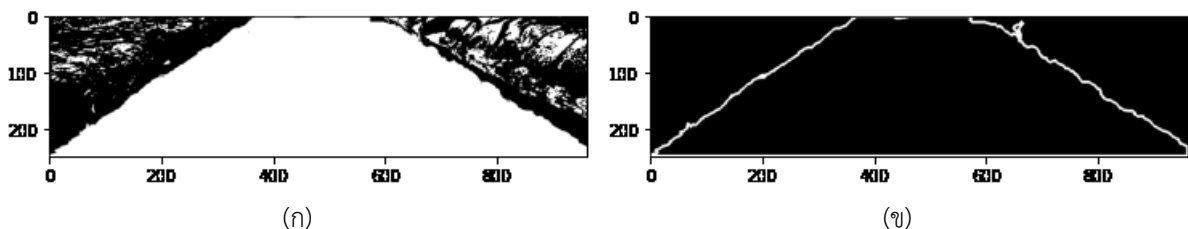
สมการที่ (1) ดังแสดงในภาพที่ 8 และทำการแยกภาพพื้นน้ำออกจากคันดินโดยใช้การทำเทรชโฮลด์ (Threshold) โดยใช้สมการที่ (2) ซึ่งค่าที่ใช้ในการทำเทรชโฮลด์ (T) จะถูกกำหนดโดยผู้ใช้งานเพื่อให้สามารถแยกภาพร่องน้ำได้อย่างเหมาะสม ภาพที่ 9 แสดงการใช้ค่า T ที่แตกต่างกันในการทำเทรชโฮลด์ สังเกตว่าถ้าต้องการให้ระบบประมวลผลภาพสามารถแยกร่องน้ำออกจากคันดินจำเป็นต้องเลือกค่า T ให้มีความเหมาะสม โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า $T = 115$ ในการประมวลผล เมื่อทำการแยกร่องน้ำออกจากภาพได้แล้วจะทำการหารูปร่าง (Contour) ที่ใหญ่ที่สุดและนำมาวาดเส้นรูปร่างเพื่อให้เห็นขอบของร่องสวนดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 8 การประมวลผลภาพร่องสวน (ก) ภาพถ่ายสี RGB (ข) การแปลงภาพเป็นเฉดสีเทา (Grayscale)

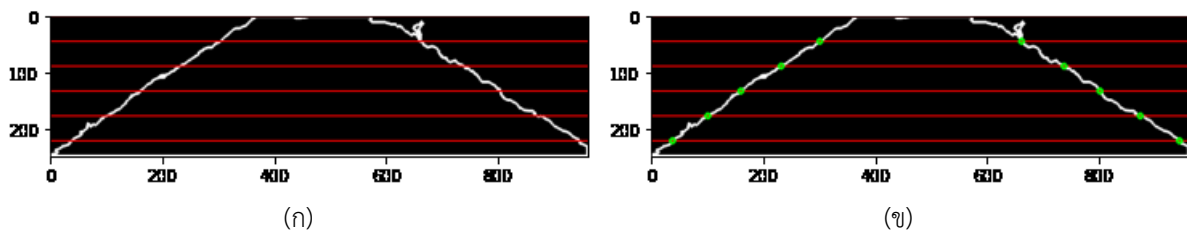


ภาพที่ 9 การทำเทรชโฮลด์โดยใช้ค่าแตกต่างกัน (ก) $T = 50$ (ข) $T = 100$ (ค) $T = 150$ (ง) $T = 200$



ภาพที่ 10 การแยกร่องสวนด้วยการประมวลผลภาพ (ก) การทำเทรชโฮลด์ $T = 115$
(ข) การวาดเส้นรูปร่าง (Contour) ของร่องสวน

จากนั้นนำภาพเส้นร่องสวนมาแบ่งเป็น 5 ส่วนโดยมีระยะความสูงต่างกันที่ 44 พิกเซล จากนั้นคำนวณหาพิกัด (X, Y) ที่ตัดผ่านเส้นร่องสวนทั้ง 5 ส่วนเพื่อนำไปประมวลผลในการหาค่าที่ใช้ในการนำทางของเรืออัตโนมัติต่อไป ภาพที่ 11 แสดงการแบ่งเส้นร่องสวนและพิกัดตัดผ่านร่องสวนทั้ง 5 ส่วนรวมทั้งหมด 10 จุดโดยแบ่งเป็นจุดพิกัดร่องสวนทางซ้าย (X_a, Y) และจุดพิกัดร่องสวนทางขวา (X_b, Y) จากนั้นนำค่าพิกัดที่ได้มาคำนวณหาค่ากึ่งกลางดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 1



ภาพที่ 11 การแบ่งระยะเส้นร่องสวน (ก) แบ่งระยะเส้นร่องสวนเป็น 5 ส่วน

(ข) จุดสีเขียวแสดงพิกัดจุดที่ตัดกันของเส้นร่องสวนทั้ง 5 ส่วน

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการคำนวณค่าพิกัดตัดผ่านเส้นร่องสวน

ส่วนที่	พิกัดร่องสวน (X_A, Y)	พิกัดร่องสวน (X_B, Y)	จุดกึ่งกลาง
1	(301,44)	(661,44)	(481,44)
2	(232,88)	(737,88)	(485,88)
3	(160,132)	(801,132)	(480,132)
4	(101,176)	(873,176)	(487,176)
5	(38,220)	(943,220)	(490,220)

จากจุดที่ตัดกันของเส้นร่องสวนทั้ง 5 ส่วน นำมาหาจุดกึ่งกลางของร่องสวนดังสมการที่ 3 กำหนดให้ ΔX ค่าจุดกึ่งกลางแนวแกน x และ X_A, X_B คือพิกัดร่องสวน

$$\Delta X = \left(\frac{X_A + X_B}{2} \right) + X_A \quad (3)$$

เมื่อได้ค่ากึ่งกลางร่องสวนเพื่อทำคำนวณเป็นเวกเตอร์และหาค่ามุมที่กระทำกับแกน x โดยสมการที่ 4 และ 5

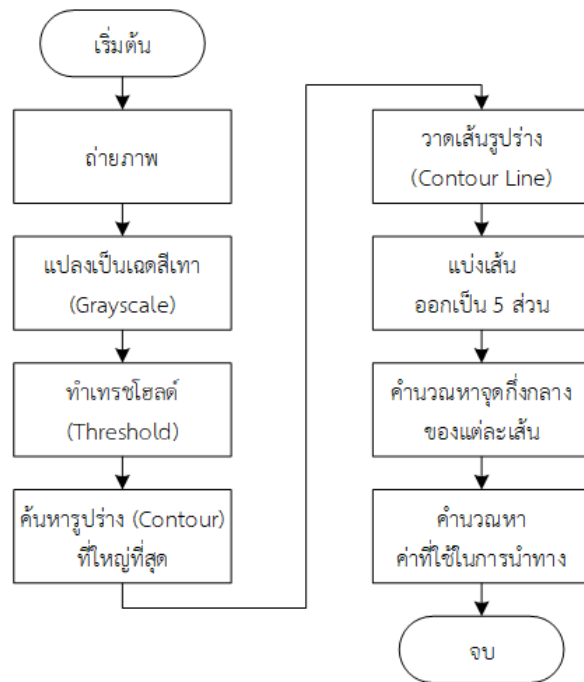
$$R_i = \sqrt{(\Delta X_{i+1} - \Delta X_i)^2 + (\Delta Y_{i+1} - \Delta Y_i)^2} \quad (4)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta X_{i+1} - \Delta X_i}{\Delta Y_{i+1} - \Delta Y_i} \right) \quad (5)$$

จากสมการที่ 4 และ 5 มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อคำนวณหาเส้นทางดังสมการที่ 6 และ 7 โดยที่ R_s คือค่าความเร็วเฉลี่ยเรือควรรเคลื่อนที่ไป และ θ_s คือค่ามุมที่เรือควรรปรับเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางและยังสามารถให้รักษาระยะกลางร่องสวน โดยค่าที่เหมาะสมคือ 90 องศา และ N คือจำนวนของเส้นตัดซึ่งในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 5 โดยกระบวนการทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังแสดงในภาพที่ 12

$$R_s = \frac{\sum_{i=0}^N R_i}{N} \quad (6)$$

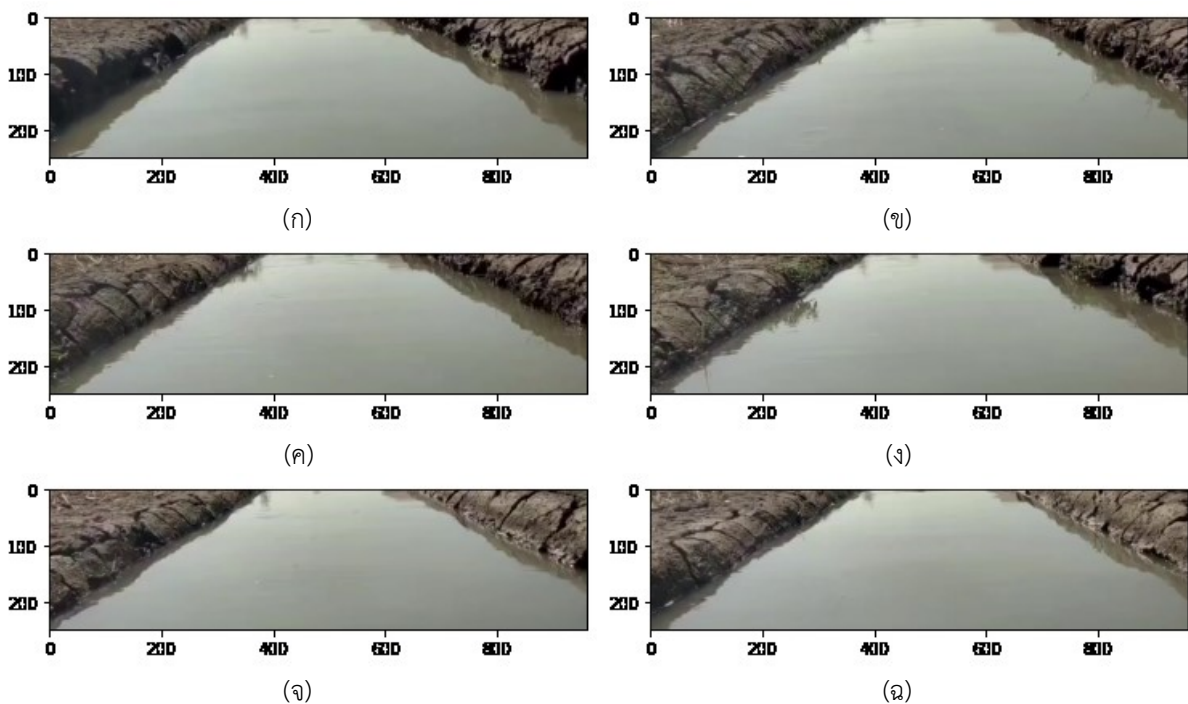
$$\theta_s = \frac{\sum_{i=0}^N \theta_i}{N} \quad (7)$$



ภาพที่ 12 ผังงานแสดงหาค่าที่ใช้ในการนำทางเรือร่น้ำแบบอัตโนมัติ

ผลการวิจัย

ในการทดลองระบบที่พัฒนาขึ้นได้ติดตั้งกล้องถ่ายภาพไว้บนหัวเรือและทำการถ่ายภาพมาประมวลผลภาพทุกๆ 5 วินาทีดังแสดงในภาพที่ 13 โดยเริ่มจากที่เวลา $t = 0$ s จนถึงเวลา $t = 25$ s จากการทดลองทำให้ทราบผลของค่า R_s และ θ ที่คำนวณได้จากสมการที่ (6) และ (7) ในแต่ละเวลาได้ดังตารางที่ 2-7 ที่แสดงให้เห็นค่ามุมในการหลบของเรือดังภาพที่ 14



ภาพที่ 13 ภาพร่องน้ำส่วนที่ใช้ในการทดลอง (ก) $t = 0$ s (ข) $t = 5$ s (ค) $t = 10$ s (ง) $t = 15$ s (จ) $t = 20$ s (ฉ) $t = 25$ s

ตารางที่ 2 การคำนวณหาค่าที่ใช้ในการนำทางของเรือรตน้ำแบบอัตโนมัติที่ $t = 0$ s

ส่วนที่	จุดกึ่งกลาง	ค่า R_i	ค่า θ (Degree)
1	(447,44)	178.539	99.673
2	(490,88)	133.090	97.338
3	(505,132)	88.023	91.302
4	(496,176)	45.354	104.036
5	(507,220)		
ค่าเฉลี่ย		111.251	98.088

ตารางที่ 3 การคำนวณหาค่าที่ใช้ในการนำทางของเรือรตน้ำแบบอัตโนมัติที่ $t = 5$ s

ส่วนที่	จุดกึ่งกลาง	ค่า R_i	ค่า θ (Degree)
1	(530,44)	176.182	87.397
2	(530,88)	132.242	86.531
3	(545,132)	90.956	75.352
4	(544,176)	49.193	63.435
5	(552,220)		
ค่าเฉลี่ย		112.143	78.179

ตารางที่ 4 การคำนวณหาค่าที่ใช้ในการนำทางของเรือรตน้ำแบบอัตโนมัติที่ $t = 10$ s

ส่วนที่	จุดกึ่งกลาง	ค่า R_i	ค่า θ (Degree)
1	(518,44)	176.011	89.349
2	(518,88)	132.015	89.131
3	(522,132)	88.204	86.100
4	(536,176)	48.332	65.556
5	(516,220)		
ค่าเฉลี่ย		111.141	82.534

ตารางที่ 5 การคำนวณหาค่าที่ใช้ในการนำทางของเรือรตน้ำแบบอัตโนมัติที่ $t = 15$ s

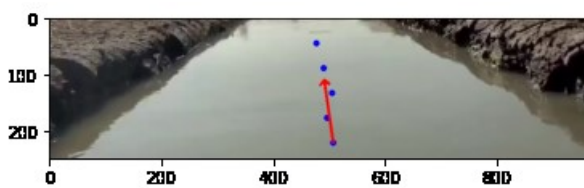
ส่วนที่	จุดกึ่งกลาง	ค่า R_i	ค่า θ (Degree)
1	(512,44)	176.011	89.349
2	(527,88)	133.090	82.661
3	(541,132)	93.301	70.594
4	(542,176)	54.406	53.972
5	(510,220)		
ค่าเฉลี่ย		111.141	74.144

ตารางที่ 6 การคำนวณค่าที่ใช้ในการนำทางของเรือรตน้ำแบบอัตโนมัติที่ $t = 20$ s

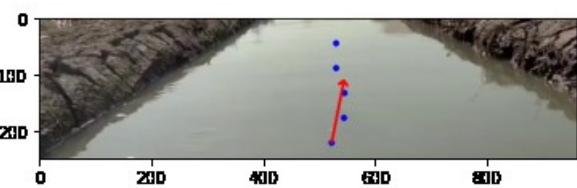
ส่วนที่	จุดกึ่งกลาง	ค่า R_i	ค่า θ (Degree)
1	(520,44)	176.819	84.483
2	(519,88)	132.966	83.089
3	(518,132)	89.269	80.327
4	(539,176)	56.851	50.711
5	(503,220)		
ค่าเฉลี่ย		111.141	74.652

ตารางที่ 7 การคำนวณค่าที่ใช้ในการนำทางของเรือรตน้ำแบบอัตโนมัติที่ $t = 25$ s

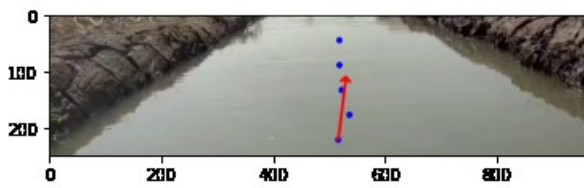
ส่วนที่	จุดกึ่งกลาง	ค่า R_i	ค่า θ (Degree)
1	(515,44)	176.139	87.722
2	(518,88)	132.378	85.667
3	(508,132)	88.000	90.000
4	(527,176)	47.927	66.644
5	(508,220)		
ค่าเฉลี่ย		111.141	82.509



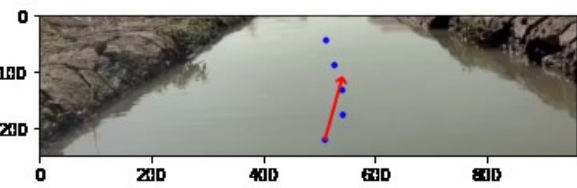
(ก)



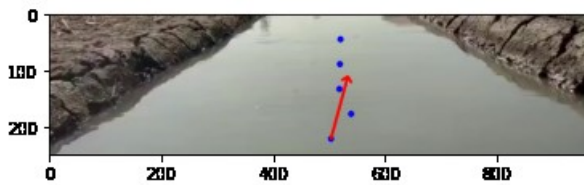
(ข)



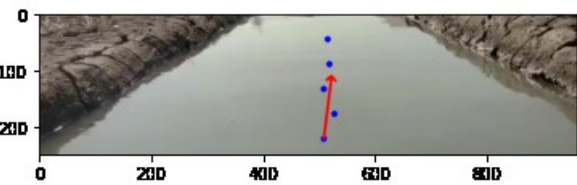
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 14 ภาพผลลัพธ์การนำทางที่ได้จากการทดลอง

(ก) $t = 0$ s (ข) $t = 5$ s (ค) $t = 10$ s (ง) $t = 15$ s (จ) $t = 20$ s (ฉ) $t = 25$ s

จากภาพที่ 14 แสดงถึงทิศทางของการเคลื่อนที่โดยจุดสีน้ำเงินแสดงถึงค่ากึ่งกลางจากการตัดกันของเส้นแนวขอบร่องสวนทั้งซ้ายและขวา (Channel Line) กับเส้นแนวนอน (Horizontal Line) ซึ่งจะช่วยให้เห็นถึงเส้นทางของร่องสวน

(Trench Channel Guideline) และลูกศรสีแดงแสดงถึงทิศทางที่เรือควรปรับเพื่อให้เรือสามารถที่จะเคลื่อนที่ในร่องสวนและรักษาระยะให้อยู่ระหว่างกึ่งกลางของร่องสวนได้ และขนาดของลูกศรบอกถึงความเร็วลัพธ์ที่เกิดจากการคำนวณ

จากภาพ 14 (ข) ถึง 14 (ฉ) แสดงให้เห็นถึงทิศทางที่เรือควรปรับเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกับขอบตลิ่งซึ่งสังเกตได้จากภาพ จะเห็นได้ว่าเรือกำลังมีทิศทางที่จะพุ่งเข้าสู่ตลิ่งทางด้านซ้ายทำให้ทิศทางและความเร็วลัพธ์ (ลูกศรสีแดง) ชี้ไปทางด้านขวาเพื่อบอกให้เรือปรับทิศทางมาทางด้านขวา อย่างไรก็ตามในภาพ 14 (ก) จะสังเกตได้ว่าทิศทางของเรือมีลักษณะพุ่งเข้าสู่ตลิ่งด้านซ้ายเช่นกัน แต่ทิศทางและความเร็วลัพธ์ (ลูกศรสีแดง) ชี้ไปทางด้านซ้ายเนื่องจากข้อผิดพลาดในการแยกเงาและตลิ่งทำให้เกิดการบ่งบอกทิศทางที่ผิดพลาดได้ในภาพ 14 (ก)

สรุปผลวิจัยและอภิปรายผล

จากผลการวิจัยพบว่าเราสามารถใช้การประมวลผลภาพในการแยกแยะและตรวจจับร่องน้ำในสวน แล้วนำไปประมวลผลหาความเร็วและทิศทางที่จะควบคุมเรือร่อนน้ำอัตโนมัติ เพื่อหลีกเลี่ยงการชนขอบตลิ่งของเรือและให้เรือสามารถที่จะเคลื่อนที่ไปในร่องสวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามวิธีที่ใช้ในการประมวลผลภาพยังมีข้อจำกัดเรื่องของเงาในร่องน้ำทำให้เกิดการบอกทิศทางที่คลาดเคลื่อนซึ่งสามารถแก้ปัญหาโดยการบูรณาการร่วมกับเซนเซอร์วัดระยะอื่นๆ เพื่อให้เกิดการบอกทิศทางและความเร็วที่ถูกต้อง

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการวิจัยนี้ผลลัพธ์ของการประมวลผลภาพได้จากรูปตัวอย่างที่มีจำนวนจำกัดและไม่มีหลากหลายของลักษณะของร่องสวน ทำให้ผลที่ได้อาจจะมีความผิดพลาดเมื่อร่องสวนมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงควรเพิ่มภาพตัวอย่างให้มีความหลากหลายของลักษณะร่องสวนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน อีกประการหนึ่งผลการวิจัยที่ได้ยังเป็นการทดสอบโดยการจำลองดังนั้นควรที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบจริงเพื่อให้เห็นประสิทธิภาพที่แท้จริง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทางวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ และศูนย์นวัตกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ (iCRAS) ที่สนับสนุนทางด้านอุปกรณ์และสถานที่สำหรับการทดลอง และรวมถึงเกษตรกรชาวสวนจังหวัดปทุมธานีที่ให้ข้อมูลและเป็นสถานที่ทดสอบ และนักศึกษาที่ช่วยเป็นผู้ช่วยวิจัยคือนางสาวฉัตรสุดา เพ็ชรโยธิน และนางสาวมนัสวี พุ่มพยอม และสุดท้ายสำนักวิจัยสถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ที่ได้อำนวยความสะดวกในด้านเอกสารและอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ในการระบบการตรวจจับร่องน้ำในสวนโดยใช้การประมวลผลภาพเพื่อใช้นำทางของเรือร่อนน้ำแบบอัตโนมัติไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Subramanian, A., Gong, X., Wyatt, C.L., Stilwell, D. (2007). *Shoreline Detection in Images for Autonomous Boat Navigation*. DOI:10.1109/ACSSC.2006.354902.
- [2] Majid, M. H. A. & Arshad, M. R. (2016). *Design of an Autonomous Surface Vehicle (ASV) for Swarming Application*. <http://srv.uib.es/public/AUV2016/pdf/5.4.pdf>.
- [3] Aqthobilrobbany, A., Handayani, A. N., Lestari, D., Muladi, M. (2020). *HSV Based Robot Boat Navigation System*. DOI:10.1109/CENIM51130.2020.9297915
- [4] Xue, J., Zhang, L., & Grift, T.E. (2012). Variable field-of-view machine vision based row guidance of an agricultural robot. *Computers and Electronics in Agriculture*, 84, 85-91.

- [5] สันติชัย เฟื่องกาญจน์ และคณะ. (2010). การจำลองระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติโดยวิธีการประมวลผลภาพเพื่อใช้ในการควบคุมระยะไกล. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.
- [6] Hartley, R., & Zisserman, A. (2003). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. (2rd ed.). Cambridge University.
- [7] Kunghun, W. & Tantrapiwat, A. (2018). Development of a Vision Based Mapping in Rubber Tree Orchard. Applied Sciences and Technology-ICEAST 2018 (IEEE). Phuket, Thailand. *Proceedings in the 4th International Conference on Engineering*, 206-209.
- [8] การปลูกพืชแบบยกร่อง. <https://puechkaset.com>.

Received: Jul 5, 2022

Revised: Sep 13, 2022

Accepted: Sep 20, 2022

แนวทางในการลดความสูญเสียในอุตสาหกรรมต่อเรือในไทย

A SYSTEMATIC APPROACH TO REDUCING LOSSES IN THE SHIPBUILDING INDUSTRY IN THAILAND

สนธิรัตน์ อินทสนธิ, ศุภพัชร พวงแก้ว*, ทัดพล กุลวงศ์
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
Sontinan Intasonti, Supapat Phuangkaew, Tadpon Kullawong
Division of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Education,
Rajamangala University of Technology Krungthep
E-mail: supapat.p @mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมการต่อเรือเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศ แต่จากข้อมูลที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการเติบโตของการขนส่งทางเรือมีการเติบโตขึ้น ตรงข้ามกับรายได้ของอุตสาหกรรมการต่อเรือที่ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปัญหาภายในของธุรกิจ โดยการศึกษาครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบการผลิต และออกแบบวิธีการเพื่อแก้ปัญหา และใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ มาเพื่อช่วยในการจัดสมดุลสายการผลิต ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า มีความสูญเสียในส่วนของการขึ้นงานที่รอการผลิตในระบบ โดยเฉพาะในขั้นตอนการตัดเหล็กก่อนนำไปเชื่อมได้ท้องเรือเพื่อทำกระดูกงู และยังพบชิ้นงานรอการผลิตที่เสียหายจากการเกิดสนิม ผลที่ได้จากการนำแผนการผลิตที่ได้ออกแบบใหม่ไปทดลองใช้เป็นเวลา 6 สัปดาห์ ผลแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมให้ชิ้นงานรอการผลิตลดลงจาก ร้อยละ 7.8 เหลือ 4.8 ของคำสั่งซื้อ ซึ่งคิดเป็นมูลค่าความสูญเสียของเหล็กจากการเป็นสนิม และสูญหาย คิดเป็นมูลค่า 192,000 บาท ต่อการทำกระดูกงูท้องเรือขนาดกลาง 1 ลำ โดยใช้ข้อมูลของเรือบรรทุกขนาดกลาง และยังสามารถรายละเอียดของอุตสาหกรรมต่อเรือรวมถึงข้อจำกัดของการศึกษา

คำสำคัญ: อุตสาหกรรมต่อเรือ งานระหว่างการผลิต สมดุลสายการผลิต

Abstract

The shipbuilding industry is one of the most important businesses in Thailand. Recent reports have indicated that the rate of maritime transport in Thailand continues to grow whereas the income of the shipbuilding industry in Thailand has decreased. It implies that the loss in processes occurs. The main objective of this research project was to indicate the loss in processes and solve a problem. Computer simulation (Flex Sim) and on-site survey were used to solve this problem. Six weeks were used to implement for new process design. Finding from this current research project revealed a lot of work in process were occur. The most of work in process occurs in the process of cutting steel before welding the keel. Moreover, work in process was damaged by rust. After implementing the new process, Results showed that work in process decreased from 7.8 percent to 4.8 of the orders. Values of Loss of steel from damage from rust and loss were also decreased to 192,000 baht for the medium size tanker. The detail and limitations of this research are also discussed.

Keywords: Shipbuilding industry, Work in process, Line balancing

บทนำ

การต่อเรือเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานทางเศรษฐกิจที่สำคัญ โดยมีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงธุรกิจต่างๆ กับการขนส่งทางน้ำไม่ว่าจะเป็นทางแม่น้ำ หรือทางทะเล รวมไปถึงกิจการพาณิชย์นาวี นอกจากนี้ ยังเป็นส่วนที่สำคัญในการเชื่อมโยงอุตสาหกรรมต่างๆ ในห่วงโซ่อุปทานเข้าด้วยกัน ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาถึงปริมาณการค้าระหว่างประเทศพบว่า ปริมาณการค้าระหว่างประเทศของไทยใช้การขนส่งทางน้ำเป็นหลัก โดยมูลค่าการค้าในปี พ.ศ. 2564 มีมูลค่าการขนส่งทางเรือรวม 11.49 ล้านล้านบาท โดยมีสัดส่วนถึงร้อยละ 67.2 ของการค้าระหว่างประเทศ ซึ่งเป็นช่องทางการค้าที่มีมูลค่ามากที่สุด และมีการเติบโตอย่างมากถึงร้อยละ 28.8 [1] เนื่องจากการขนส่งทางเรือสามารถขนส่งสินค้าได้ในปริมาณที่มาก และต้นทุนในการขนส่งต่ำกว่าการขนส่งด้านอื่น จากที่กล่าวมาข้างต้นแม้ว่าการค้าระหว่างประเทศทางน้ำจะมีมูลค่ามาก และเติบโตอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อพิจารณาถึงมูลค่าของอุตสาหกรรมการต่อเรือโดยพิจารณาจากรายได้ของผู้ประกอบการที่ได้จดทะเบียนในประเทศไทย พบว่า มีรายได้ลดลงในช่วงเวลาที่ผ่านมาจาก 16,870 ล้านบาท ที่ปี พ.ศ. 2557 เหลือ 12,197 ล้านบาท ที่ พ.ศ. 2560 [2] ซึ่งตรงข้ามกับการเติบโตของการค้าทางน้ำ โดยข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า รายได้ที่ลดลงไม่ได้มาจากภาพรวมของอุตสาหกรรมแต่มาจากการบริหารภายใน ซึ่งอาจมีปัญหาก็ต้องมีการศึกษา และทำการแก้ไข

แนวคิดแบบลีน (Lean thinking) เป็นแนวคิดที่กำหนดวิธีการส่งมอบ คุณค่าในด้านต่างๆ ให้มากขึ้น และวิธีการที่กำหนดจะต้องสอดคล้องการดำเนินการเพื่อสร้างคุณค่าที่ดีที่สุด โดยการดำเนินการจะไม่หยุดชะงัก และลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นให้เหลือน้อยที่สุด [3] โดยหลักการแบบลีนคุณค่าที่สร้างขึ้นจะเป็นการสร้างมูลค่าที่เพิ่มให้กับลูกค้า [4] วิธีบริหารแบบลีนได้มีแนวคิดเริ่มต้นมาจากแนวคิดแบบทันเวลา (Just-In-Time) ซึ่งแต่แรกได้ถูกนำมาใช้ในหลายบริษัทในยุโรป และอเมริกา แต่มาในภายหลังได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ที่ญี่ปุ่น และได้รับผลสำเร็จอย่างมาก [3,5] ตั้งแต่นั้น วิธีการบริหารจัดการแบบลีน ได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิต ไม่ว่าจะเป็น รถยนต์ ไปถึงเครื่องบิน [6] แม้่วิธีที่ใช้ และเทคโนโลยีสำหรับอุตสาหกรรมการต่อเรือจะแตกต่างไปจาก อุตสาหกรรมยานยนต์ [7] และยังมีหลายๆ ด้านที่ใช้เทคโนโลยีเหมือนการก่อสร้าง ที่มีนักร้านและอุปกรณ์ในการใช้ต่อเรือที่เหมือนกันการก่อสร้าง [8] แต่ขั้นตอนการทำงานในการต่อเรือก็ไม่ได้แตกต่างกับอุตสาหกรรมยานยนต์ ในอุตสาหกรรมการต่อเรือชั้นนำของโลก ไม่ว่าจะเป็นที่เกาหลีใต้และญี่ปุ่น ก็ได้นำแนวคิดการบริหารแบบลีนมาเพื่อพัฒนาจนประสบความสำเร็จ นอกจากนี้แนวคิด และวิธีการแบบลีนยังเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของการต่อเรือสำหรับเทคโนโลยียุคใหม่ [9,10] โดยนำวิธีการและเทคโนโลยีใหม่มารวมเข้ากับวิธีบริหารเพื่อลดความสูญเสีย และเพิ่มคุณค่าที่จะส่งต่อไปสู่ลูกค้า

ดังนั้นในการศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมต่อเรือ เพื่อหาจุดที่ส่งผลกระทบต่อการทำงาน อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความสูญเสีย และออกแบบวิธีการโดยใช้แนวคิดแบบลีน เพื่อเน้นการลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นในการต่อเรือ ในรูปแบบต่างๆ ของความสูญเสีย เช่น เวลา วัสดุ สินค้า คุณภาพงาน พร้อมทั้งนำวิธีการที่ออกแบบใหม่ไปทดลองใช้ในงานจริง และนำผลที่ได้ไปสรุปผล รวมถึงคำแนะนำในการปรับปรุง

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ได้วางแผนการศึกษาเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ประกอบด้วย

1. การศึกษากระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการต่อเรือ และความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ
2. ออกแบบวิธีเพื่อลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นพร้อมนำไปทดลองใช้ในงานจริง

โดยในการศึกษานี้จะนำผลที่ได้จากการศึกษาความสูญเสียในขั้นตอนแรก เพื่อไปใช้ในการวิเคราะห์ และออกแบบวิธีการแก้ปัญหา โดยวิธีการแก้ปัญหาจะถูกนำไปทดลองใช้ในส่วนที่สอง

2.1 การศึกษากระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการต่อเรือ และความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ

การศึกษานี้ได้วางแผนเข้าไปศึกษาในโรงงานต่อเรือ สิ่งปลูกสร้างลอยน้ำ และซ่อมเรือเหล็ก โดยผลิตภัณฑ์หลักของโรงงานนี้คือ เรือพ่วงขนาดกลาง และเมื่อเข้าไปตรวจสอบพบว่า การผลิตที่ได้ดำเนินการอยู่ใช้แรงงานคนในการดำเนินการเป็นหลัก นอกจากนี้ยังพบชิ้นงานระหว่างการผลิต (Work In Process : WIP) จากขั้นตอนการตัดเหล็กก่อนนำไปเชื่อมได้ท้องเรือเพื่อทำการดัดงอแสดงในภาพที่ 1 และเหล็กที่พบ เป็นเหล็กขนาด 9 และ 12 มิลลิเมตร เมื่อศึกษาเกี่ยวกับเหล็กที่ใช้ในการสร้างเรือบรรทุกขนาดกลาง พบว่าต้องใช้เหล็กที่ขนาดแตกต่างกัน โดยจำนวนเหล็กที่ต้องใช้รวม 2994 ชิ้น เมื่อคิดเฉพาะ

เหล็กขนาด 9 มิลลิเมตรสำหรับทำกระดูกท่อนเรือจากเอกสารข้อมูลของทางโรงงานพบมีการใช้เหล็กจำนวน 499 ชิ้น โดยข้อมูลจากบันทึกของโรงงานในเดือน ธันวาคม 2564 พบปริมาณชิ้นงานระหว่างการผลิต เฉลี่ยอยู่ที่ ร้อยละ 7.8 สำหรับการผลิตรเรือ 1 ลำ ดังแสดงในภาพที่ 2

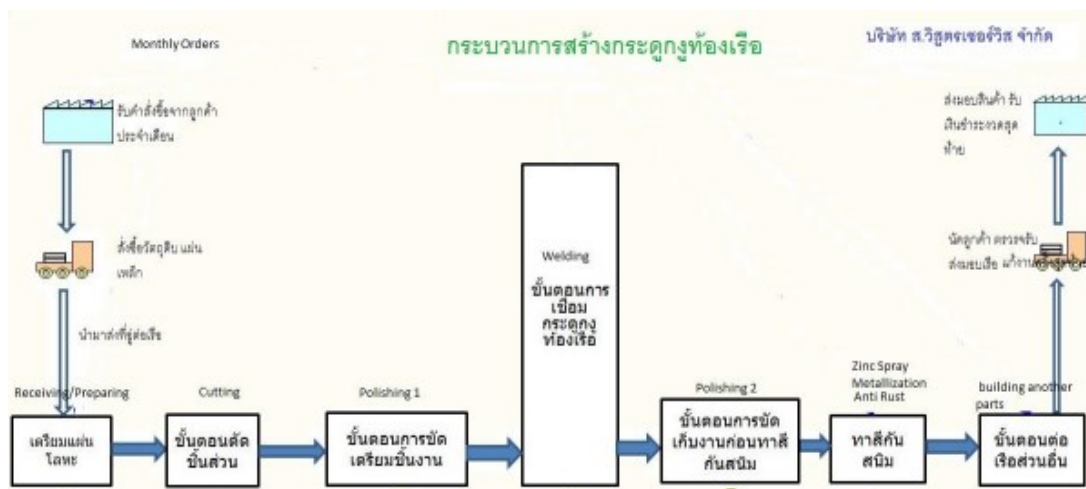


ภาพที่ 1 กระบวนการเชื่อมแผ่นใต้ท้องเรือ

คำสั่งซื้อก่อนการปรับปรุง	งาน กอง	จำนวนเหล็กที่ใช้	%เกิน
12-18 พฤศจิกายน 2564	544	499	9.018
19-25 พฤศจิกายน 2564	537	499	7.6152
26-2 ธันวาคม 2564	535	499	7.2144
3-9 ธันวาคม 2564	540	499	8.2164
10-16 ธันวาคม 2564	542	499	8.6172
17-23 ธันวาคม 2564	530	499	6.2124
total	3228	2994	

ภาพที่ 2 ข้อมูลจำนวนชิ้นงานระหว่างการผลิต (งานกอง)

จากการศึกษากระบวนการผลิตพบความสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ขั้นตอนการสร้างกระดูกงูของเรือ โดยกระบวนการผลิตกระดูกงูของโรงงานที่เข้าไปศึกษาเป็นดังภาพที่ 3 และความสูญเสียหลักจะเกิดจากการตัดเหล็กเพื่อนำไปใช้ โดยขั้นตอนนี้มีชิ้นเหล็กถูกตัดออกมาเป็นจำนวนมากเป็นผลให้การตรวจนับชิ้นงานเป็นงานที่ยาก และมีจำนวนเหล็กที่สูญหายมาก ดังนั้นการตรวจสอบจึงเป็นเรื่องยาก นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมต่อเรือวัสดุที่ต้องใช้เป็นหลักคือ เหล็ก ดังนั้น งานที่ค้างอยู่ในระบบการผลิต จึงส่งผลให้เกิดความสูญเสียทางด้านวัตถุดิบเพิ่มเข้ามาด้วย นอกจากความสูญเสียทางเวลา และโอกาสเพราะชิ้นงานเหล็กระหว่างการผลิต ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการผลิตที่เหมาะสม เช่น การตะไบ และขัดพ่นกันสนิม ซึ่งยังมีงานรอการผลิตมาก ส่งผลให้วัตถุดิบเสียหายจากการขึ้นสนิมไม่สามารถนำมาใช้ได้มากขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 3 กระบวนการสร้างกระดูกท้องเรือ

2.2 ออกแบบวิธีเพื่อลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นพร้อมนำไปทดลองใช้ในงานจริง

การออกแบบวิธีเพื่อลดความสูญเสียที่เกิดขึ้น จะเริ่มต้นจาก แยกประเภทของเหล็กตามชนิดของเหล็ก และขนาดความหนาตามความต้องการของรุ่นเรือที่จะผลิต วัตถุประสงค์เพื่อที่จะกำหนดแรงงานที่จะไปทำงานได้ตรงกับความต้องการในงานชนิดนั้น รวมถึงกำหนดจำนวนให้เหมาะสม สำหรับขั้นตอนการศึกษานี้ไม่ได้นำวัตถุดิบในส่วนอื่นของเรือมาพิจารณาสำหรับรายละเอียดในการตัด แต่กำหนดให้เริ่มจากแผ่นเหล็กที่มีความหนา 9 มิลลิเมตร ก่อนจนครบ หลังจากนั้นจึงมาตัดแผ่นเหล็ก 12 มิลลิเมตร และตัดแผ่นเหล็กเสริมคละขนาดเป็นสามเหลี่ยมในขั้นตอนต่อไป โดยในการศึกษารั้งนี้มีการกำหนดเป้าหมายของชิ้นงานระหว่างการผลิตอยู่ไม่เกินร้อยละ 5 ของคำสั่งซื้อ โดยปริมาณที่ใช้คือ 2994 ชิ้น โดยรวมปริมาณที่เผื่อไว้ไม่เกิน ร้อยละ 5 ของคำสั่งซื้อเป็นจำนวน 3140 ชิ้น ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กำหนดเป้าหมายปริมาณชิ้นงานระหว่างผลิต ในส่วนท้องเรือ (กระดูกงู)

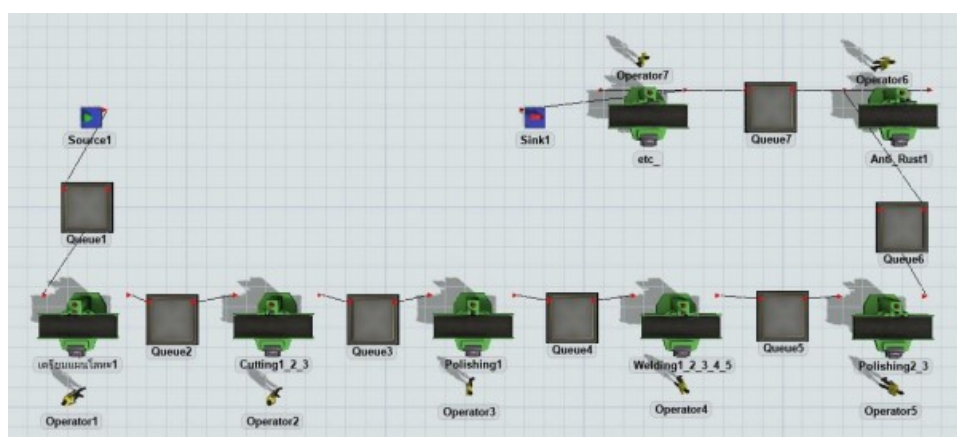
ขนาดของเรือ	เหล็กแผ่นหนา 9 มิลลิเมตร	เหล็กแผ่นหนา 12 มิลลิเมตร	แผ่นเหล็กเสริมคละขนาดตัดสามเหลี่ยม	รวมจำนวนเหล็กที่ต้องใช้ในการทำกระดูกงูเรือ +5%
600 ตัน (เรือบรรทุกขนาดกลาง)	1208	861	1071	3140

หลังจากที่กำหนดเป้าหมาย และส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการพิจารณาแล้ว การศึกษาครั้งนี้ได้วางแผนในการรวบรวมข้อมูลกำลังการผลิต เครื่องจักรชนิดต่างๆ เพื่อมาจัดวางตำแหน่งพนักงาน และเครื่องจักรที่ใช้ในการตัดชิ้นงานรอเข้าประกอบทำโครงกระดูกของเรือบรรทุกขนาดกลาง โดยปริมาณเครื่องจักร และพนักงานที่มีอยู่แสดงดังตารางที่ 2

จากข้อมูลที่รวบรวมได้ในตารางที่ 2 การศึกษาครั้งนี้ได้นำข้อมูลที่ได้นำไปใช้ในการวางแผน เพื่อปรับสมดุลสายการผลิต (Line Balancing) เพื่อลดการเกิดคอขวด (Bottleneck) ในสายการผลิต อันเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดชิ้นงานรอการผลิตค้างในระบบ โดยในการศึกษาเลือกที่จะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Flex Sim) เพื่อใช้ในการวางแผนสายงานผลิต และปรับสมดุลสายการผลิต ดังภาพที่ 4

ตารางที่ 2 จำนวนพนักงานและเครื่องจักร

เครื่องจักร และพนักงาน	จำนวน
เครื่องเชื่อมเหล็ก	18 ตัว
เครื่องตัดเหล็ก	20 อัน
คนงานเชื่อมเหล็ก	12 คน
คนงานตัดเหล็ก	9 คน
คนงานตะไบเหล็ก	9 คน



ภาพที่ 4 โปรแกรม Flex Sim ในการวางแผนการผลิต

หลังจากที่ได้วางแผนสายการผลิตแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การนำวิธีการที่ได้วางแผนไว้ไปใช้ทดสอบในอุตสาหกรรมจริง โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้นำไปทดสอบ ช่วงเวลาดังตั้งแต่วันที่ 2 มกราคม 2565 ถึง 14 กุมภาพันธ์ 2565 และกำหนดเป้าหมายจำนวน ชิ้นงานระหว่างการผลิต น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 5

ช่วงเวลาทำโครงการ	จำนวนเหล็กที่ต้องใช้	คำนวณ5%ของค่าสั่งซื้อ
2-7 มกราคม 2565	499	524
8-14 มกราคม 2565	499	524
15-21 มกราคม 2565	499	524
22-31 มกราคม 2565	499	524
1-7 กุมภาพันธ์ 2565	499	524
8-14 กุมภาพันธ์ 2565	499	524
รวม	2994	

ภาพที่ 5 ช่วงเวลาในการทดลองและเป้าหมายจำนวนเหล็กที่ใช้

ผลการวิจัย

การศึกษาค้นคว้าได้ทำการปรับปรุง เพื่อลดปริมาณชิ้นงานระหว่างการผลิต ของเหล็กขนาด 9 มิลลิเมตร 12 มิลลิเมตร และเหล็กสามเหลี่ยม ในการผลิตท่อเรือกระดุกสำหรับเรือบรรทุกขนาดกลาง โดยวิธีที่นำมาใช้ในการบริหาร คือ การปรับสมดุลสายการผลิตตั้งแต่กระบวนการเริ่มต้นจนถึงกระบวนการสุดท้าย จากการศึกษาพบว่า ในสายการผลิตมีปัญหาคอขวดที่เกิดขึ้นในส่วนของการเชื่อมเหล็ก และเป็นจุดสำคัญที่ส่งผลต่อ ปริมาณชิ้นงานระหว่างการผลิตที่มีสะสมในกระบวนการนี้ ส่งผลให้เหล็กชิ้นสนิมเสียหาย และยากต่อการตรวจนับทำให้เกิดความเสียหาย

นำแผนการปรับปรุงกระบวนการไปทดลองใช้โดยวางเป้าหมายเพื่อควบคุมชิ้นงานระหว่างการผลิต ไม่ให้เกินร้อยละ 5 ของค่าสั่งซื้อ โดยเริ่มต้นตั้งแต่เดือน มกราคม 2565 ถึง กุมภาพันธ์ 2565 พบว่าการนำไปใช้ในสัปดาห์แรก ผลการตรวจนับ ชิ้นงานระหว่างการผลิตได้ที่ร้อยละ 6.21 ของการวางแผนการผลิตรายสัปดาห์ โดยจุดที่เฝ้าระวังหลักคือ การตัดเหล็กซึ่งต้องควบคุมให้เหมาะสมกับจำนวนที่จะนำไปซัด และเชื่อมทันที ไม่ให้ผลิตออกมาจนเกินไป และผลการตรวจนับชิ้นงาน ระหว่างการผลิตในสัปดาห์ที่ 2 ในเดือนมกราคม 2565 ผลที่ได้เป็นจำนวน ร้อยละ 4.2 ซึ่งมีปริมาณลดลง ดังภาพที่ 6

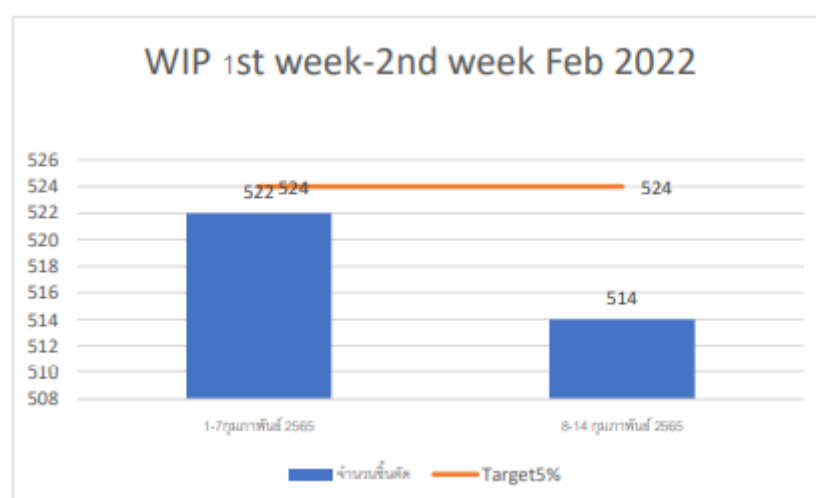


ภาพที่ 6 ผลการตรวจนับชิ้นงานระหว่างการผลิตในสัปดาห์ที่ 1 และ 2 ของเดือนมกราคม

การศึกษาในสัปดาห์ที่ 3 ของการนำวิธีการที่ได้พัฒนาไปทดลองใช้พบว่า มีชิ้นงานระหว่างการผลิตที่ร้อยละ 6.2 ซึ่งมีปริมาณมากขึ้นจากสัปดาห์ก่อนหน้านี้ โดยปัญหาที่พบคือ พนักงานไม่ได้ทำตามแผน มีการผลิตเกินกว่าแผนที่กำหนดไว้ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงจำเป็นที่จะต้องแก้ไข โดยการอบรมให้ความรู้พนักงาน เพื่อให้ปฏิบัติตามแผนที่ได้วางไว้ โดยเน้นการทำความเข้าใจกับพนักงาน ให้พนักงานทราบถึงความสำคัญของการผลิตตามแผนที่วางไว้เพื่อลดชิ้นงานระหว่างการผลิต และในการศึกษาในสัปดาห์ที่ 4 การตรวจนับชิ้นงานระหว่างการผลิต ได้ผลร้อยละ 5.4 ลดลงจากสัปดาห์ที่ 3 แต่ยังคงมากกว่าเป้าหมายที่ร้อยละ 5 จากคำสั่งซื้อ แต่มีแนวโน้มที่ดีขึ้น และพบปัญหาในกระบวนการเชื่อม ที่เกิดคอกวดในสายการผลิตขึ้นเนื่องจาก กระบวนการเชื่อมจำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีทักษะ แต่ทางโรงงานมีพนักงานไม่มากเพียงพอ จึงทำให้เกิดชิ้นงานระหว่างการผลิตตกค้างในขั้นตอนนี้น่ามาก ยิ่งไปกว่านั้นในการศึกษาอยู่ในช่วงการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส เป็นผลทำให้พนักงานที่มีความเสี่ยง หรือมีอาการที่คาดว่าจะติดเชื้อจำเป็นต้องพักงาน และกักตัวเป็นระยะเวลา 14 วัน เป็นผลให้พนักงานที่ทำงานในแต่ละตำแหน่งลดลงจึงทำให้ปัญหาเพิ่มขึ้น โดยผลการตรวจนับชิ้นงานในสัปดาห์ที่ 3 และ 4 ของเดือนมกราคมเป็นไปตามภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ผลการตรวจนับชิ้นงานระหว่างการผลิตในสัปดาห์ที่ 3 และ 4 ของเดือนมกราคม



ภาพที่ 8 ผลการตรวจนับชิ้นงานระหว่างการผลิตในสัปดาห์ที่ 1 และ 2 ของเดือนกุมภาพันธ์

ผลการศึกษาในสัปดาห์ที่ 5 (สัปดาห์แรกของเดือนกุมภาพันธ์) ผลการตรวจนับชิ้นงานระหว่างการผลิตที่นับได้เท่ากับร้อยละ 4.6 ของคำสั่งซื้อ ซึ่งเป็นแนวโน้มที่ดีขึ้น และยังอยู่ภายใต้แผนที่กำหนดไว้คือไม่เกินร้อยละ 5 ของคำสั่งซื้อ และ

สัปดาห์ที่ 6 ของการศึกษา (สัปดาห์ที่สองของเดือนกุมภาพันธ์) ผลที่ได้จากการนับชิ้นงานระหว่างการผลิตก็ยังคงมีแนวโน้มที่ดีขึ้นที่ร้อยละ 3 และเป็นไปตามเป้าที่กำหนดไว้ โดยผลการตรวจนับชิ้นงานระหว่างการผลิตเป็นไปตามภาพที่ 8

สรุปผลวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาในอุตสาหกรรมต่อเรือ โดยอุตสาหกรรมต่อเรือที่ได้ใช้ในการศึกษานี้เป็นโรงงานต่อเรือ และซ่อมบำรุงเรือ ในการศึกษาได้คัดเลือกนำชนิดของเรือที่มีคำสั่งต่อมากที่สุดมาศึกษา คือ เรือบรรทุกขนาดกลาง และศึกษาในรายละเอียดความสูญเสียที่เกิดขึ้น พบว่า ความสูญเสียที่เกิดขึ้นมาจากชิ้นงานสูญหาย หรือ ชิ้นงานเสียหายที่เกิดจากขั้นตอนการทำงานกระดุกงูท้องเรือ โดยมีสาเหตุมาจากชิ้นงานระหว่างการผลิตมีจำนวนมาก และเกิดความเสียหายจากการเกิดสนิม รวมถึงสูญหายในขั้นตอนนี้น่ามาก ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้ศึกษาในส่วนของการผลิตกระดุกงูท้องเรือสำหรับเรือฟางขนาดกลาง โดยได้ทำการเก็บข้อมูลก่อนทำการปรับปรุง 6 สัปดาห์ พบว่ามีชิ้นงานระหว่างการผลิตเฉลี่ยที่ร้อยละ 7.8 ของคำสั่งซื้อ ดังนั้นในการศึกษาได้กำหนดวิธีการแก้ปัญหา โดยการปรับสมดุลสายการผลิต ใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Flex Sim) เพื่อใช้ในการวางแผนสายการผลิต และปรับสมดุลสายการผลิต โดยมีเป้าหมายลดชิ้นงานระหว่างการผลิตให้น้อยกว่าร้อยละ 5 หลังจากนั้นนำแผนการที่ได้ไปทดลองใช้จริงเป็นเวลา 6 สัปดาห์

หลังจากที่ได้นำแผนการผลิตที่ได้ปรับปรุงไปทดลองแล้วนั้น พบเจอสิ่งที่ต้องคำนึงในกระบวนการต่างๆ เช่น พนักงานไม่ปฏิบัติตามแผนที่วางไว้ และในการเชื่อมต่อใช้พนักงานที่มีทักษะ แต่ทางโรงงานมีพนักงานที่มีทักษะไม่มาก จึงทำให้งานในจุดนี้ล่าช้า และมีชิ้นงานระหว่างการผลิตตกค้างอยู่มาก ยิ่งไปกว่านั้นในการศึกษายังพบว่ามีพนักงานที่คาดว่าจะมีอากาศใช้ จากสถานการณ์แพร่ระบาดของเชื้อไวรัส จึงจำเป็นที่จะต้องให้พนักงานพักงาน และกักตัวเป็นระยะเวลา 14 วันทำให้เกิดงานตกค้างมากยิ่งขึ้นในกระบวนการตัด และการเชื่อมโลหะ ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถทำตามแผนที่ตั้งหมดรวมถึง มีอุปสรรคจากสถานการณ์โรคระบาด แต่โดยภาพรวมของชิ้นงานระหว่างการผลิตก็ค่อยๆ ดีขึ้นและอยู่ภายใต้เป้าหมายที่กำหนด โดยภาพรวมผลการศึกษาในระยะเวลาที่กำหนดไว้ แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ภาพรวมผลการศึกษา

หลังจากที่นำแผนที่ได้ปรับปรุงไปทดลองเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ นำผลการดำเนินการมาเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุงโดยข้อมูลของชิ้นงานระหว่างการผลิต (แผ่นเหล็กตัด) พบว่าสามารถควบคุมให้อยู่ภายใต้เป้าหมายที่กำหนดไว้ได้ โดยค่าเฉลี่ยก่อนที่ปรับปรุงอยู่ที่ร้อยละ 7.8 และ หลังปรับปรุงที่ร้อยละ 3 แสดง จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถลดชิ้นงานระหว่างการผลิตไปได้ถึงร้อยละ 4.8 ของคำสั่งซื้อ เมื่อคิดเป็นมูลค่าความสูญเสียของเหล็กจากการที่เสียหายจากการเป็นสนิม และสูญหาย โดยใช้ข้อมูลของเรือบรรทุกขนาดกลาง ที่ใช้เหล็ก 9 มิลลิเมตร ในการทำกระดุกงูท้องเรือ จำนวน 499 ชิ้น เมื่อนำร้อยละของความสูญเสียที่ลดได้คือร้อยละ 4.8 มาพิจารณา เทียบได้เท่ากับเหล็กจำนวน 24 ชิ้น โดยมูลค่าของเหล็กที่ขนาด

9 มิลลิเมตรอยู่ที่ 8,000 บาทต่อชิ้น ดังนั้นมูลค่าความสูญเสียที่ลดลงไปจากการปรับปรุงกระบวนการอยู่ที่ $24 \times 8,000 = 192,000$ บาท ต่อการทำกระดุงท้องเรือขนาดกลาง 1 ลำ แม้ว่าการศึกษารั้งนี้จะช่วยลดความสูญเสียในการผลิตได้ แต่ความสูญเสียก็ยังไม่หมดไป รวมถึงการศึกษารั้งนี้ได้ทดลองในการทำกระดุงท้องเรือสำหรับเรือบรรทุกขนาดกลางเท่านั้น ดังนั้น จึงควรนำไปพัฒนาใช้ลดความสูญเสียในส่วนอื่น จะช่วยให้ลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นในภาพรวมได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ. (2564). *มูลค่าการค้าระหว่างประเทศ ตามประเภทการขนส่ง (ม.ค.-ธ.ค. 2564)*. <https://www.tradelogistics.go.th/th/article/>.
- [2] ฐานข้อมูลความรู้ทางทะเล (2560). *อุตสาหกรรมต่อเรือและซ่อมเรือ*. http://www.mkh.in.th/index.php?option=com_content&view=article&id=276&Itemid=71&lang=th
- [3] Jones, D. T., & Womack, J. P. (2016). The evolution of lean thinking and practice. *The Routledge companion to lean management*, 8, 3.
- [4] Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (2007). *The machine that changed the world: The story of lean production--Toyota's secret weapon in the global car wars that is now revolutionizing world industry*. Simon and Schuster.
- [5] Handfield, R. B., Monczka, R. M., Giunipero, L. C., & Patterson, J. L. (2011). *Sourcing and supply chain management*. Boston, MA: South-Western Cengage Learning.
- [6] Slater, J. (2012). *The global lean supply chain: creating end-to-end value*. Productivity.
- [7] Sharma, S., & Gandhi, P. J. (2017). Scope and impact of implementing lean principles & practices in shipbuilding. *Procedia Engineering*, 194, 232-240.
- [8] Kristoffersen, S. (2012). *Nextship-Lean Shipbuilding*. Molde University College.
- [9] Ramirez-Peña, M., Abad Fraga, F. J., Sánchez Sotano, A. J., & Batista, M. (2019). Shipbuilding 4.0 index approaching supply chain. *Materials*, 12(24), 4129.
- [10] Xia, L. X. X., Ma, B., & Lim, R. (2008). Supplier performance measurement in a supply chain. *6th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 877-881. DOI: 10.1109/INDIN.2008.4618224.

Received: Aug 10, 2022

Revised: Sep 12, 2022

Accepted: Sep 20, 2022

ลดน้ำเชื่อมสูญเสีย จากปัญหาปริมาณต่ำกว่ามาตรฐาน กระบวนการผลิต 5

REDUCE SYRUP LOSS DUE TO SUBSTANDARD WATER LEVEL PROBLEMS

PRODUCTION PROCESS 5

วิทยา ปันคำ¹, สมจินต์ อักษรธรรม², สมศักดิ์ มินคร³, ชยานิต เฉลิมสุข⁴^{1, 2, 3} คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธนบุรี,Wittaya Pankham¹, somjin Aksorntham², Smoak Meenakorn³, Chayanit Chalermsook⁴

Faculty of Engineering, Thonburi University

E-mail : Wittpank@sermsukplc.com, somjin1@hotmail.com, somsak_me@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มผลผลิต และลดต้นทุนการผลิตจากการแก้ไขปัญหาเครื่องจักรเสีย ส่งผลทำให้ผลผลิตของเสียในระหว่างการผลิต ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตของบริษัทตัวอย่าง การศึกษาปัญหาใช้ทฤษฎี 3 จริง และทฤษฎีทำไม ทำไม พบสาเหตุของปัญหา คือเกิดปัญหาสปริงเสื้อชุดวาล์วบรรจุ และชุดสปริงวาล์วชำรุด ทำให้เครื่องจักรผลิตของเสีย จึงทำให้เกิดความสูญเสียของผลผลิตผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุง จุดที่เป็นสาเหตุของปัญหาสปริงเสื้อชุดวาล์วบรรจุ และชุดสปริงวาล์ว ทำให้เกิดความสูญเสียของน้ำเชื่อมทั้งหมดถึง 80% ผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขรูปแบบชิ้นส่วนเครื่องจักร และมีการกำหนดมาตรฐานในชิ้นส่วนของเครื่องจักรใหม่ และให้ผู้เกี่ยวข้องเฝ้าติดตามกระบวนการปฏิบัติงานให้มีคุณภาพและประสิทธิภาพมากขึ้น หลังการปรับปรุงพบว่าสามารถลดปัญหาการสูญเสีย จากเดิม 9,354 ขวด/เดือน หลังการปรับปรุง 1,232 ขวด/เดือน และจากการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โรงงานตัวอย่างสามารถลดการสูญเสียได้จากการปรับปรุงประมาณ 90%

คำสำคัญ: ชุดวาล์วบรรจุ สปริงวาล์ว

Abstract

This research aims to increase productivity and reduce production costs by solving machine breakdowns. This affects the production cost of the sample company. The study of the problem uses 3 real theories and theories of why the cause of the problem is the problem of the spring, the packed valve set, and the defective snipe valve set. Make the machine produce waste. As a result of the loss of productivity, the researchers made improvements. The point that causes the problem is the spring jacket, the filling valve, and the snipe valve set, resulting in a loss of up to 80% of the total syrup. The researchers revised the machine parts patterns and set new standards in machine parts and had stakeholders monitor the operational process for greater quality and efficiency. After improvement, it was found that it can reduce the problem of loss. From 9,354 bottles/month. The sample plant can reduce losses by improving by about 90%.

Keywords: Filling valve assembly, Snipping valve

บทนำ

จากสภาวะการแข่งขันที่รุนแรง ส่งผลให้ต้นทุนการดำเนินงานทั้งกระบวนการสูงขึ้นเรื่อย ๆ และความต้องการสินค้าหรือบริการของลูกค้ามีความหลากหลายมากขึ้น โดยทุกองค์กรจะต้องปรับตัวพัฒนาคุณภาพ และการบริการอย่างเร่งด่วน เพื่อความอยู่รอดของธุรกิจ และให้มีความสามารถในการแข่งขัน อุตสาหกรรมอาหาร หรืออุตสาหกรรมเครื่องดื่มถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตมนุษย์ เพื่อบริโภคที่ปัจจุบันมีการแข่งขันที่สูง ทั้งในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ขนาด

กลาง และขนาดใหญ่ ก็ต้องมีจุดแข็งหรือจุดเด่นที่สร้างความแตกต่างเช่นในเรื่องราคา (Price) ยี่ห้อที่ได้รับการรับรองด้านคุณภาพ (Brand) การลดแลกแจกแถม (Promotion) รวมถึงต้นทุนต่างๆ เช่น ต้นทุนการผลิต ต้นทุนขายหรือบริหาร เป็นต้น ในปัจจุบันประเทศไทยมีผู้ผลิต ผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องดื่มจำนวนมาก เช่น บริษัท ตัวอย่าง ผู้ผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม ภายใต้ตราสินค้าซึ่งเป็นตราสินค้าของคนไทย และประกันคุณภาพสินค้าโดยการรับรองคุณภาพ ระบบ ISO 22000 – 2005 จาก SGS รวมถึงระบบ GMP & HACCP จาก องค์การอาหารและยา โดยรักษาคุณภาพของสินค้าตั้งแต่เริ่มกระบวนการผลิต การคัดเลือกวัตถุดิบ การจัดเก็บทั้งหมดจะต้องผ่านการตรวจสอบคุณภาพเป็นอย่างดี เพื่อผลิตสินค้าที่มีคุณภาพได้ตามมาตรฐานส่งถึงมือลูกค้า โดยทางบริษัทได้ผลิตเครื่องดื่มน้ำอัดลม หลากหลายขนาดเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค และจากการได้ตรวจสอบ รวมถึงเก็บข้อมูลการสูญเสียทั้งหมดของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มน้ำอัดลมบรรจุขวดพลาสติก ซึ่งในปัจจุบันบริษัทกำลังดำเนินการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีต้นทุนที่สามารถแข่งขันได้ และผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพส่งถึงมือลูกค้า

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่ทำการปรับปรุง แก้ไขปัญหาผลิตภัณฑ์ไม่ได้ตามมาตรฐาน (Defect) เพื่อลดการสูญเสียและเพิ่มผลผลิต ในกระบวนการผลิต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อลดการผลิตของเสีย
2. เพื่อเพิ่มผลผลิตในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์

วิธีดำเนินการวิจัย

ทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีเครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด (QC 7 Tools)[1]

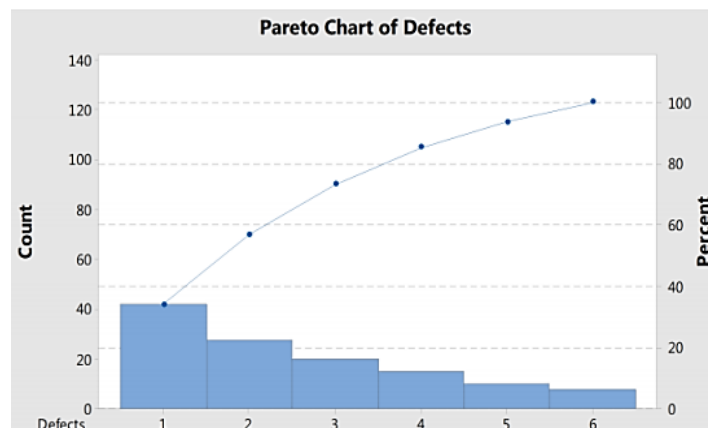
เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์จุดบกพร่องของการปฏิบัติงาน โดยอาศัยข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้มีการจดบันทึกไว้ และนำไปสู่การค้นหาค่าเหตุ เพื่อปรับปรุงการปฏิบัติงานต่อไป

แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram)[1]

ดร.ภทพล กล่าวไว้ว่า ทฤษฎี “พาเรโต” ได้ก่อให้เกิดการ “ประยุกต์” ใช้ “กฎ 20/80” กันอย่างกว้างขวางเพราะ “พาเรโต” ได้สังเกตว่าบรรดาผู้คนในสังคมไม่ว่ายุคใดสมัยใดในประวัติศาสตร์ดูเหมือนว่าได้ ถูกแบ่งออกตามธรรมชาติเป็น 2 กลุ่ม ซึ่งมีสัดส่วนที่น่าสนใจคือ 20/80 หมายถึงในสังคมนั้นมี “คนส่วนน้อย 20%” ที่สำคัญมาก(Vital Few) แต่กลับมีบทบาทเหนือ “คนส่วนใหญ่ 80%” และ 20% นี้แหละครับที่ครอบครองความมั่งคั่งและมีอิทธิพลในการชี้นำสังคมนั้นๆ ของอีกกลุ่ม 80%ซึ่งเป็นคนส่วนมากที่สำคัญน้อย(Trivial Many)เป็นกลุ่มประชากรระดับกลางถึงล่างของประชากรทั้งหมด

และต่อมาได้ค้นพบสัดส่วน 20/80 นี้ในเชิงเศรษฐกิจเพราะการประกอบธุรกิจธุรกรรมต่างๆ ทั้งหมดล้วนแล้วเป็นไปตามกฎของ “พาเรโต” เช่นกันยกตัวอย่าง เช่นกิจกรรม 20%ของการลงทุนจะก่อให้เกิดผลลัพธ์ 80% ของทั้งองค์กร นอกจากนี้สินค้าจำนวน 20% ของบริษัทจะขายออกได้ 80% ของสินค้าทั้งหมด และก่อให้เกิดกำไร 80% ของผลกำไรทั้งหมด ซึ่งสะท้อนถึงการทำงาน 20% ที่ทำจะส่งผลที่มีคุณค่าของผลลัพธ์ทั้งหมดเป็นจำนวนสูงถึง 80% และก็จะเป็นอย่างนี้เรื่อยไป

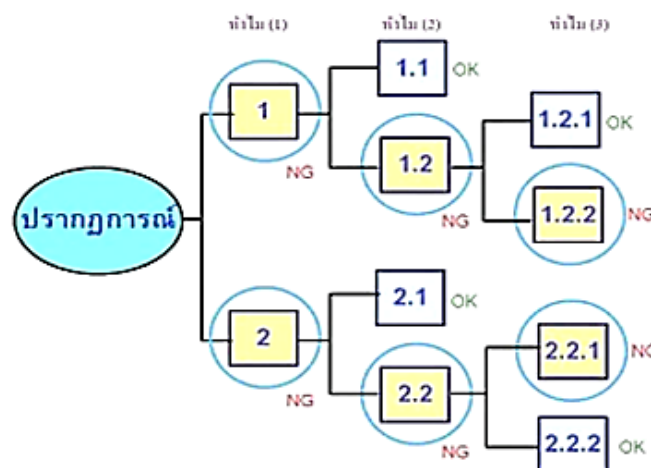
นั่นหมายถึง “พาเรโต” บอกเราไว้เมื่อ 118 ปี ล่วงแล้วว่า หากท่านมีแผนงานที่จะลงมือทำอยู่ 10 รายการแล้วละก็จะมีเพียงแค่ 2 รายการเท่านั้นที่ทำแล้วจะเป็นงานที่มีค่ามากกว่าหรือเทียบเท่ากับงานอีก 8 งานที่เหลือรวม



ภาพที่ 1 แผนภูมิพาเรโต

ทฤษฎี ก้างปลา [2][3]

Why Why Analysis เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้กันมากโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาปัจจัยที่เป็นต้นเหตุของปรากฏการณ์หรือปัญหาที่เกิดขึ้น เพื่อให้ได้พบต้นตอ หรือรากเหง้าที่แท้จริง และที่สำคัญคือเพื่อนำไปสู่การแก้ไข และป้องกันการเกิดซ้ำต่อไป



ภาพที่ 2 แผนภูมิอธิบายวิธีการคิดแบบ Why- Why Analysis

ทฤษฎี 3 จริ่ง[4]

3 จริ่ง หรือ 3 GEN คือ หลักการทำงานของญี่ปุ่น ซึ่งเป็นหลักการที่เป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับความจริงล้วนๆ คนญี่ปุ่นพูดว่า “อย่าเชื่อข้อมูลในคอมพิวเตอร์มากนัก ให้ไปดูหน้างานด้วยจะได้เข้าใจถ้ามันนั่งเทียนอยู่กับโต๊ะแล้วเราจะรู้ได้อย่างไรว่าสิ่งนั้นเป็นความจริงหรือเปล่า อย่าเชื่อใครง่าย ๆ ถ้าไม่เห็นกับตา”

หลักการ "3 GEN" ซังเก็ง... มาจากคำภาษาญี่ปุ่น 3 คำ ได้แก่

1. GENBA (เก็มบะ) คือสถานที่จริงเมื่อเกิดปัญหาขึ้นเราต้องเข้าไปตรวจสอบดูสถานที่เกิดเหตุจริงด้วยตัวของเราเอง ถึงแม้ว่า

จะมีคนอธิบายหรือรายงานให้เราฟังแล้วก็ตาม เราควรเข้าไปดูให้เห็นกับตา

2. GENBUTSU (เก็มบุสึ) คือ ชิ้นงานจริง เราต้องเข้าไปดูชิ้นงานที่เกิดความเสียหายด้วยตาของเราเอง ถึงแม้ว่าเราจะรู้จักปัญหานี้เป็นอย่างดีก็ตาม เพราะอาการของปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งอาจจะแตกต่างจากที่เราเคยเห็นมาก่อนก็ได้

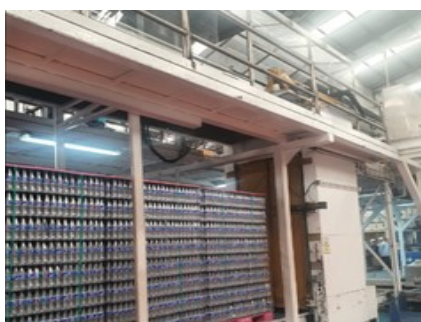
3. GENJITSU (เก็นจิสึ) คือ ข้อเท็จจริง เราต้องเข้าไปตรวจสอบข้อเท็จจริงหรือเรื่องราวต่างๆที่เกิดขึ้นจริง โดยดูข้อมูลรอบด้านที่เกี่ยวข้องอย่างรอบครอบด้วยตัวของเราเอง ถึงแม้ว่าจะมีคนรวบรวมข้อมูลมาให้เราบ้างแล้วก็ตาม เนื่องจากบางครั้งข้อมูลที่ได้มาอาจจะไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์หาข้อเท็จจริงได้หรือข้อมูลอาจจะมีผิดพลาดก็ได้

ดังนั้นหลักการ "3 GEN" จึงมีความสำคัญในการนำมาประยุกต์ใช้กับการทำงาน ซึ่งจะช่วยให้เราสามารถวิเคราะห์ปัญหาหรือข้อมูลต่างๆ ได้มีความชัดเจนและถูกต้องแม่นยำมากขึ้น จนทำให้ปัญหาเหล่านั้นได้รับการแก้ไขอย่างถูกวิธีและตรงจุดต่อไป

ขั้นตอนการผลิต

กระบวนการผลิตเครื่องดื่มน้ำอัดลมบรรจุขวดพลาสติกมีขั้นตอนการผลิตด้วยกัน 8 ขั้นตอน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผสมผสานระหว่างคนกับเครื่องจักร โดยมีขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การนำขวดเปล่าที่รับมาจากบริษัทผลิตส่งเข้ากระบวนการผลิตเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการผลิตเครื่องดื่มน้ำอัดลมบรรจุขวดพลาสติก เพื่อลำเลียงโดยสายพานส่งต่อไปในขั้นตอนถัดไปดัง ภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การนำขวดเปล่าส่งเข้าสู่กระบวนการผลิต

ขั้นตอนที่ 2 ลำเลียงขวดส่งต่อไปในขั้นตอนของกระบวนการถัดไป ด้วยสายพานลำเลียงขวดเปล่า (Conveyer) แสดงดัง ภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การลำเลียงขวดเปล่า

ขั้นตอนที่ 3 ลำเลียงขวดด้วยความเร็ว เพื่อส่งต่อไปยังในขั้นตอนของกระบวนการถัดไปด้วยการใช้แรงลมเป่า (Air conveyer) แสดงดังภาพประกอบ 5



ภาพที่ 5 ลำเลียงขวดพลาสติกด้วยความเร็ว
ขั้นตอนที่ 4 การล้างทำความสะอาดขวดก่อนการบรรจุ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ล้างทำความสะอาดขวดก่อนการบรรจุ
ขั้นตอนที่ 5 การบรรจุผลิตภัณฑ์พร้อมปิดฝา ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การบรรจุผลิตภัณฑ์ พร้อมปิดฝา
ขั้นตอนที่ 6 การปรับอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ ก่อนเข้าแพ็คหีบห่อ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การปรับอุณหภูมิผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนที่ 7 การจัดทำแพ็คเกจผลิตภัณฑ์เข้าหีบห่อ ภาพประกอบ 9



ภาพที่ 9 การแพ็คเกจผลิตภัณฑ์

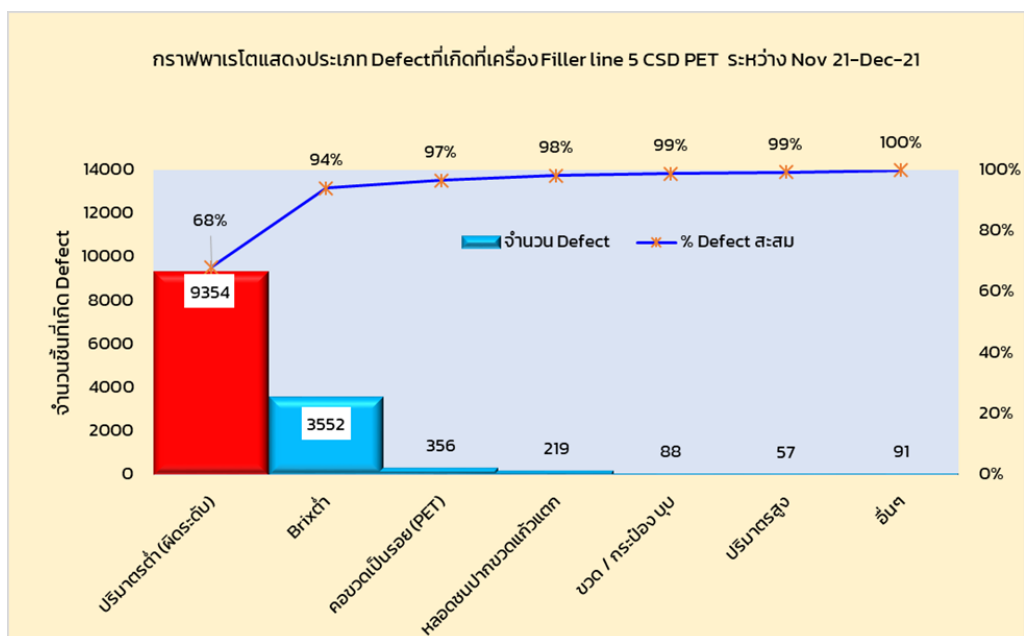
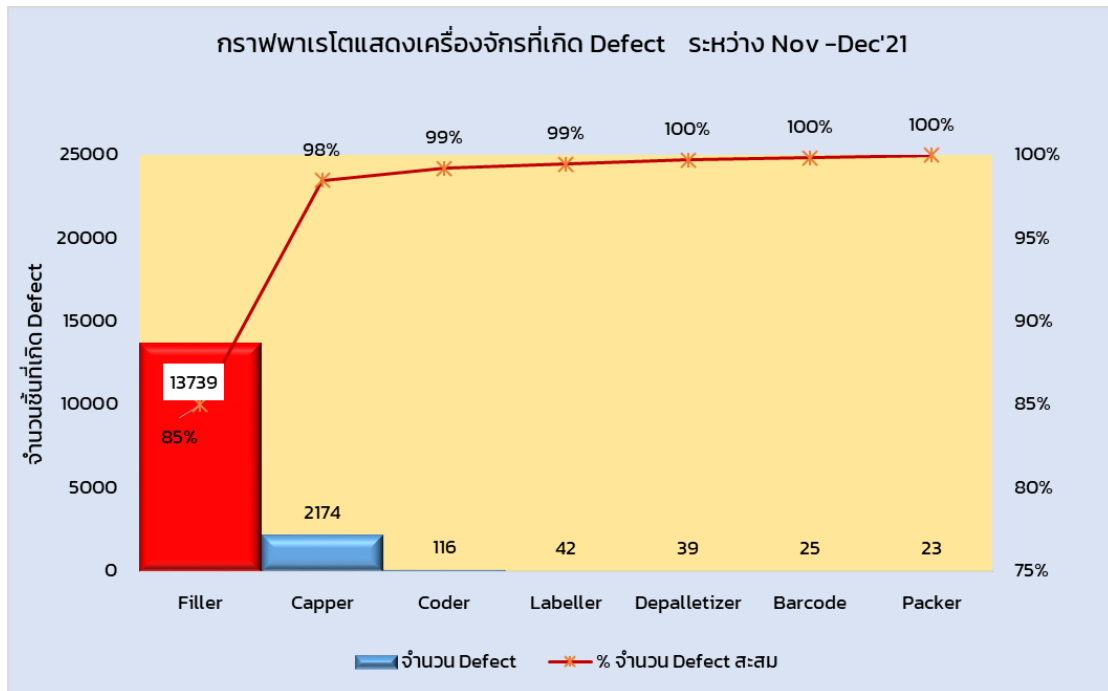
ขั้นตอนที่ 8 การเรียงผลิตภัณฑ์ขึ้นบนกระเบะ ดังภาพที่ 10



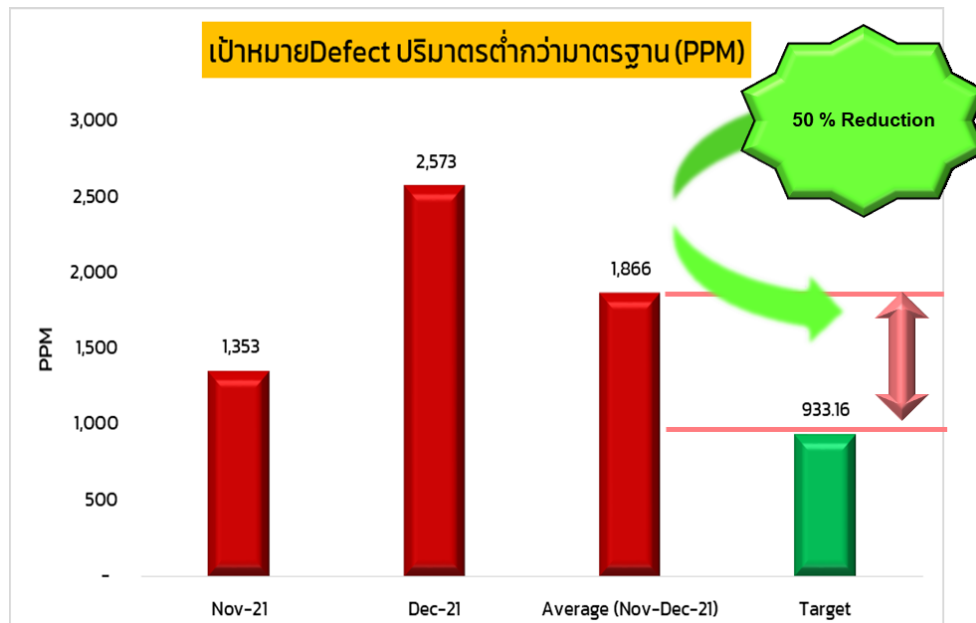
ภาพที่ 10 การเรียงแพ็คเกจผลิตภัณฑ์

การทดลอง

ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับปัญหา เครื่องจักรผลิตของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเครื่องดื่มน้ำอัดลมบรรจุขวดพลาสติก ช่วงเดือนพ.ย.- ธ.ค. 63 พบปัญหาต่างๆ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบ การสูญเสียในกระบวนการผลิตทั้งหมดด้วยกราฟพาเรโต ผู้วิจัยจึงนำเปอร์เซ็นต์ การสูญเสียสูงสุด คัดเลือกเพื่อเริ่มแก้ไขปัญหาโดย ดังภาพที่ 11(ก), 11(ข)

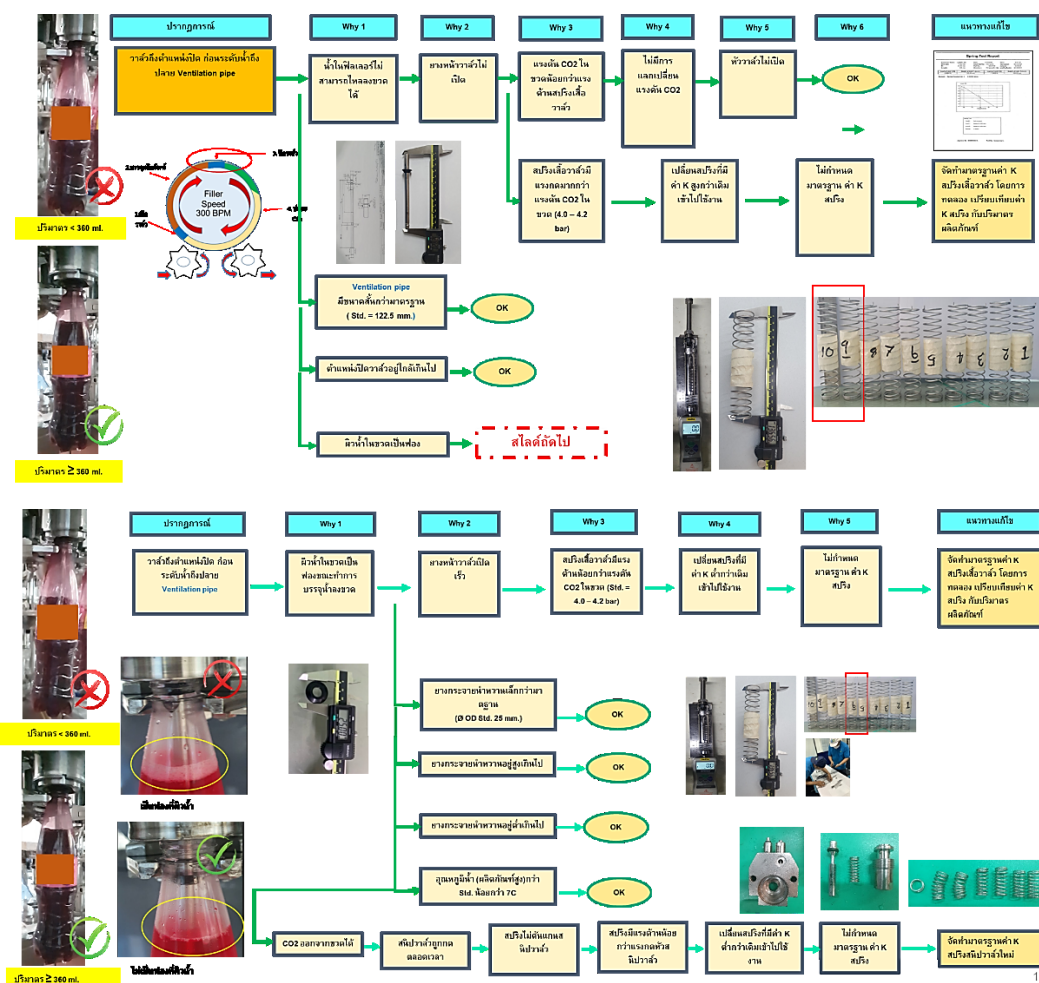


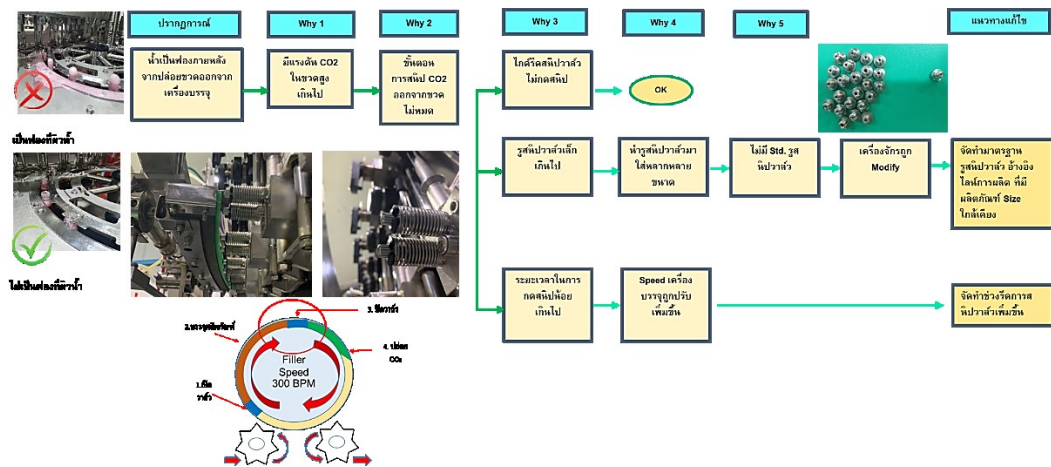
ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจสภาพปัจจุบัน ในส่วนกระบวนการผลิตที่เป็นสาเหตุการผลิตของเสีย ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กำหนดเป้าหมาย

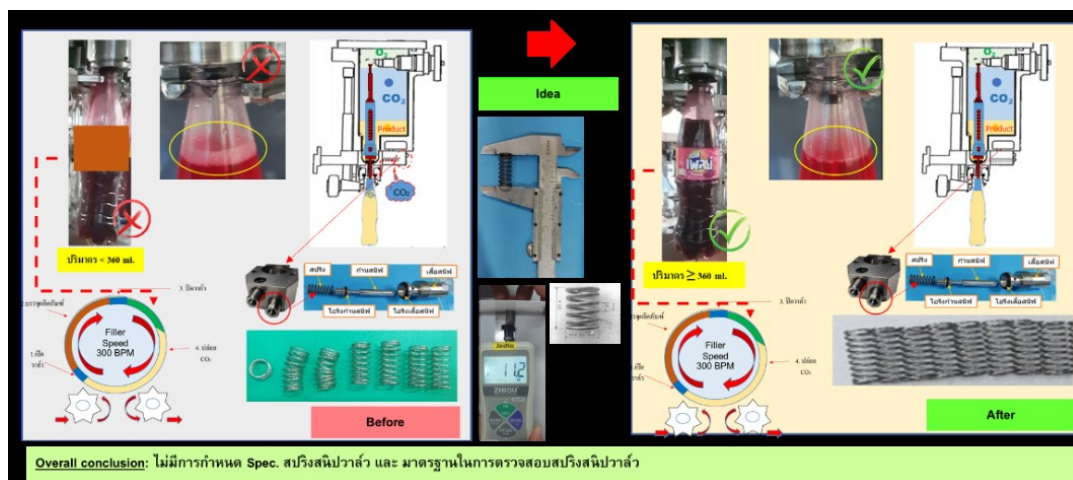
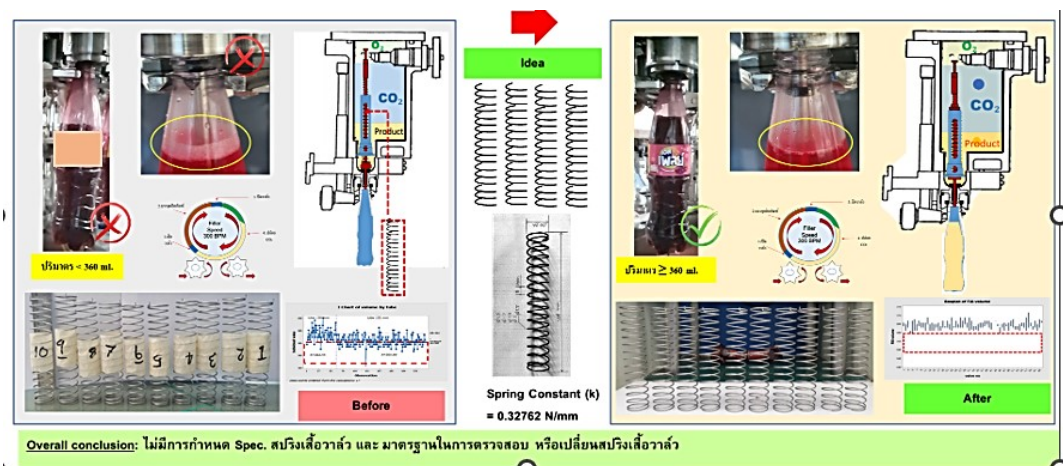
การวิเคราะห์ปัญหาและแนวทางแก้ไข ดังภาพที่ 13

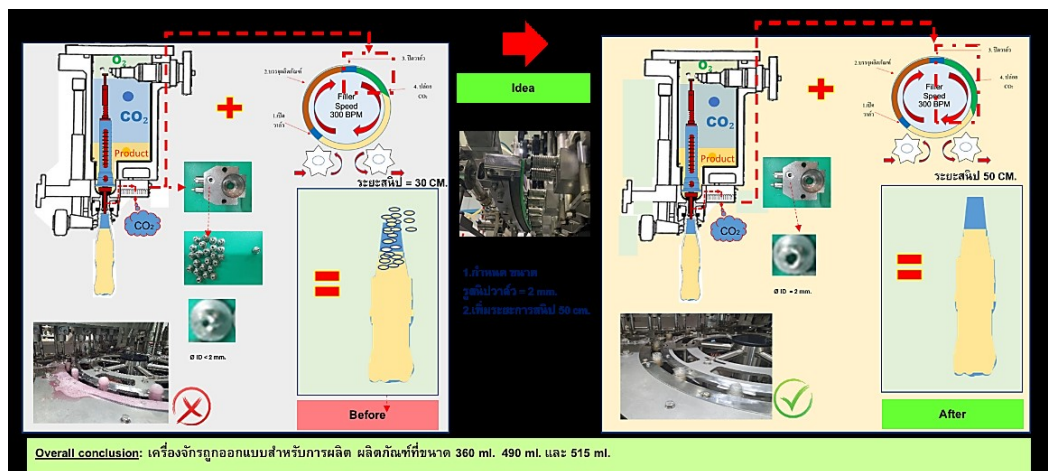




ภาพที่ 13 วิเคราะห์หาสาเหตุจากการใช้ทฤษฎี Why-Why Analysis

ดำเนินการแก้ไข ดังภาพที่ 14

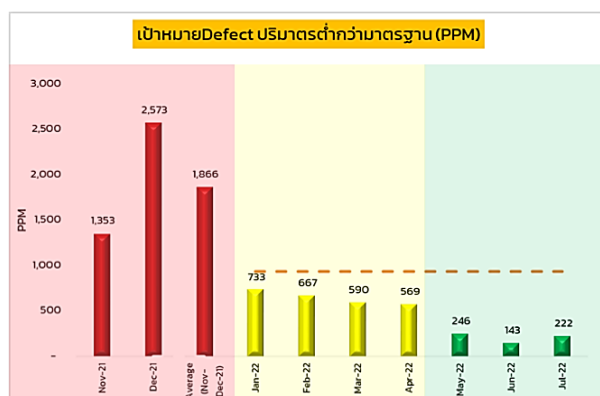




ภาพที่ 14 ดำเนินการแก้ไข

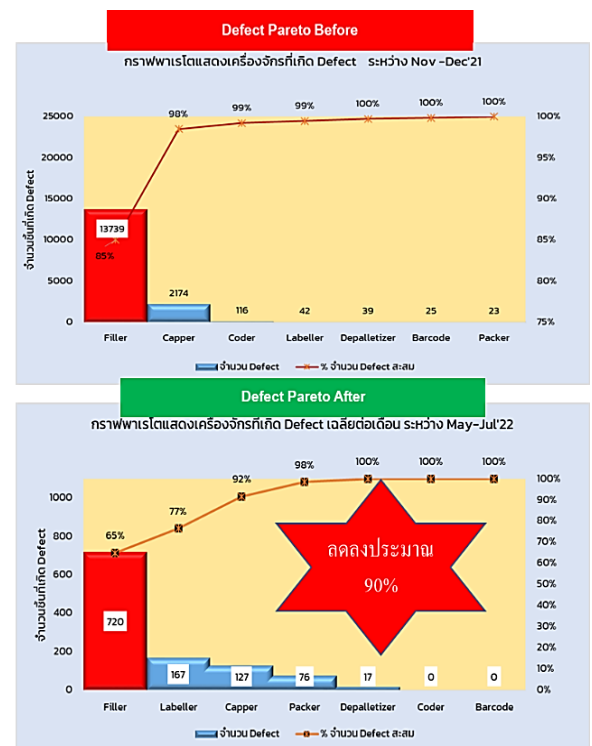
ผลการวิจัยการปรับปรุง

ประเด็นปัญหาเครื่องจักรผลิตของเสีย ก่อนการปรับปรุง จำนวน 9,354 ขวด/เดือน หรือ 1,866 ppm และหลังการปรับปรุงจำนวนเฉลี่ย 1,232 ขวด/เดือน หรือ 200 ppm ดังภาพที่ 15



จากข้อมูลหลังจากการปรับปรุงพบว่า แนวโน้มระหว่างการปรับปรุงและหลังปรับปรุง ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยพบว่า

- ก่อนปรับปรุง = 1866 PPM
- ระหว่างปรับปรุง = 636
- หลังปรับปรุงและจัดทำมาตรฐาน = 200 PPM



ภาพที่ 15 เปรียบเทียบผลการปรับปรุง

อภิปรายผลการวิจัย

ผลจากการทดลอง โดยการปรับเปลี่ยนขนาดสปริง และชิ้นส่วนของสปริงวาล์ว ซึ่งสามารถนำแนวทางไปปรับใช้ในกระบวนการผลิตที่มีชิ้นส่วนคล้ายกัน

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวิจัยการปรับปรุงเพื่อลดปัญหาเครื่องจักรผลิตของเสีย จากอาการสปริงเสื่อวาล์วบรรจุมีขนาดไม่เหมาะสม และชุดสนิปวาล์วชำรุดที่กระบวนการผลิตเครื่องดื่มน้ำอัดลมบรรจุขวดพลาสติกที่กระบวนการผลิตที่ 5 เป็นไปได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพรวมถึงการใช้ทรัพยากรมนุษย์ให้คุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด กรณีศึกษาบริษัทตัวอย่าง ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. เนื่องจากการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม เพื่อจำหน่ายให้ผู้บริโภค หัวใจหลักคือเรื่องคุณภาพ เพื่อตอบสนองความต้องการและความคาดหวังของลูกค้ามากที่สุด
2. สามารถประยุกต์ใช้หลักการและทฤษฎีดังกล่าวมาปรับปรุงการผลิตจนถึงการส่งมอบในส่วนกระบวนการอื่นๆ ได้
3. อนาคตของบริษัทกรณีศึกษาควรนำเอาเทคโนโลยีเครื่องจักรที่ทันสมัยในการผลิตมาใช้เพื่อป้องกัน การสูญเสีย และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศุภพัฒน์ ปิงตา. (2563). เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด. http://www.eng.mut.ac.th/article_detail.php?i5=50
- [2] สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ. (2563). *ทฤษฎี Why Why Analysis*. http://www.ftpi.or.th/download/seminar-file/P-talk_nov_2011.pdf
- [3] สมจินต์ อักษรธรรม. (2559). การศึกษาแนวทางการประหยัดพลังงาน กรณีศึกษา: บริษัทแพตติ้ง (ไทยแลนด์) จำกัด. *การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 7-8 กรกฎาคม 2559*.
- [4] 3 จริง หรือ 3 GEN. <http://www.japanese2u.com/2014/11/3-gen.html>
- [5] ชนนาถ กฤตวรกาญจน์. (2559). การลดผลิตภัณฑ์บกพร่องของการผลิตใบเลื่อยคั่นธนูโดยใช้เครื่องมือคุณภาพ. *การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 7-8 ก.ค.2559*.
- [6] อุมภาพร พกแดง และ ญัฐนารี สุขเสกสรรค์. (2556). การลดของเสีย ในกระบวนการผลิตท่ออย่างน้ำมันในรถยนต์ กรณีศึกษา บริษัทผลิตชิ้นส่วนรถยนต์. *การประชุมวิชาการข่ายงาน วิศวกรรมอุตสาหกรรม, 16-18 ต.ค 2556*.