



สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

Thai-Nichi Institute of Technology

泰日工業大学

สร้างนักคิด ผลิตนักปฏิบัติ สร้างนักประดิษฐ์ ผลิตนักบริหาร

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

TNI Journal of Engineering and Technology

ISSN 2351-0056

ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2561

- | | | |
|---|---|----|
| ☼ | A Queue Management System for a Hospital: A Wearable Q
เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล, ธนชัย หนูบุญ, อีร์ธวัช ดีมาก, นพชัย คงเจริญ | 1 |
| ☼ | An Application of Assembly Line Balancing Methods for Producing Vehicle's Air Outlets
ธัญญา จมรัตน์, พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์ | 6 |
| ☼ | Cracking Cause of Neutron and Gamma Ray Shielding Material Composing of
High-Density Cement, Crumb Rubber and Lead
Pawitra Aim-O, Doonyapong Wongsawaeng, Somchai Tancharakorn,
Phiphat Phruksarojanakun | 12 |
| ☼ | Electrical Resistivity Development of Concrete at Early Ages and Its Correlation
with Compressive Strength
มงคล นามลักษณ์, Rithy Lo | 17 |
| ☼ | Smart Home Security Systems with the Internet of Things to the Future Internet
through IPv6 support
ศุภโชค เกียรติกิติกุล, ชรัตน์ ชำแสง, อรรณพ หมั่นสกุล | 24 |
| ☼ | Technical and Financial Feasibility Study on Recycle Water Treatment System from
Wastewater: A Case Study of Automobile Manufacturer
นันทชัย กานตานันทะ, ชเนตติ์ พูลพัฒน์ | 30 |

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

TNI Journal of Engineering and Technology

ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2561 Vol. 6 No. 2 July - December 2018 ISSN 2351-0056

ความเป็นมา

ด้วยสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น มีนโยบายสนับสนุนการเผยแพร่บทความจากผลงานวิจัย และบทความวิชาการ ที่มีคุณภาพ เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาความรู้แก่สังคม โดยเฉพาะภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม จึงได้จัดทำวารสาร วิชาการ คือ วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อส่งเสริมและเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีคุณภาพ
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางการวิจัยในสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อพัฒนาศักยภาพทางการวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต โรจน์อารยานนท์

ขอบเขตเนื้อหา

บทความวิจัยและบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ สาขาวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์เทคโนโลยี เทคโนโลยีสารสนเทศ มัลติมีเดีย

กำหนดออกเผยแพร่

วารสารตีพิมพ์เผยแพร่ราย 6 เดือน (ปีละ 2 ฉบับ)

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

เจ้าของ

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น (Thai-Nichi Institute of Technology : TNI)

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

1771/1 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

กองบรรณาธิการ

- | | |
|---|---------------------------------------|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ชนารักษ์ ชีระมั่นคง | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.อดิสร ลีลาสันติธรรม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.พีรยุทธ์ ชาญเศรษฐิกุล | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 5. รองศาสตราจารย์ พูลพร แสงบางปลา | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ พงษ์ยุพินพานิช | มหาวิทยาลัยรามคำแหง |
| 7. รองศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล อันตรเสน | สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์ | สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |

คณะกรรมการดำเนินงาน

1. ดร.กรกฎ เหมสถาปัตย์
2. รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์
3. รองศาสตราจารย์ ดร.อรรณพ หมั่นสกุล
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทวัฒน์ ไชยชนะวงศ์
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อนุญาหงษ์
6. ดร.เอิบ พงษ์พอง
7. นางสาวสุพิศ บายคายคม
8. นางสาวนิรชา อินทร์ศรี
9. นางสาวจุฑามาศ ประสพสันต์
10. นางสาวพิมพ์รัตน์ พิพัฒน์กุล

การติดต่อกองบรรณาธิการ

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

Tel. 0-2763-2600 (ต่อ 2752, 2704) Fax. 0-2763-2754

website : <http://journal.tni.ac.th> e-mail : journal@tni.ac.th

บทความวิจัยและบทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน
กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใดๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัยและบทความวิชาการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.รัชนีกร ธรรมวิชัย	St.Cloud State University, USA
ศาสตราจารย์ ดร.วิลาศ วูวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรณะเดช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญญะ เกียรติวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงค์	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พัชราภรณ์ ญาณภีร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรภรณ์ อธิชัยกุล	สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)
รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ มุ่งวัฒนา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ พูลพร แสงบางปลา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Prof. Dr.Michiko OHKURA	Shibaura Institute of Technology, Japan
Dr.Masayuki FUJISE	National Institute of Information and Communications Technology, Japan
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต โรจน์อารยานนท์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล อันตรเสน	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกว วรากุลศิริพันธ์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมล แสนอ้อม	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ดร.สะพรั่งสิทธิ์ มฤตุสาธร	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ดร.กรกฎ เหมสถาปัตย์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

บทบรรณาธิการ

ในสถานการณ์โลกที่มีการแข่งขันอย่างรุนแรงทั้งภาคการค้า ภาคอุตสาหกรรม ตลอดจนการเข้ามา มีบทบาทอย่างสำคัญของเทคโนโลยีดิจิทัลต่อแวดวงธุรกิจ อุตสาหกรรมและการศึกษา ตลอดจนด้านการ วิจัยและงานสร้างสรรค์นวัตกรรม การเสริมสร้างศักยภาพและการเผยแพร่ผลงานด้านการวิจัย นับว่ามีความ สำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมเพื่อรองรับการแข่งขันในยุค “ประเทศไทย 4.0” การวิจัยทาง ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีมีความสำคัญอย่างยิ่ง ต่อการเพิ่มพูนองค์ความรู้ทางด้านเทคโนโลยี าระดับสูงและต่อยอดการประยุกต์เทคโนโลยีสู่ภาคอุตสาหกรรมและธุรกิจ เพื่อเป้าหมายการพัฒนาประเทศ อย่างยั่งยืนและมั่นคงตามแนวยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี ของรัฐบาล ซึ่งประกอบด้วย 6 ยุทธศาสตร์ที่สำคัญคือ 1) ด้านความมั่นคง 2) ด้านการสร้างความสามารถในการแข่งขัน 3) ด้านการพัฒนาและเสริมสร้างศักยภาพ ทรัพยากรมนุษย์ 4) ด้านการสร้างโอกาสและความเสมอภาคทางสังคม 5) ด้านการสร้างการเติบโตบนคุณภาพ ชีวิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และ 6) ด้านการปรับสมดุลและพัฒนาระบบบริหารจัดการภาครัฐ

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการเผยแพร่ผลงานวิจัยและงานสร้างสรรค์ ทางวิชาการที่จะเป็นประโยชน์ต่อแวดวงวิชาการและการประยุกต์ใช้ในภาคธุรกิจอุตสาหกรรม เพื่อเสริมสร้าง ความเข้มแข็งด้านงานวิจัยให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างแท้จริง เพื่อตอบสนองต่อยุทธศาสตร์ชาติทั้ง 6 ด้าน วารสารฉบับนี้จึงได้รับการจัดทำขึ้นเพื่อเป็นช่องทางสำหรับนักวิจัยและนักวิชาการในการเผยแพร่ ผลงานสู่สาธารณะ วารสารฉบับนี้จึงเป็นวารสารสำหรับนักวิจัย นักวิชาการ ตลอดจนผู้บริหาร และผู้ปฏิบัติงาน ในด้านงานวิศวกรรมและเทคโนโลยี

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มีกำหนดออกปีละ 2 ฉบับ กองบรรณาธิการยินดีรับทุกบทความจากผลงานวิจัย งานวิชาการ และงานสร้างสรรค์ที่นำเสนอให้คณะกรรมการ กลั่นกรองพิจารณา ดังนั้นผู้สนใจที่จะร่วมเผยแพร่ผลงาน ความรู้ และประสบการณ์ สามารถศึกษาและจัด เตรียมบทความจากคำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความและนำส่งบทความได้ที่กองบรรณาธิการวารสาร เพื่อ เสนอต่อคณะกรรมการกลั่นกรองบทความพิจารณาจัดพิมพ์ในวารสารต่อไป เราหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสาร ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักวิจัย นักวิชาการ นักการศึกษาและผู้ประกอบการธุรกิจทุกภาคส่วน

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์
บรรณาธิการ

สารบัญ

- 1 **A Queue Management System for a Hospital: A Wearable Q**
เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล, ธนชัย หนูบุญ, อีร์ธวัช ดีมาก, นพชัย คงเจริญ
- 6 **An Application of Assembly Line Balancing Methods for Producing Vehicle's Air Outlets**
ธัญญา ฉมารัตน์, พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์
- 12 **Cracking Cause of Neutron and Gamma Ray Shielding Material Composing of High-Density Cement, Crumb Rubber and Lead**
Pawitra Aim-O, Doonyapong Wongsawaeng, Somchai Tancharakorn,
Phiphat Phruksarajanakun
- 17 **Electrical Resistivity Development of Concrete at Early Ages and Its Correlation with Compressive Strength**
มงคล นามลักษณ์, Rithy Lo
- 24 **Smart Home Security Systems with the Internet of Things to the Future Internet through IPv6 support**
ศุภโชค เกียรติกิติกุล, ชรัตน์ ขำแสง, อรรณพ หมั่นสกุล
- 30 **Technical and Financial Feasibility Study on Recycle Water Treatment System from Wastewater: A Case Study of Automobile Manufacturer**
นันทชัย กานตานันทะ, ชเนตติ์ พูลพิพัฒน์
- 39 **The Development of Telecommunication Network Verification System**
เพ็ญสุภา โกญจนะบุญ, สมชาย นำประเสริฐชัย
- 45 **Traffic Flow Analytics and Prediction using Nonlinear Autoregressive Network with Exogenous Inputs Technique**
พีรพล พุทธเวชมงคล, วิมล แสนอัม, ชฎาพร เกตุมณี
- 50 **Volume Estimation of Stock Pile: A Study Case Comparing Estimation Results between Surpac and AutoCAD C3D**
พงศ์ศิริ จุลพงศ์, วิมเนศวร์ ดำคง

ระบบจัดลำดับคิวสำหรับโรงพยาบาล: คิวแบบสวมใส่ได้

A Queue Management System for a Hospital: A Wearable Q

เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล¹ ธนชัย หนูบุญ² วีรวิทย์ ดีมาก³ นพชัย คงเจริญ⁴

หน่วยวิจัยวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

¹kiattisin.k@msu.ac.th

²thanachai.noo@msu.ac.th

³teetawat_non@hotmail.com

⁴noppachai101@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปัญหาหนึ่งในการรอรับบริการสาธารณสุขในโรงพยาบาล คือ ผู้ป่วย ต้องนั่งรอดูลำดับคิวของตน จึงทำให้ไม่สามารถไปจุดต่างๆ ได้ ถึงแม้ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน แต่ระบบดังกล่าว ไม่สามารถใช้งานได้กับทุกคน ดังนั้น วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัยนี้ คือ เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบคิวที่สามารถแจ้งเตือนลำดับคิวผ่านเครือข่ายไร้สาย ผู้ป่วยสามารถพกพาหรือสวมใส่เพื่อไปทำกิจกรรมต่างๆ ได้ โดยไม่จำเป็นต้องนั่งรอคิว ระบบนี้ ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 อุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้ ซึ่งถูกออกแบบให้เป็นลักษณะสายรัดข้อมือ มีราคาถูกขนาดเล็กพกพาได้สะดวก ใช้ Node MCU ในการเชื่อมต่อรับข้อมูลลำดับคิวและแสดงผลสถานะคิวผ่านทางหลอดไฟแอลอีดีและเสียง ส่วนที่ 2 คือ ปุ่มกดเรียกคิว เมื่อปุ่มถูกกด จะแจ้งไปยังส่วนที่ 3 ตัวควบคุมและจัดลำดับคิว เพื่อประมวลผลและส่งข้อมูลไปยังส่วนคิวแบบสวมใส่ได้ ผลการทดลองพบว่าระบบจัดลำดับคิวนี้ สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ ทั้งกรณีทดสอบแบบจำลองสถานการณ์และทดสอบจริง ณ ศูนย์บริการทางการแพทย์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ดังนั้น ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ ช่วยอำนวยความสะดวกให้กับผู้ป่วยสามารถออกไปทำกิจกรรมอย่างอื่นได้ในระหว่างที่รอคิว

คำสำคัญ: ระบบจัดลำดับคิว, เครือข่ายสื่อสารไร้สาย, โรงพยาบาล, คิวแบบสวมใส่ได้

ABSTRACT

One main problem of health services in hospitals is that patients have to wait in front of the monitor displaying the service queue. They cannot go elsewhere. Although, at present, queue applications have been developed on smartphones, these solutions are not applicable for everyone. Therefore, the main objectives of this research are to design and to develop a queuing system which can notify the queue via a wireless network. Patients can carry or wear the queue device in order that they can do other activities during waiting for the service queue. The developed system consisted of 3 parts: Part 1 is wearable queue devices designed in the form of a wristband and they had to be cheap, small and easily portable. The Node MCU was used for wireless connection to receive the queue number and to show the queue status through LEDs and sound. Part 2 was the queue calling push button. When it was pressed, the signal was sent to the third part, i.e., the queue management controller for processing and sending the queue

information to the wearable queue devices. The experimental results showed that the developed queue management system can be implemented successfully as designed for both simulation and real situations at the medical service center, Mahasarakham University. Therefore, it can facilitate the patients to do other activities during queue waiting.

Keywords: Queue management system, wireless networks, hospitals, wearable queue

1) บทนำ

การจัดลำดับคิวเกิดขึ้นเมื่อ ผู้มารับบริการหรือลูกค้าที่เข้ามาใช้บริการยังหน่วยที่ให้บริการและยังไม่ได้รับบริการในทันที ส่งผลให้ผู้มารับบริการต้องใช้เวลาในการรอเพื่อรับบริการ ระบบคิวแบบเดิม ผู้มารับบริการจะต้องนั่งรอดูลำดับคิวของตนเองจึงทำให้ไม่สามารถทำกิจกรรมอย่างอื่นหรือไปจุดต่างๆ ได้ ปัจจุบันได้มีระบบที่เข้ามาช่วยในการอำนวยความสะดวก เช่น การจองคิวและแจ้งลำดับคิวผ่านทางสมาร์ตโฟน ทั้งในรูปแบบของแอปพลิเคชัน [1-3] หรือ ผ่านเว็บเพจ [4] แต่ก็ยังไม่สามารถใช้ได้กับทุกคน เนื่องจากในปัจจุบันยังมีคนที่ไม่ได้ใช้สมาร์ตโฟน หรือ ไม่คุ้นเคยกับการใช้สมาร์ตโฟน หรือ สมาร์ตโฟนที่ผู้มารับบริการใช้ อาจจะไม่ได้อัปเดต Internet ตลอดเวลา

ในอีกรูปแบบหนึ่ง คือ การใช้ SMS เพื่อสอบถามคิวและแจ้งคิว [5] แต่ในกรณีนี้ จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับ SMS อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ผู้ใช้โทรศัพท์มือถือ แบตเตอรี่ ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง ถ้าแบตเตอรี่หมด ก็จะไม่สามารถใช้งานโทรศัพท์มือถือได้ จึงทำให้คนที่ไม่ได้ใช้โทรศัพท์มือถือยังคงนั่งรอคิวแบบเดิม

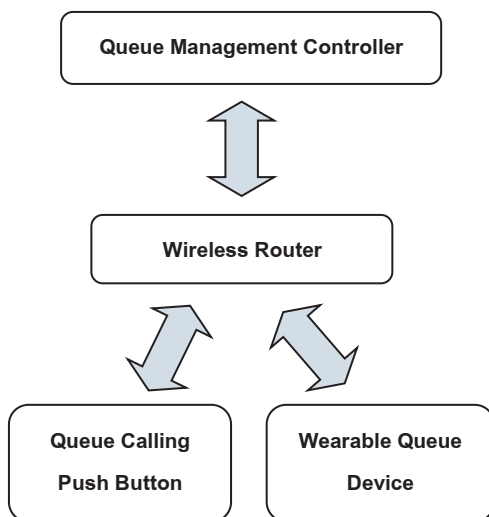
การแจ้งเตือนอีกประเภทหนึ่ง คือ อุปกรณ์เพจเจอร์ระบบคิวไร้สาย [6-7] อุปกรณ์เรียกคิวแบบนี้ สามารถพกพาได้ เมื่อถึงคิวของตน ก็จะมีสัญญาณสั่นเตือน เพื่อให้ลูกค้าเข้ามาใช้บริการ โดยไม่จำเป็นต้องนั่งรอตัวส่งสัญญาณจะติดตั้ง ณ จุดให้บริการ เพื่อกดเรียกคิวลูกค้า อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์เพจเจอร์ระบบคิวไร้สาย แบบนี้ มีราคาค่อนข้างสูง อาจจะไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในโรงพยาบาล

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ระบบจัดลำดับคิว ยังมีข้อจำกัดทั้งในด้านราคาและไม่ยืดหยุ่นต่อผู้ใช้งาน ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดออกแบบและพัฒนาระบบจัดลำดับคิวที่มีอุปกรณ์แสดงคิวเป็นลักษณะสายรัด

ข้อมือ ที่มีราคาถูก ขนาดเล็ก สามารถพกพาได้สะดวก และ ที่สำคัญคือ ใช้งานได้กับทุกคน ซึ่งจะช่วยอำนวยความสะดวกให้ผู้ขอรับบริการสามารถออกไปทำกิจกรรมอย่างอื่นได้นอกจากการนั่งรอคิว เนื่องจากสามารถแจ้งเตือนลำดับคิวผ่านเครือข่ายสื่อสารไร้สายได้

2) ระเบียบวิธีวิจัย

หลักการทำงานจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ตัวควบคุมและจัดลำดับคิว (Queue Management Controller) อุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้ (Wearable Queue Device) และ ปุ่มกดเรียกคิว (Queue Calling Push Button) ดังแสดงในรูปที่ 1 การรับส่งข้อมูลระหว่างส่วนต่างๆ ใช้เป็นเครือข่ายไร้สายแบบ WiFi เชื่อมต่อแบบ Ad Hoc โดยมี Router เป็นตัวช่วยขยายสัญญาณ ในกรณีที่ต้องใช้งานในพื้นที่ กว้าง เพื่อให้ผู้ขอรับบริการ สามารถทำกิจกรรมอื่นๆ ได้สะดวก



รูปที่ 1: แผนภาพของระบบจัดลำดับคิวโดยอาศัยเครือข่ายไร้สาย

2.1) ตัวควบคุมและจัดลำดับคิว

บอร์ด Raspberry Pi 3 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมและประมวลผลหลักของระบบ เนื่องจากมีราคาถูก และ รองรับการทำงานได้อย่างครบถ้วน การพัฒนาโปรแกรม ใช้โปรแกรม Qt สำหรับสร้างส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2 ร่วมกับจอแบบสัมผัส และ ในส่วนของฐานข้อมูลใช้ SQLite เพื่อบันทึกลำดับคิวและหมายเลข IP ของอุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้

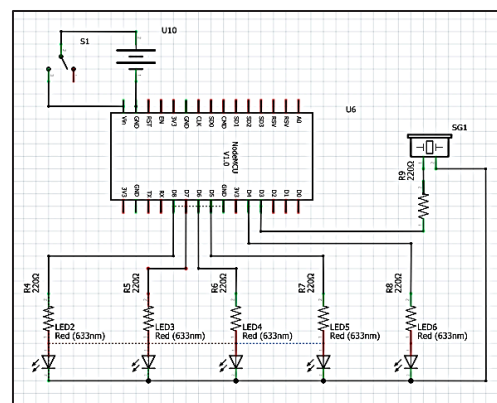


รูปที่ 2: ตัวควบคุมและจัดลำดับคิวพร้อมด้วยหน้าจอแสดงผล

หน้าจอส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน จะแสดงผลข้อมูลการจ่ายคิวให้กับอุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้ ข้อมูลการเรียกคิว จำนวนคิวทั้งหมด และ คิวปัจจุบัน โดยจำนวนคิวทั้งหมดจะเพิ่มค่า เมื่อมีการเปิดใช้งานอุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้ ในขณะที่คิวปัจจุบัน จะเพิ่มค่า เมื่อมีการกดปุ่มเรียกคิว นอกจากนี้ ยังมี ปุ่ม Reset สำหรับเริ่มต้นทำงานใหม่

2.2) อุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้

การออกแบบอุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้ จะมีลักษณะเป็นสายรัดข้อมือ มีขนาดเล็ก สะดวกสบาย เพื่อให้ง่ายต่อการพกพาหรือสวมใส่ที่บริเวณแขนของผู้ขอรับบริการ ซึ่งง่ายต่อการมองเห็น วงจรทางไฟฟ้าของอุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้เป็นดังรูปที่ 3



รูปที่ 3: วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้

จากรูปที่ 3 อุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้ ประกอบด้วย สวิตช์ ปิด-เปิดการทำงาน, แบตเตอรี่ LiPo 3.7 V 180 mAh ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์, LED แสดงผล และ Buzzer สร้างเสียง ทำหน้าที่แจ้งเตือนลำดับคิวให้กับผู้ขอรับบริการ ตัวควบคุมของอุปกรณ์นี้ใช้ Node MCU ESP 8285 เมื่อประกอบสำเร็จแล้วได้อุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4 และ สวมใส่ให้กับผู้ขอรับบริการได้ดังแสดงในรูปที่ 5



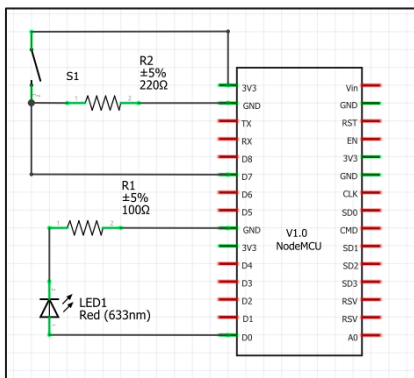
รูปที่ 4: ส่วนประกอบภายในอุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้



รูปที่ 5: การสวมใส่อุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้ ที่บริเวณข้อมือของผู้ใช้บริการ

2.3) ปุ่มกดเรียกคิว

ปุ่มกดเรียกคิวเป็นลักษณะกดแล้วปล่อยเพื่อเรียกคิวให้ผู้เข้ารับบริการให้เข้ามาใช้บริการ ตำแหน่งที่ติดตั้งอาจจะเป็นบริเวณหน้าห้องตรวจ วงจรไฟฟ้าของปุ่มกดเรียกคิว เป็นดังรูปที่ 6 ซึ่งใช้ Node MCU ESP8285 เป็นตัวรับค่าการกดและส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สาย มีสวิตช์เปิด-ปิดการทำงาน ใช้แบตเตอรี่ LiPo 3.7 V 180 mAh ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์ และมี LED แสดงสถานะการกดเมื่อประกอบสำเร็จแล้วได้ปุ่มกดเรียกคิวดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6: วงจรไฟฟ้าของปุ่มกดเรียกคิว



รูปที่ 7: ลักษณะของปุ่มกดเรียกคิว

2.4) ขั้นตอนการทำงานของทั้งระบบ

เริ่มต้นการทำงานด้วยการเปิดใช้งานตัว Router และ ตัวควบคุม และจัดลำดับคิว เพื่อการเชื่อมต่อ WiFi โปรแกรมจัดลำดับคิวพร้อมใช้งาน เมื่อต้องการใช้งาน จะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เมื่อผู้ให้บริการ ต้องการที่จะรับบริการ เจ้าหน้าที่ผู้ดูแล เปิดการใช้งานอุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้

2. อุปกรณ์จะทำการเชื่อมต่อกับตัวควบคุมและจัดลำดับคิว ผ่านเครือข่ายไร้สายโดยอัตโนมัติ แล้วทำการส่งค่า IP Address ของอุปกรณ์ไปยัง ตัวควบคุม
3. ตัวควบคุมตรวจสอบค่า IP Address ดังกล่าวในฐานข้อมูล ตารางการจัดลำดับคิว ว่า IP Address ดังกล่าว ได้ถูกใช้งานอยู่หรือไม่
4. ถ้าหากตัวควบคุมตรวจสอบแล้ว พบว่า IP Address ดังกล่าว ยังไม่ได้ถูกใช้งาน ตัวควบคุม จะส่งลำดับคิวต่อจากลำดับคิวล่าสุดไปให้อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อนี้ พร้อมทั้งเพิ่มจำนวนคิวทั้งหมดบนหน้าจอ จะเพิ่มขึ้น 1 ค่า และบันทึกข้อมูลลงในฐานข้อมูล นั่นคือ IP Address และ ลำดับคิวที่ได้รับ แต่ในกรณีที่ IP Address นี้ ยังมีการใช้งานอยู่ ตัวควบคุม จะส่งลำดับคิวของ IP Address นี้ไปให้แทน
5. อุปกรณ์ เมื่อได้รับลำดับคิวแล้วจะบันทึกเก็บค่าไว้
6. เมื่อมีการกดปุ่มเรียกคิว สัญญาณจะถูกส่งไปยังตัวควบคุม ตัวควบคุมเพิ่มค่าคิวปัจจุบันอีก 1 พร้อมทั้งแสดงผลบนหน้าจอ แล้วส่งค่าคิวปัจจุบันไปยังอุปกรณ์ทุกตัวที่เชื่อมต่อกับตัวควบคุม
7. เมื่ออุปกรณ์แต่ละตัวได้รับค่าคิวปัจจุบัน ก็จะนำค่านี้นับจากค่าลำดับคิวของตัวเอง ถ้าหากผลต่างไม่เกิน 5 จำนวน LED ที่สว่างจะเท่ากับผลต่างนี้ และมีเสียงแจ้งเตือนเมื่อลำดับคิวลดลง แต่ในกรณีที่ค่านี้นเกิน 5 อุปกรณ์จะไม่แสดงผล เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานของตัวอุปกรณ์
8. ถ้าหากอุปกรณ์ตัวใด มีผลต่างเป็น 0 นั่นคือ ลำดับคิวที่ต้องเข้ารับบริการ LED จะกระพริบ และมีเสียงแจ้งเตือน

จากขั้นตอนการทำงานดังกล่าว ผู้ให้บริการ ไม่จำเป็นต้องนั่งรอคิวอยู่ ณ ห้องตรวจ ผู้ให้บริการสามารถเดินทางไปทำกิจกรรมต่างๆ ได้ ในบริเวณที่มีสัญญาณเครือข่ายไร้สาย นอกจากนี้ อุปกรณ์ยังมีการแจ้งเตือนผู้ให้บริการ ถ้าหากกำลังออกนอกพื้นที่เชื่อมต่อ โดยอุปกรณ์ทำการสแกนความเข้มของสัญญาณ WiFi ทุกๆ 5 วินาที เมื่อสัญญาณ WiFi มีความเข้มของสัญญาณต่ำกว่า -80 เดซิเบล-มิลลิวัตต์ จะมีเสียงแจ้งเตือน แต่ถึงแม้ผู้ให้บริการจะอยู่นอกระยะการเชื่อมโยงเครือข่ายไร้สาย เมื่อผู้ให้บริการ เข้ามาอยู่ในระยะเชื่อมโยง อุปกรณ์ก็จะสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบได้อีกครั้งอย่างอัตโนมัติ โดยอุปกรณ์ทำการสแกนหา SSID ของ WiFi ที่กำหนดไว้ทุกๆ 5 วินาที

3) ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการทดสอบแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ทดสอบ ระยะเวลาการใช้งานของแบตเตอรี่ในอุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้, ทดสอบการทำงานของระบบในสถานการณ์จำลอง และ ทดสอบการทำงานของระบบในสถานที่ที่ให้บริการจริง

3.1) การทดสอบระยะเวลาการใช้งานของแบตเตอรี่

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแบตเตอรี่จำนวน 3 ชุด ที่ประจุไฟฟ้าเต็ม แล้วให้ LED สว่างครบทั้ง 5 ดวง ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าทุกๆ 10 นาที พบว่า เมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 3.3-3.4 โวลต์ LED ทั้งหมดจะดับลง นั่นคือ อุปกรณ์ไม่สามารถทำงานได้ ซึ่งจากการทดลอง

พบว่าระยะเวลาที่อุปกรณ์สามารถเปิดใช้งานได้ต่อเนื่อง คือ 40 – 50 นาที

3.2) การทดสอบการทำงานของระบบในสถานการณ์จำลอง

ในการจำลองสถานการณ์ เพื่อทดสอบขั้นตอนการทำงาน โดยมีผู้ขอรับบริการจำนวน 10 คน ผลการจำลองสถานการณ์ ได้ผลถูกต้องตามที่ได้ออกแบบไว้ เป็นดังนี้

1. เมื่อเปิดสวิทช์ที่อุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้ หน้าจอจะแสดงจำนวนคิวทั้งหมด และ LED ที่ตัวอุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้จะแสดงผลจำนวนตามคิวที่ได้รับ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8: การจำลองขั้นตอนการทำงาน

2. เมื่อมีการกดปุ่มเรียกคิว จะสังเกตเห็นว่าจำนวน LED ที่ตัวอุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้แต่ละตัวจะลดลงทีละ 1 คิว ตามจำนวนครั้งที่กด เมื่ออุปกรณ์ตัวใด LED กระพริบแสดงว่าต้องเข้ารับบริการแล้วทำการเปิดสวิทช์ที่ตัวอุปกรณ์ได้ เพื่อเตรียมใช้งานสำหรับคิวถัดไป ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9: การจำลองเมื่อมีการกดปุ่มเรียกคิว

3. เมื่อทำการเปิดสวิทช์ของตัวอุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้ที่เคยใช้งานไปแล้ว อุปกรณ์แสดงคิวจะรับลำดับคิวใหม่ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10: การจำลองเมื่อเปิดใช้งานคิวแบบสวมใส่

3.3) การทดสอบการทำงานของระบบในสถานที่ให้บริการจริง

คณะผู้วิจัย ได้นำระบบจัดลำดับคิวที่พัฒนาขึ้นนี้ ติดตั้ง ณ ศูนย์บริการทางการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยทำการจัดลำดับคิว ณ จุดก่อนเข้าพบแพทย์ เพราะเป็นจุดที่จะใช้ระยะเวลานานที่สุด จุดที่ให้คิว คือ ขั้นตอนคัดกรองผู้ป่วยโดยพยาบาลทำหน้าที่สอบถามผู้ป่วย และเปิดสวิทช์อุปกรณ์ ดังรูปที่ 11 ในขณะเดียวกันก็จะเป็นผู้เรียกคิวด้วยการกดปุ่มเรียกคิวอีกด้วย ดังรูปที่ 12 ส่วนหน้าจอแสดงผล ติดตั้งไว้ ณ ตำแหน่งที่สามารถสังเกตเห็นได้ง่าย ดังรูปที่ 13



รูปที่ 11: การใช้งานอุปกรณ์คิวแบบสวมใส่ได้



รูปที่ 12: ตำแหน่งในการติดตั้งปุ่มกดเรียกคิว



รูปที่ 13: ตำแหน่งในการติดตั้งจอแสดงผล

ในระหว่างการทดสอบ พบว่ามีผู้ขอรับบริการ เดินออกจากบริเวณนั่งรอคิว เพื่อไปธุระส่วนตัวหรือไปห้องน้ำ แต่ยังคงอยู่ในบริเวณที่สามารถเชื่อมต่อกับตัวควบคุมได้ อีกทั้งยังมีการแจ้งเตือนผ่านอุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้ เมื่อถึงคิวตนเอง ได้อย่างถูกต้อง หลังจากที่ผู้ขอรับบริการเข้ารับบริการเสร็จสิ้นแล้ว คณะผู้วิจัยได้สอบถามความพึงพอใจในการใช้งาน พบว่า ผู้ขอรับบริการต้องการให้เพิ่มความดังของเสียงเตือนและการสั่นสะเทือนของเครื่อง ควรเปลี่ยนสายรัดเป็นแบบซิลิโคนเพื่อง่ายต่อการทำความสะอาด และสามารถตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้

4) สรุป

เนื่องจากปัญหาในการรอรับบริการตรวจรักษาในโรงพยาบาล ใช้เวลานานและไม่สามารถคาดคะเนได้ ทำให้ผู้ป่วยและผู้ดูแลต้องนั่งรอไม่สามารถทำกิจกรรมอื่นๆ ได้ ถึงแม้ปัจจุบันได้มีการพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน [1-3] หรือ ผ่านเว็บเพจ [4] แต่ทุกคนไม่ได้มีสมาร์ตโฟน หรือ สมาร์ตโฟนที่ใช้นั้น อาจจะได้เชื่อมต่อ Internet ตลอดเวลา ในขณะที่ การใช้ SMS เพื่อสอบถามและแจ้งคิว [5] นั้น จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับ SMS การแจ้งเตือนอีกประเภทหนึ่ง คือ อุปกรณ์เพจเจอร์ระบบคิวไร้สาย [6-7] แต่อุปกรณ์ดังกล่าว มีราคาค่อนข้างสูง ไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในโรงพยาบาล

จากงานวิจัยที่กล่าวมา จึงมีข้อจำกัดทั้งในด้านราคาและไม่ยืดหยุ่นต่อผู้ใช้งาน ดังนั้น ระบบจัดลำดับคิวที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ นอกจาก ทำให้ผู้ขอรับบริการ สามารถทำกิจกรรมอื่นๆ ได้สะดวกแล้วยังมีข้อดี คือ ใช้งานง่าย ราคาถูก ขนาดเล็ก สามารถพกพาได้สะดวก และ ที่สำคัญ คือ ใช้ได้กับทุกคนและไม่ต้องเชื่อมต่อ Internet ส่วนประกอบหลัก ประกอบด้วย ตัวควบคุมและจัดลำดับคิว อุปกรณ์แสดงคิวแบบสวมใส่ได้ และปุ่มกดเรียกคิว การรับส่งข้อมูลระหว่างส่วนต่างๆ ใช้เป็นเครือข่ายไร้สาย

ผลการทดลองระบบจัดลำดับคิวทั้งในสถานการณ์จำลอง และ ในสถานที่ที่ให้บริการจริง ณ ศูนย์บริการทางการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พบว่าทั้งระบบสามารถทำงานได้ถูกต้อง และสามารถอำนวยความสะดวกให้กับผู้ที่มาขอรับบริการได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ข้อเสนอแนะที่ได้ คือ ระยะเวลาการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นเกินไป คือ ประมาณ 40 – 50 นาที และควรบอกแรงดันไฟฟ้าที่เหลือได้, การทำความสะอาดอุปกรณ์แสดงคิวเพื่อสุขอนามัยในการใช้งาน และ อุปกรณ์ควรมีขนาดเล็กและมีการสั่นเตือน ซึ่งข้อเสนอแนะดังกล่าวจะนำไปสู่การปรับปรุงแก้ไขต่อไป นอกจากนี้ เพื่อรองรับการให้บริการสำหรับผู้ที่อยู่นอกพื้นที่เชื่อมต่อของเครือข่ายไร้สาย คณะผู้วิจัยจะพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจัดลำดับคิวดังกล่าว ซึ่งจะช่วยให้ผู้ขอรับบริการมีความสะดวกมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ ศูนย์บริการทางการแพทย์ (ขามเรียง) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการทดลอง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Okoshi, L. Yu, C. Vig, Y. Lee, R. Balan and A. Misra, "QueueVadis: Queuing analytics using smartphones," in *14th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, Seattle, USA, 2015, pp. 214-225.
- [2] M. Ghazal, R. Hamouda, and S. Ali, "An IoT Smart Queue Management System with Real-Time Queue Tracking," in *2015 5th International Conference on e-Learning (econf)*, 2015, pp. 257-262.
- [3] Y.L. Khong, B.C. Ooi, K.E. Tan, S.A. Binti Ibrahim and P.L. Tee, "E-Queue mobile application," in *the International Conference on Communication and Media: An International Association Regional Conference (i-COME'16)*, 2016.
- [4] M. Ngorsed and P. Suesawoluk, "Hospital service queue management system with wireless approach," *Frontier Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 375, pp. 627-637, 2016.
- [5] L. Zou and J. Schum, "Queue management system allows queue number to be remotely obtained by patients or customers," US20100317377A1, 10-Dec-2010.
- [6] "Wireless paging system," *Call Systems Technology (CST)*. [Online]. Available: <https://www.call-systems.com>. [Accessed: 15-Nov.-2017].
- [7] "Wireless calling systems," *CHN Smart Ltd.* [Online]. Available: <http://www.callingsys.com>. [Accessed: 15-Nov.-2017].

การประยุกต์ใช้วิธีการจัดสมดุลสายการประกอบ สำหรับการผลิตช่องแอร์รถยนต์

An Application of Assembly Line Balancing Methods for Producing Vehicle's Air Outlets

ธนัญญา ฌมรัตน์¹ พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์²

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น เขตสวนหลวง, กรุงเทพฯ 10250

¹thananya.champ@gmail.com

²pisut@tni.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงประสิทธิภาพความสมดุลของสายการประกอบในการผลิตช่องแอร์รถยนต์ของโรงงานแห่งหนึ่ง โดยทำการประยุกต์ใช้วิธีการจัดสมดุลสายการประกอบแบบต่างๆ กับสายการผลิตช่องแอร์รถยนต์จำนวน 3 สายการผลิตที่มีประสิทธิภาพความสมดุลต่ำ และนำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบเพื่อหาวิธีที่เหมาะสมกับสายการผลิตช่องแอร์รถยนต์ของโรงงานแห่งนั้นมากที่สุด ผลลัพธ์จากวิธีที่ดีที่สุดที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถปรับปรุงค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพความสมดุลได้ถึง 13.3% จากประสิทธิภาพความสมดุลก่อนปรับปรุง

คำสำคัญ: ปัญหาสมดุลสายการประกอบ, ประสิทธิภาพความสมดุล, ช่องแอร์รถยนต์

ABSTRACT

This research aims at improving the assembly line balance efficiencies on producing the vehicle's air outlets in a factory. To do so, this research applies a number of assembly line balancing methods on the three production lines which have low balance efficiencies. This research finally compares the results of those methods in order to find out the most proper method for the vehicle's air-outlet production lines in the factory. The most proper method revealed here results in the 13.3% average balance efficiency improvement from the current production.

Keywords: Assembly Line Balancing Problem, Balance Efficiency, Vehicle's Air Outlet.

1) บทนำ

งานวิจัยนี้มีเป้าประสงค์หลัก คือ การปรับปรุงประสิทธิภาพความสมดุลของสายการประกอบในการผลิตช่องแอร์รถยนต์ของโรงงานแห่งหนึ่ง สายการประกอบที่ถูกพิจารณาเลือกทำการปรับปรุงในงานวิจัยนี้คือสายการผลิตโมเดลที่มีประสิทธิภาพความสมดุล (Balance Efficiency) ที่ต่ำและโรงงานยังคงมีแผนการผลิตโมเดลเหล่านี้ต่อไปในอนาคต ดังนั้น เพื่อให้เป้าประสงค์ที่วางไว้ประสบผลสำเร็จ งานวิจัยนี้จึงได้เลือกวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบ (Assembly Line

Balancing Methods) แบบต่างๆ มาประยุกต์ใช้กับสายการผลิตช่องแอร์รถยนต์ของโมเดลที่ต้องการปรับปรุง จากนั้นงานวิจัยนี้จะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบ เพื่อหาวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสายการผลิตช่องแอร์รถยนต์ของโรงงานกรณีศึกษาแห่งนี้

2) นิยามของปัญหาและคำศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย

ปัญหาสมดุลสายการประกอบ (Assembly Line Balancing Problem) คือ ปัญหาที่ต้องการจัดเรียงองค์ประกอบงานทั้งหมด (ซึ่งเท่ากับ n_o องค์ประกอบงาน) ให้กับสถานีงานในสายการประกอบ เพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานได้ตามเวลารอบการทำงาน (Cycle Time) ที่โรงงานกำหนดและเป็นไปตามข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลัง (Precedence Constraints) โดยมีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพความสมดุล (Balance Efficiency) สูงสุด งานวิจัยนี้ใช้คำย่อ, นิยาม และคำศัพท์เหมือนกับที่ใช้ใน [1, 2] ดังต่อไปนี้

- T_{ek} คือ เวลาองค์ประกอบงาน (Work Element Time) ขององค์ประกอบงานที่ k (เมื่อ $k = 1, 2, \dots, n_o$) โดย n_o คือ องค์ประกอบงานลำดับสุดท้าย และดังนั้น n_o จึงเท่ากับจำนวนขององค์ประกอบงานทั้งหมดในสายการประกอบด้วย
- T_c คือ เวลารอบการทำงาน (Cycle Time) ที่มากที่สุดที่ยอมรับได้ซึ่งถูกกำหนดจากทางโรงงาน โดยเวลารอบการทำงานของแต่ละสายการประกอบ คือ เวลาเฉลี่ยระหว่างการผลิตเสร็จสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ 2 ชิ้นที่ผลิตต่อกัน หรือก็คือเวลาเฉลี่ยที่ผลิตภัณฑ์แต่ละชิ้นจะออกมาจากสถานีงานสุดท้ายของสายการประกอบ
- T_r คือ เวลาการกลับสู่ที่เดิม (Repositioning Time) ซึ่งก็คือเวลารวมในการหยิบชิ้นงานออกจากสายพานมาดำเนินการที่พื้นที่ทำงานและหยิบชิ้นงานวางคืนสู่สายพานเมื่อดำเนินการเสร็จ งานวิจัยนี้กำหนดให้ทุกๆ สถานีงานในสายการประกอบเดียวกันมีเวลาการกลับสู่ที่เดิมเท่ากัน
- T_{si} คือ เวลาทำงาน (Service Time) ของสถานีงานที่ i โดยมีข้อกำหนดว่าเวลาทำงานของแต่ละสถานีต้องไม่เกินเวลาทำงานสูงสุดที่ยอมรับได้ ซึ่งย่อว่า T_s โดย $T_s = T_c - T_r$

- E_b คือ ประสิทธิภาพความสมดุล (Balance Efficiency) โดย E_b
 $= \sum_{k=1}^{n_{op}} T_{ek} / n \text{Max}(T_{sj})$ เมื่อ n คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด

3) วิธีการจัดสมดุลสายการประกอบที่ใช้ในงานวิจัย

วิธีการจัดสมดุลสายการประกอบ (Assembly Line Balancing Methods) ทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ กลุ่มที่ 1 คือ กลุ่มของวิธีที่จัดเรียงองค์ประกอบงานตามข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลัง (Precedence Constraints) แบบปรกติ และกลุ่มที่ 2 คือ กลุ่มของวิธีที่จัดเรียงองค์ประกอบงานตามข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลัง (Precedence Constraints) แบบย้อนหลัง วิธีในกลุ่มที่ 1 แต่ละวิธีมีการกำหนดความสำคัญในการเลือกองค์ประกอบงานที่เป็นเอกลักษณ์แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม วิธีทั้งหมดในกลุ่มที่ 1 จะมีขั้นตอนทั่วไปที่เหมือนกันดังต่อไปนี้

ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบในกลุ่มที่ 1:

1. กำหนดให้ $i = 1$
2. เลือกองค์ประกอบงานจำนวน 1 องค์ประกอบงานที่มีความสำคัญ (Priority) สูงสุดจากองค์ประกอบงานทั้งหมดที่ยังไม่เคยถูกเลือกจัดลงสายการประกอบและไม่ขัดแย้งกับข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลัง (Precedence Constraints) เพื่อจัดให้กับสถานีงานที่ i โดยไม่ทำให้เวลาทำงานของสถานีงานที่ i เกินเวลาทำงานสูงสุดที่ยอมรับได้ (T_s) จากนั้นให้ดำเนินการซ้ำในขั้นตอนที่ 2 นี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะไม่มีองค์ประกอบงานที่เข้าเงื่อนไขที่จะเลือกได้เหลืออยู่เลย จึงข้ามไปดำเนินการต่อในขั้นตอนที่ 3
3. ถ้าการจัดองค์ประกอบงานทั้งหมดลงสายการประกอบเสร็จสิ้นแล้ว ให้กำหนดสถานีงานที่ i เป็นสถานีงานสุดท้าย (นั่นคือ $n = i$) และให้หยุดการคำนวณ แต่ถ้ายังมีองค์ประกอบงานที่ยังไม่ถูกจัดลงสายการประกอบเหลืออยู่ ให้เพิ่มค่า i ขึ้นโดยการบวก 1 แล้วกลับไปดำเนินการในขั้นตอนที่ 2

ดังที่กล่าวมา วิธีการจัดสมดุลสายการประกอบในกลุ่มที่ 1 ทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความแตกต่างกันที่ลำดับของความสำคัญ (Priorities) ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2 ในขั้นตอนทั่วไปของวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบในกลุ่มที่ 1 ดังต่อไปนี้

- วิธี LCR (Largest Candidate Rule) มีการจัดลำดับความสำคัญขององค์ประกอบงานโดยการเลือกองค์ประกอบงานที่มีเวลาองค์ประกอบงานมากกว่าก่อน [1]
- วิธี RPW (Ranked Positional Weight Method) เลือกองค์ประกอบงานที่มีค่า RPW สูงสุดก่อน โดยค่า RPW ขององค์ประกอบงานหนึ่งๆ คือ ผลรวมเวลาองค์ประกอบงานขององค์ประกอบงานนั้นกับองค์ประกอบงานที่ตามหลังองค์ประกอบงานนั้นตลอดสายของข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลัง (Precedence Constraints) ทั้งหมด [1, 3]
- วิธี MFWE (Most Following Work Element Method using Longest Work Element Time Rule as the Secondary Criterion) เลือกองค์ประกอบงานที่มีจำนวนองค์ประกอบงานตามหลังตลอดสายของข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลัง

(Precedence Constraints) มากที่สุดก่อน ในกรณีนี้ที่องค์ประกอบงานซึ่งมีจำนวนองค์ประกอบงานตามหลังมากที่สุดนั้นมีจำนวนมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบงาน ให้เลือกองค์ประกอบงานที่มีเวลาองค์ประกอบงานสูงสุดจากองค์ประกอบงานเหล่านั้น [4-5]

- วิธี MFWE (Most Following Work Element Method using Shortest Work Element Time Rule as the Secondary Criterion) เลือกองค์ประกอบงานที่มีจำนวนองค์ประกอบงานตามหลังตลอดสายของข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลัง (Precedence Constraints) มากที่สุดก่อน ในกรณีนี้ที่องค์ประกอบงานซึ่งมีจำนวนองค์ประกอบงานตามหลังมากที่สุดนั้นมีจำนวนมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบงาน ให้เลือกองค์ประกอบงานที่มีเวลาองค์ประกอบงานต่ำสุดจากองค์ประกอบงานเหล่านั้น [2]
- วิธี LFWE (Least Following Work Element Method using Longest Work Element Time Rule as the Secondary Criterion) เลือกองค์ประกอบงานที่มีจำนวนองค์ประกอบงานตามหลังตลอดสายของข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลัง (Precedence Constraints) น้อยที่สุดก่อน ในกรณีนี้ที่องค์ประกอบงานซึ่งมีจำนวนองค์ประกอบงานตามหลังน้อยที่สุดนั้นมีจำนวนมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบงาน ให้เลือกองค์ประกอบงานที่มีเวลาองค์ประกอบงานสูงสุดจากองค์ประกอบงานเหล่านั้น
- วิธี LFWE (Least Following Work Element Method using Shortest Work Element Time Rule as the Secondary Criterion) เลือกองค์ประกอบงานที่มีจำนวนองค์ประกอบงานตามหลังตลอดสายของข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลัง (Precedence Constraints) น้อยที่สุดก่อน ในกรณีนี้ที่องค์ประกอบงานซึ่งมีจำนวนองค์ประกอบงานตามหลังน้อยที่สุดนั้นมีจำนวนมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบงาน ให้เลือกองค์ประกอบงานที่มีเวลาองค์ประกอบงานต่ำสุดจากองค์ประกอบงานเหล่านั้น

สำหรับวิธี Least Following Work Element Method, วิธี Longest Work Element Time Rule และวิธี Shortest Work Element Time Rule สามารถสืบค้นได้จาก [6-7]

สำหรับวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบในกลุ่มที่ 2 นั้น คือการจัดสมดุลสายการประกอบแบบย้อนหลัง ซึ่งทุกๆ วิธีในกลุ่มที่ 2 มีขั้นตอนทั่วไปที่เหมือนกัน โดยขั้นตอนที่ 2 ในขั้นตอนทั่วไปของวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบในกลุ่มที่ 2 คือ การนำขั้นตอนทั่วไปของวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบในกลุ่มที่ 1 มาใช้ ดังนั้น ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบในกลุ่มที่ 2 เป็นดังต่อไปนี้

ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบในกลุ่มที่ 2:

1. กลับทิศทางของข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลัง (Precedence Constraints) ทั้งหมดของปัญหา โดยการกลับทิศของหัวลูกศรทั้งหมดบนแผนภาพลำดับก่อนหลัง (Precedence Diagram) และให้ใช้ข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลังที่กำหนดขึ้นใหม่นี้ในขั้นตอนที่ 2

2. ดำเนินการตามขั้นตอนทั่วไปของวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบในกลุ่มที่ 1 จนกว่าการจัดเรียงจะเสร็จสิ้น จากนั้นจึงดำเนินการในขั้นตอนถัดไป
3. จัดเรียงองค์ประกอบงานใหม่เพื่อให้ใช้งานได้จริง ดังนั้นคือ องค์ประกอบงานใดที่ถูกจัดในสถานีงานที่ i ตามขั้นตอนที่ 2 ให้ย้ายไปอยู่ในสถานีงานที่ $n - i + 1$ และสำหรับ องค์ประกอบงานใดๆ ที่ถูกจัดในสถานีงานเดียวกัน องค์ประกอบงานที่ถูกจัดก่อนตามขั้นตอนที่ 2 ให้เปลี่ยนเป็นจัดที่หลัง

วิธีการจัดสมดุลสายการประกอบในกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นการจัดเรียงองค์ประกอบงานแบบย้อนหลัง (Reverse) ทุกวิธีจะมีข้อย่ที่ขึ้นต้นด้วย "R-" แล้วตามด้วยวิธีการจัดลำดับความสำคัญ (Priority) ในการจัดองค์ประกอบงานเข้าสู่สายการประกอบ เช่น R-RPW คือ วิธีการจัดสมดุลสายการประกอบในกลุ่มที่ 2 ที่ใช้การลำดับความสำคัญเหมือนวิธี RPW เป็นต้น ดังนั้น วิธีทั้งหมดที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้ที่จัดอยู่ในกลุ่มที่ 2 มีดังต่อไปนี้คือ R-LCR, R-RPW, R-MFWEL, R-MFWES, R-LFWEL และ R-LFWES โดยวิธี R-RPW สามารถสืบค้นได้จาก [3, 8], วิธี R-LCR, R-MFWEL, R-MFWES สามารถสืบค้นได้จาก [2] และงานวิจัยนี้เพิ่มเติมวิธี R-LFWEL กับ R-LFWES เพื่อเป็นอีกสองทางเลือก

4) สายการประกอบกรณีศึกษาจากโรงงาน

จากการศึกษาและการปรึกษากับบุคลากรของโรงงาน ทำให้พบว่าสายการประกอบที่กำลังประสบปัญหาขาดประสิทธิภาพความสมดุลมีด้วยกัน 3 สายการประกอบ แต่ละสายการประกอบผลิตโมเดล (Model) ที่แตกต่างกันของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงอ้างถึงแต่ละสายการประกอบตามโมเดลที่สายการประกอบนั้นผลิต ได้แก่ โมเดล I, II และ III

4.1) รายละเอียดของสายการประกอบโมเดล I

สายการประกอบโมเดล I มีจำนวนองค์ประกอบงานทั้งหมด 20 องค์ประกอบงาน, เวลาการกลับสู่ที่เดิมเท่ากับ 2.99 วินาที และเวลาการทำงานที่โรงงานต้องการคือ 32.14 วินาทีต่อชิ้น สายการประกอบนี้มีประสิทธิภาพความสมดุล (Balancing Efficiency) อยู่ที่ 78.90% ก่อนปรับปรุง

รายละเอียดขององค์ประกอบงานของสายการประกอบโมเดล I จะแสดงไว้ด้านล่าง โดยลำดับเลข (1 ถึง 20) จะใช้แทนว่าเป็นองค์ประกอบงาน k ที่เท่าใด จากนั้นจึงแสดงรายละเอียดขององค์ประกอบงานดังกล่าวตามลำดับดังนี้คือ คำอธิบายขององค์ประกอบงาน, องค์ประกอบงานที่ต้องทำก่อนที่ติดกัน (Immediate Predecessors) ขององค์ประกอบงานนั้น และ เวลาองค์ประกอบงานในหน่วยวินาที ซึ่งจะใช้เครื่องหมาย ":" ในการแบ่งแยกรายละเอียดทั้งสาม สำหรับรายละเอียดของทั้ง 20 องค์ประกอบงาน ซึ่งเรียงจากองค์ประกอบงานที่ 1 ไปจนถึงองค์ประกอบงานที่ 20 ของสายการประกอบโมเดล I ถึงแสดงไว้ด้านล่างดังต่อไปนี้

รายละเอียดองค์ประกอบงานของสายการประกอบโมเดล I:

1. ทำเครื่องหมายถูกที่ฝาปิดหน้า (Bezel) : ไม่มี : 0.52 (หมายถึง องค์ประกอบงานที่ 1 เป็นการทำให้เครื่องหมายถูกที่ฝาปิดหน้า ซึ่งไม่มีองค์ประกอบงานที่ต้องทำก่อนที่ติดกัน

และองค์ประกอบงานที่ 1 นี้มีเวลาองค์ประกอบงานเท่ากับ 0.52 วินาที)

2. ประกอบคลิปล็อก (Clips) จำนวน 4 ตำแหน่งที่ฝาปิดหน้า : 1 : 5.38
3. นำกรอบ CTR (CTR Case) ออกมาจากสายพาน : ไม่มี : 1.15
4. ดัดยางกันลมรั่ว (Urethane) บนกรอบ CTR : 3 : 10.76
5. ใส่บานปรับช่องแอร์ 5 ประเภท ประเภทละ 1 ชิ้น ได้แก่ บานปรับ A (Fin A) จำนวน 1 ชิ้น, บานปรับ B (Fin B) จำนวน 1 ชิ้น, บานปรับ C (Fin C) จำนวน 1 ชิ้น, บานปรับ D (Fin D) จำนวน 1 ชิ้น, และ บานปรับ E (Fin E) จำนวน 1 ชิ้น ลงในอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig) : ไม่มี : 6.82
6. โยกคันโยกเพื่ออัดบานปรับ A, บานปรับ B, บานปรับ C, บานปรับ D และ บานปรับ E ให้เข้ากัน (บานปรับที่อัดรวมกันเสร็จแล้วจะถูกเรียกว่า ชุดบานปรับ A-E) : 5 : 0.84
7. ทา น้ำมันหล่อลื่นที่ชุดบานปรับ A-E : 6 : 1.12
8. ทา น้ำมันหล่อลื่นที่กรอบ CTR : 4, 7 : 3.05
9. ประกอบกรอบ CTR เข้ากับชุดบานปรับ A-E (เรียกชุดบานปรับ A-E ที่ประกอบเข้ากับกรอบ CTR แล้วว่า ชุด CTR RR) : 8 : 2.52
10. ทดสอบโยก (Shaking Test) ชุด CTR RR : 9 : 1.62
11. ใส่บานปรับช่องแอร์ 3 ประเภท ประเภทละ 1 ชิ้น ได้แก่ บานปรับ A (Fin A) จำนวน 1 ชิ้น, บานปรับ B (Fin B) จำนวน 1 ชิ้น และบานปรับ C (Fin C) จำนวน 1 ชิ้น ลงในอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig) : ไม่มี : 3.60
12. โยกคันโยกเพื่ออัดบานปรับ A, บานปรับ B และบานปรับ C, ให้เข้ากัน (บานปรับที่อัดรวมกันเสร็จแล้วจะถูกเรียกว่า ชุด CTR FR) : 11 : 0.82
13. ประกอบชุด CTR RR กับชุด CTR FR เข้าด้วยกันโดยใช้ตัวโฮลเดอร์ (เรียกชิ้นส่วนที่เกิดจากการประกอบชุด CTR RR กับชุด CTR FR เข้าด้วยกันว่า ชุด CTR) : 12 : 2.26
14. ประกอบชุด CTR ลงบนตัวดันบานปรับช่องแอร์ (Knob) : 10, 13 : 2.86
15. ทดสอบโยก (Shaking Test) ชุด CTR : 14 : 0.99
16. นำชุด CTR วางครอบลงบนฝาปิดหน้า (Bezel) ซึ่งได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ : 2, 15 : 2.75
17. ทดสอบการทำงานพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ : 16 : 1.74
18. ทำเครื่องหมายสัญลักษณ์เพื่อแสดงให้ทราบว่าผ่านการตรวจสอบแล้ว : 16 : 3.95
19. ทดสอบการทำงานพื้นฐานของผลิตภัณฑ์อีกครั้งหนึ่ง : 16 : 1.17
20. ตรวจสอบพื้นผิวของผลิตภัณฑ์และบรรจุกล่อง : 17, 18, 19 : 2.30

4.2) รายละเอียดของสายการประกอบโมเดล II

สายการประกอบโมเดล II มีจำนวนองค์ประกอบงานทั้งหมด 30 องค์ประกอบงาน, เวลาการกลับสู่ที่เดิมเท่ากับ 1.35 วินาที และเวลา

รอบการทำงานที่โรงงานต้องการคือ 25 วินาทีต่อชิ้น ก่อนปรับปรุงมี ประสิทธิภาพความสมดุล (Balancing Efficiency) เท่ากับ 72.07%

รายละเอียดองค์ประกอบงานของสายการประกอบโมเดล II จะ แสดงไว้ด้านล่างในรูปแบบเดียวกันกับโมเดล I โดยลำดับเลข (1 ถึง 30) ใช้แทนว่าเป็นองค์ประกอบงาน k ที่เท่าใด บานปรับช่องแอร์ที่ใช้ใน โมเดล II นี้มี 3 ประเภท ได้แก่ บานปรับ A (Fin A), บานปรับ B (Fin B) และ บานปรับ C (Fin C) ส่วนตัวต้นบานปรับช่องแอร์ที่ใช้ประกอบ ในโมเดล II มี 3 ประเภท ได้แก่ ตัวต้น A (Knob A), ตัวต้น B (Knob B) และตัวต้น C (Knob C) รายละเอียดของ 30 องค์ประกอบงานของ สายการประกอบโมเดล II เป็นดังต่อไปนี้

รายละเอียดองค์ประกอบงานของสายการประกอบโมเดล II:

1. หยอดจาระบีใส่ลงในแกนกลางของกรอบนอก (Outer Case) : ไม่มี : 1.68
2. ใส่สปริง 1 ตัวลงในตัวเชื่อม (Link) ของบานปรับ A : 1 : 1.74
3. หยอดจาระบีลงในตัวเชื่อมของบานปรับ A (Fin A) และ หยอดจาระบีลงในตัวเชื่อมของบานปรับ B (Fin B) : 2 : 3.63
4. ประกอบบานปรับ A และบานปรับ B โดยการสอดลงใน แกนกลางของกรอบนอก (เราเรียกบานปรับ A กับบานปรับ B ที่ประกอบกันเสร็จแล้วนี้ว่า ชุดบานปรับ A-B และเรียก กรอบนอกที่ประกอบเข้ากับชุดบานปรับ A-B ว่า ชุดกรอบ นอก โดยชุดบานปรับ A-B ได้กลายมาเป็นชิ้นส่วนหนึ่งของ ชุดกรอบนอก) : 1, 3 : 1.87
5. ทาน้ำมันหล่อลื่นที่ขาล็อกด้านนอกของชุดกรอบนอก : 4 : 3.82
6. นำตัวกันกระแทก (Seal) จำนวน 1 เส้น มาติดที่ชุดกรอบ นอก : ไม่มี : 7.36
7. ใส่ยาง (Rubber) ลงในตัวเชื่อมของชุดบานปรับ A-B : 5 : 3.23
8. ใส่ชุดกรอบนอกลงในอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig) แล้วนำตัว ต้น C (Knob C) มาครอบตัวเชื่อมของชุดบานปรับ A-B : 7 : 1.82
9. นำตัวปิดตัวเชื่อมบานปรับ (Joint Cover) 1 ชิ้น มาครอบตัว ต้น C โดยการอัดให้ลงล็อก : 8 : 2.34
10. นำชุดกรอบนอกออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานแล้วทดลอง หมุนตัวปิดตัวเชื่อมบานปรับ : 9 : 1.48
11. ประทับตราฐานการผลิต (Product Lot) ลงบนชุดกรอบนอก : ไม่มี : 3.36
12. หยิบยาง (Rubber) 1 ชิ้น มาประกอบเข้ากับบานปรับ A จำนวน 1 ชิ้น : ไม่มี : 7.14
13. ทาน้ำมันหล่อลื่นที่บริเวณขาล็อกของบานปรับ A : 12 : 2.22
14. กัดบานปรับ A ลงในชุดกรอบนอก : 10, 13 : 3.02
15. นำชุดกรอบนอกมาวางลงในอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน และนำตัว ต้น A (Knob A) กับตัวต้น B (Knob B) มาประกอบกันและ นำไปประกอบเข้ากับชุดกรอบนอก : 14 : 2.95
16. ทาน้ำมันหล่อลื่นที่ขาตัวต้น B (Knob B) แล้ววางบนขาตัว

ต้น C (Knob C) แล้วอัดตัวต้น A, ตัวต้น B และตัวต้น C ลง ไปในชุดกรอบนอกให้สุดด้วยเครื่องอัดนิวแมติกส์ (ตัวต้น A, B และ C ที่ถูกอัดลงในชุดกรอบนอกเรียบร้อยแล้วจะถูก เรียกว่า ชุดตัวต้น) : 15 : 1.42

17. นำชุดกรอบนอกที่อัดชุดตัวต้นเรียบร้อยแล้วออกมาจาก อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig) จากนั้นทดสอบความแน่นโดย การทดลองหมุนและโยก : 16 : 2.97
18. ประกอบกรอบใน (Inner Case) กับชุดกรอบนอกเข้าด้วยกัน (เรียกกรอบในและชุดกรอบนอกที่ประกอบกันเรียบร้อยแล้ว ว่า ชุดกรอบ) : 17 : 2.99
19. นำชุดกรอบมาพลิกเอาด้านล่างขึ้นแล้วนำไปวางใส่ลงใน อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน จากนั้นนำฝาเปิดปิดลมเข้า (Flaps) จำนวน 2 ชิ้น มาประกอบที่ชุดกรอบ : 18 : 5.38
20. นำชุดกรอบออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน จากนั้นหมุนชุด ตัวต้นเพื่อปิดฝาเปิดปิดลมเข้า : 19 : 5.33
21. ทาน้ำมันหล่อลื่นบริเวณรอบๆ ฝาเปิดปิดลมเข้า : 20 : 3.62
22. หมุนชุดตัวต้นเพื่อทดสอบการเปิดปิดของฝาเปิดปิดลมเข้า : 21 : 1.21
23. นำฝาปิดหน้ามาประกอบเข้ากับชุดกรอบ ซึ่งทำให้ได้เป็น ผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ : 6, 11, 22 : 5.79
24. เขย่าผลิตภัณฑ์เบาๆ เพื่อฟังเสียงสปริง, ทดลองโยกชุด บานปรับขึ้นลง และโยกซ้ายขวาเพื่อเช็คน้ำหนักและฟังก์ชัน อื่น : 23 : 1.10
25. ตรวจสอบขาล็อกของชุดกรอบนอกกับฝาปิดหน้า และ ตรวจสอบขาล็อกของกรอบในกับชุดกรอบนอก : 23 : 2.23
26. ตรวจสอบขาแหวนล็อกตรงบริเวณรอยเชื่อม : 23 : 3.83
27. เป่าผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องเป่าลมไฟฟ้าสถิต : 24, 25, 26 : 1.71
28. ทำเครื่องหมายสัญลักษณ์เพื่อแสดงให้ทราบว่าเป็นการ ตรวจสอบแล้ว : 27 : 2.82
29. นำผลิตภัณฑ์มาใส่ถุง และห่อให้เรียบร้อย : 28 : 2.90
30. บรรจุใส่กล่อง : 29 : 1.32

4.3) รายละเอียดของสายการประกอบโมเดล III

สายการประกอบโมเดล III มีจำนวนองค์ประกอบงานทั้งหมด 16 องค์ประกอบงาน, เวลาการกลับสู่ที่เดิมเท่ากับ 1.80 วินาที และเวลา รอบการทำงานที่โรงงานต้องการคือ 16.48 วินาทีต่อชิ้น สายการ ประกอบนี้มีประสิทธิภาพความสมดุลอยู่ที่ 70.89% ก่อนปรับปรุง

รายละเอียดขององค์ประกอบงานของโมเดล III จะแสดงไว้ด้านล่าง โดยลำดับเลข (1 ถึง 16) จะใช้แทนว่าเป็นองค์ประกอบงานที่เท่าใด บานปรับช่องแอร์ที่ใช้ในโมเดล III นี้มี 3 ประเภท ได้แก่ บานปรับ A (Fin A), บานปรับ B (Fin B) และ บานปรับ C (Fin C) รายละเอียดของ 16 องค์ประกอบงานของสายการประกอบโมเดล III เป็นดังต่อไปนี้

รายละเอียดองค์ประกอบงานของสายการประกอบโมเดล III:

1. นำตัวเชื่อมบานปรับช่องแอร์ด้านข้าง (Side Link) มาใส่ลงในอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig) : ไม่มี : 1.72
2. ใส่บานปรับ A (Fin A), บานปรับ B (Fin B) และบานปรับ C

- (Fin C) ลงในตัวเชื่อมบานพับช่องแอร์ด้านข้าง (Side Link) : ไม่มี : 2.21
3. โยคคันโยกอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเพื่อประกอบบานพับ A, บานพับ B, บานพับ C และตัวเชื่อมบานพับช่องแอร์ด้านข้างเข้าด้วยกัน โดยเรียกชิ้นงานจากการประกอบนี้ว่า ชุดบานพับ : 1, 2 : 1.04
 4. นำชุดบานพับมาประกอบฝาปิดหน้าด้านข้าง (Side Panel) และเรียกรวมกันว่า ชุดฝาปิดหน้า : 3 : 2.39
 5. ทำสัญลักษณ์เพื่อยืนยันความถูกต้อง : 4 : 1.01
 6. นำกรอบด้านข้าง (Side Case) จำนวน 1 ชิ้น มาใส่แหวนล็อก (Ring) : ไม่มี : 1.43
 7. นำกรอบด้านข้าง จำนวน 1 ชิ้น มาใส่สปริง (Spring) : ไม่มี : 1.79
 8. นำกรอบด้านข้าง จำนวน 1 ชิ้น มาใส่ลูกปืน (Bearing) : 7 : 1.27
 9. นำกรอบด้านข้างทั้ง 3 ชิ้น จากองค์ประกอบงานที่ 6, 7 และ 8 มาประกอบเข้าด้วยกัน โดยเรียกรวมกันว่าชุดกรอบ : 6, 8 : 1.30
 10. ทาน้ำมันหล่อลื่นที่ชุดฝาปิดหน้า : 5 : 1.82
 11. นำชุดฝาปิดหน้ามาใส่บนชุดกรอบ จากนั้นดึงแหวนล็อกมาสอดสปริงเพื่อให้เข้าล็อกตรงตำแหน่ง : 9, 10 : 3.04
 12. ทดสอบความสัมพันธ์ของชิ้นส่วนต่างๆ ในผลิตภัณฑ์ : 11 : 5.83
 13. ทดสอบบานพับช่องแอร์ : 12 : 1.88
 14. ทดสอบเปิดปิด : 12 : 0.93
 15. ตรวจสอบพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ : 12 : 5.21
 16. ทำเครื่องหมายสัญลักษณ์เพื่อแสดงให้ทราบว่าผ่านการตรวจสอบแล้ว และวางลงในกล่อง : 13, 14, 15 : 2.17

5) ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบแบบปรกติจำนวน 6 วิธี และแบบย้อนหลังจำนวน 6 วิธี รวมทั้งสิ้น 12 วิธี ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3 มาทดสอบกับสายการผลิตช่องแอร์รถยนต์จำนวน 3 สาย ซึ่งผลิตโมเดล I, II และ III ตามลำดับ ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4 โดยความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงของวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบทั้ง 12 วิธีนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพความสมดุล (Balance Efficiency; E_b) รวมทั้งเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพความสมดุลที่ได้จากสายการประกอบของโรงงานก่อนการปรับปรุงด้วย

ตารางที่ 1 แสดงประสิทธิภาพความสมดุลของวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบทั้ง 12 วิธี รวมไปถึงประสิทธิภาพความสมดุลของสายการประกอบก่อนการปรับปรุงของโมเดลที่ I, II, III และค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพความสมดุลจากทั้งสามโมเดล ตามลำดับ

ตารางที่ 1: ร้อยละ (%) ของประสิทธิภาพความสมดุล

วิธี	โมเดล I	โมเดล II	โมเดล III	เฉลี่ย
ก่อนปรับปรุง	78.9	72.1	70.9	74.0
LCR	98.0	78.5	82.4	86.3
RPW	98.0	79.8	79.5	85.8
MFWE	98.0	80.5	79.5	86.0
MFWE	98.0	81.2	82.4	87.2
LFWE	66.3	78.5	82.4	75.7
LFWE	73.5	78.5	82.4	78.1
R-LCR	97.3	79.3	80.9	85.8
R-RPW	99.5	79.4	82.8	87.2
R-MFWE	99.5	79.4	82.8	87.2
R-MFWE	99.5	80.5	81.8	87.3
R-LFWE	99.1	80.5	79.6	86.4
R-LFWE	99.1	80.5	79.6	86.4

ผลลัพธ์จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบทั้ง 12 วิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพความสมดุลของสายการประกอบทั้ง 3 โมเดลให้ดีขึ้นกว่าประสิทธิภาพความสมดุลก่อนการปรับปรุง โดยวิธี R-MFWE เป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพความสมดุลที่สูงที่สุดโดยเฉลี่ย เนื่องจากค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพความสมดุลที่ได้รับจาก R-MFWE เท่ากับ 87.3% ซึ่งสูงกว่าวิธีอื่นๆ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าวิธี R-MFWE มีความเหมาะสมที่จะใช้จัดองค์ประกอบงานของสายการผลิตช่องแอร์รถยนต์ในโรงงานกรณีศึกษานี้มากที่สุด

6) สรุป

งานวิจัยนี้นำวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบจำนวนทั้งหมด 12 วิธี ได้แก่ LCR, RPW, MFWE, MFWE, LFWE, LFWE, R-LCR, R-RPW, R-MFWE, R-MFWE, R-LFWE และ R-LFWE มาใช้กับสายการประกอบ 3 สายในโรงงานผลิตช่องแอร์รถยนต์ ผลการวิจัยสรุปว่าวิธีที่ทำให้สายการประกอบมีประสิทธิภาพความสมดุลที่สูงที่สุดโดยเฉลี่ย คือ วิธี R-MFWE ซึ่งการใช้วิธี R-MFWE สามารถเพิ่มค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพความสมดุลจาก 74.0% ไปเป็น 87.3% นั่นคือเพิ่มขึ้นจากก่อนปรับปรุง 13.3% โดยเฉลี่ย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ศรีไทย มียากาว จำกัด และ คุณชาญชัย ทองเชื้อ หัวหน้าแผนกวิศวกรรม ที่อนุญาตให้ทำวิจัยในส่วนของกระบวนการผลิตของโรงงาน รวมไปถึงการให้ความช่วยเหลือและการอำนวยความสะดวกที่ได้รับในขั้นตอนของการเก็บข้อมูลอันเป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. P. Groover, *Work Systems and the Methods, Measurement and Management of Work*, NJ: Pearson Prentice Hall, 2007.
- [2] P. Phiphatsomporn and P. Pongchairerks, "Double Assembly Line Balancing Algorithms on Real-world Instances of Producing Digital Rice Cookers and Digital Hot Pots," *Science and Technology RMUTT Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 96–117, Dec. 2015.
- [3] B. Rekiek and A. Delchambre, *Assembly Line Design: The Balancing of Mixed-Model Hybrid Assembly Lines with Genetic Algorithms*, Germany: Springer, 2006.
- [4] J. K. Shim and J. G. Siegel, *Operations Management*, NY: Barron's Educational Series, 1999.
- [5] S. Bhattacharya, *Operations Management*, Delhi: PHI Learning Private, 2014.
- [6] H. J. Weiss, "Implement Line Balancing Heuristics in Spreadsheets," *INFORMS Transactions on Education*, vol. 13, no. 2, pp. 114-125, Jan. 2013.
- [7] J. Heizer and B. Render, *Operations Management*, 10th ed. NJ: Pearson Prentice Hall, 2011.
- [8] W. B. Helgeson and D. P. Birnie, "Assembly line balancing using ranked positional weight technique," *Journal of Industrial Engineering*, vol. 12, pp. 394-398, 1961

Cracking Cause of Neutron and Gamma Ray Shielding Material Composing of High-Density Cement, Crumb Rubber and Lead

Pawitra Aim-O^{#1,*2}, Doonyapong Wongsawaeng^{#1}, Somchai Tancharakorn^{*2}, Phiphat Phruksarojanakun^{@3}

[#]*Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Bangkok, Thailand, 10330*

¹*doonyapong.w@chula.ac.th*

^{*}*Synchrotron Light Research Institute, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000*

²*somchai@slri.or.th*

[@]*Office of Atoms for Peace, 16 Vibhavadi Rangsit Road, Bangkok, Thailand, 10900*

³*phiphatnor@gmail.com*

Abstract— The cause of the crack under neutron and photon flux of neutron and gamma ray shielding material composing of high-density cement mixed with 5% waste rubber and various percentages of lead powder was investigated. This shielding material was designed and fabricated in our prior work to shield against radiation from synchrotron accelerator. The lead percentages of 2, 4, 6 and 8 wt.% were studied. It was found that with the lead content of at least 4 wt.%, the shielding material cracked under neutron and gamma-ray irradiation. The crystalline phases as well as elemental composition of the shielding material were determined by quantitative X-ray diffraction technique (QXRD). Results revealed the following crystalline phases: barite, portlandite, quartz, calcite, lead and PbO₂. Experimental tests were performed to determine the physical bonding of lead powder to high-density cement. Results revealed that lead powder exhibited very weak adhesion to the cement, indicating that the poor mechanical interface was the underlying cause of cracking. These data will be helpful in developing this class of radiation shielding material to prevent the cracking problem.

Keywords— Cracking cause, Radiation shielding material, High-Density Cement, Crumb Rubber, Lead

I. INTRODUCTION

Ionizing radiation is widely used in many fields such as medical, industrial, and others [1]. Nuclear applications can affect human beings from ionizing radiation exposure. In order to control radiation exposure hazard, working areas and public areas have to comply with the maximum permissible dose suggested by ICRP basic radiation safety criteria [2].

The radiation shielding properties depend on material composition [3]. For gamma ray shielding, the important interactions between gamma radiation and matter are photoelectric effect, Compton scattering and pair production. High Z components in material, such as lead and tungsten, contribute to both Compton scattering and photoelectric absorption processes. On the other hand, low Z components in material result in Compton scattering processes [4]. Everything else being equal, the gamma ray attenuation coefficient increases with increasing density of material [5].

For neutron shielding, the most effective shielding material can be obtained by mixing together hydrogenous materials, heavy metal elements and neutron absorbers.

For neutron interactions, the inelastic scattering process from heavy elements and elastic scattering process from hydrogen are effective in slowing down fast and intermediate energy neutrons, and the other absorbers can help reduce secondary gamma rays including capturing of thermal neutrons [6].

Tyre rubber wastes represent a significant environmental problem [7]. In this work, crumb rubber, which is a low-cost hydrocarbon polymer, is selected to mix with high-density cement. Crumb rubber is produced from natural rubber. A large number of hydrogen atoms present in the chemical structure makes this hydrocarbon polymer a very suitable choice to shield neutrons [8]. Moreover, different materials such as graphite, polyethylene and cement have suitable fast neutron scattering cross-section that can be used for moderating fast neutrons as well [3].

High-density cement mixed 5 wt.% crumbed rubber was design to be the neutron and gamma ray shielding material [1]. In order to improve the photon attenuation ability of the shielding material, lead powder was added with various percentages from 2% to 8% with 2% increments. Although the addition of lead powder in the high-density cement enhances gamma ray attenuation, increasing amount of lead beyond 2 wt.% resulted in cracking under neutron and gamma-ray irradiation. For the lead content of 0 and 2 wt.%, the cracking problem did not occur.

The aim of this research was to determine the cause of the cracking problem of the shielding material composing of high-density cement mixed with 5% waste rubber and various percentages of lead powder [9] in order to better understand and develop this class of radiation shielding material. The crystalline phases were determined and physical tests were performed to evaluate the adhesion of lead powder to high-density cement.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Material Design

Monte Carlo Transport Code is the powerful tool that was used to study the radiation attenuation prior to sample fabrication.

1) Gamma Ray Attenuation

In designing the gamma ray shielding material, the intensity of gamma ray passing through the shielding can be calculated by using Beer-Lambert's law as follows:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

where I_0 and I are the incident and the attenuated gamma ray intensities, respectively, μ is the photon attenuation coefficient of the material in unit cm^{-1} , and x is the thickness of the material, in unit cm, that is placed in the path of gamma ray beam.

2) Neutron Attenuation

For neutron shielding design, the principle is similar to gamma ray attenuation. Beer-Lambert law can be employed to calculate the neutron attenuation as follows:

$$I = I_0 e^{-\Sigma t} \quad (2)$$

where I_0 and I are the incident and the attenuated neutron beam intensities, respectively, t is the thickness of the material in unit cm, and Σ is the neutron attenuation coefficient in unit barn (10^{-24} cm^2).

B. Sample Preparation

High-density cement, crumb rubber and lead with the specific portions were mixed in a mixer. The mixture was poured into the mold and kept curing before undergoing evaluations as shown in Fig. 1.

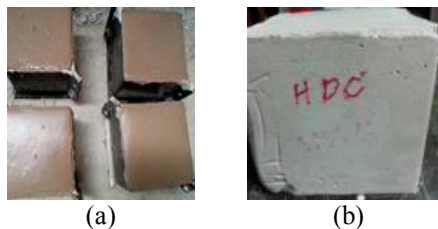


Fig. 1 Sample fabrication (a) Hydration process in the mold (b) Finished sample

All samples were evaluated for gamma ray and neutron attenuations. Elemental compositions were determined by scanning electron microscope (SEM) and electron dispersive microscope (EDS). Morphological compositions were determined by X-ray diffraction (XRD). In addition, lead adhesion test was carried out to determine the physical bonding between lead particles and fabricated high-density cement.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

A. Material Analysis

The elemental composition of the lead powder used in this study was investigated by SEM and EDS.

From the EDS result, the lead powder was determined to compose of carbon, oxygen, tin, antimony and lead with the weight and atomic percentages shown in Table I. The powder consists mainly of lead, which is expected. Although the atomic percentage of carbon is about 2 times that of lead, suggesting the presence of PbC_2 , this molecule does not officially exist. Carbon present in the powder must have been carbon powder.

TABLE I: WEIGHT AND ATOMIC PERCENTAGES OF ELEMENTAL COMPOSITION OF THE LEAD POWDER BASED ON EDS ANALYSIS

Element	Weight %	Atomic %
O	7.84	51.26
Sn	2.88	2.52
Sb	3.52	3.02
Pb	85.74	43.18

B. Photon and Neutron Attenuation

Monte Carlo Transport Code (MCNP) was utilized to investigate the neutron and photon transmission of materials. MCNP is widely used for neutron and photon transport simulations, which can be applied for various applications including radiation shielding. For this study, in the geometry specification, a specific point source was arranged in the center line in front of the samples. Mode $n p$ was designated to be transported for neutron and photon transmissions. For gamma ray transmission, mode p was used. Neutron and gamma ray were emitted from the sources. Am/Be-241 was used as the neutron source and Co-60 was used as the gamma ray source. The macrobody capability was used to specify boxes or cube shape with dimensions 5x5x5 inches and combined using Boolean operators. Flux averaged over the surface of the shielding material was identified by tally type F2 in unit particles per cm^2 as shown in Fig. 2.

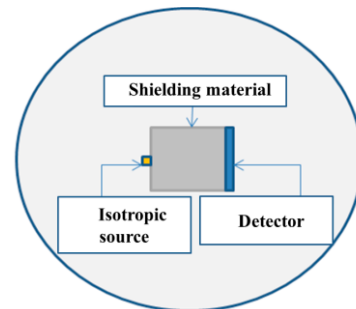


Fig. 2 Simplified 2D geometry in the simulation

The behaviour of gamma ray and neutron shielding materials (high-density cement mixed with 5 wt.% crumbed rubber and various percentages of lead powder) was analysed by the MCNP simulation. Results are presented graphically in Fig. 3 and Fig. 5.

1) Photon Attenuation Simulation

Fig. 3 illustrates the gamma radiation shielding characteristics. The lead powder at 2, 4, 6, and 8 weight percent is denoted as HDCR5L2, HDCR5L4, HDCR5L6 and HDCR5L8, respectively.

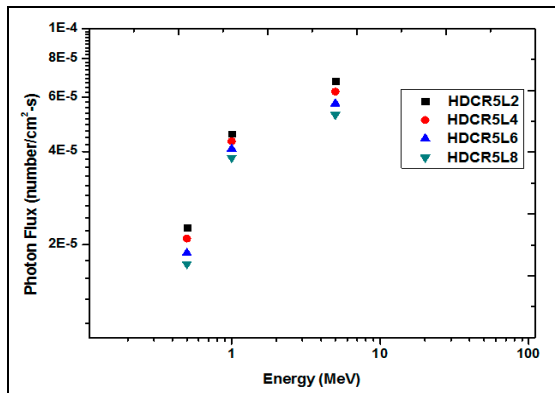


Fig. 3 Transmitted photon flux from high-density cement mixed with 5 wt.% crumbed rubber and various percentages of lead powder

The results show that for all gamma ray energies simulated, the transmitted photon flux decreased with increasing lead content in the high density cement. This result conforms to our previous conclusion that increasing heavy element composition results in higher gamma ray attenuation coefficient [9].

Fig. 4 shows the relationship between lead percentage from 2 to 8% and density of the shielding material. As expected, the addition of lead to high-density cement mixed with 5 wt.% crumb rubber resulted in an increase in the density of the shielding material. As the gamma radiation attenuation depends on atomic number and density of elements in the shielding material (as well as the energy of the incident photon) [4], the shielding efficiency increased with increasing lead content.

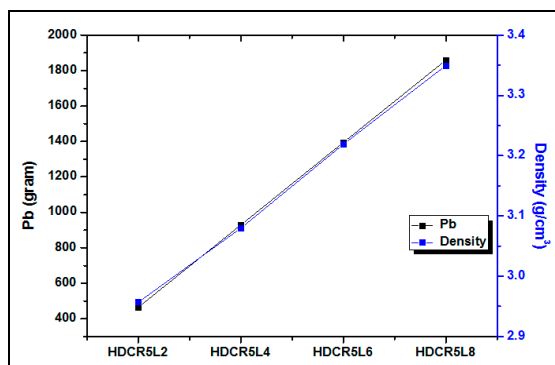


Fig. 4 Relationship between lead percentage, lead content and density of the shielding material

2) Neutron Attenuation Simulation

The simulation result of neutron attenuation shown in Fig. 5 indicates that the neutron attenuations under different lead percentages were very similar.

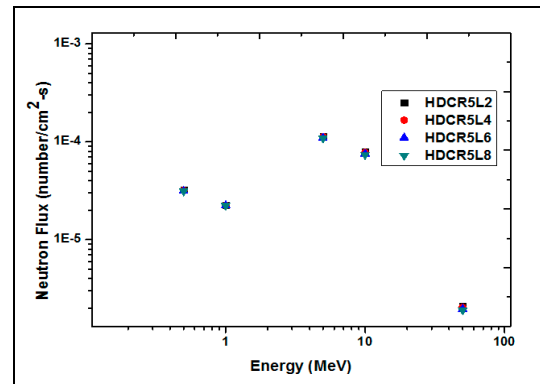


Fig. 5 Transmitted neutron flux from high-density cement mixed with 5 wt.% crumbed rubber and various percentages of lead powder

This is because the number of heavy elements in barite and the number of hydrogen atoms in crumb rubber were fixed and because lead is quite ineffective in attenuating neutrons. Thus, it can be concluded that increasing lead content from 2 to 8 wt.% was ineffective for neutron attenuation under incident neutron energies studied.

3) Lead Adhesion Testing

Cement is mainly used to bind aggregates together in concrete. Since the surface of lead powder particle is smooth unlike sand, it may affect cohesion of lead particles with high-density cement mixed 5 wt.% crumb rubber. Although the addition of lead powder to HDCR5 increased the gamma ray attenuation, increasing amount of lead beyond 2 wt.% resulted in cracking under neutron and gamma-ray irradiation. The cause of the cracking problem was determined.

The lead adhesion testing was conducted to investigate the physical bonding between lead particles and high-density cement mixed 5 wt.% crumb rubber. Lead powder was spread over the surface of the wet shielding as shown in Fig. 6(a). Moderate force was applied to the powder so that some of it was submerged in the wet shielding. After the shielding became dried, most of the lead particles on the surface were easily removed by simply wiping fingers over with little force. Fig. 6(b) shows the surface of the dry shielding after most of lead particles were removed. The agglomeration of lead on the right side is from removed lead powder.

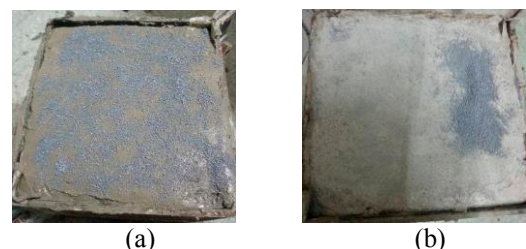


Fig. 6 (a) Lead powder on surface of wet shielding, (b) After removal of lead powder from surface of dried shielding

Thus, from this experiment, it can be concluded that lead particles do not physically adhere to high-density cement mixed 5 wt.% crumb rubber. The poor mechanical interface was the underlying mechanism for cracking. Therefore, lead particles present in the

shielding actually behaves similar to “air pockets.” Under neutron and gamma-ray irradiation, stresses are generated in the shielding material and these “air pockets” represent weak areas of the material, resulting in generation and propagation of cracks. To prevent the cracking problem with the presence of lead powder, the entire surface of each lead particle must be treated to make it to bond strongly with the shielding material. Treatment can include coating with an appropriate material to be determined in future studies.

4) Samples Analysis

Two samples were prepared for material analysis. The first one consists of the following: Portland cement type A, barite (BaSO_4) and 5 wt.% crumb rubber. The other one consists of the above with added lead powder at 2, 4, 6 and 8 weight percent. The samples were prepared with dimensions 5x5x5 inches. Two techniques were used for material analysis as follows.

4.1) Scanning Electron Microscopy and Electron Dispersive Microscopy

The microstructure and elemental composition of the samples were investigated under SEM and EDS, respectively, using the same machine.

In the SEM micrographs shown in Fig. 7, increasing lead composition from 2 to 8% did not change the observed morphological characteristics.

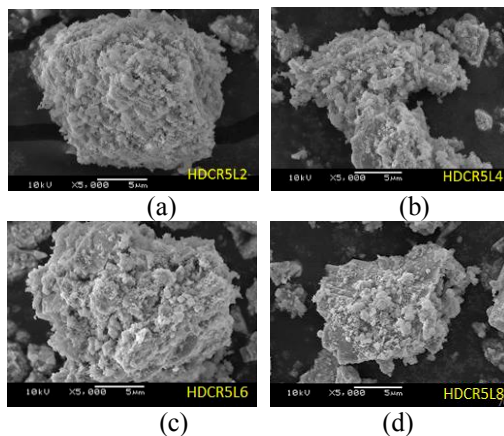


Fig. 7 SEM micrographs of high-density concrete mixed with 5 wt.% crumb rubber and various lead compositions (5,000x magnification): (a) HDCR5L2, (b) HDCR5L4, (c) HDCR5L6, (d) HDCR5L8

The elemental analysis of HDCR5L8 using EDS technique revealed that the sample consisted of barium, oxygen, sulphur, carbon, nitrogen, lead, calcium, silicon and aluminium with the following weight percentages: 35.69, 34.08, 9.27, 6.7, 5.41, 4.31, 2.75, 1.33 and 0.45%, respectively. This EDS result confirms the presence of the added 5 wt% lead. The slightly lower analysed lead quantity of 4.31% may indicate the inherent uncertainty in the analysis or it may be a result of minor inhomogeneity of lead in the small piece of the sample obtained from the large piece of fabricated shielding. The EDS spectrum of this sample is shown in Fig. 8.

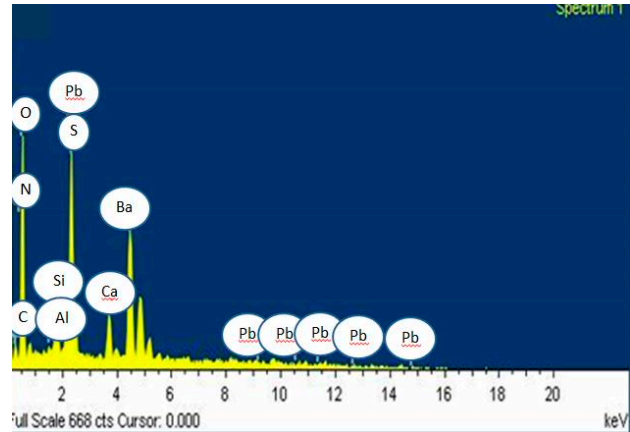


Fig. 8 EDS spectrum of HDCR5L8

4.2) X-ray Diffraction Technique

X-ray diffraction (XRD) is a technique commonly used for the characterization and identification of crystalline phases. This pattern is unique for each particular phase, and it can be used to identify the substance.

The X-ray source operated at 40 kV and 40 mA. Scans were typically collected from 5 degree 2-theta to 80 degree 2-theta using step size of 0.017 degree at a scan time of 2 hours. Samples of HDCR5, HDCR5L2, HDCR5L4, HDCR5L6 and HDCR5L8 were investigated and the crystalline phases were identified.

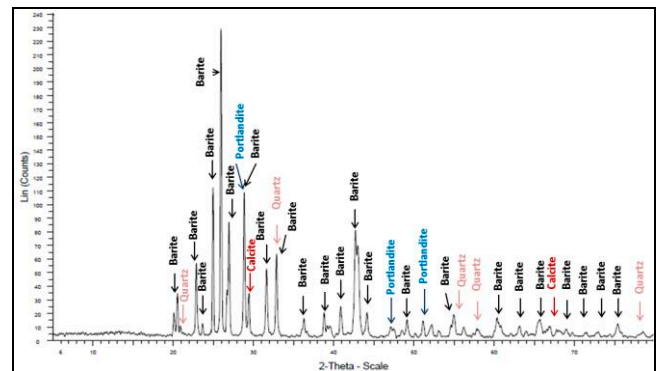


Fig. 9 XRD spectra of HDCR5

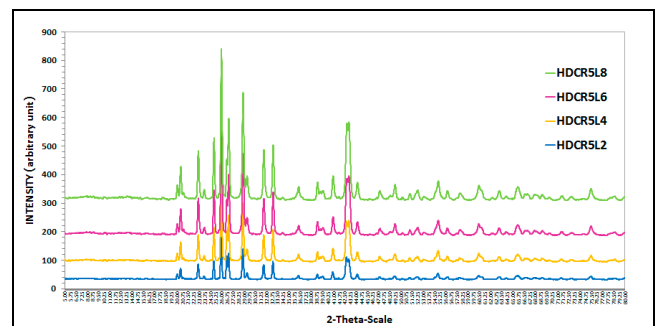


Fig. 10 XRD spectra of HDCR5L2, HDCR5L4, HDCR5L6 and HDCR5L8

The generated XRD spectra are displayed in Fig. 9 and Fig. 10. The peak locations and intensities for HDCR5L2, HDCR5L4, HDCR5L6 and HDCR5L8 are similar, but are distinctly different from those of HDCR5 because the material compositions are not same. There is no lead compound in HDCR5.

For HDCR5, the crystalline phases were determined to consist of barite (BaSO_4), portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], quartz (SiO_2) and calcite (CaCO_3), which has the crystal structures of orthorhombic, hexagonal, cubic and rhombohedral, respectively. The analyzed quantity of each phase is listed in Table II.

The analyzed phase composition of HDCR5L8 is listed in Table II. The crystalline phases of HDCR5L8 consisted of barite, portlandite, quartz, calcite, PbO_2 and Pb. The presence of PbO_2 and Pb was expected because of the added lead powder.

TABLE II : QUANTITATIVE ESTIMATE OF WEIGHT PERCENTAGES OF THE MINERAL PHASES IN HDCR5 AND HDCR5L8 SAMPLES BASED ON XRD ANALYSIS

Phase	Chemical Formula	Quantity (wt.%)	
		HDCR5	HDCR5L8
Barite	BaSO_4	75.029	72.769
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	0.146	1.198
Quartz	SiO_2	8.343	5.240
Calcite	CaCO_3	16.482	20.558
Lead oxide	PbO_2	-	0.108
Lead	Pb	-	0.128

Although the analysis for HDCR5L8 revealed only ~ 0.24 wt.% of Pb and PbO_2 , their presence confirms the added lead powder. The discrepancy between the analysed result and the expected result (5 wt.%) may be attributable to the inherent uncertainty in the analysis because other phases vary quite significantly as well, especially for portlandite which was analysed to be 10 times more abundant in HDCR5L8 than in HDCR5. Also, it may be because lead powder the fine power obtained from the large piece of fabricated shielding remained at the bottom during analysis because of its higher density, so other phases present in the high-density concrete effectively shielded lead powder.

Although discrepancy between the analysed EDS and XRD results and the expected result occurred, both analytical techniques confirmed the presence of the added lead powder and the expected phases.

IV. CONCLUSIONS

The cracking cause of neutron and gamma ray shielding material composing of high-density cement mixed with 5% crumb rubber and various percentages of lead powder was evaluated. It was found that with the lead content of at least 4 wt.%, the shielding material cracked under neutron and gamma-ray irradiation. Furthermore, experimental tests revealed that lead particles present in the shielding behaves similar to "air

pockets." Under neutron and gamma-ray irradiation, stresses are generated in the shielding material and these "air pockets" represent weak areas of the material, resulting in generation and propagation of cracks. To prevent the cracking problem with the presence of lead powder, the entire surface of each lead particle must be treated to make it to bond strongly with the shielding material. These data will be helpful in developing this class of radiation shielding material to prevent the cracking problem.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Royal Thai government for providing the scholarship to perform this research and Dr. Wutthikrai Busayaporn for the XRD data. This research was supported by Synchrotron Light Research Institute (Public Organization).

REFERENCES

- [1] R. Picha *et al.*, "Gamma and neutron attenuation properties of barite-cement mixture," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 611, no. 1, p. 012002, 2015.
- [2] S. Sharifi, R. Bagheri, and S. P. Shirmardi, "Comparison of shielding properties for ordinary, barite, serpentine and steel-magnetite concretes using MCNP-4C code and available experimental results," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 53, pp. 529–534, Mar. 2013.
- [3] D. Saryyer, R. Küçer, and N. Küçer, "Neutron Shielding Properties of Concretes Containing Boron Carbide and Ferro – Boron," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 195, pp. 1752–1756, Jul. 2015.
- [4] D. McAlister, *Gamma Ray Attenuation Properties of Common Shielding Materials*. USA: University Lane Lisle, 2013.
- [5] I. Akkurt, H. Akyildirim, B. Mavi, S. Kilincarslan, and C. Basyigit, "Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 52, no. 7, pp. 620–623, Sep. 2010.
- [6] H. Hu *et al.*, "Study on Composite Material for Shielding Mixed Neutron and Rays," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 55, no. 4, pp. 2376–2384, Aug. 2008.
- [7] K.M. Kotresh and M. Belachew, "Study On Waste Tyre Rubber As Concrete Aggregates", *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, vol.3, no.4, pp. 433-436, 2014.
- [8] C. Jumpee and D. Wongsawaeng, "Innovative neutron shielding materials composed of natural rubber-styrene butadiene rubber blends, boron oxide and iron(III) oxide," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 611, no. 1, p. 012019, 2015.
- [9] P. Aim-O, D. Wongsawaeng, S. Tancharakorn, P. Phruksarojanakun (inpress), " Monte carlo simulation of innovative neutron and photon shielding material composing of high density concrete, waste rubber, lead and boron carbide," *Journal of Physics: Conference Series by IOP Publishing Ltd.*

การพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตในช่วงอายุต้นและ ความสัมพันธ์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

Electrical Resistivity Development of Concrete at Early Ages and Its Correlation with Compressive Strength

มงคล นามลักษณ์¹ Rithy Lo²

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

¹mongkhon.nar@kmutt.ac.th

²tldpboy1@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตที่กำลังแข็งตัวในช่วง 3 วันแรก โดยใช้ชุดเครื่องมือวัดความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตที่พัฒนาขึ้น ตัวแปรการทดลองประกอบด้วย 1) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 2) การเติมสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ และ 3) การแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยซิลิกาฟูม เถ้าลอย และซิลิกาฟูมผสมเถ้าลอย สมบัติของคอนกรีตที่ศึกษา ได้แก่ การพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของเวลา และค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน ผลการศึกษาพบว่าโดยภาพรวมเส้นกราฟการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงหลัก คือ ช่วงก่อตัว (Setting period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงช้า และช่วงแข็งตัว (Hardening period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จุดแบ่งระหว่างสองช่วงนี้ คือจุดที่ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าตกต่ำลง เมื่อพิจารณาที่อายุ 3 วัน พบว่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างมาก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น และมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟูม ในขณะที่ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อใช้สารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ผสมเพิ่ม โดยภาพรวมกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วันแปรผันตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 3 วัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะทำนายกำลังรับแรงอัดด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

คำสำคัญ: ความต้านทานไฟฟ้า, กำลังรับแรงอัด, เถ้าลอย, ซิลิกาฟูม

ABSTRACT

The main purpose of this research was to study the electrical resistivity development of concrete in the first three days, by using a measurement tool developed in this work. Test variables included the water to binder ratio, the addition of superplasticizer, and the replacement of Portland cement by silica fume or fly ash, or both. Concrete properties measured included electrical resistivity as a function of time and 3-day compressive strength. Test results showed that the development curve of the electrical resistivity of concrete can be divided into two periods: 1) the setting period with slow change of resistivity and 2) the hardening period with a sharp increase of resistivity. Boundary between the two periods located at the point of resistivity drop. At the age of 3 day, it was found that the electrical

resistivity of concrete strongly decreased with an increase in water to binder ratio, slightly decreased in the presence of fly ash and silica fume, and markedly increased with the use of superplasticizer. In general view, the 3-day compressive strength was found to have a linear correlation with the resistivity, indicating that there is a high possibility to predict the compressive strength of concrete by measuring its electrical resistivity.

Keywords: Electrical resistivity, Compressive strength, Fly ash, Silica fume

1) บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างได้รับความนิยอย่างกว้างขวางในการก่อสร้างอาคารและโครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรมโยธา ส่วนประกอบหลักในการผลิตคอนกรีต คือ ปูนซีเมนต์ น้ำ มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ ปฏิกริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำทำให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการก่อตัวและการพัฒนาสมบัติทางกลของคอนกรีต

กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุเริ่มแรกเป็นสมบัติทางกลที่ใช้ประเมินความแข็งแรงของคอนกรีต เพื่อวางแผนการก่อสร้าง การหาค่ากำลังรับแรงอัด ณ เวลาใดๆ ทำได้โดยการทดสอบกดอัดแบบทำลายตามมาตรฐาน ASTM C39 [1] หรือ BS EN 12390-3:2009 [2] อย่างไรก็ตาม การทดสอบข้างต้นเป็นงานที่ต้องทำในห้องปฏิบัติการและมีกระบวนการเตรียมตัวอย่างที่ต้องใช้เวลาและงบประมาณค่อนข้างมาก นอกจากนี้ความถูกต้องแม่นยำของผลการทดสอบยังขึ้นอยู่กับความพิถีพิถันในการเตรียมตัวอย่างและความชำนาญของผู้ทดสอบ [3] ดังนั้นงานวิจัยที่ผ่านมาจึงพยายามพัฒนาวิธีการทดสอบที่เป็นทางเลือกอื่นๆ เพื่อใช้ประเมินค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหน้างาน

การวัดความต้านทานไฟฟ้าเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้ในการตรวจวัดความก้าวหน้าของปฏิกริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีต การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพภายในวัสดุ [4] นอกจากนี้การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ายังเป็นเทคนิคที่ทำการ

ทดลองได้ง่าย ประหยัดเวลา สามารถวัดค่าได้แบบอัตโนมัติอย่างต่อเนื่อง และสามารถทำได้ในสถานที่ก่อสร้าง

Wei และคณะ [4] ได้ศึกษาการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าในช่วง 48 ชั่วโมงแรก ของซีเมนต์เพสต์ และพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์ ณ อายุใดๆ สามารถบ่งชี้ถึงปริมาณผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังรับแรงอัดมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานไฟฟ้าในช่วง 48 ชั่วโมง Xiao และ Wei [5] รายงานว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดและความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์มีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ สามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิก ของเวลา Wei และคณะ [6] ได้นำเสนอวิธีการทำนายกำลังรับแรงอัดมาตรฐานของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) คงที่เท่ากับ 0.4 ด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 24 ชั่วโมง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ธเนศ หายะบรร และ มงคล นามลักษณ์ [7] ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดและพฤติกรรมการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ซิลิกาฟุ่มร่วมกับเถ้าลอย และพบว่าการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของมอร์ตาร์ สามารถแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงก่อดำ (Setting period) ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงช้า และช่วงแข็งตัว (Hardening period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และจุดก่อดำของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่วัดตาม ASTM C409 เกิดขึ้นในช่วงก่อดำ นอกจากนี้พบว่าการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ในช่วง 1-3 วันแรก มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานไฟฟ้า แต่ยังไม่มีการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวในคอนกรีต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ 1) ศึกษาพฤติกรรมการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตที่กำลังแข็งตัวในช่วง 3 วันแรก 2) ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) การเติมสารลดน้ำ (superplasticizer) และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอย ที่มีต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต และ 3) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

2) วิธีดำเนินการวิจัย

2.1) วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2555 ซิลิกาฟุ่มจากบริษัทเอลเคม (Elkem) และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งสามได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 นอกจากนี้ได้ใช้มวลรวมละเอียดซึ่งเป็นทรายแม่น้ำสะอาด มีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.53 และมีร้อยละการดูดกลืนน้ำเท่ากับ 0.97 หินปูนย่อยขนาดโตสุด 19.05 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) และมีร้อยละการดูดกลืนน้ำเท่ากับ 0.63 สารลดน้ำ (ซูเปอร์พลาสติคไซเซอร์) ประเภทโพลีคาร์บอเนต มีความหนาแน่น 1.06 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และใช้น้ำประปาสะอาดในการผสมคอนกรีต

2.2) ส่วนผสมคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในการทดลองมี 7 ส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 2 แยกพิจารณาเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 มี 3 ส่วนผสม คือ 40PC, 45PC และ 50PC ซึ่งใช้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวและแปรผัน w/b เท่ากับ 0.4, 0.45 และ 0.5 ตามลำดับ กลุ่มที่ 2 มี 4 ส่วนผสม คือ 45PC, 45PC-SF5, 45PC-FA20 และ 45PC-SF5-FA20 ใช้ในการศึกษาผลกระทบของวัสดุปอซโซลาน (ซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอย) ทั้งในลักษณะสองประสานและสามประสาน โดยการควบคุม w/b ให้คงที่เท่ากับ 0.45 กลุ่มที่ 3 มี 2 ส่วนผสม คือ 40PC และ 40PC-SP0.5 ใช้ในการศึกษาผลกระทบของสารซูเปอร์พลาสติคไซเซอร์ โดยการควบคุม w/b ให้คงที่เท่ากับ 0.40

ตารางที่ 1: องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน (% by mass)

ธาตุ/สมบัติ	ปูนซีเมนต์ (PC)	ซิลิกาฟุ่ม (SF)	เถ้าลอย (FA)
CaO	70.4	0.38	23.4
SiO ₂	15.9	83.6	33.1
Al ₂ O ₃	3.79	0.14	18.3
Fe ₂ O ₃	3.71	0.03	13.7
M ₂ O	0.75	0.38	1.77
SO ₃	4.22	0.63	4.62
K ₂ O	0.43	-	2.84
Na ₂ O	0.18	-	1.04
LOI	2.00	2.30	2.10

ตารางที่ 2: อัตราส่วนผสมของคอนกรีต (kg/m³)

วัสดุ	สัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีต						
	40PC	40PC-SP0.5	45PC	45PC-SF5	45PC-FA20	45PC-SF5-FA20	50PC
w/b	0.4	0.4	0.45	0.45	0.45	0.45	0.5
PC	494	494	494	469	395	370	494
SF	-	-	-	25	-	25	-
FA	-	-	-	-	99	99	-
W	198	198	222	222	222	222	247
SP	-	0.5%	-	-	-	-	-
S	988	988	988	988	988	988	988
G	988	988	988	988	988	988	988

หมายเหตุ: w/c คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (โดยน้ำหนัก) PC คือ ปูนซีเมนต์ SF คือ ซิลิกาฟุ่ม FA คือ เถ้าลอย W คือ น้ำ SP คือ สารซูเปอร์พลาสติคไซเซอร์ S คือ ทราย และ G คือ หิน

การผสมคอนกรีต เริ่มจากการผสมมวลรวมทั้งหมดให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที โดยใช้เครื่องผสม (โมลู่ข้าง) จากนั้นเติมปูนซีเมนต์รวมถึงเถ้าลอยและซิลิกาฟูม (ถ้ามี) ลงในเครื่องผสม และผสมต่อเนื่องไปอีก 1 นาที แล้วจึงค่อยๆ เติมน้ำทั้งหมด รวมถึงสารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร์ (ถ้ามี) และเดินเครื่องผสมต่อเนื่องไปอีก 2 นาที เป็นอันแล้วเสร็จ จากนั้นแบ่งตัวอย่างคอนกรีตสดส่วนหนึ่งไปหล่อก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด อีกส่วนหนึ่งนำไปหล่อแท่งตัวอย่างสำหรับวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งต้องดำเนินการให้แล้วเสร็จและเริ่มวัดค่าภายในเวลา 25 นาที

2.3) การวัดความต้านทานไฟฟ้า

การตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตได้ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง (29 ± 1 องศาเซลเซียส) โดยใช้เครื่องมือทดสอบที่สร้างขึ้น ซึ่งมีวงจรไฟฟ้าและรูปภาพของชุดทดลองดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ

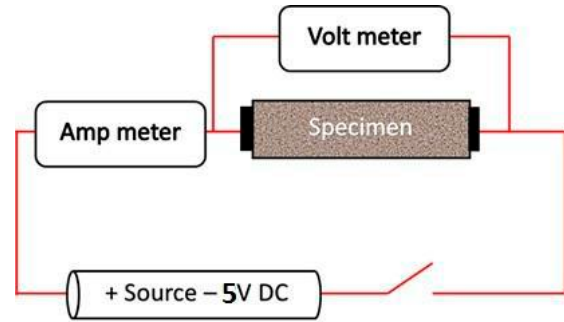
หลักการพื้นฐานของการทดลอง คือ การปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 โวลต์ ผ่านตัวอย่างคอนกรีตขนาด $75 \times 75 \times 285$ มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในแบบหล่อพลาสติก PVC โดยมีแผ่นอิเล็กโทรดทองแดงขนาด 75×75 มิลลิเมตร ติดอยู่ที่ปลายทั้งสองข้าง งานวิจัยนี้ได้ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 โวลต์ ที่แปลงมาจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ โดยมีชุดอุปกรณ์แปลงไฟฟ้าที่ออกแบบเฉพาะ จึงสามารถควบคุมความดันไฟฟ้าให้คงที่ได้ตลอดช่วงการทดลอง การปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านคอนกรีตเริ่มขึ้น ณ เวลา 25 นาทีหลังการผสมคอนกรีต และการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต จะกระทำอย่างต่อเนื่องทุกๆ 1 นาที ตลอดช่วงเวลา 3 วัน (4320 นาที) ค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยรวมของแท่งคอนกรีต (Bulk electrical resistivity, ρ) ณ เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{L} \quad (1)$$

เมื่อ V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลอง (Volts) I คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลอง (Amps) A คือ พื้นที่หน้าตัดแท่งตัวอย่าง (cm^2) L คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (cm)

2.4) การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ได้การทดสอบกำลังรับแรงอัด ได้ทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 12390-3:2009 [2] เมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 3 วัน โดยใช้ก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $15 \times 15 \times 15$ เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อนสำหรับแต่ละอายุการทดสอบเพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 1: วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



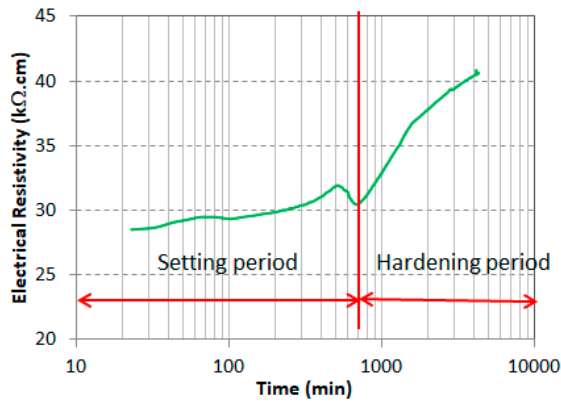
รูปที่ 2: ชุดเครื่องมือทดลองความต้านทานไฟฟ้า

3) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1) พฤติกรรมการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต

รูปที่ 3 แสดงลักษณะทั่วไปของเส้นกราฟการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต จะเห็นว่ากราฟการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงหลัก คือ ช่วงก่อตัว (Setting period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อย และช่วงแข็งตัว (Hardening period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จุดแบ่งระหว่าง 2 ช่วงนี้ คือจุดที่ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าตกต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [7] ที่พบปรากฏการณ์ดังกล่าวในการศึกษาการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ตาร์

Wei และ Li [8] กล่าวว่าในช่วงก่อตัว ค่าความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์ (ρ_{paste}) จะถูกควบคุมโดยความต้านทานไฟฟ้าของสารละลายในช่องโพรงขนาดเล็ก (ρ_{solution}) กล่าวคือ เมื่อไอออนของ K^+ Na^+ Ca^{2+} OH^- และ SO_4^{2-} OH^- จากอนุภาคปูนซีเมนต์และวัสดุป่อขโซลาน แพร่เข้าสู่น้ำอย่างช้าๆ ทำให้ระดับความเข้มข้นรวมของไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้น เมื่อระดับความเข้มข้นของไอออนในสารละลายถึงจุดอิ่มตัว ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายจะมีค่าสูงสุด ในทางตรงข้าม ค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตจะมีค่าลดลงถึงจุดต่ำสุด สำหรับช่วงแข็งตัว ค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Acceleration period) ของปูนซีเมนต์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณน้ำและปริมาณช่องโพรงภายในซีเมนต์เพสต์ลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน



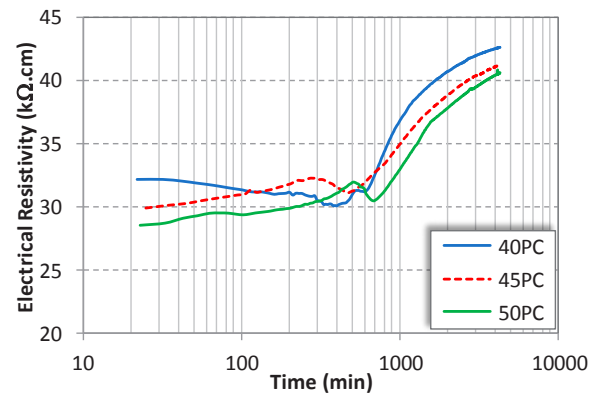
รูปที่ 3: ลักษณะทั่วไปของเส้นกราฟการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต

รูปที่ 4 แสดงผลของ w/b ต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต จากรูปจะเห็นว่าคอนกรีต 40PC ซึ่งใช้ w/b เท่ากับ 0.40 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุดในช่วงก่อตัวและช่วงแข็งตัว สำหรับคอนกรีตที่ใช้ w/b สูงขึ้น (45PC และ 50PC) จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำลงตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) มีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต ณ เวลาใดๆ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเป็นส่วนที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีในคอนกรีต (Conductive phase) การมีน้ำอยู่มากจึงทำให้ความต้านทานไฟฟ้าต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Topcu และคณะ [9] ที่รายงานว่าการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงๆ จะทำให้มีค่าความนำไฟฟ้าสูงตามไปด้วย ซึ่งหมายความว่าทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำลง

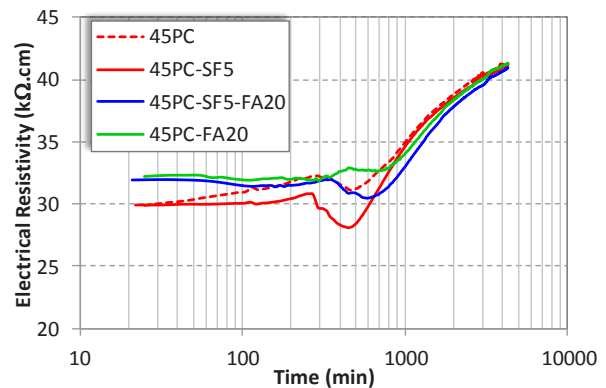
รูปที่ 5 แสดงผลของการใช้ซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน คือ 0.45 จะเห็นว่าในช่วงก่อตัว ซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตในทิศทางที่แตกต่างกัน คอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่ม ร้อยละ 5 (45PC-SF5) จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าคอนกรีตปกติ (45PC) เล็กน้อย ซึ่งคาดว่าเกิดจากสารเคมีในซิลิกาฟุ่ม ที่ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารละลายในคอนกรีตต่ำลง สำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย ร้อยละ 20 (45PC-FA20) พบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าคอนกรีตปกติ (45PC) เล็กน้อย สอดคล้องกับรายงานของ Topcu และคณะ [9] ส่วนกรณีที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับซิลิกาฟุ่ม (45PC-SF5-FA20) พบว่ามีแนวโน้มการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าใกล้เคียงกับคอนกรีต 45PC-FA20 เนื่องจากมีปริมาณเถ้าลอยที่มากกว่า สำหรับช่วงแข็งตัว จะเห็นว่าคอนกรีตทุกกลุ่มมีการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 3 วัน ประมาณ 41 kΩ.cm แสดงให้เห็นว่า การใช้ซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ทั้งในลักษณะสองประสานและสามประสาน ไม่มีผลกระทบต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตในช่วงแข็งตัวมากนัก นอกจากนี้ยังอาจสรุปได้ว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/c) มีอิทธิพลควบคุมการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าในช่วงแข็งตัว มากกว่าวัสดุประสาน

รูปที่ 6 แสดงผลของการใช้สารซูเปอร์พลาสติกไฮดรอกซีต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน คือ 0.40 จะเห็นว่าในช่วงก่อตัว คอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารซูเปอร์พลาสติกไฮดรอกซี ร้อยละ 0.5 (40PC-SP0.5) มีการ

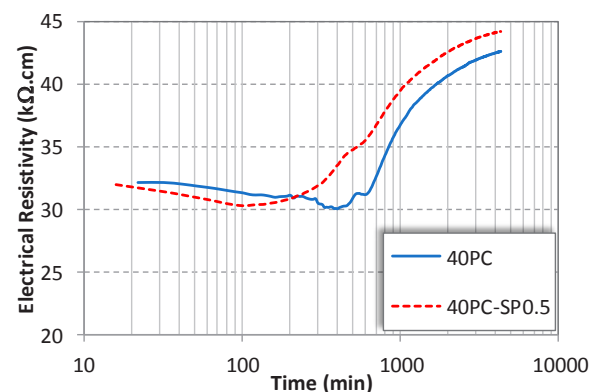
พัฒนาความต้านทานไฟฟ้าคล้ายคลึงกับคอนกรีตปกติ (40PC) แต่มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย แต่ในช่วงแข็งตัว คอนกรีต 40PC-SP0.5 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าอย่างชัดเจน จากรายงานวิจัยของ Liu และคณะ [10] ระบุว่าการใช้สารซูเปอร์พลาสติกไฮดรอกซี ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์สม่ำเสมอและเรียงตัวแน่นมากขึ้น ส่งผลให้ช่องโพรงคาพิลลารีมีขนาดเล็ก จึงทำให้กระแสไฟฟ้าเดินทางผ่านสารละลายในช่องโพรงได้ยากขึ้น นอกจากนี้สารเคมีที่เป็นส่วนประกอบของซูเปอร์พลาสติกไฮดรอกซีก็ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของสารละลายในคอนกรีต แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่มีข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของสารซูเปอร์พลาสติกไฮดรอกซี จึงไม่สามารถอภิปรายได้ในประเด็นนี้ ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในอนาคต



รูปที่ 4: ผลของ w/b ต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต



รูปที่ 5: ผลของการใช้ซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต



รูปที่ 6: ผลของการใช้สาร ซูเปอร์พลาสติกไฮดรอกซี ต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต

จากรูปที่ 4-6 จะเห็นว่าโดยภาพรวมค่าความต้านทานไฟฟ้า ในช่วง ก่อตัว ของคอนกรีตกลุ่มต่างๆ แปรผันอยู่ในช่วง 30-35 k Ω -cm แต่เมื่อ คอนกรีตเริ่มแข็งตัว ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และ ที่อายุ 3 วัน พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตกลุ่มต่างๆ แปรผันอยู่ในช่วง 40-44 k Ω -cm งานวิจัยในอดีตโดย Rajabipour และ Weiss [11] รายงานว่าในช่วงอายุเริ่มแรกค่าความต้านทานไฟฟ้าของ ซีเมนต์เพสต์มีค่าต่ำกว่า 10 k Ω -cm ซึ่งแม้ว่ามีค่าต่ำกว่าผลการทดลอง ในงานวิจัยนี้ แต่ถือว่ามีความใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากงานวิจัยนี้ เป็นการทดลองในคอนกรีตซึ่งมีมวลรวมเป็นส่วนประกอบจำนวนมาก จึง ทำให้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์

3.2) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 3 วัน

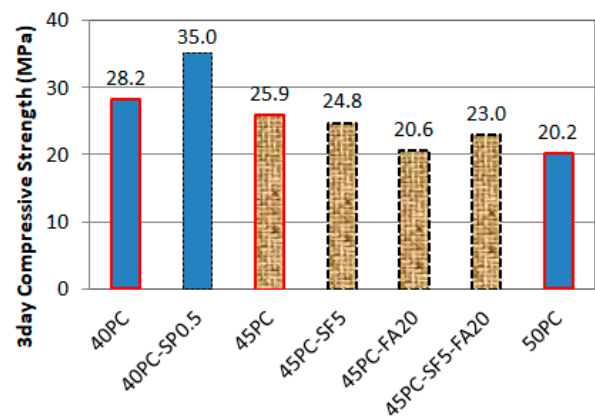
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกลุ่มต่างๆ ที่อายุ 3 วัน แรก ได้แสดงในรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูงขึ้น จะ ทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันต่อปริมาตร ช่องโพรง (gel/space ratio) ต่ำลง จึงทำให้คอนกรีตมีความพรุนสูงขึ้น และกำลังรับแรงอัดต่ำลง [12]

เมื่อพิจารณาผลของการใช้สารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร် พบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้สารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร်ร้อยละ 0.5 (40PC-SP0.5) มีค่าเท่ากับ 35.0 MPa ซึ่งมากกว่ากำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตซึ่งไม่ใช้สารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร် (40PC) ซึ่งมีค่า เท่ากับ 28.2 MPa จะเห็นได้ว่าการใช้สารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร် เพียงร้อยละ 0.5 ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นถึง 1.24 เท่า ซึ่งสอดคล้อง กับงานวิจัยของ Liu และคณะ [10] ที่รายงานว้ค่าความอัดแน่น (packing density) ของซีเมนต์เพสต์เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสารซูเปอร์ พลาสติกไฮเซอร်ที่ใช้ และ Mangane และคณะ [13] รายงานว่าการใช้ สารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร်ประเภทโพลีคาร์บอเนตซีเลตดั่งที่ใช้ใน งานวิจัยนี้ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์ เพสต์ที่ไม่ใช้สารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร်

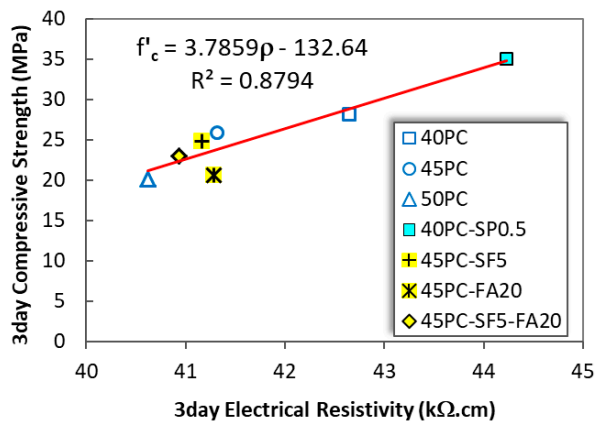
เมื่อพิจารณาผลของการใช้วัสดุปอชโซลาน พบว่ากำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟูมและเถ้าลอย 45PC-SF5, 45PC-FA20 และ 45PC-SF5-FA20 มีค่าเท่ากับ 24.8, 20.6 และ 23.0 MPa ตามลำดับ หรือคิดเป็นดัชนีกำลังรับแรงอัด เท่ากับ 0.96 0.80 และ 0.89 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมวัสดุปอชโซ ลาน 45PC (25.9 MPa) แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้า ลอยร้อยละ 20 เพียงอย่างเดียวทำให้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน ลดลง ประมาณร้อยละ 20 ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ (Dilution effect) และเถ้าลอยเป็นวัสดุปอชโซลานที่เกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ปูนซีเมนต์ [12] ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับซิลิ กาฟูมร้อยละ 5 ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อ เปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอชโซลานเพียงอย่างเดียว (45PC-FA20) ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาฟูมเป็นวัสดุปอชโซลานที่ เกิดปฏิกิริยาเร็วและมีขนาดเม็ดละเอียดกว่าปูนซีเมนต์จึงสามารถแทรก ตัวทำให้ช่องโพรงแน่นขึ้น (Filler effect) [12]

3.3) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ที่อายุ 3 วัน

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 3 วันและกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน จากรูปจะเห็นว่าสำหรับกลุ่ม คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวและมีการ แปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (40PC, 45PC, และ 50PC) พบว่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มแปรผันตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ของคอนกรีต กล่าวคือ กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความ ต้านทานไฟฟ้า (เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง) สำหรับกลุ่ม คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลาน (ซิลิกาฟูมและเถ้าลอย) และ กำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ (45PC-SF5, 45PC-FA20, 45PC-SF5-FA20) พบว่ามีกำลังรับแรงอัดและค่าความต้านทานไฟฟ้า ไกลเคียงกับคอนกรีต 45PC ส่วนคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารซูเปอร์ พลาสติกไฮเซอร် (40PC-SP0.5) พบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าและ ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด และสูงกว่าคอนกรีต 40PC ก่อนข้างมากแม้ว่า จะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าในกรณี คอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร်นั้น ค่าความ ต้านทานไฟฟ้าเป็นสมบัติที่สามารถบ่งชี้ถึงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ได้ดีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปที่ 8 โดย ภาพรวมโดยไม่คำนึงถึงส่วนผสมของคอนกรีต จะเห็นว่ากำลังรับ แรงอัดแปรผันตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต สามารถ แสดงด้วยสมการเชิงเส้น ($f_c = 3.796\rho - 132.64$) และมีค่า $R^2 = 0.879$ ผล การทดลองข้างต้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wei และคณะ [6] ที่ได้รายงานว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของซีเมนต์เพสต์ ที่ ทดสอบโดยวิธีมาตรฐาน ISO679:1989 มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า ความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 24 ชั่วโมง โดยมีสมการความสัมพันธ์ คือ $f_{28} = 8.76\rho_{24} - 20.4$) และมีค่า $R^2 = 0.96$



รูปที่ 7: ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน ของคอนกรีต



รูปที่ 8: ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 3 วัน

3.4) แนวทางการประยุกต์ใช้ผลการวิจัยในงานจริง

จากผลการวิจัยข้างต้นจะเห็นว่า เทคนิคการวัดความต้านทานไฟฟ้าจะมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานก่อสร้างที่ต้องการทราบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงอายุเริ่มแรก เพื่อประกอบการตัดสินใจในการดำเนินงานขั้นต่อไป เช่น การประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในงานซ่อมบำรุงถนนหรือสะพานคอนกรีตก่อนการเปิดใช้งานในเวลาจำกัด หรืองานก่อสร้างแผ่นพื้นคอนกรีตชนิดอัดแรงที่หลัง ซึ่งต้องการทราบค่ากำลังรับแรงอัดของแผ่นพื้นคอนกรีตก่อนการตัดสินใจดึงลวดอัดแรง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีตที่เก็บจากสถานที่ก่อสร้างหน้างาน เพื่อประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ณ อายุที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม การแปลผลค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้หน้างาน ต้องอาศัยสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของคอนกรีตนั้นๆ

4) บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองข้างต้น สามารถเขียนข้อสรุปได้ดังนี้

1. การพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตในงานวิจัยนี้ มีลักษณะคล้ายคลึงกับการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่รายงานไว้ในรายงานวิจัยในอดีต กล่าวคือ เส้นกราฟการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงหลัก คือ ช่วงก่อตัว (Setting period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อย และช่วงแข็งตัว (Hardening period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จุดแบ่งระหว่าง 2 ช่วงนี้ คือจุดที่ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าตกต่ำลง
2. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตทั้งในช่วงก่อตัวและช่วงแข็งตัว การใช้วัสดุปอซโซลาน (ซิลิกาฟูมและเถ้าลอย) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าอย่างชัดเจนในช่วงก่อตัว แต่ไม่มีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตในช่วงแข็งตัว ส่วนการใช้สารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ มีผลให้ความต้านทานไฟฟ้าในช่วงแข็งตัว สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ
3. สำหรับกลุ่มคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลาน) และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

ประสานแปรผันอยู่ในช่วง 0.40 – 0.50 ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน จะแปรผันตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นวิธีการประเมินค่ากำลังรับแรงอัด โดยเฉพาะกรณีคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์

4. การวิจัยในอนาคต ควรทำการทดลองเพิ่มเติมให้ครอบคลุมส่วนผสมของคอนกรีตที่หลากหลาย และควรศึกษาอิทธิพลของสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์เพิ่มเติม โดยแปรผันปริมาณเป็นหลายระดับ และศึกษาผลของชนิดหรือประเภทของสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ที่แตกต่างกัน เพื่อยืนยันผลการวิจัยให้ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ควรศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อายุอื่นๆ เพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ทำการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM C39 / C39M - 17b, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," *ASTM International*: West Conshohocken, PA, 2017.
- [2] "Testing Hardened Concrete Compressive Strength of Test Specimens," BS EN 12390-3, 31-May-2009.
- [3] B. Dong, J. Zhang, Y. Wang, G. Fang, Y. Liu, and F. Xing, "Evolutionary trace for early hydration of cement paste using electrical resistivity method," *Construction and Building Materials*, vol. 119, pp. 16–20, Aug. 2016.
- [4] X. Wei, L. Xiao, and Y. Liao, "Early Age Properties of Cementitious Materials by Electrical Resistivity Measurement," *Journal of Wuhan University of Technology-materials Science Edition*, vol. 25, pp. 641–644, Aug. 2010.
- [5] L. Xiao and X. Wei, "Early age compressive strength of pastes by electrical resistivity method and maturity method," *Journal of Wuhan University of Technology-materials Science Edition*, vol. 26, no. 5, pp. 983–989, Oct. 2011.
- [6] X. Wei, L. Xiao, and Z. Li, "Prediction of standard compressive strength of cement by the electrical resistivity measurement," *Construction and Building Materials*, vol. 31, pp. 341–346, 2012.
- [7] ธนศ ทายะบุตร และ มงคล นามลักษณ์, "กำลังอัดและการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมและเถ้าลอย," ใน *เรื่องนวัตกรรมอาคาร, โรงแรม ไม่ดำ ทาวเวอร์ กรีน นครปฐม*, 2559, หน้า 116–124.
- [8] Wei Xiaosheng and Li Zongjin, "Early Hydration Process of Portland Cement Paste by Electrical Measurement," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 99–105, Feb. 2006.
- [9] i. B. Topçu, T. Uygunoglu, and i. Hocaoglu, "Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 414–420, Mar. 2012.
- [10] J. Liu, K. Wang, Q. Zhang, F. Han, J. Sha, and J. Liu, "Influence of superplasticizer dosage on the viscosity of cement paste with low water-binder ratio," *Construction and Building Materials*, vol. 149, pp. 359–366, Sep. 2017.

- [11] F. Rajabipour and J. Weiss, "Electrical conductivity of drying cement paste," *Materials and Structures*, vol. 40, no. 10, pp. 1143–1160, Dec. 2007.
- [12] W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn, A. Ngamjarujana, and A. Chaipanich, "Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume," *Materials & Design*, vol. 64, pp. 261–269, Dec. 2014.
- [13] M. B. C. Mangane, R. Argane, R. Trauchessec, A. Lecomte, and M. Benzaazoua, "Influence of superplasticizers on mechanical properties and workability of cemented paste backfill," *Minerals Engineering*, vol. 116, pp. 3–14, Jan. 2018.

ระบบความปลอดภัยบ้านอัจฉริยะด้วยอินเทอร์เน็ตสำหรับทุกสิ่ง สำหรับอินเทอร์เน็ตยุคหน้าที่ยอมรับอินเทอร์เน็ตโปรโตคอลรุ่นที่หก

Smart Home Security Systems with the Internet of Things to the Future Internet through IPv6 Support

ศุภโชค เกียรติกิติกุล¹ ชรัตน์ ขำแสง² อรรณพ หมั่นสกุล³

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

1771/1 ซ.พัฒนาการ 37 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

¹ki.suppachok_st@tni.ac.th

²kh.charat_st@tni.ac.th

³annop@tni.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเทคโนโลยี IoT6 (Internet of Things with IPv6) เพื่อออกแบบและประยุกต์การใช้งานภายในที่อยู่อาศัยที่สามารถรักษาความปลอดภัยและแจ้งเตือนภัยได้ โดยได้นำอุปกรณ์ที่ทันสมัยในปัจจุบัน เช่น อุปกรณ์เซ็นเซอร์ไร้สาย รุ่น Zolertia Z1, อุปกรณ์ Raspberry Pi 3, อุปกรณ์กล้อง Pi NoIR, อุปกรณ์เซ็นเซอร์เปลวไฟ, อุปกรณ์เซ็นเซอร์แก๊ส และอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหว โดยอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไร้สาย รุ่น Zolertia Z1 จะมีการอ้างอิงตำแหน่งด้วย IPv6 ซึ่งถือว่าเป็นโปรโตคอลที่มีข้อดีหลายประการและรับส่งข้อมูลของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ต่างๆ ผ่านอุปกรณ์ Raspberry Pi 3 เพื่อส่งต่อไปยังคลาวด์แพลตฟอร์ม (Ubidots) และเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน ไฟไหม้, แก๊สรั่ว หรือตรวจพบผู้บุกรุก ระบบก็จะทำการถ่ายภาพและอัปโหลดภาพขึ้น Amazon Simple Storage Services เพื่อทำการแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้งานผ่านอีเมลหรือข้อความสั้นได้ทันที

คำสำคัญ: ระบบความปลอดภัยบ้านอัจฉริยะ, เซ็นเซอร์ไร้สาย, อินเทอร์เน็ตสำหรับทุกสิ่ง, อินเทอร์เน็ตโปรโตคอลรุ่นที่หก, คลาวด์แพลตฟอร์ม

ABSTRACT

This research using IoT6 Technology for design and implement in the house. With the innovation technology, it can improve security and inform the user when an accident happened with smart devices such as Wireless Sensor Zolertia Z1, Raspberry Pi 3, Pi NoIR camera, fire sensor, gas sensor and motion sensor. The Zolertia z1 is located by IPv6 that have many advantages and transmit data from various sensors through Raspberry Pi 3 and then forwarding data to a Ubidots cloud platform. Therefore, this paper has tested the system in the event of an emergency happened such as fire, gas leak or detect the thief. The system will take a picture and upload to Amazon Simple Storage Services for immediately inform the user by email or short message.

Keywords: Smart Home Security Systems, Wireless Sensor Network, Internet of Things, Internet Protocol version 6, Cloud Platform

1) บทนำ

เทคโนโลยี IoT6 [1] เป็นอีกเทคโนโลยี ที่มีความทันสมัยและน่าสนใจ เพราะในอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กแต่สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตบนไอพีรุ่นที่หกและส่งข้อมูลที่ได้รับการตรวจวัดจากเซ็นเซอร์ต่างๆมากมายหลายชนิด อัปโหลดขึ้นไปบนอินเทอร์เน็ตได้หลากหลายแพลตฟอร์มโดยสามารถเข้าถึงข้อมูลที่ได้ตรวจวัดได้ทุกที่ทุกเวลา

โดยในงานวิจัยนี้ได้นำอุปกรณ์ IoT6 มาติดตั้งภายในบ้านและนำมาช่วยแจ้งเตือนผู้ใช้งานเมื่อเกิด 2 เหตุการณ์หลักๆ อย่างแรกคือกรณีที่เกิดเหตุการณ์แก๊สรั่ว ซึ่งเมื่อ Z1 ตรวจพบแก๊สรั่วออกมา จะทำการแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้งานผ่านอีเมลและข้อความสั้น อย่างที่สองคือ Z1 ติดตั้งเซ็นเซอร์สามารถแจ้งเตือนหากเกิดผู้บุกรุกภายในบ้านในเวลาที่เรากำลังไม่อยู่บ้านและตรวจพบการเคลื่อนไหว ซึ่งจะทำให้การถ่ายรูปและส่งภาพขึ้นไปยังคลาวด์เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจเช็คได้ในทันที

2) เครื่องมือและเทคโนโลยี

2.1) Zolertia Z1

Zolertia Z1 [2] แพลตฟอร์มมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาแพลตฟอร์มสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย [3] (WSN) สื่อสารบนโปรโตคอล 6LoWPAN ซึ่งทำให้อุปกรณ์ขนาดเล็กที่มีข้อจำกัด สามารถสื่อสารด้วย IPv6 ได้, มีการทำงานแบบ Hop-by-hop, มีเซ็นเซอร์อุณหภูมิและเซ็นเซอร์วัดความเอียงในตัว และสามารถเชื่อมต่อเซ็นเซอร์ภายนอกเพื่อตรวจวัดค่าจากสภาพแวดล้อมจริงได้

2.2) เซ็นเซอร์

ในงานวิจัยนี้จะนำเซ็นเซอร์เปลวไฟ เซ็นเซอร์แก๊ส เซ็นเซอร์อุณหภูมิและความชื้น และเซ็นเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวมาใช้

2.2.1) เซ็นเซอร์เปลวไฟ

เซ็นเซอร์ตรวจจับเปลวไฟโดยใช้การทำงานของแสงอินฟราเรด สามารถแสดงผลการทำงานได้ทั้งในรูปแบบสัญญาณดิจิทัล

(ให้ค่า 0 หรือ 1 เพื่อแสดงค่าที่ตรวจจับได้) และสัญญาณนาฬิกา (ให้ค่าสัญญาณเพื่อใช้ประมวลผลต่อ)

2.2.2) เซ็นเซอร์แก๊ส MQ-2

MQ-2 เป็นเซ็นเซอร์ตรวจสอบปริมาณ ก๊าซไวไฟและควัน เช่น แอลกอฮอล์, มีเทน, แอลกอฮอล์, ไฮโดรเจน และควันในอากาศ ซึ่งเมื่อเราเริ่มจ่ายพลังงานให้ MQ-2 จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวด เมื่อก๊าซไวไฟต่างๆ เข้ามาทำปฏิกิริยาจะทำให้ค่าความต้านทานลดลง ซึ่งค่าจะวัดได้จากความต้านแปรผกผันกับปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้น

2.2.3) เซ็นเซอร์อุณหภูมิและความชื้น

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิ โดยจะเปลี่ยนระดับอุณหภูมิเป็นสัญญาณไฟฟ้า และค่าความชื้น โดยความชื้นนี้มาจากความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศต่อปริมาณไอน้ำที่จะทำให้อากาศอิ่มตัว ณ อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์จะแสดงในรูปของร้อยละ (%) มีหน่วยเป็น %RH

2.2.4) เซ็นเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหว [4][5]

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับความเคลื่อนไหวด้วยการวัดความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงรังสีอินฟราเรดที่ปล่อยออกมาจากวัตถุนั้นๆ แล้วนำมาแปลงเป็นค่าสัญญาณไฟฟ้าเพื่อใช้งาน

2.3) Ubidsots [6]

คลาวด์แพลตฟอร์มสำหรับนักพัฒนาที่จะช่วยในการสร้างแอปพลิเคชัน ซึ่งเก็บข้อมูลจากการตรวจวัดของเซ็นเซอร์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยมีคุณสมบัติที่หลากหลาย สามารถแสดงค่าบนหน้าเว็บแจ้งเตือนผ่านข้อความสั้นและอีเมลได้

2.4) Amazon Simple Storage Services [7]

คลาวด์แพลตฟอร์มที่ใช้สำหรับเก็บรูปถ่ายไว้บนอินเทอร์เน็ต โดย Raspberry Pi โดยจะอัปโหลดรูปถ่ายขึ้นไปทันทีที่มีการถ่ายรูป

2.5) Boto3 [8]

เป็นชุดพัฒนาซอฟต์แวร์ของ Amazon Web Services ที่ช่วยในการใช้งานบริการต่างๆ ของ Amazon ทำให้สามารถใช้งาน Amazon Simple Storage Services ได้ง่ายขึ้น สามารถใช้ภาษาไพธอนในการเขียนได้

2.6) Raspberry Pi 3

อุปกรณ์ขนาดเล็กสามารถติดตั้งระบบปฏิบัติการและใช้งานได้เหมือนคอมพิวเตอร์ทั่วไป ใช้ระบบปฏิบัติการ Raspbian ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการที่มาจากผู้ผลิตเอง

2.7) กล้อง Pi NoIR [9][10]

กล้องสำหรับเชื่อมต่อกับ Raspberry Pi มีความละเอียด 8 ล้านพิกเซล แบบไม่ตัดตัวกรองแสงอินฟราเรดออก ทำให้สามารถถ่ายรูปได้ในตอนกลางคืน โดยต้องใช้ร่วมกับแสงอินฟราเรด สามารถเขียนโปรแกรมบน Raspberry Pi เพื่อสั่งงานได้

2.8) ระบบปฏิบัติการ Contiki

ระบบปฏิบัติการแบบโอเพนซอร์สสำหรับ Internet of Things โดย

รองรับการใช้พลังงานต่ำเพื่อสื่อสารบนอินเทอร์เน็ต รองรับมาตรฐานไอพีรุ่นที่สี่และไอพีรุ่นที่หก พร้อมทั้งมาตรฐานเครือข่ายไร้สายพลังงานต่ำ เช่น 6LoWPAN [11], RPL และ CoAP สามารถนำไปพัฒนาต่อได้ง่าย เพราะเขียนด้วยภาษาซี และยังมีโปรแกรมจำลอง Cooja Simulator ที่สามารถทำการจำลองระบบเครือข่ายได้

2.9) ไอพีรุ่นที่หก

การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตจำเป็นต้องมีโปรโตคอลเครือข่ายซึ่งจะบอกที่อยู่ในการส่งข้อมูลจากเว็บไซต์ ไอพีรุ่นที่สี่นั้นมีจำนวนที่อยู่ไอพีที่จำกัด ซึ่งจะต้องเปลี่ยนเป็นไอพีรุ่นที่หกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ การสำรวจของยูเกิลพบว่าไอพีรุ่นที่หกได้รับการยอมรับเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัวทุกๆ 9 เดือน

2.10) IPv6 Transition Mechanism (6in4)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนผ่านไอพี เพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนไอพีรุ่นที่หกจากผู้ให้บริการ โดยใช้วิธีการทำอุโมงค์ 6in4 ซึ่งวิธีการนี้ยังสามารถแก้ปัญหาเราเตอร์ที่ไม่รองรับไอพีรุ่นที่หกได้อีกด้วย วิธีการแก้คือการเพิ่มเราเตอร์ที่รองรับทั้งไอพีรุ่นที่หกและไอพีรุ่นที่สี่ และสร้างอุโมงค์ 6in4 ขึ้นจากเราเตอร์กับปลายทางอุโมงค์แห่งหนึ่งในอินเทอร์เน็ตของไอพีรุ่นที่หก ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมและง่ายต่อการทำมากที่สุด

2.11) TunnelBroker.net [12]

เป็นเว็บไซต์ที่ให้บริการในการทำอุโมงค์ไอพีรุ่นที่หก สำหรับผู้ที่มีแต่ไอพีรุ่นที่สี่ แล้วต้องการจะใช้ไอพีรุ่นที่หก การทำอุโมงค์จะทำให้ไอพีรุ่นที่หกสามารถวิ่งผ่านเครือข่ายที่เป็นไอพีรุ่นที่สี่ได้

โดย Zolertia Z1 เป็นอุปกรณ์ที่ทำการสื่อสารบนไอพีรุ่นที่หก ซึ่งภายในห้องทดลองของสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ยังใช้ไอพีรุ่นที่สี่อยู่ จึงจำเป็นต้องใช้บริการของ TunnelBroker.net ในการใช้งานไอพีรุ่นที่หก

3) ขั้นตอนการทำงาน

3.1) การเตรียมการ

เตรียมการอุปกรณ์และตั้งค่าพื้นฐานสำหรับใช้งานอุปกรณ์ Zolertia Z1 ในการส่งค่าไปยัง Ubidsots

3.1.1) ติดตั้ง Contiki

ดาวน์โหลดระบบปฏิบัติการ Contiki และติดตั้งโปรแกรม msp430 บน Raspberry Pi เพื่อใช้ในการติดตั้งโปรแกรมบน Zolertia Z1

3.1.2) ทำอุโมงค์ไอพีรุ่นที่หกให้เชื่อมต่อมาที่ Raspberry Pi

สมัครใช้งานเว็บไซต์ TunnelBroker.net เพื่อขอใช้งานไอพีรุ่นที่หกผ่านไอพีสาธารณะรุ่นที่สี่ที่ใช้งานอยู่ ซึ่งจำเป็นต้องเปิดพอร์ต ICMP และโปรโตคอล 41 เพื่อให้แพ็กเก็ตไอพีรุ่นที่หกสามารถวิ่งผ่านเครือข่ายที่เป็นไอพีรุ่นที่สี่ได้

3.1.3) สมัครใช้งานและตั้งค่า Ubidsots

สมัคร Ubidsots คลาวด์แพลตฟอร์ม, สร้างตัวแปรสำหรับเตรียมรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์, สร้างหน้าต่างการแสดงผลของเซ็นเซอร์ที่หน้า Dashboard และทำการตั้งค่า Events สำหรับการแจ้งเตือนข้อความสั้นและอีเมลไปยังผู้ใช้งาน

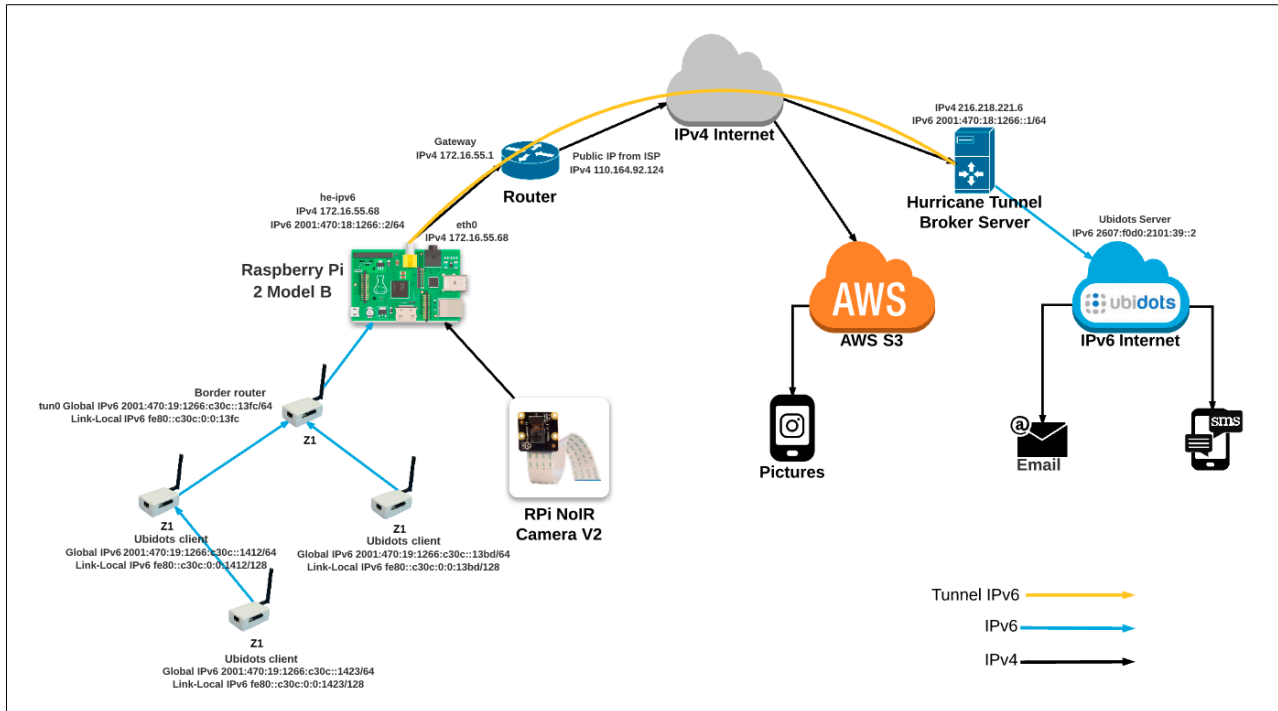
3.1.4) สมัครงาน Amazon Simple Storage Services

สมัครงาน Amazon Simple Storage Services, สร้างคลังเก็บข้อมูลเพื่อเก็บข้อมูลรูปภาพที่ถ่ายรูปจากกล้อง Pi NoIR, สร้าง Access Key ของ Amazon เพื่อใช้ในการยืนยันตัวตน และทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ Raspberry Pi กับ Amazon โดยเข้าไปตั้งใน AWS IoT เพื่อ

ลงทะเบียนอุปกรณ์ Internet of Things

3.2) การติดตั้ง

ทำการตั้งค่าอุปกรณ์และเชื่อมต่อรูปภาพภายในห้องทดลองดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 : การทำงานของระบบเครือข่าย

3.2.1) การตั้งค่าจาก Ubidots Client (Z1) เพื่อส่งข้อมูลไปยัง Border Router (Z1)

เริ่มจากการติดตั้ง Ubidots Client บนอุปกรณ์ที่ต้องการรับค่าโดยการแก้ไขค่าของ VARIABLE KEY ให้ตรงกับที่ได้ตั้งค่าไว้ในเว็บไซต์ Ubidots ในทุกอุปกรณ์ที่จะทำการติดตั้ง

ติดตั้ง Border Router โดยเชื่อมต่อกับ Raspberry Pi ผ่านพอร์ต USB เพื่อเป็นทางผ่านของข้อมูลและจ่ายพลังงานให้กับ Zolertia Z1

3.2.2) การส่งข้อมูลจาก Border Router (Z1) [13] ไปที่ Raspberry Pi

ตัว Border Router จะทำหน้าที่ค้นหา Z1 ตัวอื่นๆและจัดหาเส้นทางในการเชื่อมต่อ โดย Border Router จะรู้ไอพีรุ่นที่หกของตนจากการกำหนด Prefix ให้ ซึ่งในกรณีนี้จะใช้ IPv6 Prefix Routes ที่ได้มาจากการทำไอพีรุ่นที่หกบนเว็บไซต์ TunnelBroker.net และทำหน้าที่ส่งข้อมูลผ่านสาย USB ไปยัง Raspberry Pi เพื่อทำการเชื่อมต่อออกไปยังเครือข่ายอินเทอร์เน็ตและส่งข้อมูลขึ้นไปยังเว็บไซต์ Ubidots

3.2.3) การตั้งค่าบน Raspberry Pi 3 เพื่อส่งข้อมูลไปยังเราเตอร์

บน Raspberry Pi นั้นจะทำหน้าที่เป็นทางผ่านของข้อมูลจาก Zolertia Z1 ที่ติดตั้งโปรแกรม Border Router อย่างแรกนั้นต้องทำการตั้งค่าบน Raspberry Pi โดยบน Raspberry Pi จะมี 3 อินเทอร์เน็ตดังนี้

1. อินเทอร์เน็ต eth0 ใช้สำหรับรับไอพี ที่ทางสถาบันทำการ NAT กับไอพีรุ่นที่สี่แบบสาธารณะ เพื่อให้ออกสู่อินเทอร์เน็ต [14]

2. อินเทอร์เน็ตเสมือน tun0 ใช้สำหรับเชื่อมต่อเครือข่ายไอพีรุ่นที่หกบนเครือข่ายบุคคลไร้สายพลังงานต่ำของอุปกรณ์ Zolertia Z1 ที่ทำหน้าที่เป็นขอบ Border Router เพื่อเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต eth0

3. อินเทอร์เน็ตเสมือน he-ipv6 ใช้สำหรับเชื่อมโยงเครือข่ายไอพีรุ่นที่หกที่วิ่งผ่านเครือข่ายไอพีรุ่นที่สี่จากเว็บไซต์ TunnelBroker.net เพื่อให้ Raspberry Pi สามารถออกสู่อินเทอร์เน็ตผ่านระบบเครือข่ายไอพีรุ่นที่หกได้

จากนั้นให้ตั้งค่าตารางไอพีเพื่อให้การส่งแพ็กเก็ตสามารถวิ่งไปถึงปลายทางที่กำหนดได้โดยการตั้งค่าให้ยอมรับ ในทุกช่องทาง ทั้งการนำเข้า, การส่งต่อ และการนำออกของแพ็กเก็ต ตั้งค่าให้อินเทอร์เน็ต eth0 สามารถส่งต่อแพ็กเก็ตไปที่อินเทอร์เน็ตเสมือน tun0 และตั้งค่าให้อินเทอร์เน็ตเสมือน tun0 ส่งต่อกลุ่มข้อมูลกลับไปให้อินเทอร์เน็ต eth0 ได้เช่นกัน [15] ตั้งค่าให้อินเทอร์เน็ต eth0 ทำหน้าที่จัดหาเส้นทางให้กับเครือข่ายภายใน และเข้าไปทำการแก้ไขไฟล์ระบบให้สามารถส่งต่อแพ็กเก็ตไอพีรุ่นที่หกได้

3.2.4) การตั้งค่าบนเราเตอร์ เพื่อเชื่อมต่อไปยังเว็บไซต์ TunnelBroker.net

จากเราเตอร์ไปยัง TunnelBroker.net นั้นจะเชื่อมต่อไปยังอินเทอร์เน็ตผ่านเครือข่ายไอพีรุ่นที่สี่ โดยต้องตั้งค่าที่เราเตอร์ให้เปิดการใช้งานสองส่วนคือ

1. โพรโทคอล 41 ไว้เพื่อเป็นการเปิดอนุญาตสำหรับการเพิ่มพื้นที่บนส่วนหัวของไอพีรุ่นที่สี่เพื่อห่อหุ้มแพ็กเกจไอพีรุ่นที่หก
2. พอร์ต ICMP เพื่อให้ทางเซิร์ฟเวอร์สามารถตอบกลับมายัง Raspberry Pi ได้

ซึ่งเมื่อทำตามทั้ง 2 อย่างนี้จะสามารถใช้บริการของ TunnelBroker.net ได้ และจะได้รับไอพีรุ่นที่หกมาใช้งาน ซึ่งสามารถเข้าใช้งานได้กับทุกเว็บไซต์ที่รองรับไอพีรุ่นที่หก

3.2.5) จากเว็บไซต์ TunnelBroker.net ไปยัง Ubidots

ข้อมูลจากเว็บไซต์ TunnelBroker.net นั้นเมื่อเชื่อมต่อไป Ubidots จะเชื่อมต่อด้วยไอพีรุ่นที่หกที่ออกมาจากอุโมงค์ไอพีรุ่นที่หก ซึ่งข้อมูลของแพ็กเกจจาก Border Router จะถูกคลายออกในขั้นตอนนั้นและส่งต่อไปด้วยเครือข่ายไอพีรุ่นที่หก

3.2.6) Ubidots ส่งค่ากลับมายัง Raspberry Pi 3

เมื่อเกิดกรณีที่ต้องการจะถ่ายภาพ Ubidots จะส่งค่ากลับมายัง Raspberry Pi 3 ซึ่งทางฝั่ง Raspberry Pi 3 จะต้องรันโปรแกรมเพื่อรอรับค่าที่เปลี่ยนแปลงเพื่อเป็นเงื่อนไขของการถ่ายรูป

3.2.7) Raspberry Pi 3 ส่งให้กล้องถ่ายรูป และอัปโหลดรูปภาพขึ้นไปยัง Amazon Simple Storage Services

ทำการเชื่อมต่อกล้อง Pi NoIR เข้ากับตัว Raspberry Pi และเข้าไปตั้งค่าที่ระบบปฏิบัติการให้เปิดการใช้งานกล้อง Pi NoIR

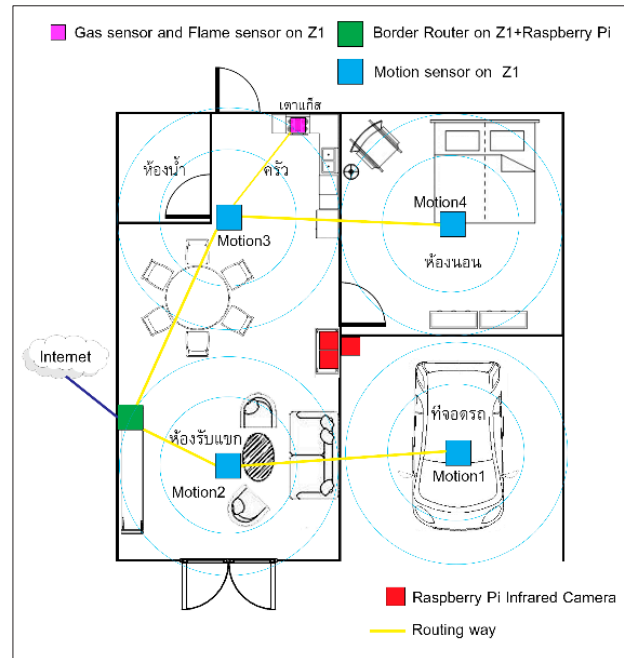
และเขียนโปรแกรมด้วยภาษาไพธอน ส่งให้รับค่าของตัวแปรที่จะใช้ในการถ่ายรูปบนเว็บไซต์ Ubidots เมื่อมีค่าที่เปลี่ยนไป ตัวโปรแกรมจะส่งให้กล้อง Pi NoIR ถ่ายรูปในทันที ซึ่งเมื่อถ่ายเสร็จแล้ว Raspberry Pi จะทำการอัปโหลดภาพถ่ายขึ้นไปยัง Amazon Simple Storage Services ในทันที หลังจากนั้นจึงลบไฟล์รูปภาพออกจากเครื่อง เพื่อไม่ให้หน่วยความจำภายในเครื่องเต็ม และผู้ใช้สามารถเข้ามาตรวจสอบรูปภาพได้ตลอดเวลา

3.2.8) เว็บไซต์ Ubidots แจ้งเตือนมายังผู้ใช้งาน

บนเว็บไซต์ Ubidots ทำการสร้าง Events โดยการกำหนดค่าจากตัวแปร เมื่อถึงค่าที่กำหนด จะทำการแจ้งเตือนในรูปแบบของข้อความสั้นและอีเมลมายังผู้ใช้งานได้

4) ผลการดำเนินงาน

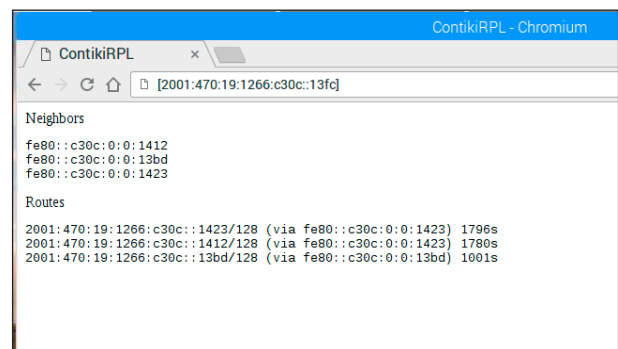
นำอุปกรณ์ตั้งค่าไว้ให้เรียบร้อยและนำไปวางในบ้านเพื่อเป็นกรณีศึกษาดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 : แผนผังการวางอุปกรณ์ภายในบ้าน

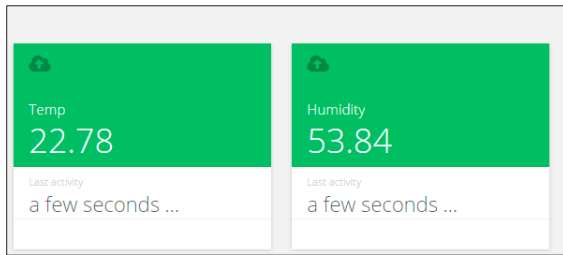
โดยจะทำการติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวไว้ที่ห้องรับแขก, ห้องครัว, ห้องนอน และที่โรงจอดรถ เพื่อตรวจจับความเคลื่อนไหวตอนที่ไม่มีคนอยู่บ้าน ทำการติดตั้ง Pi NoIR ให้ถ่ายรูปที่ห้องรับแขกจนถึงประตูหน้าบ้าน, ห้องครัวจนถึงประตูหลังบ้าน และที่โรงจอดรถ และติดตั้งเซ็นเซอร์เปลวไฟและแก๊สไว้ที่เตาแก๊สในห้องครัว โดย Zolertia Z1 มีการทำงานแบบ Hop-by-hop ตามเส้นสีเหลือง แล้วเชื่อมต่อไปที่ Border Router เพื่อส่งค่าออกสู่อินเทอร์เน็ต ไปที่เว็บไซต์ Ubidots

4.1) สามารถทำการเชื่อมต่อระบบเครือข่ายไอพีรุ่นที่หกแบบ Hop-by-hop ได้สำเร็จ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 : การเชื่อมต่อแบบ hop-by-hop

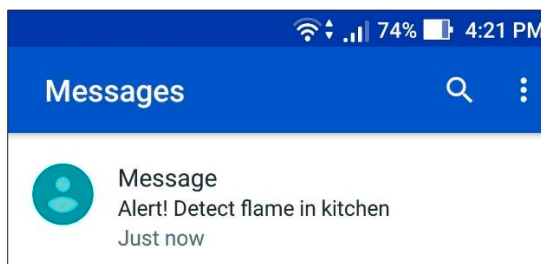
4.2) สามารถตรวจสอบค่าของเซ็นเซอร์ได้ตลอดเวลา และสามารถตรวจสอบสถานะของค่าผ่านเว็บไซต์ Ubidots ได้ตลอดเวลา ดังรูปที่ 4



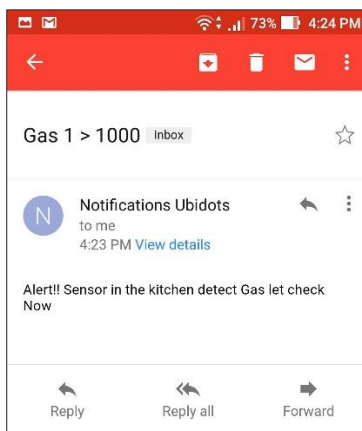
รูปที่ 4 : ตรวจสอบสถานะค่าจากเซ็นเซอร์

4.3) สามารถแจ้งเตือนผ่านอีเมลและข้อความมือถือ

เมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน เช่น ไฟไหม้หรือแก๊สรั่ว สามารถแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้งานได้ในทันทีผ่านข้อความสั้นหรืออีเมล ดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6



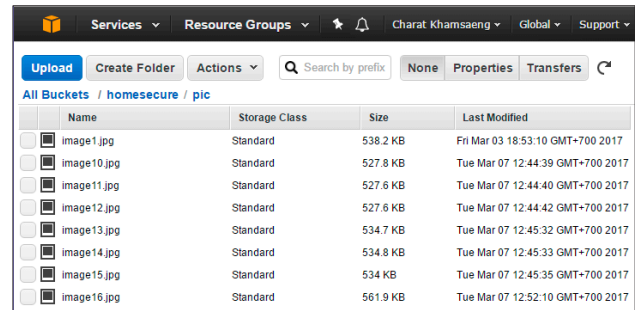
รูปที่ 5 : การแจ้งเตือนมายังโทรศัพท์



รูปที่ 6 : การแจ้งเตือนอีเมล

4.4) สามารถอัปโหลดรูปถ่ายขึ้น Amazon Simple Storage Services

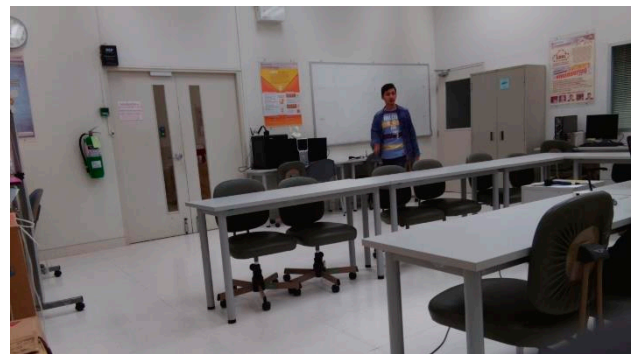
เมื่อถ่ายรูปแล้ว ก็ทำการอัปโหลดรูปภาพขึ้นไปยัง Amazon Simple Storage Services เพื่อทำการเก็บไว้ แล้วจึงลบรูปภาพออกจากอุปกรณ์ Raspberry Pi 3 เพื่อไม่ให้หน่วยความจำในอุปกรณ์เต็ม ซึ่งสามารถอัปโหลดรูปถ่ายได้ และสามารถลบรูปภาพหลังจากอัปโหลดได้เช่นกัน ดังรูปที่ 7



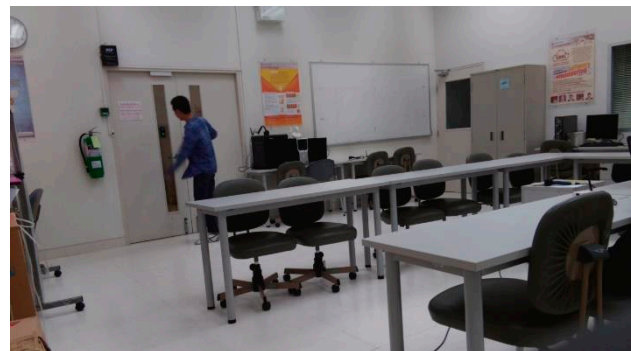
Name	Storage Class	Size	Last Modified
image1.jpg	Standard	538.2 KB	Fri Mar 03 18:53:10 GMT+700 2017
image10.jpg	Standard	527.8 KB	Tue Mar 07 12:44:39 GMT+700 2017
image11.jpg	Standard	527.6 KB	Tue Mar 07 12:44:40 GMT+700 2017
image12.jpg	Standard	527.6 KB	Tue Mar 07 12:44:42 GMT+700 2017
image13.jpg	Standard	534.7 KB	Tue Mar 07 12:45:32 GMT+700 2017
image14.jpg	Standard	534.8 KB	Tue Mar 07 12:45:33 GMT+700 2017
image15.jpg	Standard	534 KB	Tue Mar 07 12:45:35 GMT+700 2017
image16.jpg	Standard	561.9 KB	Tue Mar 07 12:52:10 GMT+700 2017

รูปที่ 7 : Amazon Simple Storage Services

4.5) รูปภาพที่ถ่ายมีความคมชัดและสามารถระบุตัวตนได้ว่าเป็นใครที่เข้ามาในห้อง ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9



รูปที่ 8 : รูปถ่ายหลังจาก Motion2 สามารถตรวจจับความเคลื่อนไหว



รูปที่ 9 : รูปถ่ายหลังจาก Motion1 สามารถตรวจจับความเคลื่อนไหว

5) สรุปการดำเนินงาน

อุปกรณ์สามารถทำงานร่วมกับเซ็นเซอร์ได้ดี สามารถตรวจจับความเคลื่อนไหวได้ สามารถตรวจจับแก๊สที่รั่วและเปลวไฟได้ สามารถส่งค่าขึ้นเว็บไซต์ Ubidots ได้และแจ้งเตือนมายังสมาร์ตโฟนผ่านข้อความสั้นและอีเมลได้ตลอดเวลา รวมถึงในส่วนของถ่ายรูปและอัปโหลดรูปภาพไปยัง Amazon Simple Storage Services ก็สมารถทำงานได้ดีโดยไม่มีปัญหาเช่นกัน แต่การจะนำไปใช้งานจริงจำเป็นต้องมีไอพีรุ่นที่สี่แบบสาธารณะในการใช้งาน ซึ่งการขอตามบ้านเรือนอาจจะเป็นไปได้ยากและยังต้องเปิดพอร์ต ICMP และโปรโตคอล 41 หากต้องการทำโมเดลไอพีรุ่นที่หก จึงทำให้ในตอนนี้อาจทำได้เพียงภายในแล็บของสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น เท่านั้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรณพ หมั่นสกุล ที่ได้เขียนโครงการเพื่อขอทุนการศึกษาสำหรับการซื้ออุปกรณ์ Z1 มาให้ทดลองค้นคว้าเพื่อใช้ในการงานวิจัยและคอยให้คำปรึกษา เสนอแนวคิดต่างๆ ช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่อง และความช่วยเหลือในทุกๆด้าน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอย่างยิ่ง และขอแสดงความขอบคุณต่อคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่เอื้อเฟื้อสถานที่เพื่อใช้ในการวิจัยและทดลองใช้งานอุปกรณ์งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] "IPv6 for IoT | IoT6.eu," [Online]. Available: http://iot6.eu/ipv6_for_iot. [Accessed: 17-Mar-2017].
- [2] "Zolertia/Resources," *GitHub*. [Online]. Available: <https://github.com/Zolertia/Resources>. [Accessed: 13-Mar-2017].
- [3] "marcozennaro/IPv6-WSN-book," *GitHub*. [Online]. Available: <https://github.com/marcozennaro/IPv6-WSN-book>. [Accessed: 17-Mar-2017].
- [4] "PIR Motion Sensor Overview," *Adafruit*. [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/pir-passive-infrared-proximity-motion-sensor/overview#>. [Accessed: 13-Mar-2017].
- [5] ปิยะชัย ควรปราโมทย์, "Application of Embedded Linux Base: เซ็นเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหว (Motion Sensor)," *Application of Embedded Linux Base*, 2553. [Online]. Available: <http://application-with-embedded-linux.blogspot.com/2010/12/motion-sensor.html>. [Accessed: 07-Dec-2017].
- [6] "IoT platform | Internet of Things | Ubidots," [Online]. Available: <https://ubidots.com/>. [Accessed: 13-Mar-2017].
- [7] "Getting Started with Amazon Simple Storage Service - Amazon Simple Storage Service," [Online]. Available: <https://docs.aws.amazon.com/AmazonS3/latest/gsg/GetStartedWithS3.html>. [Accessed: 13-Mar-2017].
- [8] "Boto 3 Docs 1.9.61 documentation," *Boto 3 Documentation*. [Online]. Available: <https://boto3.amazonaws.com/v1/documentation/api/latest/index.html>. [Accessed: 13-Mar-2017].
- [9] "Getting started with picamera | Raspberry Pi Learning Resources," [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/learning/getting-started-with-picamera/>. [Accessed: 13-Mar-2017].
- [10] "RPi-Cam-Web-Interface - eLinux.org," [Online]. Available: <http://elinux.org/RPi-Cam-Web-Interface>. [Accessed: 13-Mar-2017].
- [11] "IoT Standards & Protocols Guide | 2017 Comparisons on Network, Wireless Comms, Security, Industrial," *Postscapes*. [Online]. Available: <https://www.postscapes.com/internet-of-things-protocols/>. [Accessed: 17-Mar-2017].
- [12] "Hurricane Electric Free IPv6 Tunnel Broker," *Hurricane Electric Internet Service*. [Online]. Available: <https://tunnelbroker.net/>. [Accessed: 13-Mar-2017].
- [13] "AKIF," *Zaidmufti*. [Online]. Available: <https://Zaidmufti.wordpress.com/>. [Accessed: 17-Mar-2017].
- [14] "How to give your Raspberry Pi a Static IP Address UPDATE," *ModMyPi*. [Online]. Available: <https://www.modmypi.com/blog/how-to-give-your-raspberry-pi-a-static-ip-address-update>. [Accessed: 13-Mar-2017].
- [15] "networking - How to route traffic from a specific port on tun0 to eth0 (and back)," *Raspberry Pi Stack Exchange*. [Online]. Available: <https://raspberrypi.stackexchange.com/questions/57380/how-to-route-traffic-from-a-specific-port-on-tun0-to-eth0-and-back>. [Accessed: 13-Mar-2017].

การศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคและการเงินของระบบ ผลิตน้ำรีไซเคิลจากน้ำเสีย กรณีศึกษา: โรงงานผลิตรถยนต์

Technical and Financial Feasibility Study on Recycle Water Treatment System from Wastewater: A Case Study of Automobile Manufacturer

นันทชัย กานตานันทะ¹ ชเนตตี พูลพิพัฒน์²

สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ 10900

¹nantachai.k@ku.ac.th

²chanettee.p@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตและการอุปโภคภายในโรงงานและผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแล้วไปรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ทดแทนการใช้น้ำประปา โดยการศึกษาทางด้านเทคนิคของระบบผลิตน้ำรีไซเคิลจากน้ำเสียจะวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติของเยื่อกรองเมมเบรน 4 ประเภท ได้แก่ ไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชัน นาโนฟิลเตรชัน และรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน เพื่อเลือกเยื่อกรองเมมเบรนที่เหมาะสมกับลักษณะน้ำเสียของโรงงานและแนวทางเลือกที่มีความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคไปวิเคราะห์ทางการเงินเพื่อพิจารณาตัดสินใจในการลงทุน โดยผลการศึกษาทางด้านเทคนิคพบว่าระบบผลิตน้ำรีไซเคิลจากน้ำเสียควรประกอบด้วยหน่วยเยื่อกรอง 2 หน่วยหลัก คือ หน่วยผลิตน้ำสะอาดซึ่งมีไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนเป็นหน่วยเยื่อกรองและหน่วยผลิตน้ำบริสุทธิ์ซึ่งมีรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรนเป็นหน่วยเยื่อกรอง การวิเคราะห์ทางการเงิน ณ อัตราคิดลดร้อยละ 10 พบว่าโครงการมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 1,007,668.46 บาท อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการเท่ากับ 11.11% ซึ่งมากกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ยอมรับได้ อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนเท่ากับ 1.03 และมีระยะเวลาคืนทุนคิดลดเท่ากับ 13 ปี 2 เดือน แสดงให้เห็นว่าโครงการมีความเป็นไปได้ในการลงทุน การวิเคราะห์ความอ่อนไหวโดยการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ ในช่วง $\pm 25\%$ มี 4 ปัจจัย คือ ต้นทุนการก่อสร้าง ผลตอบแทน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและอัตราส่วนคิดลด พบว่าการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่มีผลกระทบทำให้โครงการไม่มีความเหมาะสมในการลงทุน คือ ต้นทุนการก่อสร้างเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ผลตอบแทนลดลงร้อยละ 5 และอัตราคิดลดเพิ่มขึ้นร้อยละ 15

คำสำคัญ: น้ำรีไซเคิล, น้ำเสีย, เมมเบรน, การวิเคราะห์ทางการเงิน, การวิเคราะห์ความอ่อนไหว

ABSTRACT

The objective of this research is to study the possibility to take the wastewater from production and processes in the factory which are already treated by the wastewater treatment system to recycle in order to replace the tap water. The technical study of the recycle water treatment system from wastewater compares the properties of four

membrane types including microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis membranes to choose ones that are appropriate with the characteristics of the wastewater from the factory. The technical feasible alternative is then analyzed the financial aspects for decision making. According to the technical study result, it shows that the recycle water treatment system from wastewater should consist of two main membrane units, the pre-treatment unit with a microfiltration membrane and the purified unit with a reverse osmosis membrane regeneration. For the financial analysis at 10% discount rate, it shows that the net present value is 1,077,668.46 baht, the internal rate of return is 11.11% which is higher than the minimum attractive rate of return, the benefit/cost ratio is 1.03 and the discount payback period is 13 years and 2 months, indicating that the project is feasible to invest. The sensitivity analysis varies four factors within the range of $\pm 25\%$ including the capital investment cost, the benefit, the operating expenses and the discount rate. The changes in the factors that result in the infeasibility of the project are 10% increase in the capital investment cost, 10% increase in the operating expenses, 5% decrease in the benefit and 15% increase in the discount rate.

Keywords: Recycle Water, Wastewater, Membrane, Financial Analysis, Sensitivity Analysis.

1) บทนำ

น้ำเป็นปัจจัยที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตและยังเป็นปัจจัยที่มีความจำเป็นต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นที่ทราบกันดีว่าน้ำเป็นทรัพยากรที่มีปริมาณมากถึง 2 ใน 3 ของโลก แต่มีปริมาณน้ำจืดเพียงร้อยละ 0.003 เท่านั้น ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ การขยายการลงทุนของภาคอุตสาหกรรมทำให้ปริมาณความต้องการใช้น้ำเพิ่มมากขึ้น เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะขาดแคลนน้ำ หากการขาดแคลนน้ำถึงขั้นวิกฤติ ทุกชีวิตและทุกอุตสาหกรรมย่อมได้รับความเดือดร้อน ฉะนั้น ในการแก้ไขปัญหาวิกฤติน้ำจึงเป็นหน้าที่ของประชาชน ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมและหน่วยงานราชการหลักที่

รับผิดชอบ ซึ่งตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีการนำเอามาตรการต่าง ๆ เข้ามาใช้ควบคุมบรรณรค์ เช่น มาตรการควบคุมการระบายน้ำทิ้งของภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรม และการชักชวนให้ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมนำเอาน้ำที่ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่อีกครั้งด้วยการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Water Reclamations) ให้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ใหม่หรือปล่อยคืนสู่สภาพแวดล้อม และการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Water Reuse) ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้น้ำให้มากที่สุด

การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ เป็นกระบวนการนำน้ำที่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรม ครัวเรือน เกษตรกรรมหรือกิจกรรมใด ๆ ไปผ่านกระบวนการบำบัดใหม่ด้วยระบบบำบัดน้ำเสียที่มีคุณภาพจนได้น้ำที่สามารถนำมาใช้ใหม่ในลักษณะต่างๆ อย่างเหมาะสม สำหรับประโยชน์โดยตรงของการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ คือ สามารถประหยัดงบประมาณรายจ่ายค่าน้ำประปาและลดปริมาณการใช้น้ำประปา ตัวอย่างการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ เช่น ใช้ในอาคาร โรงเรียน อาคารสำนักงาน โรงแรม [1] หรือศูนย์การค้า โดยเป็นการนำน้ำมาใช้ในกิจกรรมที่ไม่ใช่เพื่อการบริโภค เช่น การใช้ในระบบชักโครก [2] ระบบดับเพลิง ใช้ในการทำ ความเย็น ใช้ในการทำความสะดวกพื้น หรือล้างรถ เป็นต้น ซึ่งนับว่าเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า

โรงงานผลิตรถยนต์กรณีศึกษามีการใช้น้ำประปาในกิจกรรมต่างๆ ได้แก่ ใช้ในกระบวนการผลิตรถยนต์ ระบบหล่อเย็น น้ำอุปโภค รดน้ำต้นไม้และอื่นๆ ซึ่งมีข้อมูลปริมาณและสัดส่วนการใช้น้ำประปาต่อวันดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1: ปริมาณและสัดส่วนการใช้น้ำประปาของโรงงานผลิตรถยนต์กรณีศึกษา

กิจกรรม	ปริมาณ (ลบ.ม./วัน)	สัดส่วน (ร้อยละ)
กระบวนการทำสี		
- ขั้นตอนการล้างและเตรียมผิว	38	3
- ขั้นตอนการขัดน้ำ	302	21
ระบบหล่อเย็น	714	51
น้ำอุปโภค	338	24
รดน้ำต้นไม้และอื่นๆ	12	1
รวม	1,404	100

กิจกรรมการใช้น้ำดังกล่าวก่อให้เกิดเป็นน้ำเสียปริมาณมากประมาณ 1,260 ลบ.ม./วัน โดยน้ำเสียมีลักษณะของสิ่งปนเปื้อนประเภทโลหะหนัก น้ำมันและกากตะกอนต่างๆ ซึ่งปัจจุบันมีการจัดการน้ำเสียทั้งหมดโดยนำมาผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานจนน้ำเสียมีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมจึงปล่อยทิ้งสู่ภายนอก

การปล่อยน้ำเสียผ่านระบบบำบัดแล้วในแต่ละวันของโรงงานมีปริมาณมาก จึงได้เห็นความสำคัญที่จะนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่โดยการนำเทคโนโลยีระบบผลิตน้ำรีไซเคิลจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมาใช้เพื่อทำให้สามารถนำน้ำกลับมาใช้ทดแทนการใช้น้ำประปาภายในโรงงาน เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการซื้อน้ำประปาและลดต้นทุน

การผลิตและยังเป็นการสนองต่อนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมด้วยการลดผลกระทบจากการปล่อยน้ำเสียสู่แหล่งน้ำภายนอก ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคและการเงินของการใช้ระบบผลิตน้ำรีไซเคิลจากน้ำเสียด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนและศึกษาผลกระทบต่อการตัดสินใจของโครงการกรณีมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ

2) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1) แนวคิดเกี่ยวกับการประเมินโครงการ

การศึกษาความเป็นไปได้หรือการประเมินโครงการทางด้านต่างๆ จัดทำขึ้นเพื่อให้มั่นใจได้ว่าโครงการที่เลือกมานั้นมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ มีผลตอบแทนหรือผลประโยชน์ที่คุ้มค่าต่อการลงทุนสามารถทำให้บรรลุได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ภายใต้ข้อจำกัดทางด้านงบประมาณและเวลา ดังนั้นการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์โครงการทางด้านอุปสงค์หรือตลาดทางด้านเทคนิค ทางด้านการเงินและเศรษฐศาสตร์ ทางด้านการบริหารจัดการ ทางด้านสังคม และสิ่งแวดล้อม

การวิเคราะห์โครงการทางการเงิน (Financial Analysis) จะเปรียบเทียบระหว่างผลตอบแทนหรือรายได้ที่เกิดจากโครงการกับต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในรูปของตัวเงินในลักษณะของความสามารถในการทำกำไร จะใช้เวลาต้นทุนนานแค่ไหนรวมทั้งประมาณการแนวโน้มในอนาคตว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์และคุ้มค่าต่อการลงทุนมากน้อยแค่ไหนโดยคิดมูลค่าตามราคาลดเพื่อทำให้การตัดสินใจลงทุนมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ โดยในการวิเคราะห์จะมีการจัดทำประมาณการกระแสเงินสดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคตแล้วนำมาคำนวณผ่านตัวชี้วัดที่สำคัญ ได้แก่

2.1.1) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) คำนวณได้จากสมการ

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - I \quad (1)$$

เมื่อ

- CF_t คือ กระแสเงินสดสุทธิ ณ ปีที่ t
 I คือ เงินสดจ่ายลงทุนของโครงการ ณ ปีที่ 0
 k คือ อัตราคิดลด
 n คือ อายุของโครงการ

2.1.2) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) คำนวณได้จากสมการ

$$I = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+p)^t} \quad (2)$$

เมื่อ

- p คือ อัตราผลตอบแทนภายใน

2.1.3) อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit/Cost Ratio: B/C Ratio) คำนวณได้จากสมการ

$$B / C \text{ Ratio} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+k)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+k)^t}} \quad (3)$$

เมื่อ

B_t คือ กระแสเงินสดรับ ณ ปีที่ t
 C_t คือ กระแสเงินสดจ่าย ณ ปีที่ t

2.1.4) ระยะเวลาคืนทุนคิดลด (Discounted Payback Period: DPB) คัดจากการแปลงกระแสเงินสดสะสมที่ได้รับในอนาคตให้เป็นมูลค่าปัจจุบันก่อน คำนวณได้จากสมการ

$$DPB = \text{จำนวนงวดก่อนคืนทุน} + (\text{เงินส่วนที่ยังไม่ได้คืนทุน} / \text{กระแสเงินสดที่เกิดขึ้นในปีที่คืนทุน}) \quad (4)$$

การวิเคราะห์โครงการทางการเงินจะเน้นที่ตัวเงินโดยคิดมูลค่าตามราคาลด [3]

2.1.5) การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ (Sensitivity Analysis) เป็นการศึกษาความไม่แน่นอนเพื่อให้ทราบถึงปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลต่อโครงการและการตัดสินใจโดยการเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยต่างๆ โดยค่าตัวแปรอื่นมีค่าคงที่ตลอดอายุโครงการ [4]

2.2) แนวคิดเกี่ยวกับกระบวนการรีไซเคิลน้ำ

กระบวนการรีไซเคิลน้ำ ประกอบด้วย 3 กระบวนการหลัก คือ การบำบัดขั้นต้น (Primary) การบำบัดขั้นที่ 2 (Secondary) และการบำบัดขั้นที่ 3 (Tertiary) เป็นกระบวนการลดปริมาณแร่ธาตุในน้ำเสียและเป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีคุณภาพดีพอสำหรับการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เทคโนโลยีการผลิตน้ำสะอาดให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้เทคโนโลยีเมมเบรน [5]

2.3) แนวคิดเกี่ยวกับเทคโนโลยีการกรองด้วยเมมเบรน

เทคโนโลยีการกรองด้วยเมมเบรน เป็นกระบวนการกรองแบบหนึ่งโดยใช้เมมเบรน (Membrane) เป็นตัวกรองซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะการนำน้ำกลับมาใช้จากระบบบำบัดน้ำเสีย กระบวนการกรองโดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในระดับต่างๆ ที่มีใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ ไมโครฟิเตรชัน (Microfiltration: MF) อัลตราฟิเตรชัน (Ultrafiltration: UF) นาโนฟิเตรชัน (Nanofiltration: NF) และ รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis: RO) [5]

การคำนวณอัตราส่วนระหว่างปริมาตรน้ำสะอาดที่ผลิตได้ต่อปริมาตรน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำสะอาด (Percent Recovery) สามารถคำนวณได้จากสมการ [6]

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ

$R(\%)$ คือ Percent Recovery
 C_p คือ ปริมาตรน้ำสะอาดที่ผลิตได้
 C_f คือ ปริมาตรน้ำดิบที่ใช้ผลิต

การตรวจสอบประสิทธิภาพการกรองของเมมเบรน คือ ค่าพอมิเอทฟลักซ์ (Permeate Flux) หรือ ค่าอัตราการไหลของน้ำกรองผ่านพื้นที่ผิวเมมเบรนมีหน่วยเป็นปริมาตรต่อพื้นที่ผิวเมมเบรนต่อเวลาสามารถคำนวณได้จากสมการ [7]

$$J_p = \frac{V}{A_m \times q} \quad (6)$$

เมื่อ

J_p คือ พอมิเอทฟลักซ์ (Permeate Flux)
 V คือ ปริมาณของน้ำพอมิเอท
 A_m คือ พื้นที่การกรองของเมมเบรน
 q คือ เวลาที่น้ำพอมิเอทสะสม ณ ช่วงเวลากรอง

2.4) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Adrian et al. [8] กล่าวถึงปัจจัยที่มีผลต่อการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนใช้เมมเบรนเป็นระบบผลิตน้ำรีไซเคิลเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณา ได้แก่ ต้นทุนในการติดตั้งระบบ ค่าใช้จ่ายสำหรับอุปกรณ์ติดตั้งระบบ เช่น ท่อ วาล์ว ปั๊มน้ำ เครื่องมือวัด และระบบควบคุม นอกจากนั้นยังมีค่าใช้จ่ายหลังจากการติดตั้งระบบ คือ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาระบบ ผู้ศึกษาได้นำงานวิจัยนี้มาใช้พิจารณาปัจจัยต่างๆ ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินเพื่อการลงทุน

Ordóñez et al. [9] ศึกษาประสิทธิภาพของเทคโนโลยีแผ่นเยื่อกรอง 3 ชนิด คือ ไมโครฟิเตรชัน อัลตราฟิเตรชันแบบท่อม้วนและอัลตราฟิเตรชันแบบเส้นใยกลวง เพื่อนำมาใช้เป็นหน่วยเยื่อกรอง Pre-Treatment ก่อนเข้าหน่วยกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส เพื่อบำบัดน้ำเสียแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ในโรงงานผลิตกระดาษ โดยทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านเทคนิคของเยื่อกรองแต่ละแบบและสร้างเป็นหน่วยกรองทดสอบ จากงานวิจัยนี้ผู้ศึกษาได้นำแนวทางการวิเคราะห์ด้านเทคนิคมาใช้ในการพิจารณาเลือกชนิดเมมเบรนที่มีคุณสมบัติเหมาะสม

3) วิธีการศึกษางานวิจัย

การศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคและการเงินของระบบผลิตน้ำรีไซเคิลจากน้ำเสียกรณีศึกษาโรงงานผลิตรถยนต์ มีแนวทางวิธีการศึกษา ดังนี้

3.1) การเก็บรวบรวมข้อมูล โดยข้อมูลที่ใช้ในการศึกษามี ดังนี้

1. ข้อมูลคุณภาพน้ำทั้งหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียตั้งแต่เดือนมกราคม-ธันวาคม 2559 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะคุณภาพน้ำที่ใช้เป็นน้ำดิบสำหรับเข้าสู่ระบบผลิตน้ำรีไซเคิล ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2: ค่าเฉลี่ยข้อมูลคุณภาพน้ำทั้งเดือน ม.ค.-ธ.ค. 2559

ดัชนีคุณภาพน้ำทั้ง	หน่วย	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำทั้ง
ความเป็นกรดและด่าง (pH)	-	7.6
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (SS)	มก./ล.	24.8
ค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TDS)	มก./ล.	1,962.7
ค่าบีโอดี (BOD)	มก./ล.	9.9
ค่าซีโอดี (COD)	มก./ล.	55.8
น้ำมันและน้ำมันหล่อลื่น (Oil & Grease)	มก./ล.	3.0
สังกะสี (Zn)	มก./ล.	2.4
นิกเกิล (Ni)	มก./ล.	0.8
ตะกั่ว (Pb)	มก./ล.	0.2
แมงกานีส (Mn)	มก./ล.	2.3

แหล่งที่มา : โรงงานการศึกษา

2. ข้อมูลรายละเอียดด้านเทคนิคของระบบผลิตน้ำรีไซเคิลโดยขอข้อมูลจากบริษัทผู้ติดตั้งระบบ

3. ข้อมูลรายละเอียดด้านเทคนิคของเมมเบรนเพื่อใช้ศึกษาความเป็นไปได้โดยขอข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

4. ข้อมูลต้นทุน ค่าใช้จ่าย สำหรับการวิเคราะห์ด้านการเงิน

3.2) การวิเคราะห์ข้อมูล

3.2.1) การวิเคราะห์ด้านเทคนิค เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านเทคนิคของเมมเบรนที่ใช้ในระบบผลิตน้ำรีไซเคิลเพื่อเลือกเมมเบรนที่เหมาะสมกับลักษณะน้ำเสียของโรงงานและการวิเคราะห์อยู่ภายใต้ข้อกำหนดความต้องการของโรงงาน คือ ระบบสามารถผลิตน้ำรีไซเคิลได้อย่างน้อย 1,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เหมาะกับลักษณะน้ำเสียของโรงงาน สามารถกรองน้ำให้มีคุณภาพ โดยมีค่าดัชนีสารแขวนลอย (SDI) น้อยกว่า 5 มีค่าความขุ่น น้อยกว่า 1 NTU และกรองน้ำให้ปราศจากสิ่งปนเปื้อนและโลหะหนักโดยมีคุณภาพน้ำเทียบเท่ากับน้ำประปา ทั้งนี้ประเภทของเมมเบรนที่สามารถนำมาใช้เป็นหน่วยย่อยกรองในระบบผลิตน้ำรีไซเคิลมีอยู่ 4 ประเภท ได้แก่ ไมโครฟิลเตรชัน เมมเบรน (MF) อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (UF) นาโนฟิลเตรชันเมมเบรน (NF) และรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน (RO) โดยรุ่นที่ได้นำมาศึกษาสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3

ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้านเทคนิคมีดังนี้

1. วิเคราะห์คุณสมบัติของเมมเบรนแต่ละประเภทเพื่อพิจารณาเลือกประเภทเมมเบรนที่มีความเหมาะสม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4 และ 5

2. คำนวณปริมาณน้ำที่ได้จากการกรองจากเมมเบรนเพื่อนำไปคำนวณหาจำนวนเมมเบรน (Membrane Module) ที่ต้องใช้ในระบบผลิตน้ำรีไซเคิล

3. ศึกษาข้อมูลและส่วนประกอบทั้งหมดของเทคโนโลยีระบบผลิตน้ำรีไซเคิล

3.2.2) การวิเคราะห์ด้านการเงิน โดยการประเมินต้นทุนของระบบผลิตน้ำรีไซเคิลตามทางเลือกที่มีความเป็นไปได้ทางเทคนิค ซึ่งต้นทุนที่พิจารณา คือ ต้นทุนการก่อสร้าง ต้นทุนการดำเนินงาน และต้นทุนการบำรุงรักษา และนำมาจัดทำเป็นงบกระแสเงินสดเพื่อวิเคราะห์ผลทางการเงิน ณ อัตราคิดลด 10% ซึ่งพิจารณาจากอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำของโครงการ ใช้เกณฑ์ในการตัดสินใจ ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C Ratio) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ระยะเวลาคืนทุนคิดลด (DPB) และวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ (Sensitivity Analysis)

3.3) สรุปผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคและการเงิน

สรุปผลการวิเคราะห์ทางด้านเทคนิคเพื่อเลือกเมมเบรนที่เหมาะสมและทางด้านการเงินโดยการพิจารณาตัวชี้วัดว่าระบบผลิตน้ำรีไซเคิลมีความเป็นไปได้ทางการเงินหรือไม่

ตารางที่ 3: เมมเบรนที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ด้านเทคนิค

ประเภทเมมเบรน	ผู้ผลิต	รุ่น
ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน (MF)	A	A-MF
อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (UF)	B	B-UF
นาโนฟิลเตรชันเมมเบรน (NF)	B	B-NF
รีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน (RO)	B	B-RO

แหล่งที่มา : บริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 4: คุณสมบัติทั่วไปของเมมเบรนแต่ละประเภท

เมมเบรน	คุณสมบัติทั่วไป
MF	- ขนาดรูพรุน 0.1-10 ไมครอน - ความสามารถกรองอนุภาค : คอลลอยด์หรืออนุภาคขนาดใหญ่ สารแขวนลอยที่ทำให้ให้น้ำขุ่น แบคทีเรีย ไวรัส
UF	- ขนาดรูพรุน 0.002-0.1 ไมครอน - ความสามารถกรองอนุภาค : กำจัดความขุ่นและสี คอลลอยด์ หรืออนุภาคขนาดเล็ก แบคทีเรีย ไวรัส โปรตีน
NF	- ขนาดรูพรุน 0.001-0.004 ไมครอน - ความสามารถกรองอนุภาค : สารอนินทรีย์บางชนิดที่ทำให้น้ำกระด้าง สารละลายเกลือ แบคทีเรีย น้ำตาล ไวรัส โปรตีน
RO	- ขนาดรูพรุน 0.001-0.004 ไมครอน - ความสามารถกรองอนุภาค : สารอนินทรีย์ทั้งหมดที่ทำให้น้ำกระด้าง สารละลายเกลือ แบคทีเรีย น้ำตาล ไวรัส โปรตีน แร่ธาตุ แยกสารเคมีโลหะหนัก เช่น ตะกั่วปรอท แคดเมียม ออกจากน้ำ ได้ 95%-99.8%

แหล่งที่มา : บริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 5: คุณสมบัติจำเพาะของเมมเบรนแต่ละประเภท

คุณสมบัติ	หน่วย	ไมโครฟิลเตรชัน (MF)	อัลตราฟิลเตรชัน (UF)	นาโนฟิลเตรชัน (NF)
คุณสมบัติจำเพาะ (Product Specification)				
ขนาดแผ่นรูพรุน (Pore Size)	ไมครอน	0.1	0.03	0.001
รูปร่าง (Membrane Module)	-	Hollow Fiber	Hollow Fiber	Spiral Wound
พื้นที่การกรอง (Membrane Area)	ตร.ม.	50	77	38
Recovery Rate	%	95-98	90-97	85-95
การทำงานของไส้กรอง (Filtration Mode)	-	Outside-in	Outside-in	Outside-in
วัสดุ (Material)	-	PVDF	PVDF	PA
พารามิเตอร์การใช้งาน (Operating Parameter)				
อัตราการกรอง (Filtrate Flux)	ล./ตร.ม./ชม.	57-72	40-120	57-67
อุณหภูมิ (Operating Temperature)	องศาเซลเซียส	40	40	45
ค่าความเป็นกรดด่าง (pH Range)	-	1-10	2-11	3-10
ค่าคลอรีนอิสระ (Free Chlorine Tolerance)	ppm	-	-	< 0.1
ดัชนีสารแขวนลอย (Feed SDI)	-	-	-	< 5
ประสิทธิภาพ (Performance)				
ค่าความขุ่น (Turbidity)	NTU	< 0.08	≤ 0.1	< 0.01
ดัชนีสารแขวนลอย (Expect SDI)	-	< 2-3	≤ 2.5	< 0.1
อายุการใช้งาน (Useful Life)	ปี	7-10	7-10	3
การทำความสะอาด (Cleaning Mode)	เดือน/ครั้ง	4-6	1-3	1-3
ความถี่ในการล้างทำความสะอาดเฉลี่ย	เดือน/ครั้ง	5	2	2
ระยะเวลาการเปลี่ยนเมมเบรนเฉลี่ย	ปี/ครั้ง	8	8	3
ราคา (Cost Range)	บาท	45,000-55,000	60,000-100,000	110,000-120,000

แหล่งที่มา : บริษัทผู้ผลิต

4) ผลการศึกษางานวิจัย

4.1) การวิเคราะห์ด้านเทคนิค

4.1.1) ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ด้านเทคนิค

ค่าดัชนีคุณภาพน้ำทั้งหลังผ่านระบบบำบัดของโรงงานกรณีศึกษา ตั้งแต่เดือนมกราคม-ธันวาคม 2559 พบว่ามีค่าไม่เกินไปจากค่ามาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด จึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นน้ำดิบเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำรีไซเคิล และสามารถวิเคราะห์เลือกเยื่อกรองเมมเบรนได้อย่างเหมาะสม

4.1.2) ผลการวิเคราะห์ด้านเทคนิค

1. การวิเคราะห์ข้อมูลด้านเทคนิค

จากตารางที่ 4 ผลการศึกษาพบว่ารีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน มีคุณสมบัติเหมาะสม สามารถใช้เป็นเยื่อกรองทำให้น้ำมีคุณภาพเป็นไปตามข้อกำหนดของโรงงานโดยมีคุณสมบัติ คือ กรองสารเคมี โลหะหนัก จำพวก ตะกั่ว ปรอท แคดเมียมออกได้ และเมื่อพิจารณาคุณสมบัติจำเพาะพบว่า สามารถกรองน้ำให้เหลือค่า SDI น้อยกว่า 0.1 และค่าความขุ่น น้อยกว่า 0.01 NTU แต่รีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรนมีข้อด้อยคือ มีขนาดรูพรุนที่เล็กที่สุด ไวต่อการอุดตัน น้ำดิบที่จะป้อนเข้าต้องเป็นน้ำสะอาดมาก จึงทำให้จำเป็นต้องมีหน่วยผลิตน้ำสะอาดหรือหน่วยกรอง Pre-Treatment เพื่อเตรียมน้ำให้มีคุณภาพดีเป็นการลดภาระการกรองของรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรนและเกิดประสิทธิภาพการกรอง

สูงสุด จึงได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติจำเพาะของเมมเบรน 3 ประเภท ที่เหลือเพื่อเลือกมาใช้เป็นเยื่อกรองสำหรับผลิตน้ำสะอาด

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติจำเพาะของเมมเบรน เพื่อนำมาใช้เป็นเยื่อกรองสำหรับผลิตน้ำสะอาดหรือหน่วยกรอง Pre-Treatment

การวิเคราะห์คุณสมบัติจำเพาะของเมมเบรน 3 ประเภท พบว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญและมีผลต่อการใช้พิจารณาเลือกเมมเบรนที่มีความเหมาะสมและเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคในการนำมาใช้เป็นเยื่อกรองสำหรับผลิตน้ำสะอาด (Pre-Treatment) ให้แก่วอร์สออสโมซิสเมมเบรน คือ วัสดุของเมมเบรนที่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของคลอรีนได้ดี เพื่อยืดอายุการใช้งานให้แก่รีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน เนื่องจากไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของคลอรีนได้ เปอร์เซนต์ Recovery Rate และอัตราการกรองที่สูงซึ่งจะแสดงถึงความสามารถในการกรองของเมมเบรน สำหรับการกำจัดความขุ่นและดัชนีสารแขวนลอยในน้ำ โดยทั่วไปแล้วเมมเบรนที่มีมาตรฐานการผลิตและได้รับการรับรองจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและดัชนีสารแขวนลอยออกไปได้และทำให้ค่าน้ำที่ผ่านการกรองเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

เมื่อคำนวณปริมาณน้ำที่ได้จากการกรองด้วยเมมเบรนด้วยสมการที่ 5 จะสามารถนำไปคำนวณหาจำนวนเมมเบรนที่ต้องใช้ในระบบผลิตน้ำรีไซเคิลจากสมการที่ 6 ซึ่งผลการคำนวณสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6: ผลการคำนวณจำนวนเมมเบรนที่ใช้ในระบบผลิตน้ำรีไซเคิล

คุณสมบัติ	หน่วย	ไมโครฟิลเตรชัน (MF)	อัลตราฟิลเตรชัน (UF)	นาโนฟิลเตรชัน (NF)
ผลการคำนวณภายใต้ข้อกำหนดของโรงงาน : ผลิตน้ำรีไซเคิลได้ 1,000 ลบ.ม./วัน				
จำนวนเมมเบรนที่ต้องใช้	ท่อน	14	7	19
ปริมาณน้ำที่ได้จากกรองผ่านเมมเบรน	ลบ.ม./ชม.	42	42	42
ราคาต่อท่อน x จำนวนเมมเบรน	บาท	630,000-770,000	420,000-700,000	1,320,000-2,280,000

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติจำเพาะจากตารางที่ 5 และผลการคำนวณจากตารางที่ 6 พบว่านาโนฟิลเตรชันเมมเบรนไม่มีความเหมาะสม เนื่องจากผลิตจากวัสดุโพลีเอไมด์ (PA) ซึ่งไม่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนของคลอรีนจึงไม่สามารถป้องกันคลอรีนให้แก่วีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรนได้ มีการใช้จำนวนเมมเบรนที่มากที่สุด มีราคาต่อท่อนสูง มีความถี่ในการเปลี่ยนเมมเบรนบ่อย จึงไม่มีความเหมาะสมในแง่ค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดของน้ำดิบที่ป้อนเข้าเยื่อกรองที่

ต้องมีค่าคลอรีนอิสระ น้อยกว่า 0.1 และค่า SDI น้อยกว่า 5 จึงมีความยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายเพิ่มสำหรับชุดกำจัดคลอรีน

เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างไมโครฟิลเตรชันกับอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนด้านคุณสมบัติการบำรุงรักษา โดยเมื่อนำมาเดินระบบร่วมกับวีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรนที่เป็นเยื่อกรองในหน่วยผลิตน้ำบริสุทธิ์ เพื่อพิจารณาเลือกเพียงหนึ่งทางเลือกที่มีความเหมาะสมและมีความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคในการนำมาใช้เป็นหน่วยผลิตน้ำสะอาดในระบบผลิตน้ำรีไซเคิล โดยผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7: ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติด้านเทคนิคในการบำรุงรักษาระหว่างไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนกับอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

คุณสมบัติ	หน่วย	ไมโครฟิลเตรชัน-วีเวอร์สออสโมซิส (MF-RO)	อัลตราฟิลเตรชัน-วีเวอร์สออสโมซิส (UF-RO)
1. การทำความสะอาดแบบ Cleaning In Place (CIP)			
จำนวนเมมเบรนที่ต้องใช้ในระบบ	ท่อน	MF = 14 / RO = 21 รวม 35	UF = 7 / RO = 21 รวม 28
ความถี่ในการล้างทำความสะอาดระบบ	ครั้ง/ปี	3	6
ค่าสารเคมีและค่าแรงในการทำความสะอาดระบบ	บาท/ท่อนครั้ง บาท/ครั้ง	1,000 35,000 (1,000 x 35)	1,000 28,000 (1,000 x 28)
รวมค่าใช้จ่ายในการล้างทำความสะอาด	บาท/ปี	105,000 (35,000 x 3)	168,000 (28,000 x 6)
ระยะเวลาที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดทั้งระบบ	ชั่วโมง	27 ชั่วโมง (MF = 14 x 80 = 1,120 นาที) (RO = 21 x 23 = 483 นาที)	22 ชั่วโมง (UF = 7 x 120 = 840 นาที) (RO = 21 x 23 = 483 นาที)
ปริมาณน้ำรีไซเคิลที่สูญเสียในช่วงพักล้าง (ข้อกำหนด: ผลิตน้ำรีไซเคิล 1,000 ลบ.ม./วัน)	ลบ.ม.	1,125	918
ค่าใช้จ่ายสำหรับการใช้น้ำประปาแทนช่วงพักล้าง (อัตราค่าน้ำประปา 15.81 บาท/ลบ.ม.)	บาท	17,786.25 (1,125 x 15.81)	14,513.58 (918 x 15.81)
รวมค่าใช้จ่ายสำหรับการใช้น้ำประปาแทนช่วงพักล้าง	บาท/ปี	53,358.75 (17,786.25 x 3)	87,081.48 (14,513.58 x 6)
รวมค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบในส่วนอุปกรณ์เมมเบรน	บาท/ปี	158,358.75	255,081.48
2. การเปลี่ยนเมมเบรน			
ระยะเวลาในการเปลี่ยนเมมเบรน	ปี/ครั้ง	8	8

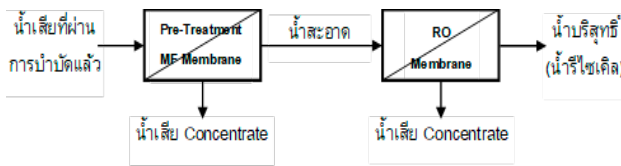
จากการวิเคราะห์ตารางที่ 5 และ 7 พบว่าเมมเบรนทั้ง 2 ประเภทมีคุณสมบัติเหมาะสมด้านเทคนิคในการเป็นหน่วยผลิตน้ำสะอาด โดยสามารถกรองน้ำให้เป็นไปตามข้อกำหนดของโรงงานได้ แต่ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสำหรับระบบที่ใช้ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนเท่ากับ 158,358.75 บาทต่อปี ซึ่งน้อยกว่าระบบที่ใช้อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 255,081.48 บาทต่อปี ดังนั้น จึงเลือกไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนสำหรับใช้เป็นหน่วยผลิตน้ำสะอาดให้แก่หน่วยผลิต

น้ำบริสุทธิ์ในระบบผลิตน้ำรีไซเคิล และนาระบบที่เลือกนี้ไปวิเคราะห์ความเหมาะสมทางการเงินต่อไป

3. ผลการศึกษาส่วนประกอบของระบบการผลิตน้ำรีไซเคิล

ผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติทั่วไปและคุณสมบัติจำเพาะของเมมเบรน พบว่าระบบผลิตน้ำรีไซเคิลประกอบด้วยหน่วยกรองน้ำ 2 หน่วย คือ หน่วยผลิตน้ำสะอาด ทำหน้าที่ผลิตน้ำให้มีคุณภาพดีก่อนส่งไป

หน่วยกรองที่สอง คือหน่วยผลิตน้ำบริสุทธิ์ ทำหน้าที่กรองน้ำให้บริสุทธิ์ ซึ่งมีลักษณะการต่อแบบอนุกรมกัน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1: หน่วยผลิตน้ำสะอาดต่ออนุกรมกับหน่วยผลิตน้ำบริสุทธิ์

4.2) การวิเคราะห์ด้านการเงิน

การวิเคราะห์ด้านการเงินโดยกำหนดปัจจัยค่าใช้จ่ายและผลประโยชน์ ดังนี้

1. ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของโครงการได้จากการประเมินราคาเครื่องจักรและอุปกรณ์โดยผู้รับเหมาระบบมีมูลค่าเท่ากับ 17.85 ล้านบาท ซึ่งเป็นการลงทุนในส่วนของผู้เจ้าของทั้งหมดไม่มีการกู้ยืมจากภายนอก

2. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของโครงการ ได้แก่ ค่าสารเคมีสำหรับเดินระบบ ค่าสารเคมีทำความสะอาดระบบ ค่าไฟฟ้า ค่าจ้างพนักงาน และค่าบำรุงรักษา โดยค่าใช้จ่ายดำเนินงานทั้งหมดประมาณ 2.72 ล้านบาทต่อปี แต่ในปีที่ 8 ค่าใช้จ่ายดำเนินงานจะเพิ่มเป็นประมาณ 3.82 ล้านบาท เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสำหรับการเปลี่ยนเมมเบรนประมาณ 1.1 ล้านบาท ซึ่งต้องเปลี่ยนทุก 8 ปี โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8: ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของโครงการ

รายการค่าใช้จ่าย	มูลค่า (บาท/ปี)
ค่าสารเคมีสำหรับเดินระบบ	216,060
ค่าสารเคมีทำความสะอาดระบบ	32,112
ค่าไฟฟ้า	1,110,578
ค่าจ้างพนักงาน	984,000
ค่าบำรุงรักษาระบบในส่วนอุปกรณ์เมมเบรน	158,359
ค่าบำรุงรักษาระบบในส่วนอุปกรณ์งานโครงการ	221,981
ค่าใช้จ่ายสำหรับการเปลี่ยนเมมเบรนในปีที่ 8 (ค่าอะไหล่และค่าแรง)	1,100,470

3. ผลประโยชน์ของโครงการ คือ ผลประโยชน์จากการประหยัดค่าใช้จ่ายจากการใช้น้ำประปาภายในโรงงาน 1,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน คิดเป็นมูลค่าประมาณ 5.5 ล้านบาทต่อปี (อัตราค่าน้ำประปาอ้างอิงจากการประปานครหลวง) คำนวณได้ดังนี้

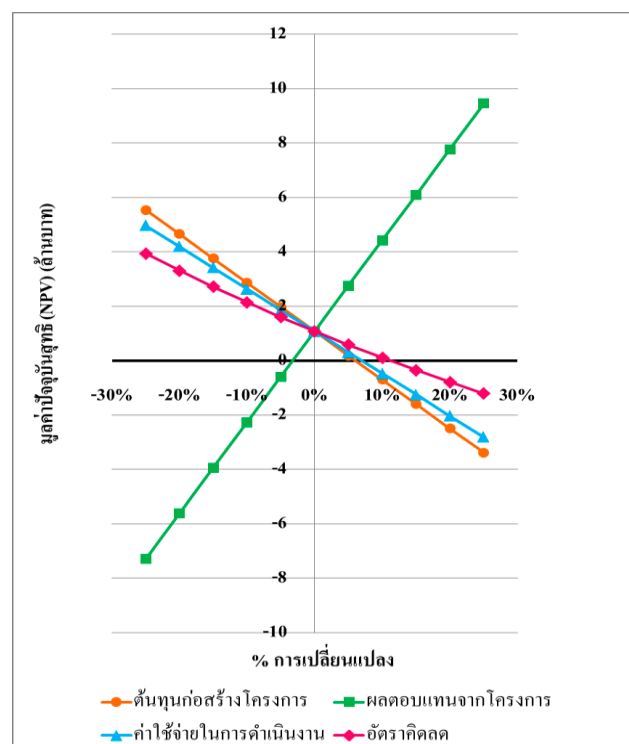
$$1,000 \text{ ลบ.ม.} \times 348 \text{ วัน/ปี} \times 15.81 \text{ บาท/ลบ.ม.} = 5,501,880 \text{ บาทต่อปี}$$

การวิเคราะห์ผลทางด้านการเงิน โดยโรงงานกรณีศึกษาได้กำหนดอัตราผลตอบแทนการลงทุนขั้นต่ำที่ยอมรับได้ เท่ากับ 10% ต่อปี พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิของกระแสเงินสดของโครงการที่ระยะเวลาอายุโครงการ 15 ปี มีค่าเท่ากับ 1.07 ล้านบาท ซึ่งมีค่ามากกว่าศูนย์ อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ เท่ากับ 11.11% ซึ่งมีค่ามากกว่า

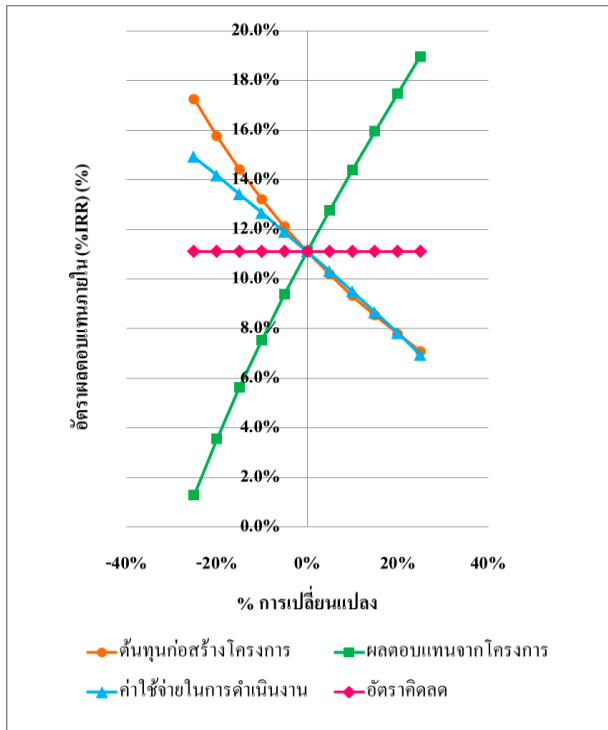
อัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ยอมรับได้ที่ 10% และอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน เท่ากับ 1.03 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1.00 ขณะที่ระยะเวลาคืนทุนคิดลดของโครงการเท่ากับ 13 ปี 2 เดือน ซึ่งน้อยกว่าอายุโครงการ แสดงว่าโครงการนี้มีความเป็นไปได้ทางการเงิน

4.3) การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

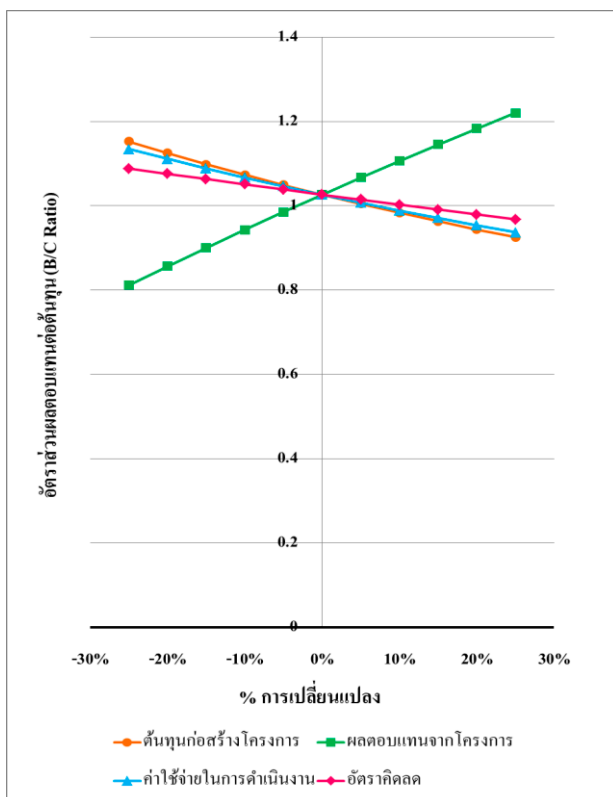
การวิเคราะห์ความอ่อนไหวเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่สำคัญต่างๆ ของโครงการ เพื่อรองรับความไม่แน่นอนที่จะส่งผลกระทบต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน และอัตราผลตอบแทนภายใน ปัจจัยที่พิจารณา คือ ต้นทุนการก่อสร้าง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ผลตอบแทนที่ได้จากโครงการและอัตราการคิดลด โดยมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง $\pm 25\%$ จากกรณีปกติ ผลจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวจะเห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน และอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน ดังแสดงในรูปที่ 2 3 และ 4 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราค่าเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบทำให้โครงการไม่มีความเป็นไปได้ทางการเงิน คือ ต้นทุนการก่อสร้างเพิ่มขึ้น 10% ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเพิ่มขึ้น 10% ผลตอบแทนลดลง 5% และอัตราคิดลดเพิ่มขึ้น 15% ซึ่งสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 9



รูปที่ 2: แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)



รูปที่ 3: แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR)



รูปที่ 4: แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C Ratio)

ตารางที่ 9: ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยด้านต่างๆ

การเปลี่ยนแปลงปัจจัย	ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว			
	NPV (บาท)	IRR (%)	B/C Ratio	DPB (ปี)
ต้นทุนก่อสร้างเพิ่มขึ้น 10%	-707,462.67	9.33%	0.98	มากกว่าอายุโครงการ
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเพิ่มขึ้น 10%	-477,666.79	9.50%	0.99	มากกว่าอายุโครงการ
ผลตอบแทนลดลง 5%	-596,241.01	9.37%	0.99	มากกว่าอายุโครงการ
อัตราคิดลดเพิ่มขึ้น 15%	-354,446.17	11.11%	0.99	มากกว่าอายุโครงการ

5) สรุปผลงานวิจัย

จากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิค พบว่า ระบบผลิตน้ำรีไซเคิลด้วยเทคโนโลยีเมมเบรน ประกอบด้วยหน่วยกรอง 2 หน่วยหลัก คือ หน่วยสำหรับผลิตน้ำสะอาด โดยมีไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนเป็นเยื่อกรองทำหน้าที่ในการเตรียมน้ำให้มีคุณภาพก่อนบ่อน้ำเข้าสู่หน่วยกรองสุดท้าย คือ หน่วยสำหรับผลิตน้ำบริสุทธิ์ โดยมีรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน เป็นเยื่อกรองทำหน้าที่กรองน้ำในขั้นสุดท้ายให้มีความบริสุทธิ์

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินของโครงการก่อสร้างระบบผลิตน้ำรีไซเคิลจากน้ำเสีย โดยมีอายุของโครงการ 15 ปี เมื่อพิจารณาจากดัชนีชี้วัดต่างๆ พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ เท่ากับ 1,077,668.46 บาท อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ เท่ากับ 11.11% อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน เท่ากับ 1.03 และมีระยะเวลาคืนทุนคิดลดของโครงการ 13 ปี 2 เดือน แสดงให้เห็นว่าโครงการมีความเป็นไปได้ทางการเงินที่จะตัดสินใจในการลงทุน

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการโดยพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าที่อยู่ระหว่าง $\pm 25\%$ พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อโครงการไม่มีความเป็นไปได้ในการลงทุน คือ เมื่อต้นทุนการก่อสร้างเพิ่มขึ้น 10% ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเพิ่มขึ้น 10% ผลตอบแทนลดลง 5% และอัตราคิดลดเพิ่มขึ้น 15%

ในการศึกษานี้มีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาและเงินทุนสนับสนุน งานวิจัยที่จะนำไปต่อยอดศึกษาคความีการวิเคราะห์ทางด้านเทคนิคในส่วนของอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบผลิตน้ำรีไซเคิลเพิ่มเติมเพื่อให้ครบถ้วน ครบคลุม และหากโครงการมีปัจจัยอื่นๆ ที่สามารถเพิ่มเติมในส่วนของการผลตอบแทนจะทำให้โครงการมีความเป็นไปได้ทางการเงินที่จะลงทุนเพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Atanasova, M. Dalmau, J. Comas, M. Poch, I. Rodriguez-Roda, and G. Buttiglieri, "Optimized MBR for greywater reuse systems in hotel facilities," *Journal of Environmental Management*, vol. 193, pp. 503–511, May 2017.
- [2] ชีรพงศ์ สว่างรัตน์, "การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบชักโครกด้วยระบบกรองคาร์บอนและฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน," วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สิ่งแวดล้อม), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2551.
- [3] "การวิเคราะห์โครงการ," มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.stou.ac.th/stouonline/lom/data/sec/Lom14/poll.html>. [เข้าถึงเมื่อ: 17-ก.พ.-2560].
- [4] A. Marchioni and C. A. Magni, "Investment decisions and sensitivity analysis: NPV-consistency of rates of return," *European Journal of Operational Research*, vol. 268, no. 1, pp. 361–372, Jul. 2018.
- [5] ทนศักดิ์ วัฒนา, "เรียนรู้การรีไซเคิลน้ำเพื่อการใช้ที่ยั่งยืน," *วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี*, ปีที่ 39, ฉบับที่ 225, หน้า 71-74, ตุลาคม-พฤศจิกายน 2555.
- [6] I. Petrinic, J. Korenak, D. Povodnik, and C. Hélix-Nielsen, "A feasibility study of ultrafiltration/reverse osmosis (UF/RO)-based wastewater treatment and reuse in the metal finishing industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 101, pp. 292–300, Aug. 2015.
- [7] J. Garcia-Ivars, L. Martella, M. Massella, C. Carbonell-Alcaina, M.-I. Alcaina-Miranda, and M.-I. Iborra-Clar, "Nanofiltration as tertiary treatment method for removing trace pharmaceutically active compounds in wastewater from wastewater treatment plants," *Water Res.*, vol. 125, pp. 360–373, Nov. 2017.
- [8] A. Suárez, P. Fernández, J. Ramón Iglesias, E. Iglesias, and F. A. Riera, "Cost assessment of membrane processes: A practical example in the dairy wastewater reclamation by reverse osmosis," *Journal of Membrane Science*, vol. 493, pp. 389–402, Nov. 2015.
- [9] R. Ordóñez, D. Hermosilla, I. S. Pío, and Á. Blanco, "Evaluation of MF and UF as pretreatments prior to RO applied to reclaim municipal wastewater for freshwater substitution in a paper mill: A practical experience," *Chemical Engineering Journal*, vol. 166, no. 1, pp. 88–98, Jan. 2011.

การพัฒนาระบบตรวจสอบความพร้อมโครงข่ายทางโทรคมนาคม

The Development of Telecommunication Network Verification System

เพ็ญสุภา โกญจนบุญ^{#1} สมชาย นำประเสริฐชัย^{*2}

[#]สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900
¹Pensupa.k@ku.th

^{*}ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900
²snp@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบตรวจสอบความพร้อมของโครงข่าย โดยทำการตรวจสอบแกนเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber core) ที่สามารถให้บริการได้และเส้นทางของโครงข่ายที่มีอยู่ในภาคตะวันออกของประเทศไทย เพื่อช่วยลดระยะเวลาและขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็น ระบบตรวจสอบความพร้อมโครงข่ายทางโทรคมนาคมพัฒนาในรูปแบบของโปรแกรมประยุกต์ ด้วยโปรแกรม Visual Basic.NET ร่วมกับระบบจัดการฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ MySQL และเชื่อมต่อกับ API (Application programming interface) ของ Google maps ในการหาตำแหน่งของสถานีโทรคมนาคมที่มีระยะทางใกล้กับสถานที่ของลูกค้ามากที่สุดด้วยอัลกอริทึมของไดจ์สตรา (Dijkstra's algorithm) จากการทดสอบระบบพบว่า การใช้ระบบตรวจสอบความพร้อมโครงข่ายนี้ จะช่วยลดระยะเวลาในการทำงานลงถึงร้อยละ 73.25 เนื่องจากจำนวนขั้นตอนในการทำงานลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบงานเดิม รูปแบบการใช้งานระบบตรวจสอบความพร้อมของโครงข่ายไม่ซับซ้อน ทำให้พนักงานฝ่ายขายที่ไม่มีความรู้เฉพาะทางสามารถใช้งานระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: โครงข่ายโทรคมนาคม, ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการ

ABSTRACT

This research will be applied by examining the fiber core that is available and is in the network solution in the East of Thailand with the purpose of diminishing the time and unnecessarily process of the work. The procedure of the verification system will be developed in a form of application by using the Visual Basic.NET together with the Relational Database Management System of MySQL. And connect to API integration with Google maps so as to find the nearest station possible for consumers by applying an algorithm called 'Dijkstra' to find the shortest distance. By applying the system, it is found that the use of this verification system will help shorten the time of the work by 73.25 percent due to the decrease in the process compared to the original way of working. Furthermore, the development of the information system also helped the assessment of network verification becomes uncomplicated

which is beneficial to employees in the Sales department who lack knowledge in this area to be able to implement this system efficiently and effectively.

Keywords: Telecommunication network, Management information system

1) บทนำ

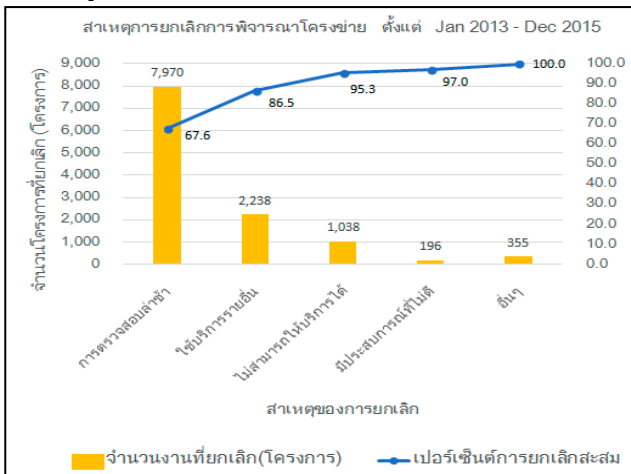
การติดต่อสื่อสารผ่านโครงข่ายโทรคมนาคมนับเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง ไม่ว่าจะเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่หรืออินเทอร์เน็ต จึงส่งผลให้ธุรกิจโทรคมนาคมมีอัตราการแข่งขันสูง ทั้งผู้ให้บริการรายใหญ่ที่มีอยู่เดิมและผู้ให้บริการรายใหม่จำนวนมาก รวมถึงบริษัทการศึกษา ซึ่งเป็นบริษัทหนึ่งให้บริการด้านสื่อสารผ่านโครงข่ายโทรคมนาคม ดังนั้น ผู้ใช้บริการจึงสามารถตัดสินใจเปลี่ยนผู้ให้บริการได้ง่าย ทำให้ผู้ให้บริการต้องพัฒนาปรับปรุงบริการให้มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้บริการ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความพึงพอใจในการให้บริการเป็นอันดับต้นๆ

บริษัทการศึกษาจึงต้องมีการปรับตัวเพื่อสร้างศักยภาพในการแข่งขันและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน เนื่องจากปัญหาที่พบบ่อยครั้งในการให้บริการคือ ความล่าช้าในการตอบสนองต่อผู้ใช้บริการ ในด้านการตรวจสอบความพร้อมของโครงข่าย จากงานวิจัยนี้พบว่า สาเหตุหลักของความล่าช้าเกิดจากมีขั้นตอนการทำงานที่ต้องติดต่อสอบถามข้อมูลจากหลายหน่วยงานและในหลายพื้นที่ผ่านทางไปรษณีย์ อีเล็กทรอนิกส์และโทรศัพท์ ทำให้เสียเวลาในการทำงานโดยไม่จำเป็น

เมื่อพิจารณาถึงสาเหตุของปัญหา การนำระบบเทคโนโลยีสารสนเทศมาใช้เป็นเครื่องมือ จึงกลายเป็นกลยุทธ์หนึ่งที่ใช้เพื่อลดระยะเวลาและขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็นในการตรวจสอบความพร้อมของโครงข่าย อีกทั้งยังสามารถช่วยให้พนักงานฝ่ายขายที่ไม่มีความรู้เฉพาะทางสามารถใช้งานระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อัตราการขยายกิจการใช้โครงข่ายโทรคมนาคมของบริษัทการศึกษาเพิ่มสูงขึ้นทุกปี จากร้อยละ 35 ในปี 2556 เป็นร้อยละ 43 ในปี 2557 และเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 48 ในปี 2558 จากการวิเคราะห์

ปัญหาและข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ผ่านระบบการจัดเก็บและสัมภาษณ์พนักงานฝ่ายขายพบว่า เหตุผลในการขอยกเลิกพิจารณาการใช้โครงข่าย เกิดจากการตรวจสอบความพร้อมโครงข่ายล่าช้าถึงร้อยละ 67.60 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1: สาเหตุการยกเลิกการพิจารณาการใช้บริการโครงข่าย ตั้งแต่ปี 2556 – 2558

การตรวจสอบความพร้อมของโครงข่าย ปัจจุบันใช้การส่งไฟล์เอกสารในรูปแบบ Excel ผ่านไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ ไปยังหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อตรวจสอบข้อมูลโครงข่ายตามความต้องการของลูกค้า โดยทำการตรวจสอบจากเส้นทางการเชื่อมต่อโครงข่ายที่มีอยู่เดิมของบริษัทการศึกษา และตรวจสอบแนวโน้มแนวโน้มในแต่ละเส้นทางการเชื่อมต่อว่าว่างเพียงพอที่จะให้บริการได้หรือไม่ จากนั้นทำการบันทึกและส่งกลับมายังหน่วยงานตรวจสอบความพร้อมของโครงข่ายเพื่อรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ว่าบริษัทสามารถให้บริการได้หรือไม่ ซึ่งโดยเฉลี่ย 1 โครงการใช้เวลาตรวจสอบประมาณ 1-2 วัน และใช้เวลาอีก 1 วันในการส่งต่อไปยังพนักงานฝ่ายตรวจสอบความพร้อมของโครงข่าย จึงทำให้มีระยะเวลาที่สูญเสียไปโดยไม่จำเป็นเกิดขึ้นอย่างมากมาย อีกทั้งขั้นตอนการทำงานก็ยังมีความซ้ำซ้อน

จากข้อมูลข้างต้น จึงได้พัฒนาโปรแกรมประยุกต์ เพื่อใช้ในการตรวจสอบความพร้อมของโครงข่าย โดยโปรแกรมประยุกต์นี้ได้รวบรวมการออกแบบวงจรพื้นฐาน ข้อมูลเส้นทางของโครงข่ายและข้อมูลสถานะโครงข่ายที่มีอยู่ในภาคตะวันออก โดยใช้ข้อมูลของโครงข่ายโครงข่ายในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด สำหรับให้ต้นทุนของโครงการต่ำที่สุดและการส่งสัญญาณมีประสิทธิภาพที่สุด (ระยะของสายใยแก้วนำแสงแปรผันตรงกับค่าการสูญเสียของสัญญาณแสงในสายใยแก้วนำแสง) เพื่อช่วยลดระยะเวลาและขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็น

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ทำการตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์ และไม่คำนึงถึงแบนวิธของโครงข่ายและความเร็วของแต่ละความต้องการ เนื่องจากมีข้อจำกัดทางเทคนิคของแต่ละอุปกรณ์ที่มีผู้ผลิตต่างกัน

2) การตรวจเอกสาร

2.1) อัลกอริทึมของไดคัสตรา

อัลกอริทึมของไดคัสตรา เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest path) โดยแต่ละเส้นทางจะมีการกำหนดค่าน้ำหนักหรือระยะทาง สำหรับการเดินทางจากโหนดเริ่มต้นไปยังโหนดปลายทาง

เอกพงษ์ แสนชัย ได้นำอัลกอริทึมของไดคัสตรามาประยุกต์ใช้ในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดของการเดินทางเข้าไปยังสถานีฐาน เพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบจีเอสเอ็มเอ [1] เนื่องจากการมีสถานีฐานเป็นจำนวนมากและกระจายอยู่ตามพื้นที่ต่างๆ อย่างกว้างขวาง ทำให้การเดินทางอาจจะต้องใช้เวลานาน การนำอัลกอริทึมของไดคัสตรามาใช้จะทำให้สามารถหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการเดินทางเพื่อที่จะใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด

นอกจากนี้ในทางโทรคมนาคมอัลกอริทึมของไดคัสตราก็ยังถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายๆ กรณี ไม่ว่าจะเป็นโปรโตคอลเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดก่อน (Open shortest path first: OSPF) ของอุปกรณ์ Router ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่เหมาะสมสำหรับระบบเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนโดย OSPF นั้นจะทำการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดที่จะส่งข้อมูลผ่าน Router ตัวอื่นๆ ไปยังปลายทาง [2] หรือการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมของไดคัสตราในการเลือกส่งสัญญาณข้อมูลระหว่างอุปกรณ์หรือระหว่างโหนด ร่วมกับกลยุทธ์การค้นหาเส้นทางจากโหนดศูนย์กลางเพื่อให้ได้ระยะทางที่สั้นที่สุดในการเชื่อมต่อ สำหรับใช้แก้ปัญหาการแก้ไขการไม่เชื่อมต่อของโครงข่าย [3]

อัลกอริทึมของไดคัสตราจึงมีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการเลือกเส้นทางของการส่งสัญญาณข้อมูลทางโทรคมนาคม เนื่องจากอัลกอริทึมนี้ เป็นอัลกอริทึมสำหรับการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดที่มีต้นทางเดียว ซึ่งข้อมูลทางโทรคมนาคมนั้นมีต้นทางในการส่งสัญญาณที่แน่นอน ดังนั้นอัลกอริทึมของไดคัสตราจึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานกับเครือข่ายขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน ดังเช่นโครงข่ายโทรคมนาคม เป็นต้น

2.2) Google maps API

Google maps คือ บริการของ Google ที่ให้บริการเทคโนโลยีด้านแผนที่ บุคคลทั่วไปสามารถใช้งานง่าย บริการฟรีผ่านทางเว็บเบราว์เซอร์ของ Google ผ่านทางโทรศัพท์มือถือ หรือผ่านทางคอมพิวเตอร์แบบพกพา โดยสามารถใช้บริการแผนที่ของ Google maps ดูตำแหน่ง ค้นหาเส้นทางที่ใกล้ที่สุด ค้นหาสถานที่ เวลาที่ใช้ในการเดินทาง หรือสามารถค้นหาข้อมูลของธุรกิจในพื้นที่นั้นได้

Google maps เป็นบริการหนึ่งที่เป็นที่นิยมนำมาใช้ร่วมกันกับโปรแกรมประยุกต์ต่างๆ โดยเฉพาะในด้านโลจิสติกส์ เพราะความสามารถของโปรแกรมที่ผู้ใช้งานสามารถค้นหาเส้นทาง พิกัด ที่อยู่ของสถานที่ต่างๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถสร้างแผนที่และคำนวณระยะทางและระยะเวลาในการเดินทางได้ โดยเลือกกระยะทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด ทำให้ระบบโลจิสติกส์มีประสิทธิภาพ [5]

Google maps API คือ ช่องทางการเชื่อมต่อช่องทางหนึ่ง ที่จะเชื่อมต่อโปรแกรมประยุกต์กับ Google maps เพื่อใช้งาน Google maps ผ่านทางช่องทางอื่น ความสามารถของ Google maps API ประกอบด้วย การแสดงข้อมูลต่างๆ ของแผนที่ การค้นหาเส้นทางในการเดินทางต่างๆ การนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมมาแสดงบนแผนที่ รวมทั้งการอนุญาตให้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดจุดตำแหน่งบนแผนที่ได้ สำหรับการใช้งานส่วนบุคคล [6]

2.3) โปรแกรมภาษา Visual Basic.NET

Visual Basic.NET เป็นภาษาที่พัฒนาต่อจาก Visual basic 6.0 ซึ่งเพิ่มความสามารถของ Visual basic เดิมที่ไม่สามารถทำได้โดยเฉพาะในเรื่องของการปรับเป็นภาษาเชิงวัตถุ (Object-oriented programming) อย่างเต็มรูปแบบ ทำให้โครงสร้างภาษาของ Visual Basic.NET นั้น มีความสมบูรณ์มากขึ้น แต่ก็ยังคงรูปแบบการเขียนแบบเดิมไว้ในบางส่วนเพื่อความสะดวกสำหรับผู้ใช้งานจาก Visual basic version ก่อนหน้านี้นับว่า Visual Basic.NET

Visual Basic.NET เป็นภาษาหนึ่งที่อยู่ในชุดเครื่องมือ Microsoft Studio.NET โดยจะใช้ IDE (Integrated development environment) รวมกับภาษาอื่นอีก 3 ภาษาในตระกูล Visual ซึ่งอยู่ในชุดเครื่องมือนี้ ได้แก่ Visual C#, Visual C++ และ Visual J#

ลักษณะเด่นของการเขียนโปรแกรมด้วย Visual basic คือ มีเครื่องมือ (Tools) ในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์เป็นจำนวนมาก และเป็นภาษาที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย ทำให้การเขียนโปรแกรมมีความสะดวกและรวดเร็ว สามารถออกแบบการติดต่อกับผู้ใช้ (ฟอร์ม) ได้ทันที เนื่องจากเป็นภาษาเชิงวัตถุ อีกทั้งโปรแกรม Visual Basic.NET นั้น มีการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของภาษาและความเร็วของการประมวลผล และยังมีการเพิ่มความสามารถใหม่ๆ อย่างต่อเนื่อง [7]

2.4) ระบบจัดการฐานข้อมูล

ระบบจัดการฐานข้อมูลที่น่ามาใช้นในงานวิจัยนี้คือ MySQL เป็นระบบจัดการฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ ทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างผู้ใช้งานกับฐานข้อมูล จึงต้องมีการทำงานร่วมกับโปรแกรมหรือภาษาอื่น เช่น ภาษา Visual basic ภาษา Java หรือ ภาษา C เป็นต้น โดยมีส่วนติดต่อ API เพื่อเชื่อมต่อกับภาษาในการพัฒนาระบบอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น .NET ที่ใช้สำหรับการเชื่อมกับภาษา .NET framework เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยได้นำ .NET เชื่อมกับโปรแกรมภาษา Visual basic สำหรับการจัดการฐานข้อมูลของเส้นทางเชื่อมต่อ ตำแหน่งของสถานีโทรคมนาคม และอื่นๆ นอกจากนี้ MySQL ยังเป็นโปรแกรมจัดการฐานข้อมูลที่สามารถรองรับข้อมูลขนาดใหญ่ ได้ในระดับล้านระเบียน ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้เก็บข้อมูลโครงข่ายโทรคมนาคมที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน

3) วิธีดำเนินการ

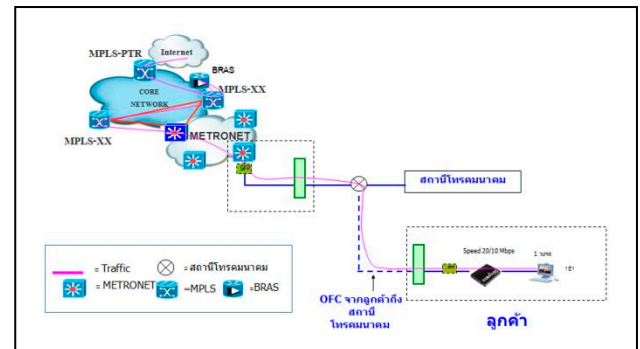
จากการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหา ได้ทำการออกแบบและพัฒนา ระบบสารสนเทศจากกระบวนการธุรกิจ โดยแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

3.1) ศึกษาการออกแบบวงจร

ประเภทเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารที่ให้บริการของบริษัทการศึกษา นั้น มีรูปแบบตามความต้องการของผู้ใช้บริการแต่ละราย ในกระบวนการออกแบบเดิมนั้น เมื่อมีการร้องขอการใช้งานของผู้ใช้บริการเข้ามาจะต้องทำการออกแบบวงจรใหม่ทุกครั้ง หลายครั้งความต้องการเป็นไปในรูปแบบเดียวกัน ซึ่งสามารถใช้แบบวงจรในลักษณะเดียวกันได้ จึงทำให้สูญเสียเวลาในกระบวนการออกแบบวงจรไปโดยไม่จำเป็น การศึกษาข้อมูลการออกแบบวงจรสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้

3.1.1) ระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงผ่านโครงข่ายใยแก้วนำแสง (FTTx)

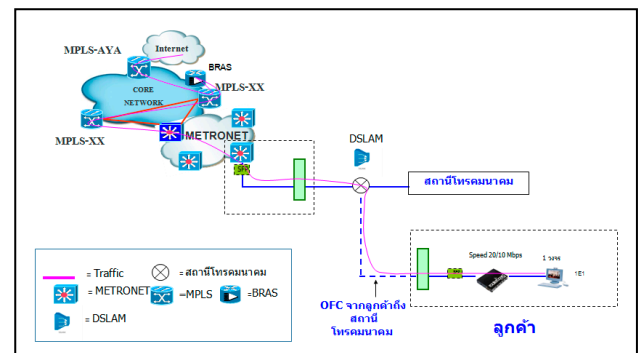
ระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงผ่านโครงข่ายใยแก้วนำแสงนี้ ดังรูปที่ 2 เป็นประเภทบริการที่ผู้ใช้บริการให้ความสนใจมากที่สุด ซึ่งสามารถให้บริการได้ทั้งระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงผ่านโครงข่ายใยแก้วนำแสงและระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต (VoIP) การศึกษาข้อมูลของบริษัทการศึกษาพบว่า ร้อยละ 70 ของการออกแบบวงจรของประเภทบริการนี้ มีรูปแบบการเชื่อมต่อวงจรในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 2: การออกแบบวงจรอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงผ่านสายใยแก้วนำแสง

3.1.2) ระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงบนโครงข่ายสายทองแดง (xDSL)

การออกแบบวงจรของระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงบนโครงข่ายสายทองแดงดังรูปที่ 3 ของบริษัทการศึกษา มีรูปแบบการเชื่อมต่อวงจรในรูปแบบเดียวกันคิดเป็นร้อยละ 40

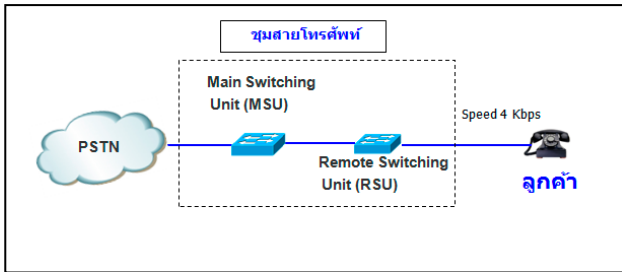


รูปที่ 3: การออกแบบวงจรอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงบนโครงข่ายสายทองแดง

3.1.3) ระบบโทรศัพท์พื้นฐาน (PSTN)

ส่วนการออกแบบวงจรโทรศัพท์พื้นฐานของบริษัทการศึกษา ดังรูปที่ 4 จะมีการเชื่อมต่อวงจรในลักษณะเดียวกันสูงถึงร้อยละ 98

เมื่อศึกษารูปแบบของวงจรประเภทต่างๆ พบว่า การบริการแต่ละประเภทนั้น จะมีเงื่อนไขในการตรวจสอบความพร้อมที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากการบริการแต่ละประเภทจะมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งสัญญาณและชนิดของสายสายที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4: การออกแบบวงจรโทรศัพท์พื้นฐาน

3.2) การจัดเก็บข้อมูล

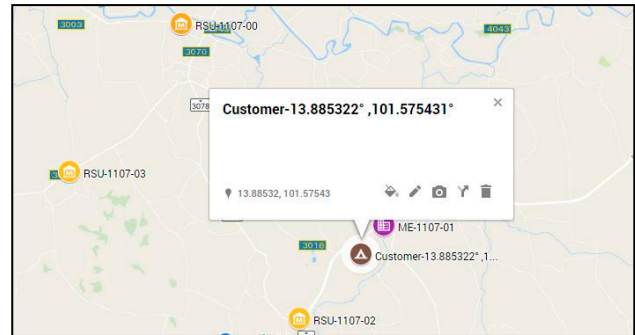
การบริการของเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารแต่ละประเภทนั้นจะใช้อุปกรณ์ในการส่งสัญญาณที่แตกต่างกัน ซึ่งสถานีโทรคมนาคมของบริษัทการศึกษาที่มีอุปกรณ์ติดตั้งอยู่ในสถานที่ที่แตกต่างกัน บางสถานีอาจจะมีอุปกรณ์ครบทุกอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารจึงสามารถรองรับการให้บริการได้ทุกประเภท บางสถานีอาจจะมีอุปกรณ์สำหรับส่งสัญญาณของโทรศัพท์พื้นฐาน หรืออุปกรณ์ที่รองรับการบริการประเภทอินเทอร์เน็ตเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องทำการจัดเก็บข้อมูลของสถานี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลดังนี้

- 1.รหัสสถานีโทรคมนาคม (Location code)
- 2.พิกัดละติจูด ลองจิจูดของแต่ละสถานี
- 3.เส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างสถานีโทรคมนาคม (Optical route)
- 4.จำนวนแกนเส้นใยแก้วนำแสงที่ว่างในแต่ละเส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างสถานี (Core available)
- 5.ระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงในการเชื่อมต่อระหว่างสถานี
- 6.อุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีอยู่ในแต่ละสถานี

3.3) การพัฒนาระบบ

การพัฒนาระบบสารสนเทศจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์หาเส้นทางที่สั้นที่สุดและการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์เพื่อใช้ในการแสดงข้อมูลของโครงข่าย โดยการนำ Google maps API มาประยุกต์ใช้ API ที่นำมาประยุกต์ใช้มี 2 ส่วนคือ 1) Google maps distance matrices API ในการวัดระยะทางจากผู้ใช้บริการไปยังสถานีโทรคมนาคมที่อยู่ในแต่ละจังหวัด เพื่อทำการเลือกสถานีที่อยู่ใกล้ที่สุดและหลังจากที่หาสถานีโทรคมนาคมที่ใกล้ที่สุดได้แล้วนั้นจะใช้ 2) Google maps directions API ในการแสดงเส้นทางที่ใกล้ที่สุดจากสองจุด โดยเลือกใช้ Driving mode เนื่องจากโครงข่ายของบริษัทการศึกษาเป็นโครงข่ายที่พาดผ่านเสาไฟฟ้าและอยู่ในแนวถนนทั้งสิ้น

งานวิจัยนี้ได้ยกตัวอย่างการตรวจสอบความพร้อมของโครงข่ายตามการร้องขอของผู้ใช้บริการระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงผ่านโครงข่ายใยแก้วนำแสงในจังหวัดปราจีนบุรี เมื่อพนักงานฝ่ายขายได้รับความต้องการของผู้ใช้บริการ พร้อมด้วยพิกัดละติจูด ลองจิจูด คือ 13.885322° และ 101.575431° ตามลำดับ ดังรูปที่ 5 โดยการใช้ Google maps API แสดงพิกัดของผู้ใช้บริการที่จุด A และสถานีโทรคมนาคมอื่นๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงบริเวณจังหวัดปราจีนบุรี



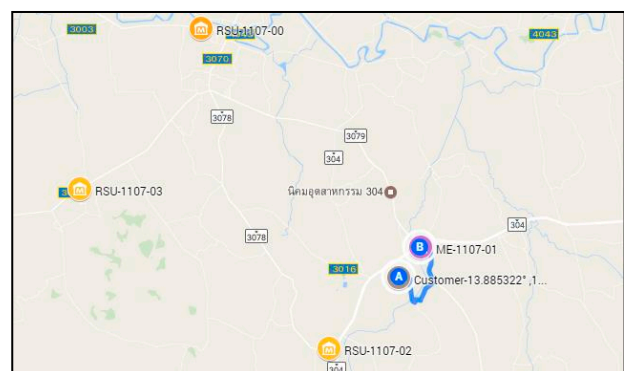
รูปที่ 5: การใช้ Google Maps API แสดงพิกัดของผู้ใช้บริการที่จุด A และสถานีโทรคมนาคมอื่นๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงบริเวณจังหวัดปราจีนบุรี

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะทำการค้นหาสถานีที่มีอุปกรณ์ส่งสัญญาณ Metro ethernet (ME) อุปกรณ์สำหรับการให้บริการประเภทอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงผ่านโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่อยู่ในจังหวัดปราจีนบุรี ซึ่งมีพิกัดดังตารางที่ 2 เพื่อทำการเชื่อมต่อตามวงจรที่ออกแบบไว้โดยใช้อัลกอริทึมของไดจ์สตรา ในการหาเส้นทางเชื่อมต่อที่ให้ระยะทางที่สั้นที่สุด

ตารางที่ 2: แสดงสถานีโทรคมนาคมที่มีอุปกรณ์ ME ในจังหวัดปราจีนบุรี

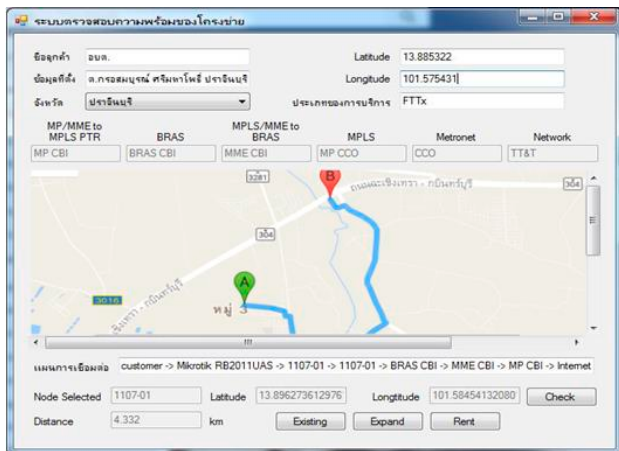
Province	Node	LAT	LONG
PRI	1106-01	14.000090°	101.225279°
PRI	1107-01	13.896274°	101.584545°
PRI	1101-00	14.053760°	101.373500°
PRI	1142-01	14.148074°	101.317614°
PRI	1102-02	14.007675°	101.705374°

จากตารางที่ 2 จะพบว่าสถานีโทรคมนาคมรหัส 1107-01 เป็นสถานีที่อยู่ใกล้กับผู้ใช้บริการที่ตำแหน่ง A มากที่สุด ดังนั้นระบบจึงทำการค้นหาเส้นทางเชื่อมต่อของการร้องขอการใช้บริการจากจุด A ไปยังสถานีโทรคมนาคมรหัส 1107-01 ที่กำหนดให้เป็นจุด B ดังรูปที่ 6 ซึ่งแสดงผลจากการใช้ Google maps API ค้นหาสถานีที่อยู่ใกล้ผู้ใช้บริการมากที่สุด



รูปที่ 6: แสดงผลจากการใช้ Google Maps API ค้นหาสถานีที่อยู่ใกล้ผู้ใช้บริการมากที่สุด โดยจุด A แทนพิกัดของผู้ใช้บริการ จุด B แทนสถานีโทรคมนาคมที่อยู่ใกล้ที่สุด

เมื่อนำมาตรวจสอบความพร้อมของโครงข่าย ดังรูปที่ 7 แสดงตัวอย่างระบบสารสนเทศการตรวจสอบความพร้อมโครงข่าย เมื่อกรอกข้อมูลของผู้ใช้บริการและพิกัดของผู้ใช้บริการจากตัวอย่าง บนโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้แล้ว ระบบจะทำการตรวจสอบหาพิกัดของสถานีโทรคมนาคมที่อยู่ใกล้ผู้ให้บริการมากที่สุด โดยแสดงรายละเอียดพิกัดละติจูด ลองจิจูดของสถานีและระยะทางของการเชื่อมต่อวงจรตามลักษณะประเภทของการให้บริการที่ได้ออกแบบไว้ในหน่วยกิโลเมตร โดยใช้ลอจิกทิมของโค้กสตรา ซึ่งเส้นทางการเชื่อมต่อของวงจรที่โปรแกรมได้ทำการตรวจสอบนั้น จะเป็นเส้นทางที่ได้ผ่านเงื่อนไขที่ได้ทำการกำหนดไว้แล้วคือ ต้องมีแกนสายใยแก้วนำแสงที่พร้อมใช้งานเพียงพอสำหรับการให้บริการ (กำหนดให้ 1 ผู้ใช้บริการใช้แกนใยแก้วนำแสงจำนวน 1-2 แกน โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะประเภทการให้บริการ) ถ้าหากเส้นทางที่ให้ระยะทางที่สั้นที่สุดไม่สามารถให้บริการได้ ระบบจะทำการแจ้งเตือนว่าในช่วงระหว่างเส้นทางใดที่ไม่สามารถให้บริการได้ หลังจากนั้นระบบจะทำการหาเส้นทางใหม่ที่มีเส้นทางที่ให้ระยะทางที่สั้นในลำดับรองลงไปแทน



รูปที่ 7: หน้าจอแสดงผลพร้อมตัวอย่างระบบสารสนเทศการตรวจสอบความพร้อมโครงข่ายการให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงผ่านโครงข่ายใยแก้วนำแสงในจังหวัดปราจีนบุรี

3.4) ตรวจสอบการใช้งานระบบสารสนเทศ

การทดสอบระบบสารสนเทศการตรวจสอบความพร้อมโครงข่าย มีวิธีการทำคือ นำโครงการที่มีอยู่ก่อนแล้วมาทดสอบ โดยใช้ระบบสารสนเทศการตรวจสอบความพร้อมโครงข่าย และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจสอบแบบเดิม จากผลการตรวจสอบความพร้อมโครงข่ายในรูปที่ 7 ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ระบบตรวจสอบความพร้อมของโครงข่ายคือ สถานีโทรคมนาคมรหัส 1107-01 เป็นสถานีโทรคมนาคมเป็นสถานที่ให้บริการ เนื่องจากตั้งอยู่ใกล้กับผู้ให้บริการที่ทำการร้องขอการให้บริการมากที่สุด

ซึ่งผลการตรวจสอบจากวิธีการเดิม ดังรูปที่ 8 พบว่า การตรวจสอบด้วยวิธีการนี้ได้เลือกสถานีโทรคมนาคมรหัส 1107-01 เป็นสถานที่ให้บริการ และมีแผนการเชื่อมต่อของวงจรระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงผ่านโครงข่ายใยแก้วนำแสงเช่นเดียวกับการตรวจสอบด้วยระบบสารสนเทศการตรวจสอบความพร้อมโครงข่าย ทั้งด้านของแผนการเชื่อมต่อวงจรและด้านของสถานีโทรคมนาคมที่ให้บริการ แต่จะมีความ

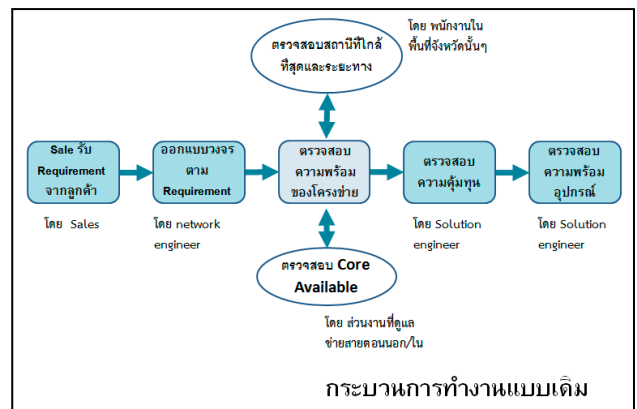
แตกต่างกันที่ระยะทางของเส้นทางการเชื่อมต่อจากผู้ให้บริการมายังสถานีโทรคมนาคม เนื่องจากการตรวจสอบความพร้อมโดยวิธีเก่านั้นใช้การคาดคะเนระยะทางจากการเดินทางจึงทำให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ดังนั้นการใช้ระบบสารสนเทศในการตรวจสอบทำให้ระยะทางที่ได้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่า

Expansion, 2011-2016				EXP001-TES-NUM-Y1	01/1900	Config	Equipment	Address	Latitude	Longitude
About Project		Work Type Location								
NUM-EXP	Area	Province	Project Name	สถานะ	ที่ไม่ได้ใช้					
2016			งาน	ค้นหาชื่อ	พบ					
#18020101	1	ปทุมธานี	FTTx sub	Expansion	1107-01	Config (FTTx) : Internet >> Internet Gateway >> BRAS CBI >> ME 1107-01 >> >> New OFC 5.2 km From Customer tom1107-01 >> Mikrotik RB2011UAS -> Customer	ODF 8 Ea, Pigtail 3 set, Patch cord LC/LC S set, SFP 10 km 8 Ea, Mikrotik RB2011UAS 8 set	พิก 3 x km	13.885322	101.575431

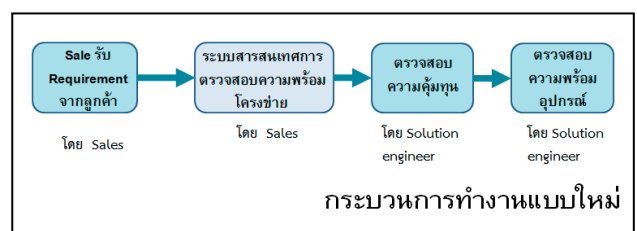
รูปที่ 8: ผลการตรวจสอบความพร้อมโครงข่ายด้วยวิธีการเดิมของการให้บริการประเภทอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงผ่านโครงข่ายสายใยแก้วนำแสงในจังหวัดปราจีนบุรี

4) สรุปและข้อเสนอแนะ

ระบบสารสนเทศการตรวจสอบความพร้อมของโครงข่ายนั้นสามารถช่วยลดระยะเวลาในการตรวจสอบความพร้อมในการให้บริการได้ถึงร้อยละ 73.25 เมื่อเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบด้วยวิธีการเดิม ซึ่งใช้ระยะเวลาโดยเฉลี่ย 12 ชั่วโมงในการตรวจสอบ (คิดเฉพาะเวลาทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน) แต่เมื่อใช้ระบบสารสนเทศการตรวจสอบความพร้อมของโครงข่ายพบว่า ใช้เวลาเฉลี่ย 3 ชั่วโมง 20 นาที เนื่องจากได้ลดขั้นตอนการทำงานบางขั้นตอนที่ไม่จำเป็น ดังรูปที่ 9 และ 10 และพนักงานฝ่ายขายยังสามารถตรวจสอบความพร้อมได้ด้วยตนเอง เพื่อที่จะตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การนำลอจิกทิมของโค้กสตรามาใช้รวมกันกับ Google maps เพื่อหาระยะทางที่สั้นที่สุด สามารถช่วยลดต้นทุนของสายใยแก้วนำแสงหรือสายทองแดงลงได้ และทำให้การตรวจสอบความพร้อมโครงข่ายมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9: กระบวนการในการทำงานในปัจจุบัน



รูปที่ 10: กระบวนการในการทำงานแบบใหม่

ข้อเสนอแนะ การใช้งาน Google maps API นั้นมีข้อจำกัดในหลายๆ ด้าน รวมถึงเรื่องภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม ซึ่ง API ของ Google maps จะสามารถใช้งานฟังก์ชันได้เต็มประสิทธิภาพ ผ่านการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา PHP และ JAVA script เนื่องจากมี API สำหรับภาษาทั้งสองโดยเฉพาะ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้อำนวยการฝ่าย หัวหน้างาน และผู้จัดการฝ่าย ตรวจสอบความพร้อมโครงข่าย ของบริษัทกรณีสึกษาที่ให้การสนับสนุน ข้อมูลที่เกี่ยวข้องสำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] เอกพงษ์ แสนชัย, "การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อสนับสนุนบริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบซีดีเอ็มเอ : กรณีศึกษา บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน)," วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เทคโนโลยีสารสนเทศ), มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น, 2552.
- [2] "OSPF Weekly Article," *ETDA*. [Online]. Available: https://www.etda.or.th/file_storage/uploaded/Etda_Website/article/20120316_OSPF_Weekly_Article_V.03-02.pdf. [Accessed: 20-Sep.-2016].
- [3] Du, R., H.D. Fei., W.G. Zhang and X. Y. Wang, "Research and Design of a SpaceWire Network Dynamic Reconfiguration Method Based on Dijkstra Algorithm," in *2016 9th International Symposium on Computational Intelligence and Design, ISCID 9, 2016*, pp.168-173.
- [4] "รู้จักกับ MySQL," กลุ่มพัฒนาการบริการข้อมูล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://kmops.moph.go.th/index.php/km-test/ict/124-mysql>. [เข้าถึงเมื่อ: 10-ต.ค.-2559].
- [5] "The logistics network system based on the Google Maps API - IEEE Conference Publication," [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5461215>. [Accessed: 28-Nov-2016].
- [6] "Google Map API," ศูนย์สารสนเทศเพื่อการพัฒนาชุมชน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://itcenter.cdd.go.th/>. [เข้าถึงเมื่อ: 10-ต.ค.-2559].
- [7] โชคชนะ อาจตา, "การเขียนโปรแกรมแบบจินตนาการ," [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://sites.google.com/site/krudollampn/hnwy-kar-reiyn-ru14>. [เข้าถึงเมื่อ: 10-ต.ค.-2559]
- [8] นัฐพล สีกะมุด, "แอปพลิเคชันค้นหาเส้นทางในมหาวิทยาลัยมหาสารคาม," ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 12*, 2559, หน้า 551-556.
- [9] "Google Maps API Reference," *Google Corporation*. [Online]. Available: <https://developers.google.com/maps/>. [Accessed: 1-Oct.-2016.]

การวิเคราะห์และทำนายสภาพคล่องการจราจรด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบถดถอยอัตโนมัติไม่เป็นเชิงเส้นร่วมกับข้อมูลอินพุตภายนอก

Traffic Flow Analytics and Prediction using Nonlinear Autoregressive Network with Exogenous Inputs Technique

พีรพล พุทธรเวชมงคล^{#1} วิมล แสนอ้อม^{*2} ชฎาพร เกตุมณี^{*}

[#]หลักสูตรปริญญาโทสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

^{*}หลักสูตรปริญญาโทสาขาวิศวกรรมดิจิทัล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น 1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250

¹phpeerapol_st@tni.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์และการทำนายสภาพคล่องการจราจรด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบถดถอยอัตโนมัติไม่เป็นเชิงเส้นร่วมกับข้อมูลอินพุตภายนอก (NARX) โดยมีการแบ่งการกำหนดค่าในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกการกำหนดค่าดีเลย์เท่ากับ 2 และส่วนที่สองค่าดีเลย์เท่ากับ 4 เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์และหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปสร้างแบบจำลอง NARX โดยอาศัยการใช้ข้อมูลจำลองที่สร้างมาจากสมการแม็กกัสมีความผันผวนเหมือนสภาพคล่องการจราจร จำนวน 1000 ชุดข้อมูล และนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาผลลัพธ์ด้วยแบบจำลอง NARX โดยสามารถนำไปพัฒนาต่อในการทำแอปพลิเคชันหรือเว็บแอปพลิเคชันที่ครอบคลุมพื้นที่ใช้งานในกรุงเทพมหานครได้ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: การวิเคราะห์, การทำนาย, สภาพคล่องการจราจร, NARX, สมการแม็กกัส

ABSTRACT

This paper proposes the traffic flow analytics and prediction using nonlinear autoregressive network with exogenous inputs technique (NARX). The learning of neural network is divided into 2 configuration parts. The configuration delays are 2 and 4 to compare the results and find optimal configuration value for create NARX model using the simulate data. The chaotic simulate data set are generate by Mackey glass equation. Then analyze data set using NARX model. This able to developed to application or web application used in Bangkok.

Keywords: Analytics, Prediction, Traffic Flow, Mackey Glass Equation, NARX

1) ที่มาและความสำคัญ

เมื่อปี พ.ศ. 2559 ที่ผ่านมาจากผลสำรวจสภาพการจราจรกรุงเทพมหานครเป็นอันดับที่ 1 ที่มีการจราจรติดขัดที่สุดในโลก[1] แต่วิถีชีวิตในกรุงเทพมหานครกลับมีความเร่งรีบในการเดินทางเป็นอย่างมาก อีกทั้งปัญหาสภาพการจราจรภายในกรุงเทพมหานครที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขมาเป็นเวลานาน ทำให้ผู้คนเริ่มหันมาหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีการจราจรหนาแน่น แต่ทว่าก็ไม่สามารถคาดการณ์ได้อย่างถูกต้องเสมอไป แม้จะใช้แอปพลิเคชันที่มีในปัจจุบันเพื่อดูข้อมูลการจราจร ณ เวลานั้นๆ เนื่องจากแอปพลิเคชันยังไม่สามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้อย่างแม่นยำที่ตอบสนองความพึงพอใจของผู้ใช้ประกอบกับตัวแอปพลิเคชันยังไม่สามารถทำนายผลการจราจรล่วงหน้าได้ ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะริเริ่มในการทำระบบวิเคราะห์สภาพคล่องการจราจรที่มีความแม่นยำขึ้นและการทำนายผลสภาพคล่องการจราจรโดยการนำ NARX (Nonlinear Autoregressive Network with Exogenous) มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการวิเคราะห์สภาพคล่องการจราจร เพื่อให้คนที่ใช้ชีวิตในเมืองหลวงสามารถรู้ล่วงหน้าถึงสภาพการจราจรและวางแผนการเดินทาง หรือหลีกเลี่ยงเส้นทางที่แออัดได้อย่างถูกต้อง

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการทำนายสภาพคล่องการจราจรด้วยการกำหนดค่าในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมที่ต่างกันออกไป เพื่อเปรียบเทียบและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างแบบจำลอง NARX โดยจำลองข้อมูลสภาพการจราจรขึ้นมาจากสมการแม็กกัสที่มีความใกล้เคียงกัน เพื่อนำไปใช้ในการทำแอปพลิเคชันหรือเว็บแอปพลิเคชันต่อไปในอนาคต

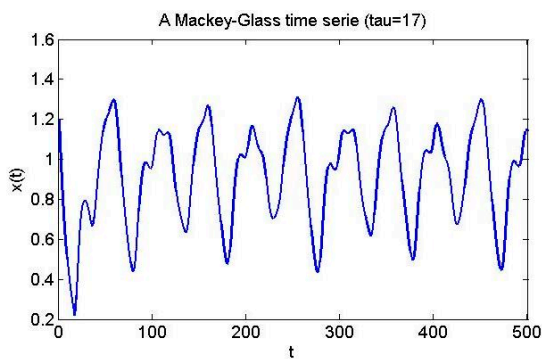
2) ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1) สมการแม็กกัส (Mackey Glass Equation)

สมการแม็กกัสเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีค่าหน่วยเวลา สมการแม็กกัสจะแสดงช่วงของเวลาและ

สัญญาณอลวนซึ่งเหมาะแก่การนำมาใช้ในการจำลองข้อมูลที่มีความผันผวน ไม่เป็นเชิงเส้น [2] ดังรูปที่ 1 โดยในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลสภาพการจราจรของกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นข้อมูลแบบอนุกรมเวลา (Time series) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น การจำลองการจราจรในช่วงเวลาใดๆ (t) ที่มีค่าหนึ่งเวลา (r) โดยให้มีพีเพอร์ที่เกี่ยวข้องกับเวลาเพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงกับข้อมูลจริง เช่น เทรนด์ ความแปรผันตามฤดูกาล วัฏจักร เป็นต้น สามารถทำได้โดยใช้สมการแม็กกัสดังสมการที่ 1

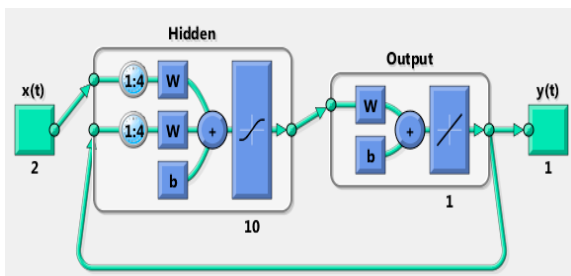
$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{ax(t-r)}{1+(x-r)^{10}} - bx(t) \quad (1)$$



รูปที่ 1: ตัวอย่างข้อมูลที่สร้างจากสมการแม็กกัส

2.2) แบบจำลอง NARX

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการประมวลผลสารสนเทศด้วยการคำนวณด้วยเทคนิคคอนเนชันนิส (Connectionist) ที่เลียนแบบมาจากสมองของมนุษย์ ส่วน NARX เป็นโครงข่ายประสาทเทียมชนิดหนึ่งที่ใช้ข้อมูลเชิงเวลาโดยอาศัยข้อมูลอินพุตภายนอกในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งสามารถป้อนกลับข้อมูลที่ได้เพิ่มความแม่นยำในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม และสามารถทำนายข้อมูลในอนาคตได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 2: โครงสร้าง NARX แบบ Closed Loop

2.3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

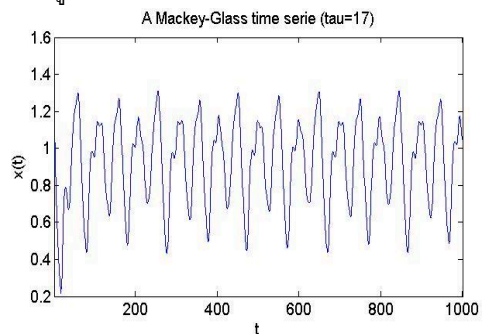
NARX เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์ในการคาดการณ์ข้อมูล [3] จึงมีงานวิจัยที่นำ NARX ไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งด้านการคมนาคม ด้านพลังงาน ด้านสิ่งแวดล้อม รวมถึงด้านเศรษฐศาสตร์และด้านอื่นๆ งานวิจัยทางด้านคมนาคมของคุณ Lejla Banjanović-Mehmedović และคณะ [4] ได้นำ NARX ไปพัฒนาระบบการขนส่ง

อัจฉริยะที่ช่วยเพิ่มความคล่องตัวของจราจร ผลจากการนำ NARX ไปใช้กับระบบทำให้ระบบมีความแม่นยำที่สูงขึ้น ด้านเศรษฐศาสตร์ คุณ Anita Thakur [5] และคณะ ได้นำ NARX ไปใช้กับการคาดการณ์ราคาน้ำมันเพื่อกำหนดการผลิตให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภคได้อย่างเหมาะสม ด้านพลังงานมีการนำไปประยุกต์ใช้ในหลายงานวิจัย เช่น คุณ Lidong Zhang และคณะ [6] ได้นำ NARX ในการทำนายการใช้พลังงานของกังหันลมแนวแกนนอนได้อย่างแม่นยำ หรือ คุณ A.G.R. Vaz และคณะ [7] ได้ใช้ NARX ในการประเมินผลของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ของเมืองยูเทรคท์และบริเวณใกล้เคียงเพื่อผลิตให้เพียงพอแก่การใช้งานและสามารถทำนายผลการใช้งานล่วงหน้าได้มากกว่า 15 นาที อีกทั้งงานวิจัยของคุณ Yang Chunshan และ Li Xiaofeng [8] ที่ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของเหมืองข้อมูลกับการใช้ NARX ในการทำนายการใช้ไฟฟ้าของจีน ทำให้สามารถแบ่งแยกประเภทข้อมูลที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการทำนายอย่างชัดเจนและทำนายผลลัพธ์ได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการจะนำ NARX ไปใช้ต้องมีข้อมูลอินพุตที่ถูกต้องและการกำหนดค่าน้ำหนักที่เหมาะสม

3) วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1) สร้างข้อมูลจำลอง

ใช้สมการแม็กกัสในการสร้างข้อมูลจำลอง เพื่อใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้สมการที่ (1) ในการสร้างข้อมูลจำลองด้วยวิธี 4th-Order Runge-Kutta ด้วยการกำหนดค่า Step Size เท่ากับ 1 และ τ เท่ากับ 17 ข้อมูลที่จำลองมีจำนวนทั้งหมด 1000 ชุด ค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1.2 ผลลัพธ์ที่ได้การจำลองข้อมูลจากสมการแม็กกัสแสดงดังรูปที่ 3

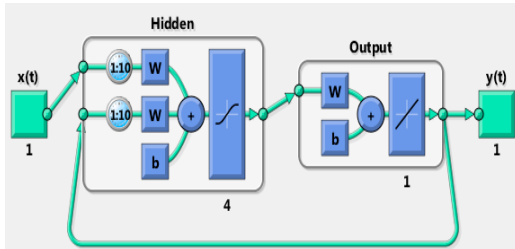


รูปที่ 3: ข้อมูลจำลอง 1000 ชุด ที่ได้จากสมการแม็กกัส

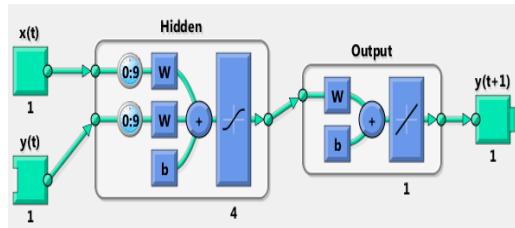
3.2) ฝึกสอนแบบจำลอง NARX

การฝึกสอนแบบจำลอง NARX จะเกี่ยวกับในการกำหนดค่าน้ำหนักที่เหมาะสม (Weights) รวมถึงโครงข่ายประสาทเทียมที่มีค่าชั้นแฝง (Number of Hidden Neurons) อินพุต (Input) และดีเลย์ (Number of Delays) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ในงานวิจัยนี้นำข้อมูลจำลองที่ได้ที่จากสมการแม็กกัสมาป้อนให้กับแบบจำลอง NARX ผ่านโปรแกรม MATLAB ด้วยชุดคำสั่งของ Neural Network Time Series Tool โดยแบ่งข้อมูลจำลองออกเป็น 3 ชุด ชุดแรกใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม (Training) จำนวน 70 เปอร์เซนต์ ชุดที่สองใช้ในการตรวจสอบ (Validation) จำนวน 15 เปอร์เซนต์ ชุดที่

สามใช้ในการทดสอบผล (Testing) จำนวน 15 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างแบบจำลอง NARX ที่จะเป็นดังรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4: โครงสร้างของแบบจำลอง NARX แบบ Close Loop



รูปที่ 5: โครงสร้างของแบบจำลอง NARX แบบ Predict 1 Step Ahead

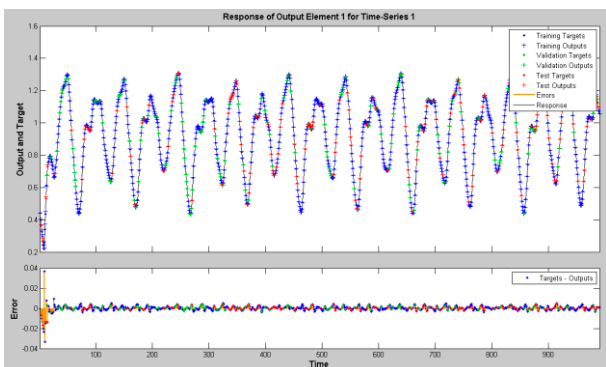
ในการทดลองครั้งนี้ ค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Error : MSE) ถูกนำมาใช้ในการประเมินค่าความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลอง NARX ดังสมการที่ (2)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y(i) - y_i}{y(i)} \right)^2 \quad (2)$$

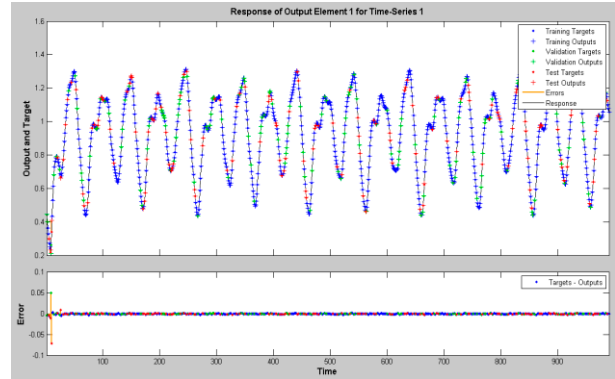
4) ผลการวิจัย

แบบจำลอง NARX ถูกออกแบบให้มีค่าชั้นแฝงเท่ากับ 10 ส่วน การวิเคราะห์เพื่อหาค่าความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองนี้จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์หรือดีเลย์ การทำลงแบบจำลองจะถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่มตามค่าดีเลย์ซึ่งเท่ากับ 2 และ 4 ตามลำดับ

4.1) ผลลัพธ์ของการทำนายของแบบจำลอง NARX ที่ค่าดีเลย์เท่ากับ 2 และ 4 แสดงในรูปที่ 6 ก) และ ข) ตามลำดับ



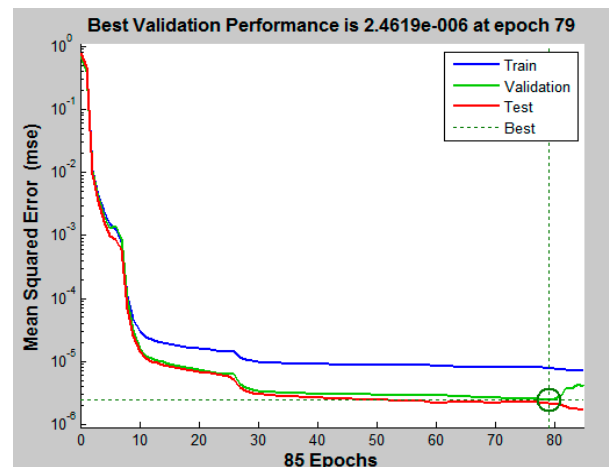
ก) กราฟแสดงการทำนายโดยใช้ดีเลย์เท่ากับ 2



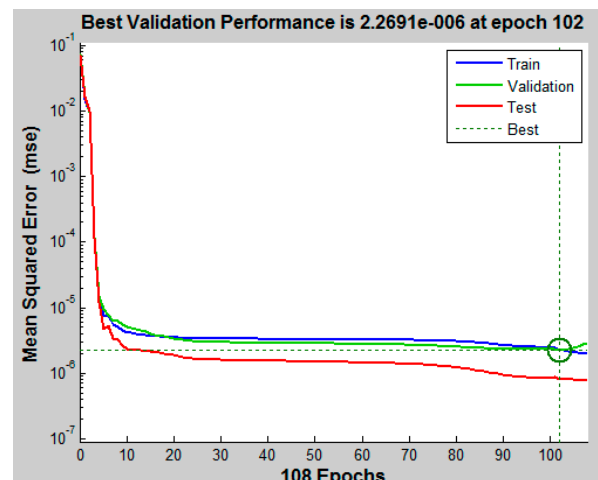
ข) กราฟแสดงการทำนายโดยใช้ดีเลย์เท่ากับ 4

รูปที่ 6: ผลลัพธ์เชิงเวลาข้อมูลของแบบจำลอง NARX

4.2) ค่าความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองด้วย MSE ของแบบจำลองทั้ง 3 ชุด ที่มีค่าดีเลย์เท่ากับ 2 และ 4 แสดงดังรูปที่ 7



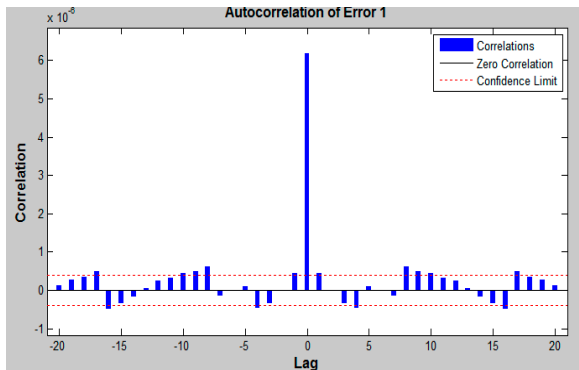
ก) กราฟแสดงความแม่นยำการทำนายโดยใช้ดีเลย์เท่ากับ 2



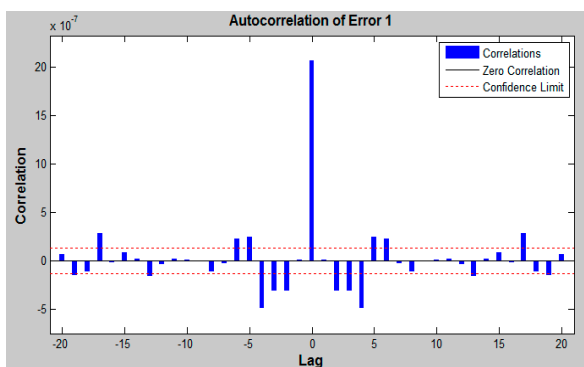
ข) กราฟแสดงความแม่นยำการทำนายโดยใช้ดีเลย์เท่ากับ 4

รูปที่ 7: ผลลัพธ์ความแม่นยำของแบบจำลอง NARX

4.3) ค่าความผิดพลาดของค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลของแบบจำลอง NARX ที่ค่าดีเลย์เท่ากับ 2 และ 4 แสดงในรูปที่ 8



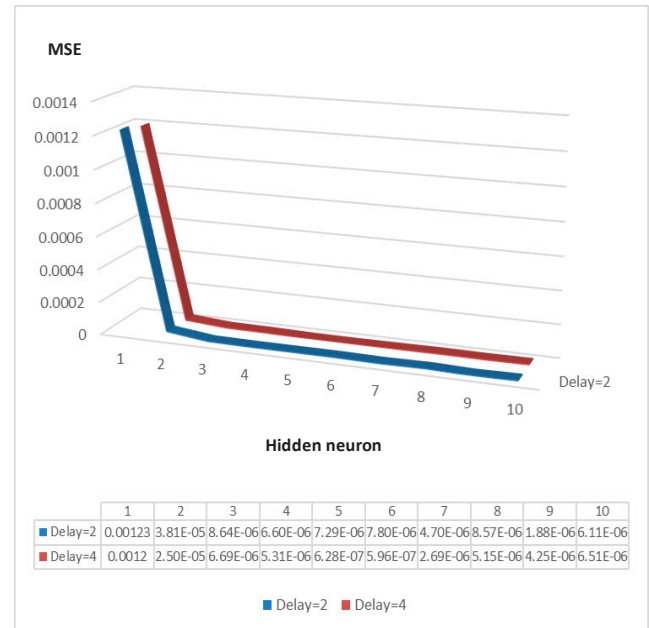
ก) ความผิดพลาดของค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลโดยใช้ดีเลย์เท่ากับ 2



ข) ความผิดพลาดของค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลโดยใช้ดีเลย์เท่ากับ 4
รูปที่ 8: ความผิดพลาดของค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลของแบบจำลอง NARX

การออกแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม NARX เพื่อวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักที่มีผลให้แบบจำลองคาดการณ์ได้แม่นยำมากที่สุดสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าดีเลย์และค่าชั้นแฝง[9] จากผลการทดลองที่ 4.1 ถึง 4.3 แบบจำลองถูกออกแบบให้มีค่าชั้นแฝงเท่ากับหมดคือ 10 การออกแบบการทดลองในครั้งนี้เน้นการศึกษาความสำคัญของค่าดีเลย์ที่มีผลต่อการทำนายโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มได้แก่ ค่าดีเลย์เท่ากับ 2 และ 4 จากผลการทดลองพิจารณาจากรูปที่ 6 7 และ 8 ค่าดีเลย์เท่ากับ 4 ส่งผลให้แบบจำลองทำนายได้แม่นยำกว่าค่าดีเลย์เท่ากับ 2 เมื่อพิจารณาจากค่า MSE ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลของการทำนายเทียบกับค่าจริง โดยแบบจำลองที่มีค่าดีเลย์เท่ากับ 2 ให้ค่าการตรวจสอบที่ดีที่สุดที่รอบ 79 จากจำนวน 85 รอบ โดยมีค่า MSE เท่ากับ 2.4619×10^{-6} ในขณะที่แบบจำลองที่มีค่าดีเลย์เท่ากับ 4 ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุดในรอบที่ 102 จากทั้งหมด 108 รอบ ซึ่งมีค่า MSE เท่ากับ 2.2691×10^{-6}

นอกเหนือจากการออกแบบการทดลองที่เน้นการวิเคราะห์ค่าดีเลย์อย่างเดียวแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ออกแบบการทดลองที่วิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้ตัวแปรทั้งค่าชั้นแฝงและค่าดีเลย์ดังตารางที่ 1 โดยค่าชั้นแฝงมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10 ที่ค่าดีเลย์ 2 และ 4 ตามลำดับ โดยค่าความแม่นยำของแต่ละแบบจำลอง NARX ประเมินโดยค่า MSE ดังกราฟเปรียบเทียบในรูปที่ 9



รูปที่ 9: กราฟแสดงความแม่นยำการทำนายโดยใช้ดีเลย์เท่ากับ 2 และ 4 โดยค่าชั้นแฝงของแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1 ถึง 10 ชั้น

ตารางที่ 1: สรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วย NARX

Number of Delays	Number of Hidden Neurons	MSE
2	1	0.00123
	2	3.81e-05
	3	8.64e-06
	4	6.60e-06
	5	7.29e-06
	6	7.80e-06
	7	4.70e-06
	8	8.57e-06
	9	1.88e-06
	10	6.11e-06
4	1	0.0012
	2	2.50e-05
	3	6.69e-06
	4	5.31e-06
	5	6.28e-07
	6	5.96e-07
	7	2.69e-06
	8	5.15e-06
	9	4.25e-06
	10	6.51e-06

5) สรุปผล

การนำโครงข่ายประสาทเทียมแบบ NARX มาใช้ในการวิเคราะห์และทำนายผลการจราจรจากข้อมูลจำลอง พบว่าค่าดีเลย์และค่าชั้นแฝงของโครงข่ายประสาทเทียมมีผลต่อความแม่นยำในการทำนายข้อมูลล่วงหน้า

ในอนาคตพัฒนาแบบจำลอง NARX ให้มีความแม่นยำมากขึ้นและนำไปพัฒนาต่อเป็นระบบ ทำเป็นแอปพลิเคชันบนมือถือ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการจราจรที่หนาแน่นได้ต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] "INRIX 2016 Global Traffic Scorecard," *INRIX*. [Online]. Available: <http://inrix.com/resources/inrix-2016-global-traffic-scorecard/>. [Accessed: 23-Mar-2017]
- [2] J. D. Farmer and J. J. Sidorowich, "Predicting chaotic time series," *Physical review letters*, vol. 59, no. 8, pp. 845–848, Aug. 1987.
- [3] E. Diaconescu, "The Use of NARX Neural Networks to Predict Chaotic Time Series," *WSEAS Transactions on computer research*, vol. 3, no. 3, pp. 182–191, Mar. 2008.
- [4] L. Banjanović-Mehmedović, I. Butigan, M. Kantardžić, and S. Kasapović, "Prediction of cooperative platooning maneuvers using NARX neural network," in *2016 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, 2016, pp. 287–292.
- [5] A. Thakur, A. Tiwari, S. Kumar, A. Jain, and J. Singh, "NARX based forecasting of petrol prices," in *2016 5th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, 2016, pp. 610–614.
- [6] L. Zhang *et al.*, "NARX models for predicting power consumption of a horizontal axis wind turbine," in *2016 UKACC 11th International Conference on Control (CONTROL)*, 2016, pp. 1–5.
- [7] A. G. R. Vaz, B. Elsinga, W. G. J. H. M. van Sark, and M. C. Brito, "An artificial neural network to assess the impact of neighbouring photovoltaic systems in power forecasting in Utrecht, the Netherlands," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 631–641, Jan. 2016.
- [8] Y. Chunshan and L. Xiaofeng, "Study and application of data mining and NARX neural networks in load forecasting," in *2015 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, 2015, vol. 01, pp. 360–364.
- [9] S.-Y. Yun, S. Namkoong, J.-H. Rho, S.-W. Shin, and J.-U. Choi, "A Performance evaluation of neural network models in traffic volume forecasting," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 27, no. 9-11, pp. 293–310, May 1998.

การคำนวณปริมาตรกองสต็อกหิน กรณีศึกษาเปรียบเทียบผลการคำนวณ จากโปรแกรม Surpac และ AutoCAD C3D

Volume Estimation of Stock Pile: A Study Case Comparing Estimation Results between Surpac and AutoCAD C3D

พงศ์ศิริ จุลพงศ์¹ วิษณุ ศรีสวัสดิ์²

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹pongsiri.j@psu.ac.th

²wikhanet.d@psu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการศึกษาความแตกต่างของผลการคำนวณปริมาตรของโปรแกรมประยุกต์ระหว่างโปรแกรม Surpac และโปรแกรม AutoCAD Civil 3D (C3D) โดยทำการรังวัดเก็บข้อมูลกองสต็อกจำนวน 7 กอง และนำข้อมูลรังวัดมาทำเป็นไฟล์ CSV (Comma Separated Values) เพื่อเป็นข้อมูลนำเข้าในการคำนวณปริมาตรของทั้ง 2 โปรแกรม แล้วทำการวิเคราะห์ผลการคำนวณปริมาตรจากโปรแกรมเปรียบเทียบกับผลการคำนวณปริมาตรด้วยวิธี Average End Area โดยพบว่าความแตกต่างของการคำนวณปริมาตรของโปรแกรม Surpac และโปรแกรม AutoCAD C3D เทียบกับการคำนวณปริมาตรด้วยวิธี Average End Area มีค่าเฉลี่ยความแตกต่างร้อยละ 3.2 และ 3.5 ตามลำดับ โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เท่ากันคือ 2.9 และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการคำนวณของทั้งสองโปรแกรมพบว่ามีความแตกต่างของผลการคำนวณร้อยละ 5.3

คำสำคัญ: ปริมาตรกองสต็อก, Surpac, C3D

ABSTRACT

This research is a study of the differential of volume estimation results between Surpac and AutoCAD Civil 3D (C3D). The survey data from 7 stockpiles were transformed to CSV (Comma Separated Values) file extension, it is the input data for volume estimation of both C3D and Surpac. The estimation results from both software were analyzed and compared with the estimation result of Average End Area method. The result show the average percentage of absolute differential between Surpac and Average End Area with AutoCAD C3D and Average End Area are 3.2% and 3.5% respectively. While the standard deviation of both case are 2.9. The comparing of estimation results between Surpac and AutoCAD C3D show the average percentage of absolute differential is around 5.3.

Keywords: Stockpile volume, Surpac, C3D

1) บทนำ

ปริมาตรและพื้นที่ผิวเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบของงานเหมืองแร่และงานโยธา ซึ่งจำเป็นต้องทราบปริมาตรเพื่อคำนวณปริมาณงานหรือ

วางแผนงานในขั้นต่อไป การที่จะทราบปริมาตรได้ต้องทำการรังวัดเพื่อระบุข้อมูลพิกัดตามลักษณะพื้นผิวของบริเวณนั้นๆ แล้วนำข้อมูลรังวัดนั้นมาคำนวณปริมาตร โดยปกติแล้วในการคำนวณปริมาตรของรูปทรงเรขาคณิตจะมีสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการคำนวณอยู่แล้ว แต่สำหรับปริมาตรของงานพื้นผิวทางด้านงานเหมืองแร่และงานโยธา รูปทรงของงานจะไม่อยู่ในรูปของรูปทรงเรขาคณิต ซึ่งไม่สามารถใช้สมการหรือสูตรคำนวณของรูปทรงเรขาคณิตทั่วไปมาคำนวณได้ โดยการคำนวณปริมาตรงานพื้นผิวทางด้านเหมืองแร่และโยธา จะใช้ลักษณะของการหาพื้นที่ภาพตัดขวางของปริมาตรนั้นๆ แล้วคำนวณปริมาตรระหว่างภาพตัดขวางแต่ละภาพนำมารวมกัน [1] ซึ่งสมการในการคำนวณแสดงดังสมการที่ 1

$$V = \frac{L}{2} (A_1 + A_n + 2(A_2 + A_3 + \dots + A_{n-1})) \quad (1)$$

โดย V คือปริมาตร A คือพื้นที่ของภาพตัดขวาง และ L คือระยะห่างระหว่างภาพตัดขวาง โดยเรียกวิธีการคำนวณปริมาตรจากสมการที่ 1 ว่า Average End Area Method ซึ่งเป็นการประยุกต์การคำนวณปริมาตรจากการหาพื้นที่แบบ Trapezoid rule ซึ่งวิธี Average End Area สามารถคำนวณปริมาตรได้ทั้งในกรณีที่จำนวนของภาพตัดขวางเป็นจำนวนคู่และจำนวนคี่ แต่ในกรณีที่มีภาพตัดขวางเป็นจำนวนคี่ สามารถคำนวณปริมาตรได้ด้วยสมการที่ 2 ซึ่งเรียกว่า Prismoidal Method [1] โดยประยุกต์จากการคำนวณพื้นที่แบบ Simpson's rule โดย n ต้องเป็นจำนวนคี่

$$V = \frac{L}{3} (A_1 + A_n + 2(A_3 + A_5 + \dots + A_{n-2}) + 4(A_2 + A_4 + \dots + A_{n-1})) \quad (2)$$

ซึ่งในปัจจุบันมีโปรแกรมประยุกต์ที่ช่วยอำนวยความสะดวกหลากหลายโปรแกรม เช่น Surpac, AutoCAD C3D, MineSight, Surfer, Micro Station ซึ่งผลการคำนวณของโปรแกรมประยุกต์เหล่านี้ให้ค่าที่มีความแตกต่างกัน งานวิจัยนี้สนใจโปรแกรม Surpac และ AutoCAD C3D ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมทางด้านงานเหมืองแร่และงานโยธา เพื่อเป็นข้อมูลในการพิจารณาปรับแก้หรือเปรียบเทียบ

ให้ใกล้เคียงกับปริมาตรจริงมากที่สุด ทั้งนี้ความถูกต้องหรือความแม่นยำในการคำนวณขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ปัจจัยสำคัญคือข้อมูลรังวัดหรือพิกัดพื้นผิว ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาเปรียบเทียบการรังวัดด้วยเครื่องมือรับส่งสัญญาณดาวเทียมและระบบระบุตำแหน่งบนพื้นผิวโลกหรือที่เรียกว่า GPS (Global Positioning System) และการรังวัดข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ UAV (Unmanned Aerial Vehicle) โดยข้อมูลรังวัดที่ได้จากการรังวัดด้วย GPS รุ่น Leica viva GS08 plus จะนำมาคำนวณปริมาตรด้วยโปรแกรม AutoCAD C3D ส่วนข้อมูลรังวัดที่ได้จาก UAV รุ่น senseFly eBee ซึ่งอยู่ในรูปของภาพถ่ายจะนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม Pix4D เพื่อให้ข้อมูลภาพถ่ายเปลี่ยนเป็นกลุ่มข้อมูลจุดแล้วจึงคำนวณปริมาตร พบว่า ผลการคำนวณปริมาตรมีความแตกต่างกัน 1.1% โดยผลการคำนวณปริมาตรด้วยโปรแกรม Pix4D ซึ่งใช้ข้อมูลรังวัดจาก UAV จะให้ผลการคำนวณที่มากกว่าโปรแกรม AutoCAD C3D ซึ่งใช้ข้อมูลรังวัดจาก GPS สำหรับในพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่การรังวัดด้วย UAV จะให้ความสะดวกรวดเร็วและแม่นยำกว่าการรังวัดด้วย GPS [2] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเปรียบเทียบการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม (Total station) รุ่น Leica TPS 1200 กับการรังวัดด้วยสแกนเนอร์สามมิติ (Laser scanner) รุ่น Leica HDS 3000 โดยการนำข้อมูลรังวัดมาประมวลผลกับโปรแกรมประยุกต์สามโปรแกรมคือ Geo Geograf และ Cyclone พบว่าการรังวัดทั้งสองวิธีให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน แต่การรังวัดด้วยสแกนเนอร์สามมิติจะให้ความสะดวกรวดเร็ว แต่ก็มีข้อเสียกรณีที่พื้นที่รังวัดมีขนาดใหญ่จะทำให้ข้อมูลที่ได้จากการรังวัดซึ่งอยู่ในรูปเมฆจุด (point cloud) หรือกลุ่มข้อมูลจุดที่มีปริมาณมากส่งผลกระทบต่อการทำงานเข้าและอาจหยุดหรือค้างในการประมวลผล ในส่วนของการเปรียบเทียบผลการคำนวณของทั้งสามโปรแกรมพบว่า ผลการคำนวณของโปรแกรม Geo และ Geograf ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน แต่ทั้งสองโปรแกรมให้ผลการคำนวณที่ค่อนข้างแตกต่างจากโปรแกรม Cyclone [3] ยังมีเครื่องมือรังวัดอีกประเภทที่ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบผลการตรวจสอบปริมาตรกองสโตค คือ Imaging Station (IS) โดยในการศึกษาได้มีการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรมกับปริมาตรกองสโตคที่ทราบค่า ซึ่งในการเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาตรของกองสโตคนั้นได้นำข้อมูลรังวัดจาก IS มาคำนวณด้วยโปรแกรม Image Master และข้อมูลรังวัดที่ได้จากกล้องประมวลผลรวมมาคำนวณด้วยโปรแกรม 12D พบว่าการรังวัดด้วย IS ซึ่งนำข้อมูลไปคำนวณด้วยโปรแกรม Image Master ให้ผลการคำนวณที่แตกต่างจากปริมาตรจริง 0.05% ส่วนการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมที่นำข้อมูลไปคำนวณปริมาตรด้วยโปรแกรม 12D ให้ผลการคำนวณที่แตกต่างจากปริมาตรจริง 5.34% [4]

2) วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

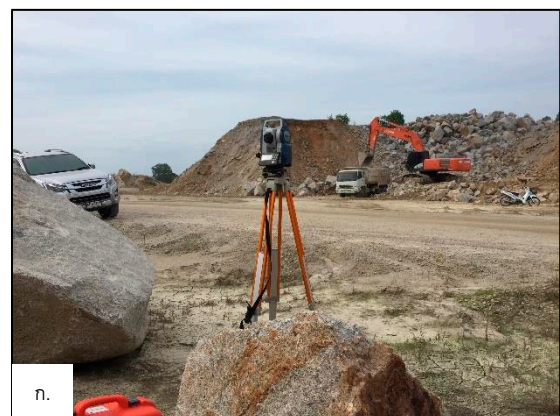
การศึกษาความแตกต่างของผลการคำนวณปริมาตรกองสโตคโดยโปรแกรม Surpac และ AutoCAD C3D ในบทความวิจัยฉบับนี้ ใช้ข้อมูลการรังวัดเป็นข้อมูลในการสร้างพื้นผิวของทั้งสองโปรแกรม โดยข้อมูลรังวัดที่ได้จะถูกทำให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์นามสกุล CSV (Comma Separated Values) ซึ่งลำดับของสแตมข้อมูลคือ ลำดับ ลำดับค่าพิกัดเหนือ ลำดับค่าพิกัดตะวันออก และลำดับค่าระดับ (ตารางที่ 1) โดยทำการ

รังวัดข้อมูลด้วยกล้องประมวลผลรวม (Total station) รุ่น Sokkia CX101 ที่บริษัท เหมืองแร่ลิวง จำกัด อำเภอจะนะ จังหวัดสงขลา จำนวน 7 กอง โดยตัวอย่างเครื่องมือรังวัดและลักษณะกองสโตคแสดงไว้ในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 : รูปแบบการเรียงลำดับข้อมูลรังวัดของไฟล์นามสกุล CSV (กรณีเปิดไฟล์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel)

สแตมที่ 1	สแตมที่ 2	สแตมที่ 3	สแตมที่ 4
ลำดับของข้อมูล	ค่าพิกัดเหนือ	ค่าพิกัดตะวันออก	ค่าระดับ

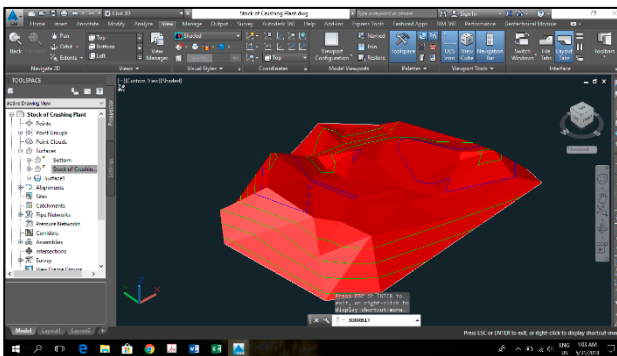
ข้อมูลรังวัดกองสโตคทั้ง 7 กองที่ถูกทำให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ข้อมูลชนิด CSV จะนำมาเป็นข้อมูลตั้งต้นในการสร้างพื้นผิวของโปรแกรม Surpac และ AutoCAD C3D โดยในการคำนวณปริมาตรของโปรแกรม AutoCAD C3D จะใช้การคำนวณปริมาตรโดยการสร้างพื้นผิวขึ้นมาจำนวน 2 พื้นผิว (Two surface method) [5] โดยพื้นผิวแรกเป็นพื้นผิวที่สร้างจากข้อมูลรังวัดที่ทำการรังวัดบริเวณกองสโตค ส่วนพื้นผิวที่สองจะสร้างจากข้อมูลรังวัดที่เป็นระดับพื้นล่างของกองสโตค (รูปที่ 2) และผลที่ได้จากการคำนวณปริมาตรของโปรแกรมจะถูกส่งออกเป็นไฟล์ PDF โดยในการสร้างพื้นผิวเพื่อคำนวณปริมาตรนั้นจะทำการกำหนดให้โปรแกรมสร้างพื้นผิวแบบ TIN (Triangulate Irregular Network) เพื่อให้พื้นผิวที่ได้มีสมบัติเดียวกับพื้นผิว DTM (Digital Terrain Model) ของโปรแกรม Surpac ส่วนการคำนวณปริมาตรของโปรแกรม Surpac จะทำโดยการสร้าง DTM จากข้อมูลรังวัดที่อยู่ในรูปแบบไฟล์ CSV เช่นเดียวกับกับโปรแกรม AutoCAD C3D ซึ่งพื้นผิวที่ได้จากโปรแกรม Surpac จะเป็นลักษณะพื้นผิวเปิด จากนั้นจึงสร้าง DTM เพิ่มเติมในบริเวณด้านล่างของกองสโตค (ระดับพื้นของกองสโตค) เพื่อให้พื้นที่ด้านล่างของ DTM เป็นรูปทรงที่ปิดสนิท (รูปที่ 3) และผลที่ได้จากการคำนวณปริมาตรของโปรแกรมจะถูกส่งออกเป็นไฟล์ PDF เช่นเดียวกัน



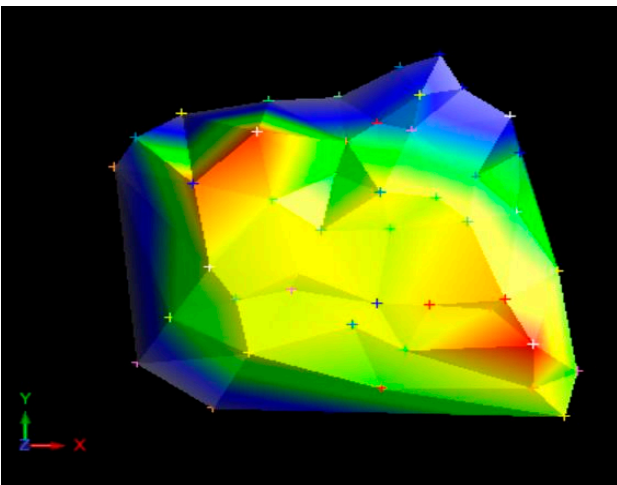
รูปที่ 1 : ก. เครื่องมือรังวัดและกองสโตคหินหน้าเหมือง



รูปที่ 1 : ข. กองสต็อกหินคลุก 2



รูปที่ 2 : การคำนวณปริมาตรโดยใช้โปรแกรม C3D



รูปที่ 3 : การคำนวณปริมาตรโดยใช้โปรแกรม Surpac

ผลการคำนวณของทั้งสองโปรแกรมจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณปริมาตรโดยการหาพื้นที่ของเส้นชั้นความสูงแต่ละเส้น โดยให้โปรแกรมประยุกต์ทั้งสองโปรแกรมแสดงเส้นชั้นความสูงและค่าพื้นที่ภายในเส้นชั้นความสูงแต่ละเส้นซึ่งจะกำหนดระยะห่างของเส้นชั้นความสูงที่ 1 เมตร หรือกล่าวอีกนัยคือการสร้างภาพตัดขวางในแนว

ระนาบ (Horizontal Cross Section) แล้วคำนวณปริมาตรด้วยวิธี Average End Area

3) ผลการทดลอง

จากการประมวลผลในการคำนวณปริมาตรของโปรแกรมประยุกต์ (ตารางที่ 2) ในส่วนของโปรแกรม Surpac เมื่อเทียบผลการคำนวณปริมาตรกับวิธี Average End Area พบว่ามีความแตกต่างสูงสุดที่ร้อยละ 7.6 และความแตกต่างน้อยสุดอยู่ที่ร้อยละ 0.2 โดยมีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ร้อยละ 3.2 และ 2.9 ตามลำดับ ในส่วนของโปรแกรม AutoCAD C3D เมื่อเทียบผลการคำนวณปริมาตรกับการคำนวณปริมาตรด้วยวิธี Average End Area พบว่ามีความแตกต่างกันสูงสุดที่ร้อยละ 8.1 และน้อยสุดที่ร้อยละ 0.2 โดยมีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ร้อยละ 3.5 และ 2.9 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการคำนวณของทั้งสองโปรแกรม จะเห็นว่าปริมาตรกองสต็อกที่ได้มีความแตกต่างกันเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 5.3 โดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 12.7 ขณะที่ความแตกต่างน้อยสุดอยู่ที่ร้อยละ 0.5 ขณะที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 4.6 ดังตารางที่ 3

เมื่อพิจารณาถึงร้อยละของความแตกต่างของผลการคำนวณของทั้งสองโปรแกรมประยุกต์กับค่าความเป็นทรงกลม (Sphericity) ซึ่งถูกคำนวณตามสมการที่ 3

$$Sphericity = \frac{\pi^{\frac{1}{3}}(6V_p)^{\frac{2}{3}}}{A_p} \quad (3)$$

โดย V_p คือปริมาตรของกองสต็อกและ A_p คือพื้นที่ผิวของกองสต็อก [6]

จากค่าความเป็นทรงกลมของกองสต็อกดังรูปที่ 4 จะเห็นว่าค่าความเป็นทรงกลมของกองสต็อกระหว่าง 0.362 – 0.548 และร้อยละความแตกต่างของผลการคำนวณไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นทรงกลมของกองสต็อก ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความแตกต่างของผลการคำนวณปริมาตรของทั้งสองโปรแกรมประยุกต์กับพื้นที่ผิวของกองสต็อกดังแสดงในรูปที่ 5 กล่าวคือพื้นที่ผิวและความเป็นทรงกลมหรือความซับซ้อนของรูปทรงกองสต็อกไม่ได้มีผลต่อความแตกต่างของผลการคำนวณปริมาตรของทั้งสองโปรแกรม

4) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จะเห็นว่าในการคำนวณปริมาตรโดยใช้โปรแกรม Surpac และ AutoCAD C3D ผลที่ได้จากการประมวลผลจะมีความแตกต่างของผลการคำนวณทั้งที่ข้อมูลในการนำเข้า (Input data) เป็นข้อมูลเดียวกัน ซึ่งปริมาตรจากการคำนวณระหว่างโปรแกรม Surpac และ AutoCAD C3D อาจจะน้อยกว่าหรือมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกัน โดยงานวิจัยนี้วิเคราะห์ความแตกต่างให้อยู่ในลักษณะค่าสัมบูรณ์เพื่อพิจารณาค่าร้อยละของความแตกต่างเฉลี่ยจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาตรของโปรแกรมประยุกต์

ตารางที่ 2 : ผลการคำนวณปริมาตรกองสัตของโปรแกรมประยุกต์ Surpac และ AutoCAD C3D
เทียบกับการคำนวณปริมาตรแบบ Average End Area

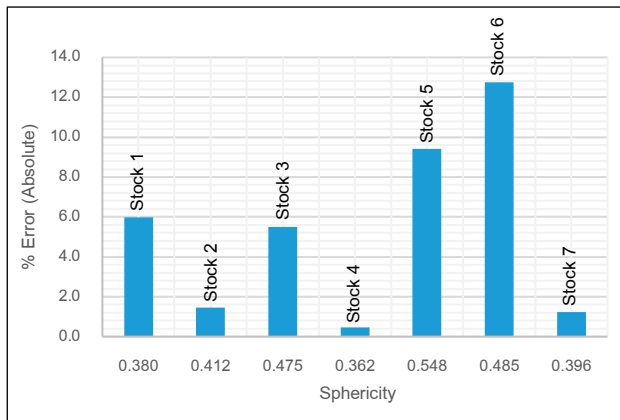
ลำดับที่ของ กองสัต	Surpac			C3D			หมายเหตุ
	Volume by Surpac (m ³)	Volume by Average End Area (m ³)	Abs. Error (%)	Volume by C3D (m ³)	Volume by Average End Area (m ³)	Abs. Error (%)	
กองสัต 1	13,596	12,632	7.6	12,783	11,981	6.7	สัตดินใหญ่หน้า เหมือง
กองสัต 2	2,564	2,394	7.1	2,527	2,486	1.6	สัตดินโคลง 1
กองสัต 3	10,046	9,818	2.3	10,599	10,580	0.2	สัตดินอุโมงค์
กองสัต 4	34,046	34,115	0.2	34,206	33,448	2.3	สัตดินฝุ่น
กองสัต 5	1,021	1,035	1.4	925	959	3.5	สัตทรายกองที่ 1
กองสัต 6	416	406	2.5	363	395	8.1	สัตทรายกองที่ 2
กองสัต 7	34,189	34,768	1.7	33,764	33,171	1.8	สัตดินโคลง 2
ค่าเฉลี่ย			3.2				3.5
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			2.9				2.9

ทั้งสองโปรแกรมพบว่า ปริมาตรที่คำนวณได้จะมีค่าเฉลี่ยร้อยละของความแตกต่างประมาณ 5.3 โดยพบว่าค่าความแตกต่างของผลการคำนวณปริมาตรของทั้งสองโปรแกรมประยุกต์ ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณปริมาตรของโปรแกรม AutoCAD C3D เกิดจากการแบ่งปริมาตรของกองสัตเป็นปริซึมสามเหลี่ยมจำนวน n ตามลักษณะของพื้นผิว

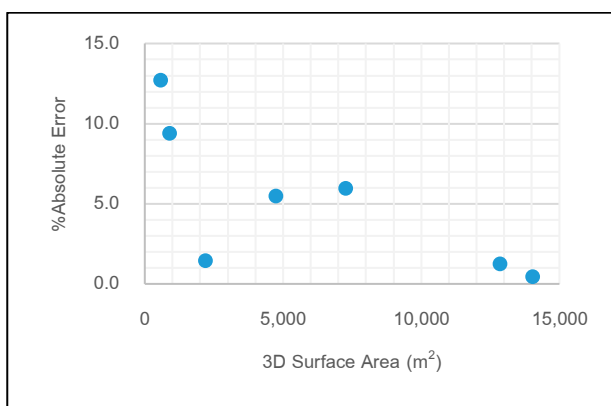
ด้านบนกับพื้นผิวด้านล่างเทียบกับพื้นผิวฐาน (base surface) [5] แล้วคำนวณปริมาตรจากแท่งปริซึมสามเหลี่ยมแต่ละแท่งรวมกัน ซึ่งทำให้ปริมาตรที่คำนวณได้ ไม่ขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของกองสัตซึ่งเป็นหลักการเดียวกันกับการคำนวณปริมาตรของโปรแกรม Surpac

ตารางที่ 3 : ร้อยละความแตกต่างผลการคำนวณของทั้งสองโปรแกรม

ลำดับที่ของกองสัต	Absolute Different between Surpac and AutoCAD C3D (m ³)	3D Surface area by Surpac (m ²)	%Error (Absolute Different/Volume by Surpac)	หมายเหตุ
กองสัต 1	813	7,253	6.0	สัตดินใหญ่หน้าเหมือง
กองสัต 2	37	2,199	1.4	สัตดินโคลง 1
กองสัต 3	553	4,745	5.5	สัตดินอุโมงค์
กองสัต 4	160	14,034	0.5	สัตดินฝุ่น
กองสัต 5	96	894	9.4	สัตทรายกองที่ 1
กองสัต 6	53	556	12.7	สัตทรายกองที่ 2
กองสัต 7	425	12,851	1.2	สัตดินโคลง 2
ค่าเฉลี่ย			5.3	
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			4.6	



รูปที่ 4 : ร้อยละของความแตกต่างของผลการคำนวณปริมาตร กับค่าความเป็นทรงกลมของกองสต็อก



รูปที่ 5 : ความสัมพันธ์ของร้อยละของความแตกต่างของผลการคำนวณปริมาตร กับพื้นที่ผิวกองสต็อก

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท เหมืองแร่ลิวง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บข้อมูลรังวัดกองสต็อคหิน ขอบคุนภาควิชาเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือรังวัดตลอดจนการใช้โปรแกรมประยุกต์ทั้งสองโปรแกรม และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ในการสนับสนุนทุนพัฒนานักวิจัย เลขที่ ENG-60-2-7-01-0230S

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. T. Crawford and W. A. Hustralid, *Open Pit Mine Planning and Design*. New York: Society of Mining Engineers, 1979.
- [2] P. L. Raeva, S. L. Filipova, and D. G. Filipov, "Volume Computation of a Stockpile - a Study Case Comparing GPS and Uav Measurements in AN Open Pit Quarry," *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 41B1, pp. 999–1004, Jun. 2016.
- [3] B. Pflipsen, "Volume computation : a comparison of total station versus laser scanner and different software," MSc thesis (Geomagnetic), University of Gävle, Department of Technology and Built Environment, Sweden, 2007.
- [4] B. H. Hazida and M. S. Shaharuddin, "Measuring Volume of Stockpile using Imaging Station," *Geoinformation Science Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 15–32, 2011.

- [5] S. LABANT, H. Stankova, and R. Weiss, "Geodetic Determining of Stockpile Volume of Mineral Excavated in Open Pit Mine," *GeoScience Engineering*, vol. 59, no. 1, pp. 30–40, 2013.
- [6] H. Wadell, "Sphericity and Roundness of Rock Particles," *The Journal of Geology*, vol. 41, no. 3, pp. 310–331, 1933.

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2561

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความเพื่อลงตีพิมพ์

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นวารสารวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ของสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น บทความที่นำเสนอจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษ ตามรูปแบบที่กำหนด และพร้อมที่จะนำไปตีพิมพ์ได้ทันที การเสนอบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร มีรายละเอียดดังนี้

1. หลักเกณฑ์การพิจารณาบทความเพื่อตีพิมพ์

1.1 เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ หรือไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่นๆ และไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อนทั้งในประเทศและต่างประเทศ หากตรวจสอบพบว่ามีงานตีพิมพ์ซ้ำซ้อน ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

1.2 เป็นบทความที่แสดงให้เห็นถึงความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ มีคุณค่าทางวิชาการ มีความสมบูรณ์ของเนื้อหา และมีความถูกต้องตามหลักวิชาการ

1.3 บทความที่ได้รับการตีพิมพ์จะต้องผ่านการประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer review) อย่างน้อย 2 ท่านต่อบทความ จากจำนวนผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความทั้งหมด 3 ท่าน ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิอาจให้ผู้เขียนแก้ไขเพิ่มเติมหรือปรับปรุงบทความให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

1.4 กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขรูปแบบบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ตามที่เห็นสมควร

1.5 บทความ ข้อความ ภาพประกอบ และตารางประกอบ ที่ตีพิมพ์ลงวารสารเป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใดๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

1.6 ต้องเป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ ไม่ลอกเลียน หรือตัดทอนข้อความของผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

1.7 หากเป็นงานแปลหรือเรียบเรียงจากภาษาต่างประเทศ ต้องมีหลักฐานการอนุญาตให้ตีพิมพ์เป็นลายลักษณ์อักษรจากเจ้าของลิขสิทธิ์

1.8 ต้องมีการอ้างอิงที่ถูกต้อง เหมาะสมก่อนการตีพิมพ์ ซึ่งเป็นความรับผิดชอบของเจ้าของผลงาน

1.9 บทความที่ส่งถึงกองบรรณาธิการ ขอสงวนสิทธิ์ที่จะไม่ส่งคืนผู้เขียน

2. ประเภทของบทความที่รับพิจารณาลงตีพิมพ์

2.1 นิพนธ์ต้นฉบับที่เป็นบทความวิจัย ประกอบด้วย บทคัดย่อ บทนำ วัตถุประสงค์ของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย สรุปและอภิปรายผล และเอกสารอ้างอิง

2.2 นิพนธ์ต้นฉบับที่เป็นบทความวิชาการ ประกอบด้วย บทคัดย่อ บทนำ เนื้อหา สรุปผล และเอกสารอ้างอิง

หมายเหตุ : บทความภาษาไทยต้องมีบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยใช้บทคัดย่อภาษาไทยก่อนบทคัดย่อภาษาอังกฤษ บทความภาษาอังกฤษไม่ต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย

* เอกสารอ้างอิง เป็นการบอกรายการแหล่งอ้างอิงที่มีการอ้างอิงในเนื้อหาของงานเขียน

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2561

3. ข้อกำหนดการจัดพิมพ์ต้นฉบับบทความ

ผู้เขียนต้องจัดพิมพ์บทความตามข้อกำหนดเพื่อให้มีรูปแบบการตีพิมพ์เป็นมาตรฐานแบบเดียวกัน ดังนี้

3.1 ขนาดของกระดาษ ให้ใช้ขนาด A4

3.2 จำนวนหน้า ความยาวไม่น้อยกว่า 4 หน้ากระดาษ A4 และไม่เกิน 10 หน้ากระดาษ A4

3.3 กรอบของข้อความ ระยะห่างของขอบกระดาษด้านบน 2.5 ซม. (0.98") ด้านล่าง 2 ซม. (0.79") ด้านซ้าย 2 ซม. (0.79") ด้านขวา 2 ซม. (0.79") รูปแบบการพิมพ์เป็นแบบ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์ กว้าง 8.2 ซม. (3.23") ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.6 ซม. (0.24")

3.4 ระยะห่างระหว่างบรรทัด หนึ่งช่วงบรรทัดของเครื่องคอมพิวเตอร์ (Single)

3.5 ตัวอักษร รูปแบบของตัวอักษรให้ใช้บราววัลเลีย นิว (Browalia New) สำหรับบทความที่มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษร่วมกัน และบทความที่เป็นภาษาอังกฤษล้วนให้ใช้รูปแบบตัวอักษรไทมส์ นิว โรมัน (Times New Roman)

3.6 รายละเอียดต่าง ๆ ของบทความ กำหนดดังนี้

❖ ชื่อเรื่อง (Title)

- บทความภาษาไทย ขนาด 22 ตัวหนา กำหนดกึ่งกลาง
- บทความภาษาอังกฤษ ขนาด 16 ตัวหนา กำหนดกึ่งกลาง

❖ ชื่อผู้เขียน (Author)

- บทความภาษาไทย ขนาด 13 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง
- บทความภาษาอังกฤษ ขนาด 11 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง

❖ ที่ติดต่อผู้เขียน

- บทความภาษาไทย ขนาด 12 ตัวเอน กำหนดกึ่งกลาง
- บทความภาษาอังกฤษ ขนาด 10 ตัวเอน กำหนดกึ่งกลาง

❖ E-mail

- บทความภาษาไทย ใช้ตัวอักษร Courier ขนาด 9 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง
- บทความภาษาอังกฤษ ใช้ตัวอักษร Courier ขนาด 9 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง

❖ บทคัดย่อ (Abstract)

- ชื่อ "บทคัดย่อ" ขนาด 11 ตัวหนาและเอน กำหนดชิดซ้าย ข้อความในบทคัดย่อ ขนาด 11
- ชื่อ "Abstract" ขนาด 9 ตัวหนาและเอน กำหนดชิดซ้าย ข้อความใน Abstract ขนาด 9 ตัวหนา

❖ คำสำคัญ (Keywords)

ให้ใส่คำสำคัญ 4-5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนอ โดยให้จัดพิมพ์ใต้บทคัดย่อ

- ชื่อ "คำสำคัญ" ขนาด 11 ตัวหนาและเอน กำหนดชิดซ้าย ข้อความในคำสำคัญ ขนาด 11
- ชื่อ "Keywords" ขนาด 9 ตัวหนาและเอน กำหนดชิดซ้าย ข้อความใน Keywords ขนาด 9 ตัวหนา

❖ รูปแบบการพิมพ์เนื้อหาของบทความ

- หัวข้อหลัก ประกอบด้วย บทนำ (Introduction) วัตถุประสงค์ของการวิจัย (Objectives) วิธีดำเนินการวิจัย (Methods) ผลการวิจัย (Results) สรุปและอภิปรายผล (Conclusions and Discussion) เอกสารอ้างอิง (References) หรือบรรณานุกรม (Bibliography)

□ บทความภาษาไทย ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง

□ บทความภาษาอังกฤษ ขนาด 10 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2561

- หัวข้อรอง ระดับที่ 1
 - ☐ บทความภาษาไทย ขนาด 12 ตัวเอน กำหนดขีดซ้าย
 - ☐ บทความภาษาอังกฤษ ขนาด 10 ตัวเอน กำหนดขีดซ้าย
- หัวข้อรอง ระดับที่ 2
 - ☐ บทความภาษาไทย ขนาด 12 ตัวเอน กำหนดขีดซ้ายและเลื่อนเข้ามา 0.5 cm
 - ☐ บทความภาษาอังกฤษ ขนาด 10 ตัวเอน กำหนดขีดซ้ายและเลื่อนเข้ามา 0.5 cm
- เนื้อเรื่อง
 - ☐ บทความภาษาไทย ขนาด 12 ตัวธรรมดา
 - ☐ บทความภาษาอังกฤษ ขนาด 10 ตัวธรรมดา
- ชื่อตาราง
 - ☐ บทความภาษาไทย ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อเหนือตาราง
 - ☐ บทความภาษาอังกฤษ ขนาด 10 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อเหนือตาราง
- หัวข้อในตาราง
 - ☐ บทความภาษาไทย ขนาด 11 ตัวหนา กำหนดกึ่งกลาง
 - ☐ บทความภาษาอังกฤษ ขนาด 9 ตัวหนา กำหนดกึ่งกลาง
- เนื้อหาในตาราง
 - ☐ บทความภาษาไทย ขนาด 11 ตัวธรรมดา
 - ☐ บทความภาษาอังกฤษ ขนาด 9 ตัวธรรมดา
- ชื่อภาพประกอบ
 - ☐ บทความภาษาไทย ขนาด 10 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อใต้ภาพ
 - ☐ บทความภาษาอังกฤษ ขนาด 8 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อใต้ภาพ
- เนื้อหาในภาพประกอบ
 - ☐ บทความภาษาไทย ขนาด 11 ตัวธรรมดา
 - ☐ ภาษาอังกฤษ ขนาด 9 ตัวธรรมดา

3.7 เอกสารอ้างอิง

- ❖ การอ้างอิงในบทความใช้การอ้างอิงแบบตัวเลข ตามมาตรฐานสากล โดยใช้หมายเลขในเครื่องหมายก้ามปู [] โดยมีตัวอย่างการเขียน เช่น [1] หรือ [2] หรือ [1], [2] หรือ [1], [3]–[8] หรือ [9], [10], [15], [16] หากมีการอ้างอิงซ้ำบทความเดิมให้ใช้หมายเลขเดิม
 - ❖ การอ้างอิงท้ายบทความ จะต้องเรียงตามลำดับบทความที่เขียนอ้างอิงในเนื้อเรื่อง และใช้การอ้างอิงตามรูปแบบของ IEEE สามารถศึกษาการเขียนเอกสารอ้างอิงตามรูปแบบที่กำหนดได้ที่ https://www.ieee.org/conferences_events/conferences/publishing/style_references_manual.pdf ซึ่งจำแนกรูปแบบการเขียนอ้างอิงส่วนท้ายบทความตามประเภทต่างๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้
 - บทความภาษาไทย ใช้ตัวอักษรบรรทัดเล็ก นิว (Browalia New) ขนาด 10 ตัวธรรมดา
- การอ้างอิงจากบทความในวารสาร**
- [1] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อบทความ,” ชื่อวารสาร, ปีที่, ฉบับที่, เลขหน้าบทความที่อ้างอิง, ปีที่พิมพ์.
 - [2] D. L. K. Tay and C. T. Tam, “In situ investigation of the strength of deteriorated concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 10, pp. 17-26, 1996.

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2561

- [3] นิตยา เงินประเสริฐศรี, “องค์การแนวนอน,” *วารสารสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 15, หน้า 37-42, มกราคม-มิถุนายน, 2554

การอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์/สารนิพนธ์

- [4] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์,” วิทยานิพนธ์หรือสารนิพนธ์ ชื่อย่อปริญญา (สาขา), ชื่อมหาวิทยาลัย, ชื่อเมือง, ชื่อประเทศ, ปีที่พิมพ์.
- [5] ปรีนทร เต็มญารศิริ, “การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตงและไผ่หมาจู,” วิทยานิพนธ์ วท.บ. (เคมี), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2551.
- [6] J.O. Williams, “Narrow-band analyzer,” Ph.D. dissertation (Electrical Engineering), Harvard University, Cambridge, MA, USA, 1993.

การอ้างอิงจากการประชุมทางวิชาการ

- [7] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อบทความ,” ชื่อการประชุมวิชาการ, ชื่อย่อการประชุมวิชาการ, ชื่อสถานที่จัดงาน, วัน เดือน ปี ที่จัดงาน, เลขหน้า.
- [8] นิตยา เงินประเสริฐศรี, “ผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดรู Orifice และ Nozzle ต่อคุณสมบัติการวัดของแอร์เกจ,” *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, MENETT 28*, จังหวัดขอนแก่น, 15-17 ตุลาคม 2557 หน้า 316.
- [9] S. Vinta, “Analysis of data to predict warranty cost for various regions,” *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, RAM 2009*, Fort Worth, TX, USA, January 26-29, 2009, pp. 78-82.

➤ **บทความภาษาอังกฤษ ใช้ตัวอักษรไทป์ นิว โรมัน (Times New Roman) ขนาด 8 ตัวธรรมดา**

Books

- [1] J.K. Author, “Title of chapter in the book,” in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, Country if not USA: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx
- [2] L. Stein, “Random patterns,” in *Computers and You*, J.S. Brake, Ed. New York: Wiley, 1994, pp. 55-70.

Conference Technical Articles

- [3] J.K. Author, “Title of paper,” in *Unabbreviated Name of Conf.*, City of Conf., Abbrev. State (if given), year, pp. xxx-xxx
- [4] J. K. Pink, “Article Title,” in *Proc. International Conference on Green Computing*, Paris, France, Jan. 2012, pp. 50-55.

Thesis and Dissertations

- [5] J.K. Author, “Title of Thesis,” M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.
- [6] J.K. Author, “Title of dissertation,” Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.
- [7] N. Kawasaki, “Parametric Study of Thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow,” M.S.thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2561

ตารางแสดงรูปแบบตัวอักษร

ภาษาไทย				รายการ	ภาษาอังกฤษ			
แบบอักษร	ขนาด	รูปแบบ	ตำแหน่ง		แบบอักษร	ขนาด	รูปแบบ	ตำแหน่ง
Browalia New	22	Bold	Center	ชื่อบทความ (Title)	Times New Roman	16	Bold	Center
Browalia New	13	-	Center	ชื่อ-นามสกุล ผู้เขียน (Author name and last name)	Times New Roman	11	-	Center
Browalia New	12	Italic	Center	ที่ติดต่อผู้เขียน (Address)	Times New Roman	10	Italic	Center
Courier	9	-	Center	e-mail	Courier	9	-	Center
Browalia New	11	Bold	Left	บทคัดย่อ (Abstract)	Times New Roman	9	Bold	Left
Browalia New	12	-	Center	หัวข้อหลัก (Main section)	Times New Roman	10	-	Center
Browalia New	12	Italic	Left	หัวข้อรอง ระดับที่ 1 (First-level sub section)	Times New Roman	10	Italic	Left
Browalia New	12	Italic	0.5 cm	หัวข้อรอง ระดับที่ 2 (Second-level sub section)	Times New Roman	10	Italic	0.5 cm
Browalia New	12	-	-	เนื้อเรื่อง (Body text)	Times New Roman	10	-	-
Browalia New	12	-	Center	ชื่อตาราง (เหนือตาราง) (Table name (above the table))	Times New Roman	10	-	Center
Browalia New	11	Bold	Center	หัวข้อในตาราง (Subjects in the table)	Times New Roman	9	Bold	Center
Browalia New	11	-	-	เนื้อหาในตาราง (Data in the table)	Times New Roman	9	-	-
Browalia New	10	-	Center	ชื่อรูปประกอบ (ใต้รูป) (Figure name (under the figure))	Times New Roman	8	-	Center
Browalia New	11	-	-	เนื้อหาในรูปประกอบ (Data in the figure)	Times New Roman	9	-	-
Browalia New	10	-	-	อ้างอิง (References)	Times New Roman	8	-	-

4. วิธีการจัดส่งบทความ

4.1 ผู้เขียนจะต้องจัดส่งบทความต้นฉบับจำนวน 1 ชุดด้วยไฟล์ .doc หรือ .docx และ .pdf พร้อมแนบแบบฟอร์มการส่งบทความ วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น จำนวน 1 ชุด ทางอีเมล journal@tni.ac.th

4.2 สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติม และดาวน์โหลดแบบฟอร์มประกอบการส่งบทความได้ที่ <http://journal.tni.ac.th>

4.3 ส่งบทความออนไลน์ได้ที่ http://it.tni.ac.th/tni_conf/openconf.php

เมื่อกองบรรณาธิการได้รับบทความจะดำเนินการส่งบทความเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความและแจ้งผลการพิจารณาให้ผู้เขียนบทความทราบ สำหรับบทความที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิแล้วจะได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารเพื่อเผยแพร่ต่อไป

หมายเหตุ

1. ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2562 เป็นต้นไป วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น จะดำเนินการจัดการวารสารด้วยระบบ Thai Journals Online (ThaiJO) ท่านสามารถส่งบทความได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal/index>

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2561

2. ตามประกาศสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ฉบับที่ 080/2561 ลงวันที่ 7 กันยายน 2561 เรื่อง การเก็บค่าสมาชิกรายปี ค่าอ่านประเมินบทความวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิ และค่าตีพิมพ์บทความวิชาการลงในวารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น มีการกำหนดอัตราค่าใช้จ่าย ดังนี้

2.1 ค่าสมาชิกวารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อัตรา 500 บาท ต่อปี

2.2 ค่าอ่านประเมินบทความวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิของวารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น จ่ายเมื่อส่งบทความวิชาการ และผ่านการพิจารณาเบื้องต้นจากกองบรรณาธิการ อัตรา 2,500 บาท ต่อ บทความวิชาการ 1 เรื่อง

2.3 ค่าตีพิมพ์บทความวิชาการในวารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น จ่ายเมื่อได้รับความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิ อัตรา 1,500 บาท ต่อ บทความวิชาการ 1 เรื่อง

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2561



แบบฟอร์มการส่งบทความ วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ชื่อเรื่อง (ภาษาไทย) :

ชื่อเรื่อง (ภาษาอังกฤษ) :

ผู้เขียน (ลำดับที่ 1)

ชื่อ-สกุล :

ตำแหน่ง :

ที่อยู่หน่วยงาน :

โทรศัพท์.....โทรสาร.....e-mail.....

ผู้เขียน (ลำดับที่ 2)

ชื่อ-สกุล :

ตำแหน่ง :

ที่อยู่หน่วยงาน :

โทรศัพท์.....โทรสาร.....e-mail.....

ผู้เขียน (ลำดับที่ 3)

ชื่อ-สกุล :

ตำแหน่ง :

ที่อยู่หน่วยงาน :

โทรศัพท์.....โทรสาร.....e-mail.....

ประเภทบทความที่เสนอ

☐ บทความวิชาการ

☐ บทความวิจัย

“ข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วม (ถ้ามี) ขอรับรองว่า บทความที่เสนอมานี้ ยังไม่เคยได้รับการตีพิมพ์และไม่ได้อยู่ระหว่างกระบวนการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารหรือสิ่งตีพิมพ์อื่นใด ข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วม ขอมอบลิขสิทธิ์บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ให้แก่สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น และยอมรับในหลักเกณฑ์การพิจารณาต้นฉบับ โดยยินยอมให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์พิจารณาตรวจแก้ไขต้นฉบับได้ตามที่เห็นสมควร ทั้งนี้หากในบทความมีข้อความ ตาราง หรือภาพประกอบ ที่จะละเมิดลิขสิทธิ์ของบุคคลหรือหน่วยงานอื่น ให้ถือเป็นความรับผิดชอบของข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมแต่เพียงฝ่ายเดียว”

ลงชื่อ.....

(.....)

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

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2561

"สร้างนักคิด ผลิตนักปฏิบัติ สร้างนักประดิษฐ์ ผลิตนักบริหาร"

คณะวิศวกรรมศาสตร์

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ (Automotive Engineering, B.Eng. : AE)
- หลักสูตรวิศวกรรมการผลิต (Production Engineering, B.Eng. : PE)
- หลักสูตรวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ (Computer Engineering, B.Eng. : CE)
- หลักสูตรวิศวกรรมอุตสาหกรรม (Industrial Engineering, B.Eng. : IE)
- หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering, B.Eng. : EE)
- International Program (Digital Engineering, B.Eng. : DGE)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

- หลักสูตรเทคโนโลยีวิศวกรรม (Engineering Technology, M.Eng. : MET)

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology, B.Sc. : IT)
- หลักสูตรเทคโนโลยีมัลติมีเดีย (Multimedia Technology, B.Sc. : MT)
- หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศทางธุรกิจ (Business Information Technology, B.Sc. : BI)
- หลักสูตรเทคโนโลยีดิจิทัลทางสื่อสารมวลชน (Digital Technology in Mass Communication, B.Sc. : DC)
- International Program (Data Science and Analytics, B.Sc. : DSA)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

- หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology, M.Sc. : MIT)

คณะบริหารธุรกิจ

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรมการผลิต (Management of Production Technology and Innovation, B.B.A. : MI)
- หลักสูตรบริหารธุรกิจญี่ปุ่น (Business Administration (Japanese), B.B.A. : BJ)
- หลักสูตรการจัดการธุรกิจระหว่างประเทศ (International Business Management, B.B.A. : IB)
- หลักสูตรการบัญชี (Accountancy, B.Acc. : AC)
- หลักสูตรการจัดการทรัพยากรมนุษย์แบบญี่ปุ่น (Japanese Human Resources Management, B.B.A. : HR)
- หลักสูตรการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน (Logistics and Supply Chain Management, B.B.A. : LM)
- หลักสูตรการตลาดเชิงสร้างสรรค์ (Creative Marketing, B.B.A. : CM)
- หลักสูตรการจัดการท่องเที่ยวและการบริการเชิงนวัตกรรม (Innovative Tourism and Hospitality Management, B.B.A. : TH)
- International Program (International Business Management, B.B.A. : IBM)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

- หลักสูตรนวัตกรรมการจัดการธุรกิจและอุตสาหกรรม (Innovation of Business and Industrial Management, M.B.A. : MBI)
- หลักสูตรบริหารธุรกิจญี่ปุ่น (Japanese Business Administration, M.B.A. : MBJ)

☀	The Development of Telecommunication Network Verification System เพ็ญสุภา โกญจนะบุญ, สมชาย นำประเสริฐชัย	39
☀	Traffic Flow Analytics and Prediction using Nonlinear Autoregressive Network with Exogenous Inputs Technique พีรพล พุทธเวชมงคล, วิมล แสนอุ้ม, ชฎาพร เกตุมณี	45
☀	Volume Estimation of Stock Pile: A Study Case Comparing Estimation Results between Surpac and AutoCAD C3D พงศ์ศิริ จุลพงศ์, วิมเนศวร ดำคง	50

