

“วิศวกรรมลาดกระบัง”

วิศวกรรมลาดกระบังเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์
2. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ ๆ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างนักวิจัยและผู้สนใจ
3. เป็นเอกสารรวบรวมรายงาน และบทความทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์

วาระที่ออก

ปีละ 4 ฉบับ (ทุก 3 เดือนต่อฉบับ)

นโยบาย

บทความที่จะเสนอตีพิมพ์ จะต้องเป็นบทความที่มีคุณค่าทางวิศวกรรม เช่น เป็นรายงานการวิจัยที่ผู้เขียนได้ทำการทดลอง สร้าง หรือมีส่วนทำงานโดยตรง เป็นบทความที่เสนอถึงความคิด หรือหลักการใหม่ที่เป็นไปได้ และมีทฤษฎีประกอบ หรือสนับสนุนอย่างเพียงพอ หรือเป็นบทความทางวิชาการที่น่าสนใจ มีประโยชน์ต่อนักศึกษาและนักวิจัย โดยผู้เขียนเป็นผู้รวบรวมและเรียบเรียงเอง

รูปแบบของบทความ

บทความที่เสนอจะเป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษก็ได้ โดยจัดพิมพ์ตามรูปแบบที่กำหนดให้ ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลทเพื่อพิมพ์ได้ทันที (camera ready) และเพื่อให้รูปแบบการพิมพ์ของบทความมีมาตรฐานเดียวกันจึงขอให้ผู้เขียนจัดเตรียมเอกสารโดยใช้เวิร์ดโปรเซสเซอร์ Microsoft Word for Windows สำหรับรูปภาพประกอบ หากมีใช้ภาพถ่ายก็ควรเขียนหรือสเก็ตโดยใช้ซอฟต์แวร์ ที่สนับสนุนการทำงานในระบบ Windows

บทความที่นำเสนอเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

ชื่อเรื่อง	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน	ไม่ต้องระบุคุณวุฒิหรือตำแหน่งทางวิชาการใด ๆ
สถานที่ทำงาน	ในกรณีที่ผู้เขียนหรือผู้ร่วมงานเป็นนักศึกษา ให้ใช้คณะและสถาบันที่สังกัดเป็นสถานที่ทำงาน
บทคัดย่อ	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
เนื้อความ	ควรประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ และมีเลขประจำหัวข้อตามลำดับ

1. บทนำ
 2. ทฤษฎี
 3. การทดลองและผลการทดลอง
 4. สรุป
- 2.1 หลักการของ.....
2.2 หลักการใหม่.....

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ (662) 329-8000 # 3464, 3465

โทรสาร (662) 329-8317

ที่ปรึกษา

คณบดี

รศ.ดร.คมสัน มาลีสี

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศ.ดร.อิสระชัย จามทรู

กองบรรณาธิการ

นายโกลด์ วาดเขียน

ออกแบบปกและรูปเล่ม

นางอาทิสดา ชาญวิกรณ์

ติดต่อประสานงานและสมาชิกสัมพันธ์

จัดทำต้นฉบับ Artwork

พิสุจน์อักษร

กิตติกรรมประกาศ

(ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง

การอ้างอิงในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิง โดยตัว เลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

- [1] P. Choeysuwan and S. Choomchuy, "The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic," Laddkrabang Engineering Journal, Vol.30, No.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltas, "Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol.39, No.4, pp.312-315, Sept., 1992.
- [3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

จัดจำหน่ายโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

นางอาทิสดา ชาญวิกรณ์

โทร. 02-329-8317

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความมีความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ ส่วนหน้าที่ 9 เป็นต้นไป ต้องเสียค่าตีพิมพ์หน้าละ 500 บาท โดยติดต่อส่งได้ที่ E-mail : kmitleng.jnl@gmail.com ส่วนวิศวกรรมลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซีดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ 12 ตุลาคม 2560

เรื่อง ขอเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมเนื้อหาของบทความวิศวกรรมลาดกระบังให้มีความยาวจำนวนหน้าเพิ่มมากขึ้น
และขอแจ้งชื่อเว็บไซต์ใหม่

เรียน อาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย และผู้ที่สนใจ

กองบรรณาธิการทางวิศวกรรมลาดกระบัง ขอเรียนแจ้งให้ท่านทราบว่า ขอเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมเนื้อหาของบทความให้มีความยาวจำนวนหน้าเพิ่มมากขึ้นจากเดิม ความยาวไม่เกิน 6 หน้า 2 คอลัมน์ เปลี่ยนเป็น ความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ หากจำนวนหน้าของเนื้อหามากกว่า 8 หน้าขึ้นไป ในส่วนของหน้าที 9 เป็นต้นไป คิดราคาค่าตีพิมพ์เพิ่มหน้าละ 500 บาท (ห้าร้อยบาทถ้วน) โดยผู้แต่งต้องชำระเงินค่าตีพิมพ์ในจำนวนหน้าที่เกิน 8 หน้า หลังจากที่ยกบทความแก้ไขสมบูรณ์แล้ว และได้รับหนังสือการตอบรับการตีพิมพ์จากงานวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง

เว็บไซต์ใหม่ของวารสาร คือ www9.kmitl.ac.th/lej

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ จักขอบพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศ.ดร.อิสระชัย งามทร)
หัวหน้ากองบรรณาธิการ



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรณเจตพงศ์ชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ประยูทธ อัครเอกผาลิน

บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติ

สิรินธร ไทย-เยอรมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-

พระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ วรพิเชฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สรวิทย์ สุจิตตรจ

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.โมนอย ไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระก่าพลธร

สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีขั้นสูง

(THAIST)

สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทช.)

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ความจุความลับของช่องสัญญาณไร้สาย

Secrecy Capacity of Wireless Channels

เกียรติศักดิ์ ใหม่เจริญกุล
วิทยาลัยเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยรังสิต

บทคัดย่อ

ตามที่การเชื่อมต่อแบบไร้สายมีการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย ความมั่นคงของการเชื่อมต่อดังกล่าวจึงเป็นประเด็นสำคัญ การเข้ารหัสลับแต่ดั้งเดิมเป็นวิธีหลักสำหรับการสื่อสารอย่างมั่นคง อย่างไรก็ตาม วิธีสร้างความมั่นคงนี้อาจนำไปปฏิบัติได้ยากในโครงข่ายไร้สายสมัยใหม่บางประเภท เช่น โครงข่ายเฉพาะกิจและโครงข่ายอาร์เอฟไอดีที่ต้องการการจัดการอย่างเป็นระบบขนาดใหญ่และความซับซ้อนในการคำนวณต่ำ ตามลำดับ วิธีทางเลือกหนึ่งคือความมั่นคงชั้นกายภาพ ซึ่งใช้ประโยชน์จากสมบัติทางกายภาพของช่องสัญญาณวิทยุเพื่อทำให้การส่งข้อมูลเชื่อถือได้โดยไม่ต้องอาศัยกุญแจถอดรหัสลับ เนื่องจากความมั่นคงชนิดนี้ปรากฏจากการแสดงความลับทางทฤษฎีสารสนเทศ จึงได้มีความสนใจอย่างมากในความจุความลับของช่องสัญญาณไร้สายประเภทต่าง ๆ บทความนี้จะอธิบายโดยย่อถึงความจุดังกล่าวสำหรับผู้ใช้อีก

คำสำคัญ : ทฤษฎีสารสนเทศ, ความมั่นคงชั้นกายภาพ, ความจุความลับ, ช่องสัญญาณไร้สาย

Abstract

As wireless networking has a wide range of applications, its security is an issue of concern. Encryption is traditionally the main route to secure communications. Nevertheless, this security solution may be difficult to implement in some modern wireless networks, e.g., ad hoc and radio-frequency identification (RFID) networks which require large-scale organization and low computational complexity, respectively. An alternative approach is physical-layer security, which leverages the physical properties of radio channels to achieve reliable data transmission without the need of secret keys. Since this kind of security emerged from the information theoretical characterization of secrecy, there has been great interest in secrecy capacity of various wireless channels. This paper provides an overview of such capacity for a single user.

Keywords : Information theory, Physical-layer security, Secrecy capacity, Wireless channel

1. บทนำ

การสื่อสารไร้สายเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่มีอยู่ทุกหนทุกแห่ง อาทิ ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบรังสี (Cellular Telephony) เนื่องจากโครงข่ายไร้สายถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น ธุรกรรมทางการเงิน การเข้าถึงเครือข่ายทางสังคม และการติดตามตรวจสอบสิ่งแวดล้อม ความมั่นคงของโครงข่ายดังกล่าว

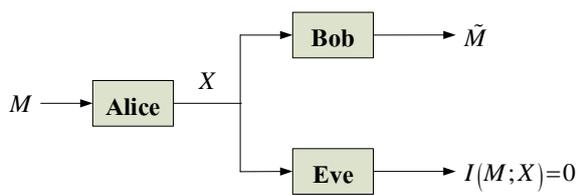
จึงเป็นประเด็นที่สำคัญ จากแบบจำลองโอเอสไอ (Open Systems Interconnection: OSI) ความมั่นคงนี้เดิมถูกทำให้เกิดผลที่ชั้น (Layer) สูง ๆ เช่น ชั้นแอปพลิเคชันที่สร้างความมั่นคงให้กับโครงข่ายวายไฟ (Wi-Fi) ด้วยโปรโตคอลดับเบิลยูอีพี (Wired Equivalent Privacy: WEP) และโปรโตคอลดับเบิลยูพีเอ (Wi-Fi Protected Access: WPA) [1]

การเข้ารหัสลับ (Encryption) เป็นวิธีการพื้นฐานอย่างหนึ่งสำหรับการรักษาความลับของข้อมูลและทำงานได้ดีในหลาย ๆ สถานการณ์ อย่างไรก็ตาม สำหรับสถาปัตยกรรมโครงข่ายสมัยใหม่ ประเด็นเกี่ยวกับการจัดการทรัพยากรหรือความซับซ้อนในการคำนวณอาจทำให้การเข้ารหัสลับข้อมูลทำได้ยาก ตัวอย่างเช่น โครงข่ายเฉพาะกิจ (Ad Hoc) ที่ซึ่งข้อความจากโหนดต้นทางอาจจะถูกส่งผ่านโหนดระหว่างทาง (Intermediate) เป็นจำนวนมากก่อนถึงโหนดปลายทาง และโครงข่ายอาร์เอฟไอดี (Radio-Frequency Identification: RFID) สำหรับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things) ที่ซึ่งอุปกรณ์ปลายทาง (End Device) มีความซับซ้อนน้อยมาก [2] เมื่อไม่นานมานี้ การพัฒนาวิธีส่งผ่านข้อมูลอย่างมั่นคงโดยใช้คุณสมบัติทางกายภาพของช่องสัญญาณวิทยุได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง [3]-[11] ผลที่ได้เรียกว่าความมั่นคงชั้นกายภาพ (Physical-Layer Security) ซึ่งมีรากฐานมาจากการแสดงลักษณะของความลับในมุมมองของทฤษฎีสารสนเทศ (Information Theory)

ในการออกแบบโครงข่ายไร้สายให้มีความมั่นคงชั้นกายภาพนั้น ดัชนีสมรรถนะที่นำมาพิจารณาคือความจุความลับ (Secrecy Capacity) ของช่องสัญญาณไร้สาย บทความนี้จะนำเสนอพัฒนาการทางความจุดังกล่าว โดยเริ่มจากระบบความลับของ Shannon [3] ตามด้วยช่องสัญญาณค้ำของ Wyner [4] และปิดท้ายด้วยการขยายผลไปสู่ช่องสัญญาณไร้สายประเภทต่าง ๆ [9]-[11]

2. ระบบความลับของ Shannon

Shannon เป็นคนแรกที่ศึกษาปัญหาการสื่อสารอย่างมั่นคงจากมุมมองของทฤษฎีสารสนเทศ [3] ระบบความลับที่ Shannon พิจารณาถูกแสดงในรูปที่ 1



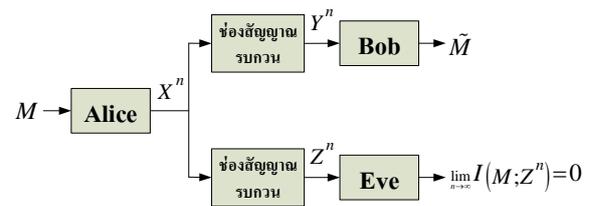
รูปที่ 1: ระบบความลับของ Shannon

จากรูปที่ 1 Alice Bob และ Eve ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง เครื่องรับ และเครื่องค้ำฟัง ตามลำดับ Alice ต้องการส่งสาร M ไปยัง Bob โดยที่สารนี้ยังคงเป็นความลับต่อ Eve ทั้งนี้ Alice และ Bob มีกุญแจความลับร่วมกัน (แทนด้วย K) ซึ่ง Eve ไม่ทราบ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว Alice จะใช้ K เข้ารหัส M ไปเป็นอักษรรหัส (Codeword) X และ Bob จะใช้ K ถอดรหัส X เพื่อกู้คืน M

การสื่อสารในรูปที่ 1 จะมีความมั่นคงเมื่อสารสนเทศร่วม (Mutual Information) ระหว่างสาร M กับอักษรรหัส X ซึ่งเขียนแทนด้วย $I(M; X)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากสารสนเทศร่วมนี้สามารถเขียนอยู่ในรูปของเอนโทรปี (Entropy) ได้เป็น $I(M; X) = H(M) - H(M | X)$ โดยที่เอนโทรปี $H(M) = -\sum p(m) \log p(m)$ แสดงถึงความไม่แน่นอน (Uncertainty) เกี่ยวกับตัวแปรสุ่ม M , $p(m)$ คือความน่าจะเป็นที่ M มีค่าเท่ากับ m และเอนโทรปีแบบมีเงื่อนไข $H(M | X)$ คือความไม่แน่นอนในตัวแปรสุ่ม M หลังจากที่ได้สังเกตตัวแปรสุ่ม X ดังนั้น $I(M; X) = 0$ หมายความว่าความไม่แน่นอนเกี่ยวกับสาร M มีค่าเท่ากับความไม่แน่นอนเกี่ยวกับสาร M หลังจากที่ได้สังเกตอักษรรหัส X หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง สาร M และอักษรรหัส X นั้นเป็นอิสระต่อกันทางสถิติ เอนโทรปีดังกล่าวนำไปสู่ความลับสมบูรณ์ (Perfect Secrecy)

3. ช่องสัญญาณค้ำของ Wyner

Wyner ได้นำเสนอช่องสัญญาณค้ำ [4] ซึ่งมีรากฐานมาจากระบบความลับของ Shannon ความแตกต่างอยู่ตรงที่ไม่มีกุญแจความลับที่ Alice และ Bob แต่มีการรบกวนในช่องสัญญาณการสื่อสารดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2: ช่องสัญญาณค้ำของ Wyner

จากรูปที่ 2 Alice ต้องการเข้ารหัสสาร M ไปสู่อักษรรหัส $X^n = (X_1, \dots, X_n)$ เพื่อให้ Bob ผู้ซึ่งได้รับ $Y^n = (Y_1, \dots, Y_n)$ สามารถกู้คืนสาร M ได้อย่างน่าเชื่อถือ (นั่นคือ $\lim_{n \rightarrow \infty} P\{\tilde{M} \neq M\} = 0$) ในขณะที่ M ยังคงเป็นความลับต่อ Eve ผู้ซึ่งได้รับ $Z^n = (Z_1, \dots, Z_n)$

เนื่องจากการรบกวนในช่องสัญญาณสื่อสาร Wyner จึงแนะนำให้ผ่อนปรนหลักเกณฑ์ของความลับสมบูรณ์ที่เป็นจริงได้ยาก (นั่นคือ ความอิสระต่อกันทางสถิติระหว่างสาร M กับเอาต์พุตช่องสัญญาณ Z^n) ด้วยการพิจารณาความอิสระต่อกันเชิงเส้นกำกับ (Asymptotic) ตามความยาวของอักษรรหัส n แทน นั่นคือ $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{I(M; Z^n)}{n} = 0$ หลักเกณฑ์นี้มีชื่อว่าความลับแบบจาง (Weak Secrecy) ซึ่งแสดงถึงสารสนเทศเกี่ยวกับสาร M ที่รั่วไหลไปยัง Eve ในอัตรา (Rate) ที่ขึ้นอยู่กับความยาว n

เงื่อนไขข้างบนสามารถปรับให้เข้มงวดขึ้นด้วยการเอาพจน์ n ออก นั่นคือ $\lim_{n \rightarrow \infty} I(M; Z^n) = 0$ ซึ่งนำไปสู่ความลับแบบเข้มแข็ง (Strong Secrecy) [5] จะเห็นว่าจำนวนสารสนเทศที่รั่วไหลไปยัง Eve จะหายไปเมื่อ n มีค่ามากขึ้นโดยไม่มีที่สิ้นสุด ความลับแบบเข้มแข็งนี้ทำให้มั่นใจว่าอัตราการผิดพลาดของการถอดรหัสมีค่าเข้าใกล้ 1 แบบเอกซ์โพเนนเชียล ไม่ว่า Eve จะใช้แผนการถอดรหัสแผนใดก็ตาม [6]

Wyner ยังได้นิยามความจุความลับ (ซึ่งแสดงถึงอัตราสูงสุดที่ยังทำให้ความต้องการของ Alice บรรลุผล นั่นคือ Bob สามารถกู้คืนสารของ Alice ได้แต่ Eve ทำไม่ได้) สำหรับช่องสัญญาณดิจิทัลที่ไม่มีสมาธิจำเชิงวิชุด (Discrete Memoryless) ดังสมการที่ (1)

$$C_s = \max_{X \rightarrow Y \rightarrow Z} (I(X; Y) - I(X; Z)) \quad (1)$$

โดยที่ $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ แทนความสัมพันธ์แบบห่วงโซ่มาร์คอฟ (Markov Chain) ซึ่งนิยามดังนี้ กำหนดให้ $p(X, Z)$ เป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Distribution) ของตัวแปรสุ่ม X และ Z , และ $p(X | Y)$ เป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขของตัวแปรสุ่ม X อันเนื่องมาจากตัวแปรสุ่ม Y

(Conditional Probability Distribution of X Given Y) ดังนั้น X , Y และ Z จะมีความสัมพันธ์แบบห่วงโซ่มาร์คอฟ $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ ก็ต่อเมื่อ $p(X, Z | Y) = p(X | Y)p(Z | Y)$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง X และ Z เป็นอิสระต่อกันแบบมีเงื่อนไข (Conditional Independent) อันเนื่องจาก Y [12] การทำให้มีค่าสูงสุดในสมการที่ (1) นั้นพิจารณาจากตัวแปรสุ่ม X , Y และ Z ทั้งหมดที่เป็นไปได้ตามความสัมพันธ์ดังกล่าว

ที่มาของความจุความลับในสมการที่ (1) สามารถอธิบายได้ดังนี้ Alice ไม่เพียงส่งสารลับไปยัง Bob แต่ต้องส่งสารคัมภีร์ (ซึ่ง Bob และ Eve ไม่ทราบ) ด้วยโดยการสุ่มเลือกจากอักษรรหัสที่มีอยู่ด้วยอัตราเท่ากับ $I(X; Z)$ หรือตามคุณภาพช่องสัญญาณของ Eve ทำให้ Eve เต็มไปด้วยสารสนเทศที่ไร้ประโยชน์จากสารคัมภีร์และไม่เหลือทรัพยากรสำหรับการถอดรหัสสารลับ [7] เนื่องจาก $I(X; Y)$ เป็นอัตราที่ Alice สามารถส่งสารลับไปยัง Bob ได้อย่างน่าเชื่อถือ และ Bob ต้องถอดรหัสทั้งสารลับและสารคัมภีร์เพื่อให้กู้คืนได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นอัตราที่เหลือสำหรับการส่งผ่านสารลับได้อย่างมั่นคงจึงมีค่าเท่ากับ $I(X; Y) - I(X; Z)$

4. ความจุความลับของช่องสัญญาณไร้สายประเภทต่าง ๆ

หัวข้อนี้จะขยายความจุความลับข้างบนไปสู่กรณีช่องสัญญาณไร้สายประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ช่องสัญญาณเกาส์เซียน (Gaussian) ช่องสัญญาณหลายทางเข้าหลายทางออก (Multiple-Input Multiple-Output: MIMO) และช่องสัญญาณเฟดดิ้ง (Fading)

4.1 ช่องสัญญาณเกาส์เซียน

ในช่องสัญญาณเกาส์เซียน สัญญาณที่ Bob และ Eve ได้รับจาก Alice สามารถเขียนได้เป็น

$$Y_i = hX_i + N_i \quad (2)$$

$$Z_i = gX_i + W_i \quad (3)$$

ตามลำดับ โดยที่ h และ g คืออัตราการขยาย (Gain) ของช่องสัญญาณระหว่าง Alice กับ Bob และช่องสัญญาณ

ระหว่าง Alice กับ Eve ตามลำดับ, N_i และ W_i คือ สัญญาณรบกวนเกาส์เซียนขาวแบบบวก (Additive White Gaussian Noise) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และความแปรปรวนเท่ากับ σ_N^2 และ σ_W^2 ตามลำดับ และ i คือครั้งการใช้ช่องสัญญาณ ความจุความลับของช่องสัญญาณประเภทนี้สามารถคำนวณได้เป็น [8]

$$C_s = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P|h|^2}{\sigma_N^2} \right) - \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P|g|^2}{\sigma_W^2} \right) \quad (4)$$

โดยที่ P คือขีดจำกัด (Limit) สำหรับค่าเฉลี่ยกำลังส่งของอักษรรหัส X_i (นั่นคือ $\frac{\sum_{i=1}^n E[X_i^2]}{n} \leq P$ โดยที่ $E[\cdot]$ คือค่าคาดหวัง)

กลยุทธ์ที่ทำให้บรรลุความจุความลับในสมการที่ (4) คือการกำหนดคให้ X_i มีการแจกแจงทางสถิติแบบเกาส์เซียนและค่ากำลังส่งเท่ากับ P สมการนี้ทำให้ทราบว่าการสื่อสารในช่องสัญญาณเกาส์เซียนจะมีความมั่นคงก็ต่อเมื่อ Bob มีคุณภาพช่องสัญญาณดีกว่า Eve ในแง่ที่ว่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio) ของช่องสัญญาณระหว่าง Alice กับ Bob มีค่ามากกว่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของช่องสัญญาณระหว่าง Alice กับ Eve (นั่นคือ $|h|^2/\sigma_N^2 > |g|^2/\sigma_W^2$)

4.2 ช่องสัญญาณหลายทางเข้าหลายทางออก

เนื่องจากการใช้สายอากาศส่งและสายอากาศรับหลายเสาสามารถปรับปรุงสมรรถนะของการสื่อสารไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ [13] ช่องสัญญาณหลายทางเข้าหลายทางออกจึงได้รับความสนใจอย่างมาก สมมติให้ Alice Bob และ Eve มีสายอากาศจำนวน l , m และ k เสาตามลำดับ สัญญาณที่ Bob และ Eve ได้รับจาก Alice สามารถเขียนอยู่ในรูปของเวกเตอร์ที่มีมิติ $m \times 1$ และ $k \times 1$ ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$\bar{Y}_i = \mathbf{H}\bar{X}_i + \bar{N}_i \quad (5)$$

$$\bar{Z}_i = \mathbf{G}\bar{X}_i + \bar{W}_i \quad (6)$$

โดยที่ \bar{X}_i คือเวกเตอร์อักษรรหัสของ Alice ที่มีมิติ $l \times 1$ และมีเงื่อนไขบังคับเป็น $\text{Tr}[\mathbf{Q}] \leq P$ เมื่อ

$\mathbf{Q} = E[\bar{X}_i \bar{X}_i^\dagger]$, $\text{Tr}[\cdot]$ คือผลบวกของสมาชิกในแนวทแยงมุม (Trace) ของเมทริกซ์, \mathbf{H} และ \mathbf{G} คือเมทริกซ์ที่ประกอบด้วยอัตราขยายของช่องสัญญาณระหว่าง Alice กับ Bob และช่องสัญญาณระหว่าง Alice กับ Eve ตามลำดับ และมีมิติ $m \times l$ และ $k \times l$ ตามลำดับ และ \bar{N}_i และ \bar{W}_i คือเวกเตอร์สัญญาณรบกวนเกาส์เซียนขาวแบบบวกที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และเมทริกซ์ความแปรปรวนเท่ากับเมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix) ความจุความลับของช่องสัญญาณประเภทนี้สามารถคำนวณได้เป็น [9]

$$C_s = \max_{\text{Tr}(\mathbf{Q}) \leq P} \left(\frac{1}{2} \log \det(\mathbf{I}_m + \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^\dagger) - \frac{1}{2} \log \det(\mathbf{I}_k + \mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^\dagger) \right) \quad (7)$$

โดยที่ \mathbf{I}_m และ \mathbf{I}_k คือเมทริกซ์เอกลักษณ์ที่มีมิติ $m \times m$ และ $k \times k$ ตามลำดับ

กลยุทธ์ที่ทำให้บรรลุความจุความลับในสมการที่ (7) จะเหมือนกับกลยุทธ์ที่ใช้ในหัวข้อ 4.1 แต่มีเงื่อนไขเพิ่มเติมคือเมทริกซ์ความแปรปรวน \mathbf{Q} จะต้องถูกเลือกให้เหมาะสมที่สุดในแง่ที่ทำให้ผลต่างในวงเล็บมีค่าสูงที่สุดเนื่องจากโดยทั่วไปปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดนี้ไม่คอนเวกซ์ (Nonconvex) [14] รูปแบบแม่นยำ (Exact Form) ของ \mathbf{Q} ที่เหมาะสมที่สุดจึงสามารถหาได้ในบางกรณีเท่านั้น ตัวอย่างเช่น กรณีที่ Alice มีสายอากาศหลายเสาและ Bob มีสายอากาศเพียงเสาเดียว ส่วน Eve อาจจะมีสายอากาศหลายเสา [10] ความจุความลับในกรณีนี้สามารถคำนวณได้เป็น

$$C_s = \frac{1}{2} \log \left(\lambda_{\max}(\mathbf{I}_l + \mathbf{P}\mathbf{h}^\dagger \mathbf{h}, \mathbf{I}_l + \mathbf{P}\mathbf{G}^\dagger \mathbf{G}) \right) \quad (8)$$

โดยที่ $\lambda_{\max}(\cdot, \cdot)$ เป็นค่าลักษณะเฉพาะทั่วไปสูงสุด (Maximum Generalized Eigenvalue) ของคู่ลำดับเมทริกซ์ [15] กลยุทธ์ที่ทำให้บรรลุความจุความลับในสมการที่ (8) คือการสร้างลำคลื่น (Beamforming) ในทิศทางของเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทั่วไป (Generalized Eigenvector) ที่สอดคล้องกับค่าลักษณะเฉพาะดังกล่าว

4.3 ช่องสัญญาณเฟดดิ้ง

ในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 ช่องสัญญาณที่พิจารณานั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการสื่อสาร นั่นคือ อัตราการขยายของช่องสัญญาณระหว่าง Alice กับ Bob และช่องสัญญาณระหว่าง Alice กับ Eve เป็นค่าคงที่ อย่างไรก็ตาม สภาพนี้เกิดขึ้นจริงได้ยากในทางปฏิบัติเนื่องจากการแพร่กระจายของพหุวิถี (Multipath) และการแทรกสอดในการสื่อสารไร้สาย การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านี้เรียกว่าเฟดดิ้ง

ในช่องสัญญาณเฟดดิ้ง สัญญาณที่ Bob และ Eve ได้รับจาก Alice สามารถเขียนได้เป็น

$$Y_i = h_i X_i + N_i \quad (9)$$

$$Z_i = g_i X_i + W_i \quad (10)$$

โดยที่ตัวแปรต่าง ๆ มีนิยามตามสมการที่ (2) และ (3) ยกเว้น h_i และ g_i คือสัมประสิทธิ์การจางหายซึ่งแสดงถึงสภาพการสื่อสาร ณ ขณะเวลา i ในกรณีเฟดดิ้งแบบเออร์โกดิก (Ergodic) ที่ซึ่งสัมประสิทธิ์การจางหายเหล่านี้เป็นอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน (Independent and Identically Distributed) และเปลี่ยนแปลงตามเวลา ความจุความลับสามารถคำนวณได้เป็น [11]

$$C_s = \max_{E_A[P(h,g)] \leq P} E_A \left[\frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P(h,g)|h|^2}{\sigma_N^2} \right) - \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P(h,g)|g|^2}{\sigma_w^2} \right) \right] \quad (11)$$

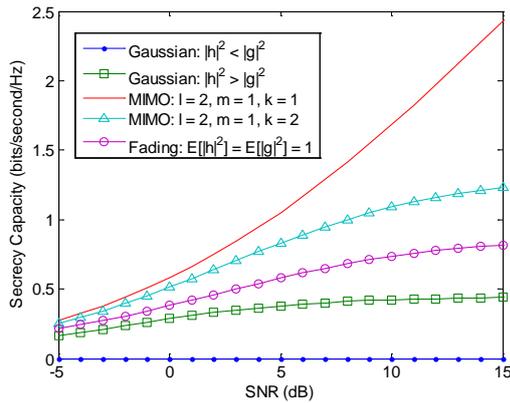
โดยที่ $A = \left\{ (h,g) : \frac{|h|^2}{\sigma_N^2} > \frac{|g|^2}{\sigma_w^2} \right\}$, $E_A[\cdot]$ คือค่าคาดหวังบนทุกคู่ลำดับ (h,g) ที่เป็นสมาชิกในเซต A ,

$$P(h,g) = \begin{cases} \frac{1}{\lambda \ln 2} - \frac{\sigma_N^2}{|h|^2}, & \text{if } |g|^2 = 0, \lambda < \frac{|h|^2}{\sigma_N^2 \ln 2} \\ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\sigma_w^2}{|g|^2} - \frac{\sigma_N^2}{|h|^2} \right) \left(\frac{4}{\lambda \ln 2} - \frac{\sigma_N^2}{|h|^2} + \frac{\sigma_w^2}{|g|^2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_N^2}{|h|^2} + \frac{\sigma_w^2}{|g|^2} \right)^2 \right]^{1/2}, & \text{if } |g|^2 > 0, \\ \frac{|h|^2}{\sigma_N^2} > \frac{|g|^2}{\sigma_w^2}, \lambda < \frac{1}{\ln 2} \left(\frac{|h|^2}{\sigma_N^2} - \frac{|g|^2}{\sigma_w^2} \right) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

คือกำลังส่งที่เหมาะสมที่สุดโดยที่ λ ถูกเลือกให้สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ $E_A[P(h,g)] = P$ และกรณีการใช้ช่องสัญญาณ i ถูกละเว้นเพื่อความกระชับในการแสดงสมการ

กลยุทธ์ที่ทำให้บรรลุความจุความลับในสมการที่ (11) สามารถอธิบายได้ดังนี้ เริ่มจากการกำหนดให้ Alice และ Bob ทราบสารสนเทศของสถานะช่องสัญญาณอย่างสมบูรณ์ (Perfect Channel State Information) นั่นคือ ค่า h_i และ g_i สำหรับทุก i หรือที่เรียกว่าเรียวลิเซชัน (Realization) ของ h และ g ตามลำดับ เนื่องจากการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมที่สุดคือการให้กำลังส่งก็ต่อเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขที่ 1 และ 2 ในสมการที่ (12)

จากการเปรียบเทียบช่องสัญญาณเกาส์เซียนกับช่องสัญญาณเฟดดิ้ง จะเห็นว่าการสื่อสารในช่องสัญญาณประเภทแรกจะมีความมั่นคงก็ต่อเมื่อเหตุการณ์ $|h|^2/\sigma_N^2 > |g|^2/\sigma_w^2$ เกิดขึ้นแน่นอน นั่นคือ $P\{|h|^2/\sigma_N^2 > |g|^2/\sigma_w^2\} = 1$ ส่วนสำหรับช่องสัญญาณประเภทหลังต้องการ $P\{|h|^2/\sigma_N^2 > |g|^2/\sigma_w^2\} > 0$ (หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง มีอย่างน้อยหนึ่งเรียวลิเซชันของ h และ g ที่ซึ่ง $|h|^2/\sigma_N^2 > |g|^2/\sigma_w^2$) และ λ ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ 1 หรือ 2 ในสมการที่ (12) เพื่อให้การสื่อสารมีความมั่นคง ดังนั้น เฟดดิ้งจึงเป็นประโยชน์ต่อการส่งผ่านสารลับ



รูปที่ 3: ความจุความลับของช่องสัญญาณเกาส์เซียน
ช่องสัญญาณหลายทางเข้าหลายทางออก และช่องสัญญาณ
เฟดดิ้ง ($\sigma_N^2 = \sigma_w^2$)

รูปที่ 3 แสดงผลการจำลองความจุความลับของ
ช่องสัญญาณไร้สายประเภทต่าง ๆ ดังนี้

- (1) ช่องสัญญาณหลายทางเข้าหลายทางออก โดยที่ Alice Bob และ Eve มีสายอากาศจำนวน 2, 1 และ 2 เสา ตามลำดับ ($l = 2, m = 1, k = 2$) และ $\mathbf{h} = [0.0991 - j0.8676 \quad 1.0814 + j1.1281]$, $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0.3880 + j1.2024 & -0.9825 + j0.5914 \\ 0.4709 - j0.3073 & 0.6815 - j0.2125 \end{bmatrix}$ ในสมการที่ (8) ซึ่งเหมือนกับที่กำหนดใน [10]
- (2) ช่องสัญญาณหลายทางเข้าหลายทางออก โดยที่ Alice Bob และ Eve มีสายอากาศจำนวน 2, 1 และ 1 เสา ตามลำดับ ($l = 2, m = 1, k = 1$) และ $\mathbf{h} = [0.0991 - j0.8676 \quad 1.0814 + j1.1281]$, $\mathbf{g} = [0.3880 + j1.2024 \quad -0.9825 + j0.5914]$ ในสมการที่ (8) ซึ่งเหมือนกับที่กำหนดใน [10]
- (3) ช่องสัญญาณเกาส์เซียน โดยที่ h และ g ในสมการที่ (4) มีขนาดเท่ากับของสมาชิกตัวแรกของ \mathbf{h} และ \mathbf{g} ข้างบน ตามลำดับ ดังนั้น $|h|^2 = 0.7626$ และ $|g|^2 = 1.5963$ ซึ่งเป็นตัวอย่างของกรณี $|h|^2 < |g|^2$
- (4) ช่องสัญญาณเกาส์เซียน โดยที่ h และ g ในสมการที่ (4) มีขนาดเท่ากับของสมาชิกตัวหลังของ \mathbf{h} และ \mathbf{g} ข้างบน ตามลำดับ ดังนั้น

$|h|^2 = 2.442$ และ $|g|^2 = 1.3151$ ซึ่งเป็นตัวอย่างของกรณี $|h|^2 > |g|^2$

(5) ช่องสัญญาณเฟดดิ้ง โดยที่ h และ g ในสมการที่

(11) เป็นตัวแปรสุ่มเชิงซ้อนแบบเกาส์เซียน (Complex Gaussian Random Variable) ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน และทั้งคู่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และความแปรปรวนเท่ากับ 1 (เหมือนกับที่กำหนดใน [11]) ดังนั้น $|h|^2$ และ $|g|^2$ มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียลด้วยพารามิเตอร์เท่ากับ 1

ทั้งนี้ กำหนดให้ $\sigma_N^2 = \sigma_w^2$ สำหรับทุกช่องสัญญาณเพื่อความสะดวกในการจำลองผล และแกนนอนแสดงอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise

Ratio: SNR) ซึ่งก็คือ $\frac{P}{\sigma_N^2}$ [10]-[11]

ผลการจำลองในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าความจุความลับของช่องสัญญาณเกาส์เซียนจะมากกว่าศูนย์เมื่อ

$\frac{|h|^2}{\sigma_N^2} > \frac{|g|^2}{\sigma_w^2}$ ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างบน ส่วนสำหรับช่องสัญญาณหลายทางเข้าหลายทางออก ความจุความลับจะขึ้นอยู่กับจำนวนสายอากาศที่ใช้ด้วย เช่น ความจุนี้จะลดลงเมื่อ Eve มีสายอากาศมากขึ้น [10]

นอกจากช่องสัญญาณที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น ซึ่งประกอบด้วยผู้ส่ง ผู้รับ และผู้ดักฟังอย่างละ 1 คน ยังมีงานอื่น ๆ ที่วิเคราะห์ความจุความลับในกรณีที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น ช่องสัญญาณbroadcast ที่มีผู้รับหลายคน [16], ช่องสัญญาณเข้าถึงหลายทาง (Multiple Access) ที่มีผู้ส่งหลายคน [17] และช่องสัญญาณแทรกสอด (Interference) ที่มีทั้งผู้ส่งและผู้รับหลายคน [18] ผู้ที่สนใจกรณีเหล่านี้สามารถศึกษารายละเอียดได้จากเอกสารอ้างอิงดังกล่าว

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอพื้นฐานและสาระสำคัญเกี่ยวกับความจุความลับของช่องสัญญาณไร้สาย การวิเคราะห์ความจุนี้ด้วยทฤษฎีสารสนเทศได้แสดงให้เห็นว่าชั้นกายภาพสามารถทำให้เกิดความมั่นคงในการส่งผ่านข้อมูล

ในทางปฏิบัติการสร้างความมั่นคงชั้นกายภาพมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การสร้างกุญแจความลับจากสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณระหว่างผู้ส่งและผู้รับ [19]-[20], การสื่อสารแบบกลับทางเวลา (Time Reversal) ระหว่างผู้ส่งและผู้รับ [21] และการสร้างสัญญาณรบกวนเทียม (Artificial Noise) ที่ผู้ส่งหรือผู้รับ [22]-[23]

การวิเคราะห์ข้างบนต้องการสารสนเทศของสถานะช่องสัญญาณอย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม เจื่อนไขนี้อาจเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ ตัวอย่างเช่น ถ้าผู้ดักฟังไม่ใช่ผู้ใช้งานจริงในโครงข่ายไร้สาย ก็ย่อมจะไม่เปิดเผยสารสนเทศใด ๆ เกี่ยวกับช่องสัญญาณของตน ความจุความลับของช่องสัญญาณไร้สายในกรณีดังกล่าวเป็นประเด็นที่จะศึกษาต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Tews and M. Beck, "Practical Attacks Against WEP and WPA," in Proceedings of the Second ACM Conference on Wireless Network Security, New York, NY, 2009, pp. 79-86.
- [2] P. Guillemin and P. Friess, "Internet of Things—Strategic Research Roadmap," European Commission, Brussels, Belgium, Technical Report, September, 2009.
- [3] C. E. Shannon, "Communication Theory of Secrecy Systems," The Bell System Technical Journal, Vol. 28, No. 4, pp. 656-715, October, 1949.
- [4] A. D. Wyner, "The Wire-Tap Channel," The Bell System Technical Journal, Vol. 54, No. 8, pp. 1355-1387, October, 1975.
- [5] U. Maurer and S. Wolf, "From Weak to Strong Information-Theoretic Key Agreement," in Proceedings of International Symposium on Information Theory, Sorrento, Italy, 2000, p. 18.
- [6] I. Bjelakovic, H. Boche, and J. Sommerfeld, "Secrecy Results for Compound Wiretap Channels. Problems of Information Transmission, Vol. 49, No. 1, pp. 73-98, January, 2013.
- [7] J. L. Massey, "A Simplified Treatment of Wyner's Wire-Tap Channel," in Proceedings of the 21st Allerton Conference on Communication, Control and Computing, Monticello, IL, October, 1983, pp. 268-276.
- [8] S. K. Leung-Yan-Cheong and M. E. Hellman, "The Gaussian Wire-Tap Channel," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 24, No. 4, pp. 451-456, July, 1978.
- [9] F. Oggier and B. Hassibi, "The Secrecy Capacity of the MIMO Wiretap Channel," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 57, No. 8, pp. 4961-4972, August, 2011.
- [10] A. Khisti and G. W. Wornell, "Secure Transmission with Multiple Antennas—Part I: The MISOME Wiretap Channel," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 56, No. 7, pp. 3088-3104, July, 2010.
- [11] Y. Liang, H. V. Poor, and S. Shamai (Shitz), "Secure Communication over Fading Channels," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 54, No. 6, pp. 2470-2492, June, 2008.
- [12] T. M. Cover and J. A. Thomas, "Elements of Information Theory," Wiley, New York, NY, Second Edition, 2006.
- [13] E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, A. Goldsmith, A. Paulraj, and H. V. Poor, "MIMO Wireless Communications," Cambridge University Press, New York, NY, 2010.
- [14] S. P. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex Optimization," Cambridge University Press, New York, NY, 2004.
- [15] G. Golub and C. F. V. Loan, "Matrix Computations," Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD, Third Edition, 1996.
- [16] I. Csiszar and J. Korner, "Broadcast Channels with Confidential Message," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 24, No. 3, pp. 339-348, May, 1978.
- [17] Y. Liang and H. V. Poor, "Multiple-Access Channels with Confidential Messages," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 54, No. 3, pp. 972-1002, March, 2008.
- [18] R. Liu, I. Maric, P. Spasojevic, and R. D. Yates, "Discrete Memoryless Interference and Broadcast Channels with Confidential Messages: Secrecy

- Rate Regions,” IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 54, No. 6, pp. 2493-2507, June, 2008.
- [19] S. Mathur, W. Trappe, N. Mandayam, C. Ye, and A. Reznik, “Radio-Telepathy: Extracting a Secret Key from an Unauthenticated Wireless Channel,” in Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, San Francisco, CA, 2008, pp. 128-139.
- [20] A. Sayeed and A. Perrig, “Secure Wireless Communications: Secret Keys through Multipath,” in Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Las Vegas, NV, 2008, pp. 3013-3016.
- [21] Y. Chen, F. Han, Y.-H. Yang, H. Ma, Y. Han, C. Jiang, H.-Q. Lai, D. Claffey, Z. Safar, and K. J. R. Liu, “Time-Reversal Wireless Paradigm for Green Internet of Things: An Overview,” IEEE Internet of Things Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 81-98, February, 2014.
- [22] R. Negi and S. Goel, “Guaranteeing Secrecy Using Artificial Noise,” IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 7, No. 6, pp. 2180-2189, June, 2008.
- [23] S. Gollakota and D. Katabi, “Physical Layer Wireless Security Made Fast and Channel Independent,” in Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications, Shanghai, China, 2011, pp. 1125-1133.

การศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาเสื้อเกราะกันกระสุนจาก เกล็ดปลาด้วยวิธีทดสอบแรงกระแทก

Feasibility Study on The Development of Bulletproof Vest with Fish Scale by Dart Impact Method.

ดวงกมล ไชกเฉลิม¹ วิภู ศรีสืบสาย²

¹สาขาวิศวกรรมป้องกันประเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail : kmitl.dkm@gmail.com

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail : wipoo.sr@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการนำเกล็ดปลามาพัฒนาวัสดุเชิงประกอบของเรซิน เพื่อพัฒนาคุณสมบัติความต้านทานด้านแรงกระแทก สำหรับการพัฒนาไปสู่การออกแบบเสื้อเกราะกันกระสุน โดยทำการเปรียบเทียบจำนวนชั้นของเกล็ดปลากับการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกด้วยวิธีตกระแทก การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบใช้โพลีเอสเตอร์เรซินเป็นวัสดุเนื้อพื้นและเกล็ดปลาเป็นวัสดุเสริมแรง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโพลีเอสเตอร์เรซินกับจำนวนชั้นเกล็ดปลามีความสัมพันธ์กับการทนทานต่อแรงกระแทก ผลการทดลองพบว่าเกล็ดปลา 2 ชั้น สามารถรับแรงกระแทกได้ดีกว่าการใช้เกล็ดปลา 1 ชั้นและ 3 ชั้น และพบว่าความต้านทานแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมแรงด้วยเกล็ดปลา มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาเสื้อเกราะกันกระสุนจากเกล็ดปลา

คำสำคัญ:เสื้อเกราะกันกระสุน , เกล็ดปลา, โพลีเอสเตอร์เรซิน

Abstracts

This research was studied the possibility of resin composites development by using fish scale in order to improve impact resistance. For development The result of this study would be the alternative material to design a bulletproof vest. The experiment was performed by comparing the number of fish scale layers to the impact resistance according to the dart impact testing. . The polyester resins and ground fish scales which acted as reinforcement material was molded . The results showed that the polyester resin and the number of fish scale layer affected to the impact resistance. The results also showed that using two layer of fish scale can absorb the impact energy higher than others. It is possible to develop a bulletproof vest from fish scales.

Keywords: Bulletproof vest, Fish scale, Polyester resin

1. บทนำ

เสื้อเกราะกันกระสุน หลายคนเข้าใจว่าสามารถป้องกันการทะลุทะลวงกระสุนปืนได้ทุกครั้ง แต่ความเป็นจริงเสื้อเกราะมีขีดจำกัดการป้องกันกระสุนปืนอยู่ ซึ่งขึ้นกับว่าเสื้อเกราะถูกผลิตและออกแบบมาเพื่อรองรับกระสุนระดับใด โดยในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันว่าวัสดุที่นิยมนำมาผลิตเสื้อเกราะกันกระสุน ได้แก่ เคฟลาร์ (kevlar) [1] เป็นชื่อทางการค้าของโพลีพาราฟีนีลีนเทอเรฟทาเลอามิ (poly-paraphenylene terephthalamide) นอกจากเคฟลาร์แล้วยังมีการนำเอาวัสดุอื่นมาผลิตเป็นเสื้อเกราะกันกระสุน เช่น สเปคตร้า (spectra)[1] เป็นชื่อทางการค้าของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (Ultra High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) เสื้อเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุสังเคราะห์เหล่านี้จัดเป็นเสื้อเกราะกันกระสุนแบบอ่อน (soft ballistic vest) เพราะใช้วัสดุที่มีสมบัติทนแรงดึงสูงมากมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยเพื่อทอเป็นผืนและนำมาเรียงซ้อนกันหลายชั้น โดยแผ่นวัสดุสังเคราะห์แต่ละผืนจะวางสลับแนวกันให้เส้นใยทอมุม 90 องศา การออกแบบเพื่อให้เสื้อเกราะมีทั้งความแข็งแรง และความยืดหยุ่น (flexible) ทำให้เสื้อเกราะกันกระสุนจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อป้องกันกระสุนปืนที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง ซึ่งวิธีการปรับปรุงเสื้อเกราะวิธีหนึ่งคือ การเสริมแรงด้วยแผ่นวัสดุแข็งต่างๆ เช่น แผ่นไทเทเนียม แผ่นเหล็กกล้า แผ่นเซรามิกแข็ง เป็นต้น แม้วัสดุที่ใช้มีหลายชนิด แต่ที่นิยมนำมาทำแผ่นเกราะแข็งเสริมให้เสื้อเกราะคือ แผ่นเซรามิก เนื่องจากมีน้ำหนักเบากว่าโลหะแต่มีราคาไม่สูง ส่วนการเสริมด้วยแผ่นโลหะนิยมประยุกต์ใช้กับยานพาหนะหุ้มเกราะมากกว่า สำหรับเซรามิกที่นำมาทำแผ่นเกราะแข็งได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide) โบรอนคาร์ไบด์ (boron carbide) รวมถึงซิลิกอนคาร์ไบด์ (silicon carbide) ซึ่งเสื้อเกราะที่เสริมแรงด้วยแผ่นเกราะแข็งเหล่านี้จะเป็นเสื้อเกราะที่สามารถป้องกันกระสุนปืนได้ในระดับ III หรือ ระดับ IV ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1: ระดับการป้องกันของเสื้อเกราะ

(Classification) มาตรฐาน NIJ [1]

ระดับการป้องกัน	ชื่อปืน	ชนิดกระสุน	น้ำหนักกระสุน	ความเร็วกระสุน
I	38 SPECIAL 22 LRHV	RN	158	259 m/s (850 ft/s)
		LEAD	GRAIN	320 m/s (1050 ft/s)
		LEAD	40 GRAIN	
II A	357 MAGNUM 9 MM	JSP	158	384 m/s (1250 ft/s)
		FMJ	GRAIN 124 GRAIN	332 m/s (1090 ft/s)
II	357 MAGNUM 9 MM	JSP	158	425 m/s (1395 ft/s)
		FMJ	GRAIN 124 GRAIN	358 m/s (1175 ft/s)
III A	44 MAGNUM 9 MM	JSP	240	426 m/s (1400 ft/s)
		LEAD FMJ	GRAIN 124 GRAIN	426 m/s (1400 ft/s)
III	7.62 MM	FMJ	150 GRAIN	838 m/s (2750 ft/s)
IV	30-06	AP	166 GRAIN	868 m/s (2850 ft/s)
REMARK	AP : Armor Piercing, FMJ : Full Metal Jacketed, JSP : Jacketed soft Point, LRHV: Long Rifle High Velocity			

เมื่อเหตุการณ์ในประเทศยังมีความรุนแรงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ทหารและตำรวจที่ปฏิบัติภารกิจในพื้นที่จำเป็นต้องใช้เสื้อเกราะป้องกันกระสุนประสิทธิภาพสูง ซึ่งเป็นยุทธภัณฑ์ราคาแพงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และบริษัท พีทีทีโพลีเมอร์มาร์เก็ตติ้ง จำกัด ในกลุ่มบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)[2] จึงร่วมกันวิจัยและพัฒนาเสื้อเกราะกันกระสุนแบบแข็งที่มีสมบัติป้องกันกระสุนปืนระดับเอ็ม-16 และปืนไรเฟิลเพื่อปกป้องชีวิตทหาร-ตำรวจผู้ปฏิบัติงาน หัวใจของเสื้อเกราะแบบแข็งอยู่ที่แผ่นเกราะแข็งขนาด 10.5x12 นิ้ว มีความหนาเฉลี่ย 4 เซนติเมตร และหนักประมาณ 4 กิโลกรัม/แผ่น แผ่นเกราะประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ชั้น ทำจากวัสดุ 2 ชนิด ประกบกัน โดยชั้นนอกเป็นแผ่น

อะลูมิเนียมออกไซด์ ชั้นเซรามิกแข็งที่ทำหน้าที่ทำลายหัวกระสุนให้แตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ และช่วยกระจายแรงปะทะ ส่วนนี้ดำเนินการพัฒนาโดย ดร.กุลจิรา สุจิโรจน์ นักวิจัยเอ็มเทคและทีมวิจัยจากห้องปฏิบัติการวิจัยชิ้นส่วนเซรามิกเพื่องานวิศวกรรม ขณะที่ชั้นในเป็นแผ่นโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) ทำหน้าที่กระจายแรงและลดแรงกระแทก ดำเนินการพัฒนาโดยทีมวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล ซึ่งผลการทดสอบตามมาตรฐานของ NIJ โดยกรมพลาธิการตำรวจ ปรากฏว่า เสื้อเกราะแบบแข็งมีระดับการป้องกันในระดับ III คือ ป้องกันกระสุนปืนขนาด 7.62 มม. NATO และกระสุนปืนไรเฟิลได้

ในปัจจุบันมีการนำเกล็ดปลาไปใช้ประโยชน์มากมาย เช่นนำมาทำเป็นดอกไม้ประดิษฐ์ (นิรนาม, ม.ป.ป.) เครื่องประดับประเภทโบว์ติดผม เข็มกลัดติดเสื้อ ต่างหูเป็นต้น หรือใช้ ตกแต่งของใช้ เช่น กรอบรูป กระชกกลองใส่นามบัตรแจกัน เป็นต้น (จงจิตร, ม.ป.ป.) การสกัดคอลลาเจนจากเกล็ดปลาเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการใช้ประโยชน์โดยที่คอลลาเจนที่สกัดได้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายเช่น ใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารใช้ในทางการแพทย์และทางเภสัชกรรม ใช้เป็นแคปซูลยา ใช้ในเครื่องสำอางบำรุงผิว และในอุตสาหกรรมเครื่องหนัง (Swan and Torley, 1991) ซึ่งทำให้เกิดมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น จากสถิติปริมาณการส่งออกสินค้าประมงของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2540–2543 พบว่า ในแต่ละปีประเทศไทยมีการส่งออกผลิตภัณฑ์จากปลาแช่เย็นและปลาแช่เยือกแข็งจำนวนมากและมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องกล่าวคือในปีพ.ศ. 2540 มี ปริมาณ 98,417 เมตริกตัน และเพิ่มเป็น 122,809 เมตริกตัน ในปีพ.ศ. 2543 (มัทนา, 2545) ซึ่งทำให้สามารถคาดคะเนถึงปริมาณเกล็ดปลาที่เป็นของเหลือทิ้งจากผลิตภัณฑ์ปลาได้ว่ามีจำนวนมากเช่นกัน ดังนั้นจึงน่าสนใจที่จะนำเกล็ดปลา ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งเหล่านี้ไปเพิ่มมูลค่าโดยการนำมาทำเสื้อเกราะกันกระสุนจากเกล็ดปลา

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

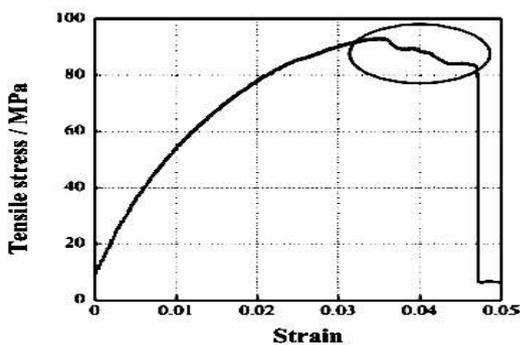
การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาเสื้อเกราะกันกระสุนจากเกล็ดปลา. จากรายงานของประเสริฐ (2524) ได้กล่าวถึงองค์ประกอบทางเคมีของเกล็ดปลาชนิดต่างๆไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าเกล็ดปลามีสารประกอบไนโตรเจนอยู่ค่อนข้างสูงประมาณ 25–35% แต่อยู่ในรูปของโปรคอลลาเจน และมีโปรตีน Ichthlipidin ซึ่งมีลักษณะต่างจากโปรคอลลาเจนคือ ละลายได้ในน้ำร้อน นอกจากนี้ Fahmi et al. (2004) ได้รายงานถึงองค์ประกอบทางเคมีโดยน้ำหนักแห้งของเกล็ด sea bream พบว่าประกอบด้วย โปรตีน 51.2% ไขมัน 0.1% สารอินทรีย์อื่นๆ 1.4% และสารอนินทรีย์ 47.3% และจากรายงานของ Nagai et al. (2004) ยังแสดงข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบของเกล็ดปลาทั่วไปว่าประกอบด้วยความชื้น 70% โปรตีน 27% ไขมัน 1% และเถ้า 2% โดยโปรตีนในเกล็ดปลาส่วนใหญ่คือคอลลาเจน.

ตารางที่ 2: องค์ประกอบทางเคมีของเกล็ดปลาชนิดต่างๆ

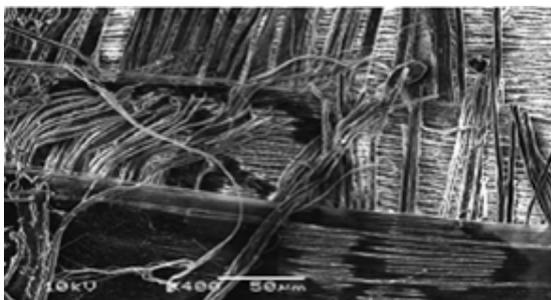
ชนิดของปลา	ปริมาณ (%)				
	น้ำ	ไขมัน	สารไนโตรเจน (Nx6.25)	เกลือแร่	ฟอสฟอรัส
Herring	51.5-56.0	0.5-1.0	26.5-28.5	16.5-18.5	0.5-0.6
Sardine	32.5-38.5	0.5-1.5	29.5-36.5	29.0-32.0	-
Pike-perch	51.5-57.5	0.1-0.8	19.5-26.5	19.5-23.5	4.5-8.0
Barb	51.0-54.5	0.4-0.5	32.0-34.0	14.0-15.5	1.2-2.1
Bream	54.5-60.5	0.1-0.5	25.0-31.0	14.0-15.0	1.0-2.0
Pike	55.5-57.5	0.1	24.5-26.5	17.0	2.3-3.2

จากการศึกษาของ Ikoma et al. (2003 a) เกี่ยวกับโครงสร้างของเกล็ดปลา *Pagrus major* พบว่าประกอบด้วย extracellular matrix ที่มีคอลลาเจน type I จัดเรียงตัวกันเป็นโครงสร้าง 3 มิติและมี calcium-deficient hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) ประกอบอยู่ในโครงสร้างและได้ศึกษาค่า tensile strength (ค่า stress ที่จุดแตกหัก) ของเกล็ดปลา *Pagrus major* ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ $93 + 1.8 \text{ MPa}$ ($n = 10$) จาก tensile

stress-strain curve (ภาพที่ 1) ในช่วงแรกของกราฟ ความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรง ทำให้ทราบค่า Young's modulus (stress/strain) เป็น $2.2 + 0.3$ GPa ซึ่งค่านี้แสดงถึงความแข็ง (stiffness) ที่ต่ำเนื่องจากเกล็ดปลาปริมาณแร่ธาตุต่ำ (46%) เมื่อเปรียบเทียบกับ red deer (~50%, 6.1 GPa) และ axis deer (~80%, 31.6 GPa) จะเห็นว่าปริมาณแร่ธาตุและค่า Young's modulus มีความสัมพันธ์กันซึ่ง Currey and Brear (1990) และ Mann (2001) ได้อธิบายถึงลักษณะ tensile stress-strain curve ที่แสดงถึงคุณสมบัติความเป็นพลาสติก (plasticity/yielding) ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 2 คือ ที่ค่า stress สูง เกล็ดปลาจะสามารถรับแรงต่อไปได้อีกระยะหนึ่งก่อนที่จะฉีกขาดอย่างฉับพลันลักษณะดังกล่าวแสดงถึงคุณสมบัติความเป็นพลาสติกของเกล็ดปลาดังรูปที่ 1



รูปที่ 1: Tensile stress-strain curve ของเกล็ดปลา P. major (n = 10) เส้นกราฟบริเวณที่วงกลมแสดงถึงคุณสมบัติความเป็นพลาสติกของเกล็ดปลา ก่อนการฉีกขาดอย่างฉับพลัน



รูปที่ 2: ภาพจากกล้อง SEM ของเกล็ดปลาที่แตกหัก ที่มา: Ikoma et al. (2003 a)

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างคอลลาเจนและโครงสร้างที่ถูกดึงออกเป็นเส้นใยคอลลาเจนซึ่งจากภาพเกล็ดปลาที่ได้จากกล้อง SEM พบว่าเกล็ดปลาประกอบด้วยโครงสร้างคอลลาเจนที่เป็นเส้นใยเมื่อเกิดการฉีกขาด โครงสร้างคอลลาเจนจะแยกออกเป็นเส้นใย (ความหนาประมาณ $2-3 \mu\text{m}$) ทำให้สามารถรับแรงต่อได้อีกระยะหนึ่งก่อนการฉีกขาดอย่างฉับพลันให้เกิดคุณสมบัติความเป็นพลาสติก ณ จุด yield point (จุดที่มีค่า strain สูงสุดก่อนการเปลี่ยนสภาพจาก elastic เป็น plastic) ส่วนเกล็ดปลาที่กำจัดแคลเซียมออกนั้นจะมีค่า tensile strength และ Young's modulus ลดลงเหลือ $36 + 8.4$ MPa และ $0.53 + 0.06$ GPa (n = 10) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพฤติกรรมการแตกหักของเกล็ดปลาที่กำจัดแคลเซียมออกนั้นคือยังคงแสดงคุณสมบัติความเป็นพลาสติก วัสดุนับว่าเป็นวัสดุที่มีบทบาทและสำคัญมากในยุคปัจจุบันนี้ และเป็นคู่แข่งของเหล็ก ซึ่งนับวันได้ถูกใช้อย่างมากมายจนเหลือน้อยทำให้พลาสติกได้ถูกนำมาใช้แทนอย่างมาก เพราะพลาสติกมีคุณสมบัติพิเศษดีเด่นกว่าวัสดุอื่นที่ใช้งานได้ก่อนอย่างมาก เพราะสามารถใช้แทนวัสดุอื่นได้เกือบทั้งหมด

3. การทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้เกล็ดปลานิลทำการทดลอง ทำการขึ้นรูปของชิ้นงานทดสอบโดยการนำเกล็ดปลามาต่อเรียงจำนวนเกล็ดปลาในแต่ละชิ้นรวม 42 เกล็ดต่อแผ่น ให้ได้ขนาด 9×9 cm. ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นนำโพลีเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัวผสมกับตัวเร่งให้แข็งตัวที่มีความหนา 10 mm. ส่วนผสมเรซินต่อสารเร่งความแข็ง ; 2 : 1 และทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้นนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกลด้วยการทดสอบแรงกระแทก เพื่อวัดความความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุประกอบ ตามมาตรฐาน ASTM D4272 ระยะที่ใช้ในการทดสอบ 77 cm. จำนวนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจำนวน 4 ชิ้น และนำไปวัดระยะความกว้าง

ตามแนวแกน x และ y วัดความลึก โดยใช้เครื่องมือวัด Vernia caliper และนำไปคำนวณหาค่าพลังงานในการรับแรงกระแทกการซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

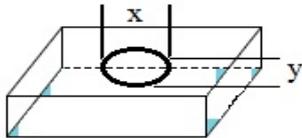
$$E = \frac{1}{2} mv^2 \quad (1)$$

เมื่อ

E = พลังงาน มีหน่วยเป็นจูล

m = มวลวัตถุ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม

v = ความเร็ววัตถุ มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที



รูปที่ 3: วิธีการวัดระยะความกว้างตามแนวแกน x และ y ดังแสดงผลการทดสอบในตารางที่ 3



รูปที่ 4: โพลีเอสเตอร์เรซินชนิดไม่แข็งตัวผสมกับตัวเร่งให้แข็งตัวให้มีความหนา 10 mm. และทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากนั้นจำนวนชั้นของเกล็ดปลาที่สามารถต้านทานแรงกระแทกได้ดีที่สุดจะถูกขึ้นรูปและนำมาทดสอบอีกครั้ง โดยการเปลี่ยนระยะความสูงของการทดสอบ เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงกระแทก

4. ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อนำโพลีเอสเตอร์เรซินที่ไม่มีเกล็ดปลามาทำการทดสอบแรงกระแทกจะมีลักษณะแตกกระจายชิ้นงานไม่สามารถรับแรงกระแทกได้เมื่อนำโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเกล็ดปลา 1 ชั้นพบว่าชิ้นงานมีรอยกระแทกมีความลึก 1.10 มม. เมื่อนำโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเกล็ดปลา 2 ชั้นพบว่า

ชิ้นงานมีรอยกระแทกซึ่งมีความลึก 0.25 มม. เมื่อนำโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเกล็ดปลา 3 ชั้นพบว่าชิ้นงานมีรอยกระแทกมีความลึก 0.67 มม. และรอยร้าวอยู่ด้านหลังดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3: ขนาดรอยกระแทกและพลังงานการตกกระแทก

จำนวนชั้นที่	ระยะความกว้างแกน X (mm)	ระยะความกว้างแกน Y (mm)	ลึก (mm)	พลังงาน (จูล)	ลักษณะ
0	-	-	-	-	ชิ้นงานแตกกระจาย
1	0.70	0.65	1.10	130	บนชิ้นงานมีรอยทะลุ
2	0.53	0.42	0.52	130	บนชิ้นงานมีรอยกระแทก
3	0.70	0.50	0.67	130	บนชิ้นงานมีรอยกระแทกและมีรอยร้าวอยู่ด้านหลัง

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเกล็ดปลา 2 ชั้น รับแรงกระแทกได้ดีกว่าแบบ 1 ชั้น และ 3 ชั้น เนื่องจากและผลการทดลองจากการได้นำโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเกล็ดปลา 2 ชั้น มาทำการทดสอบ โดยเปลี่ยนระยะในการทดสอบแรงกระแทก เพื่อศึกษาค่าความต้านทานแรงกระแทกและลักษณะรอยกระแทก ได้แก่ค่าความลึกและระยะความกว้างตามแนวแกน x และ y ผลที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4: ผลการต้านทานแรงกระแทกที่ความสูงต่าง ๆ สำหรับโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเกล็ดปลา 2 ชั้น

ชั้นที่	ระยะที่ใช้ในการทดสอบ (cm)	ระยะแกน X (mm)	ระยะแกน Y (mm)	ลึก (mm)
1	77	0.74	0.61	0.56
2	87	0.68	0.61	0.65
3	97	0.88	0.97	0.61

จากผลการทดสอบพบว่าโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงกับเกล็ดปลา 2 ชั้นทำการทดสอบวัดแรงกระแทกที่ระยะ 77 ซม. ทำให้ชิ้นงานมีรอยร้าวและมีความลึก 0.56 มม. เมื่อทำการเพิ่มระยะทดสอบเป็น 87 ซม. ความลึกของรอยกระแทกเพิ่มเป็น 0.65 มม. แต่เมื่อเพิ่มระยะที่สูงขึ้นเป็น 97 ซม. รอยกระแทกมีความลึกลดลง 0.61 มม. แต่พบว่าชิ้นงานมีรอยแตกร้าวในทิศทางแกน x และแกน y เพิ่มขึ้น

5.สรุป

จากการศึกษาพบว่าการใช้เกล็ดปลาเพื่อเสริมแรงให้โพลีเอสเตอร์มีความแข็งแรงขึ้นมีความเป็นไปได้ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อนำโพลีเอสเตอร์เรซินที่ไม่มีเกล็ดปลาทำการทดสอบแรงกระแทกจะมีลักษณะแตกกระจาย ชิ้นงานไม่สามารถรับแรงกระแทกได้ เมื่อนำโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเกล็ดปลา 1 ชั้นพบว่าชิ้นงานมีรอยกระแทกมีความลึกเมื่อนำโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเกล็ดปลา 2 ชั้นพบว่าชิ้นงานมีรอยกระแทกซึ่งมีความลึก เมื่อนำโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเกล็ดปลา 3 ชั้นพบว่าชิ้นงานมีรอยกระแทกมีความลึกมีรอยร้าวอยู่ด้านหลัง และพบว่าชั้นของเกล็ดปลาให้ผลต่อความแข็งแรง โดยการใส่เกล็ดปลา 2 ชั้นจะทำแข็งแรงมากที่สุด เมื่อความหนารวมของวัสดุประกอบเป็น 10 มม. อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของชั้นเกล็ดปลาและความหนาควรจะต้องมีศึกษาเพิ่มเติม เนื่องจากการรับแรงกระแทกจากกระสุนปืนมีค่าพลังงานสูงกว่าที่ได้รับการทดลอง จึงต้องมีการใช้ชั้นของเกล็ดปลาเพิ่มขึ้น แต่ผลการทดลองพบว่าการใช้เกล็ดปลาเพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตจะมีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นของเกล็ดปลาต่อความหนารวมของวัสดุประกอบ เพื่อให้วัสดุประกอบนี้สามารถใช้เป็นส่วนประกอบเดียวกัน

กระสุนได้จริงพลังงานจากการยิงกระสุน TYPE 1 (ชนิด 1) เลื่อที่สามารถป้องกันกระสุนขนาด .22 LR ที่มีหัวกระสุนหัวกระสุนหนัก 40 เกรน และมีความเร็วไม่เกิน 1,050 ฟุต/วินาที และหัวกระสุนขนาด .380 ACP ที่มีหัวกระสุนหนัก 95 เกรน และมีความเร็วไม่เกิน 1,025 ฟุต/วินาที หรือกระสุนในขนาด .38 RNL ที่มีหัวกระสุนหนัก 158 เกรน และมีความเร็วไม่เกิน 850 ฟุต/วินาที

6.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.วิภู ศรีสืบสายที่ให้ความรู้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างและการวัดชิ้นงาน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM International, Designation : D4272-03 "Standard Test Method for Total Energy Impact of Plastic Films By Dart Drop".
- [2] National Metals Technology Centre of Materials (SW.). The Develop a bulletproof vest Solid.2013
- [3] Wong Kwan's prosperity growth. Collagen from fish scales : extracting certain properties. Journal of science (Food Science), Faculty of science. Science and Technology Kasetsart University. 2551
- [4] K.Hartapak W.Chahai and L. Apirat, "An Overview of composite Materials," Kasetsart Engineering Journal, Vol.22, No.70, pp.18-23, September 2512-January 2533, 2553
- [5] MK polyester resin. Basic knowledge. Polyester resin

ระบบการตรวจจับฟ้าผ่าในประเทศไทย โดยผ่านวิธี TOA

Lightning Detection System in Thailand by TOA Method

กมล ชีระกาญจน์* สุวิพล สิริชิวภาค* อรรณพ โรมา**

*ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**บริษัท เค.เอ็ม.แอล.เทคโนโลยี จำกัด

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบในการตรวจจับฟ้าผ่าในประเทศไทย โดยผ่านทางวิธี TOA โดยจะมีการรับสัญญาณฟ้าผ่าที่ส่งสัญญาณมาทางคลื่น VLF หลังจากนั้นดำเนินการ ส่งข้อมูลเข้าไปประมวลผล ด้วยวิธี TOA ซึ่งวิธีนี้ จะถูกใช้ในการคำนวณ การหาพิกัดที่เกิดฟ้าผ่าขึ้น และแสดงผลในการแจ้งเตือนผ่านปฏิบัติการแอนดรอยด์ ซึ่งเราสามารถที่จะเลือกสถานที่ในการ ตรวจจับเหตุการณ์ฟ้าผ่า และทำการแจ้งผู้ใช้งาน หากมีเหตุการณ์ฟ้าผ่าเกิดขึ้นในบริเวณนั้น ซึ่งระบบนี้จะช่วยให้คนไทย สามารถรู้ตำแหน่งที่เกิดฟ้าผ่าขึ้น เนื่องจากฟ้ามีโอกาที่จะผ่าบริเวณเดิมค่อนข้างสูง เพื่อที่เราจะสามารถป้องกันภัยอันตราย ที่เกิดจากฟ้าผ่าได้ทันทั่วถึง

คำสำคัญ : วิธี TOA , VLF , สัญญาณฟ้าผ่า

Abstract

This paper presents a lightning detection system in Thailand by TOA method. This system receives lightning signal via VLF frequency to process by TOA method. This method is used to calculate lightning locations, when the system detects lightning signal. Our system will alert via Android phone if lightning happens nearby places. User can choose locations and alert points via android application. This system will help people to know lightning location. Since lightning generally occurs in same area so that we can prevent danger from lightning immediately.

Key words : TOA method , VLF , Lightning signal

1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบัน ได้มีภัยอันตรายจากธรรมชาติได้ คร่าชีวิตมนุษย์มากมาย เช่น น้ำท่วม , แผ่นดินไหว

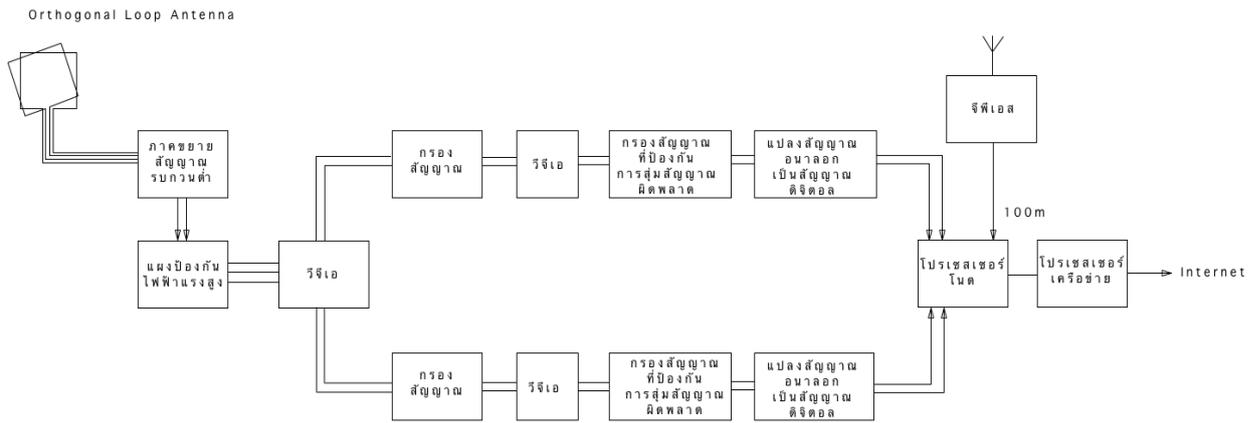
แม้กระทั่งภัยอันตรายจากฟ้าผ่า ก็ได้มีการคร่าชีวิตคน ไทยไปหลายคนในรอบหลายปีที่ผ่านมา จากการศึกษา การเก็บสถิติพบว่า โดยมีจำนวนผู้บาดเจ็บรุนแรงจาก

ฟ้าผ่า ตั้งแต่ปี 2551-2555 จำนวน 180 ราย เฉลี่ยปีละ 36 ราย เสียชีวิต 46 ราย อัตราเจ็บตายเป็นร้อยละ 23.89 และจำนวนผู้ป่วยมีแนวโน้มที่สูงขึ้น (โดยสำนักระบาดวิทยา กรมควบคุมโรค ร่วมกับ โรงพยาบาลเครือข่ายการเฝ้าระวังการบาดเจ็บแห่งชาติ 33 แห่ง ของ กระทรวงสาธารณสุข) และความรู้เรื่องวิธีการรับมือฟ้าผ่าของคนไทยยังไม่เยอะเท่าที่ควร ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยยังไม่

ค่อยตระหนักในเรื่องของฟ้าผ่าเท่าที่ควร จากการที่ได้ไปตรวจสอบค้นพบว่าในแต่ละประเทศได้มีแอปพลิเคชันแจ้งเตือนฟ้าผ่า อยู่ในหลายๆ ประเทศ แต่ของประเทศไทยยังไม่มีในเรื่องนี้ [1] , [2]

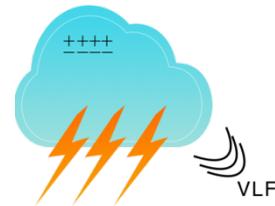
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

รูปแบบของ Lightning Detection เมื่อมีฟ้าผ่าเกิดขึ้น

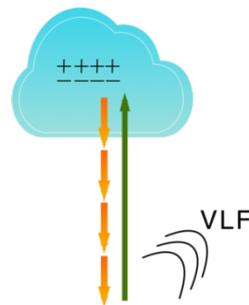


รูปที่ 1 Lightning Detection System [3]

หลังจากมีเหตุการณ์ฟ้าผ่าเกิดขึ้น เสาอากาศแบบ Orthogonal Loop Antenna จะรับสัญญาณฟ้าผ่ามา ซึ่งจะ เป็นสัญญาณ VLF (Very low frequency ช่วงความถี่ 3-30 kHz) จากนั้น ตัวภาวคชขยายสัญญาณรบกวนต่ำ จะทำการขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำ และจัดการเรื่องสัญญาณรบกวน ในกรณีที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงเข้ามาภายในระบบ ตัวแผงป้องกันไฟฟ้าแรงสูง (High voltage protection circuit CKT) จะมีหน้าที่ในการป้องกันระบบจากความเสียหาย โดยจะมีการแบ่งออกเป็น 2 ช่องสัญญาณ ได้แก่ N-S และ E-W จากนั้นจะเข้าไปสู่กรองสัญญาณที่ป้องกันการรบกวนสัญญาณผิดพลาด และทำการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นเมื่อเรานำมารวมกับสัญญาณที่มาจากเสาอากาศจีพีเอส (GPS) ที่มีค่าความผิดพลาดในการหาตำแหน่งอยู่ที่ประมาณไม่เกิน 100 m จะนำเข้ามาสู่ โปรเซสเซอร์เครือข่าย (Network Processor) โดยที่แต่ละ โหนด (Node) ที่รับสัญญาณมานั้น จะทำการตรวจจับฟ้าผ่าและรับค่าสถานที่ของฟ้าผ่าแต่ละที่ จากนั้นนำไปประมวลผลโดยวิธีการแบบ TOA [3]



รูปที่ 2 ประจุไฟฟ้าบนเมฆปล่อยสัญญาณ VLF ออกมา [4]

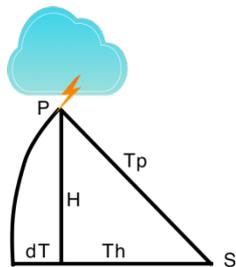


รูปที่ 3 ประจุไฟฟ้าในขณะที่เกิดฟ้าผ่า และปล่อยสัญญาณ VLF ออกมา [4]

2.1 TOA method [5]

1. มีการประยุกต์จาก 2D locating algorithm ในการคำนวณหาตำแหน่งของ Ground location
2. ในเซ็นเซอร์ที่ใกล้ที่สุดเมื่อเทียบกับจุดที่ฟ้าผ่า แล้ว ค่าความแตกต่าง (dT) ระหว่างเวลา T_p ที่ได้จากการวัดระหว่างจุดเซ็นเซอร์กับจุดที่ฟ้าผ่า และค่าระยะเวลาที่จุด 2D location ของฟ้าผ่าและที่จุดเซ็นเซอร์
3. ซึ่งในการคำนวณหาความแตกต่างระหว่างสัญญาณ IC และ CG เราจะใช้จากการสะท้อนของคลื่น VLF ออกมา โดยตัวเซ็นเซอร์จะตรวจสอบว่า สัญญาณที่สะท้อนออกมานั้นมีความสูงเป็นเท่าไร หากความสูงมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าเป็นสัญญาณ CG ตามสมการด้านล่าง

$$CG \rightarrow dT = 0, CC \rightarrow dT \neq 0$$



รูปที่ 4 TOA method

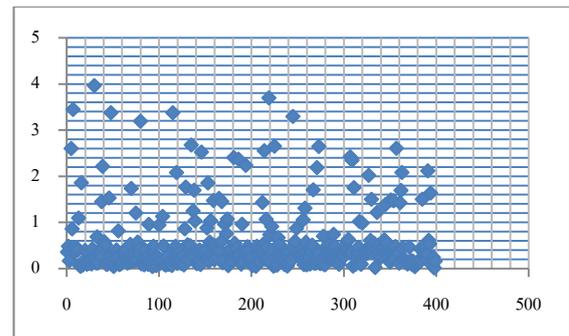
โดยที่ P = จุดที่เกิดฟ้าผ่าขึ้น

S = สถานีเซ็นเซอร์

H = ระยะความสูง

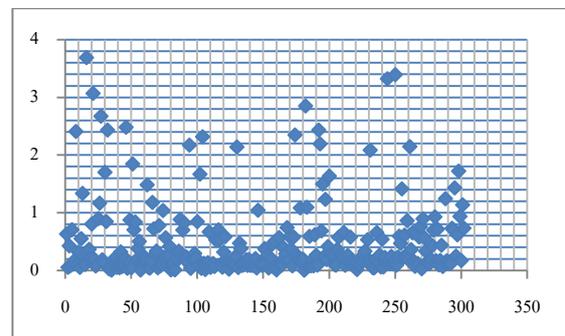
$dT = T_p - T_h$

โดยผลลัพธ์ที่ได้ออกมา จะมีค่า % ความผิดพลาด (Error) ตามรูปกราฟด้านล่าง



รูปที่ 5 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากวิธี TOA ของวันที่ 30 พฤศจิกายน 2559

โดยแกนแนวนอน คือ ลำดับค่า และแกนแนวตั้ง คือ % ความผิดพลาด



รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากวิธี TOA ของวันที่ 27-28 พฤศจิกายน 2559

โดยแกนแนวนอน คือ ลำดับค่า และแกนแนวตั้ง คือ % ความผิดพลาด

ข้อมูลในกราฟข้างต้นจะเห็นได้ว่า ค่าตำแหน่งที่วัดมา ได้มีค่าความผิดพลาด โดยส่วนมากจะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 1 %

ในการหากระแสสำหรับความแรงของฟ้าผ่า จะใช้สมการในการหาด้านล่าง ดังนี้ [5]

$$I = 2\pi R B c / (C_{RS} \mu_0) \quad (1)$$

โดยที่ R = ระยะห่างระหว่างฟ้าผ่ากับเซ็นเซอร์

B = ความนำสนามแม่เหล็กที่วัดจากตัวเซ็นเซอร์

c = ความเร็วแสง

C_{RS} = ความเร็วของฟ้าผ่าที่สะท้อนออกมา

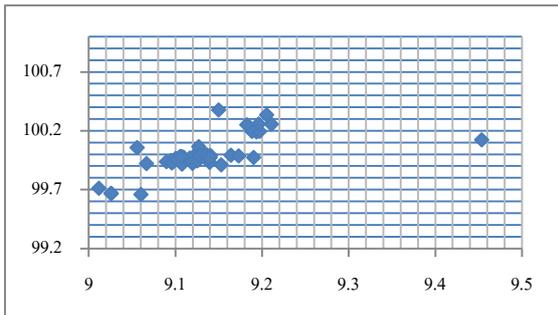
μ_0 = แรงดันสนามแม่เหล็ก

2.2 ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

ระบบปฏิบัติการทางมือถือที่ทาง Google ได้ทำการพัฒนาและแต่ละบริษัทได้ทำการนำไปใช้บนอุปกรณ์ของแต่ละบริษัท ซึ่งรูปแบบการเขียนจะเป็นรูปแบบของภาษา Java เป็นหลัก และจะมีบางส่วนที่ google ได้พัฒนาเข้าไปเพื่อที่จะสามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น สามารถที่จะเขียนได้บนโปรแกรมหลากหลายชนิด แต่ส่วนใหญ่จะนิยมพัฒนาบนโปรแกรม Android Studio ที่ทาง google ได้พัฒนาให้ผู้พัฒนาโปรแกรมใช้งาน

3. แนวทางการดำเนินงาน

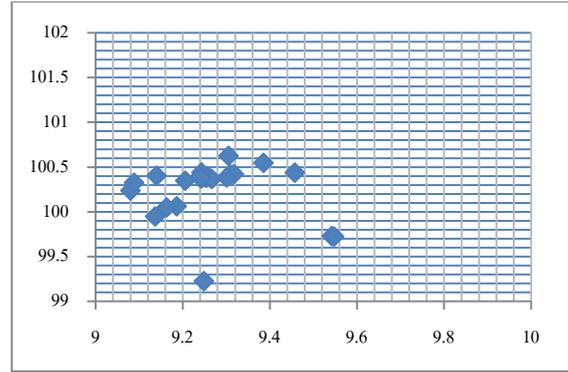
ดำเนินการเก็บข้อมูลฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในประเทศไทย โดยอาศัยข้อมูลสถิติ ซึ่งได้ทำการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 2 เดือนจะมีข้อมูล โดยจะแสดงตัวอย่างข้อมูลฟ้าผ่า ตามกราฟข้อมูลด้านล่าง



รูปที่ 7 กราฟแสดงตัวอย่างข้อมูลตำแหน่งของฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นซ้ำ ณ สถานที่ต่างๆ (ภายใน 20 นาที) ของวันที่ 30 พฤศจิกายน 2559 เวลา 23.40 – 24.00 น.

โดยแกนแนวนอน คือ ละติจูด และแกนแนวตั้ง คือ ลองจิจูด

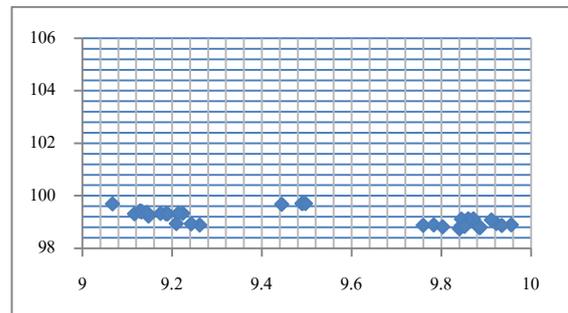
จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าภายใน 20 นาที ที่ได้มีการเก็บสถิติ นั้น มีโอกาสที่ฟ้าจะผ่าบริเวณเดิมก่อนข้างสูง (มากกว่า 1 ครั้ง)



รูปที่ 8 กราฟแสดงตัวอย่างข้อมูลตำแหน่งของฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นซ้ำ ณ สถานที่ต่างๆ (ภายใน 20 นาที) ของวันที่ 30 พฤศจิกายน 2559 เวลา 23.20 – 23.40 น.

โดยแกนแนวนอน คือ ละติจูด และแกนแนวตั้ง คือ ลองจิจูด

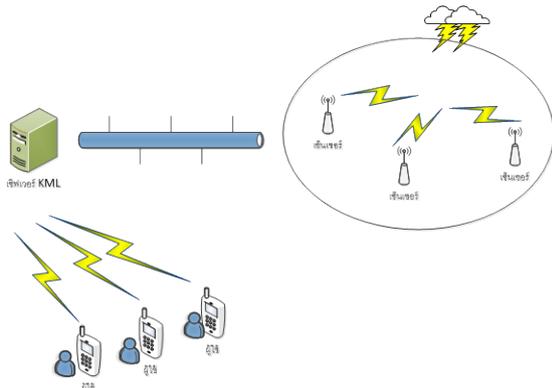
จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าภายใน 20 นาที ที่ได้มีการเก็บสถิติ นั้น มีโอกาสที่ฟ้าจะผ่าบริเวณเดิมก่อนข้างสูงเลย (มากกว่า 1 ครั้ง)



รูปที่ 9 กราฟแสดงตัวอย่างข้อมูลตำแหน่งของฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นซ้ำ ณ สถานที่ต่างๆ (เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง) ของวันที่ 29 พฤศจิกายน 2559 เวลา 08.10 – 09.20 น. โดยแกนแนวนอน คือ ละติจูด และแกนแนวตั้ง คือ ลองจิจูด

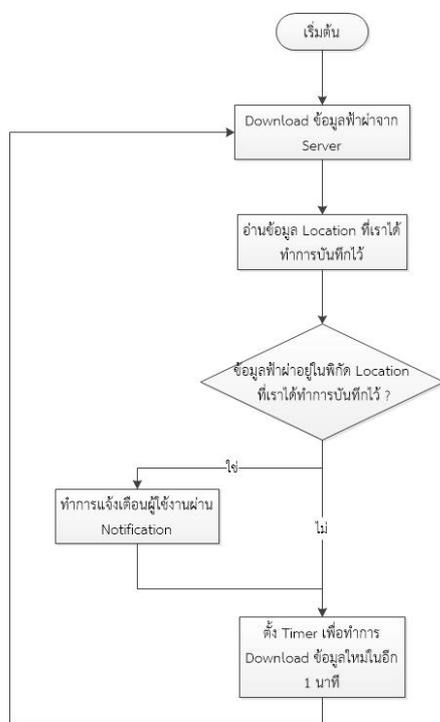
จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าภายใน 1 ชั่วโมง ที่ได้มีการเก็บสถิติ นั้น มีโอกาสที่ฟ้าจะผ่าบริเวณเดิมก่อนข้างสูงเลย (มากกว่า 1 ครั้ง)

โครงสร้างแบบจำลองทางเน็ตเวิร์คในการเชื่อมต่อ การใช้งาน



รูปที่ 10 การดำเนินงานในการเชื่อมต่อข้อมูล

การทำงานจะมีการติดตั้งเซ็นเซอร์ตามสถานที่ต่างๆ จะจับสัญญาณ IC (Cloud Lightning) โดยผ่านทาง TOA method จากนั้น จะทำการส่งข้อมูลไปยังเซิร์ฟเวอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูล และประมวลผล จากนั้น เครื่องมือถือแต่ละเครื่องทำการเรียกข้อมูลมาประมวลผลเพื่อทำการบันทึกลงในแผนที่ เพื่อทำการเปรียบเทียบและแจ้งเตือนข้อมูลไปยังผู้ใช้งานต่อไป

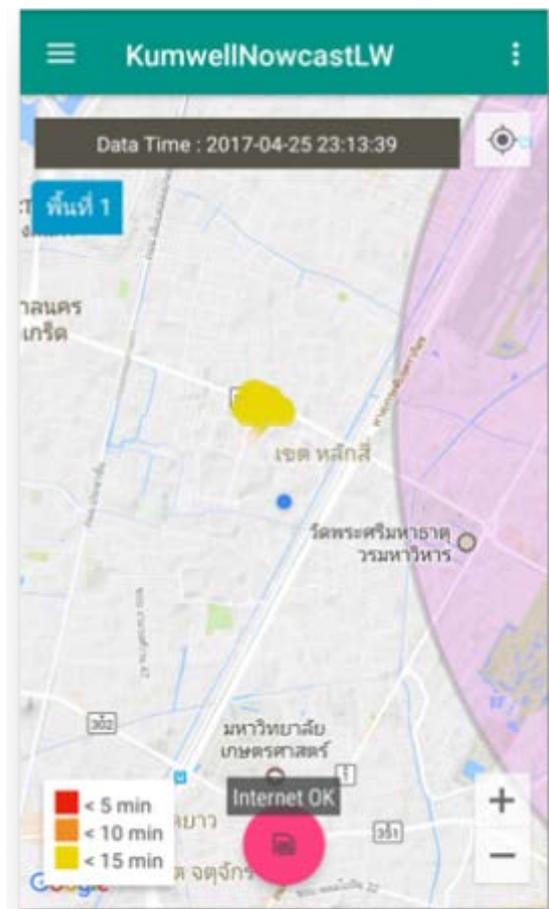


รูปที่ 11 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

การทำงานของโปรแกรมนั้น จะดำเนินการดังนี้ อุปกรณ์จะรับข้อมูลสัญญาณฟ้าผ่าจากระบบเซิร์ฟเวอร์แล้วนำมาเปรียบเทียบหาค่าความแรงของฟ้าผ่า , ค่าประเภทของฟ้าผ่า , ค่าละติจูด , ค่าลองจิจูด แล้วนำค่าทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับค่าตำแหน่งที่เราได้ทำการบันทึกไว้ จากนั้นก็นำเข้าสู่กระบวนการในการเปรียบเทียบระยะห่างที่เกิดขึ้นว่าระยะห่างที่เกิดขึ้นนั้นมีระยะห่างมากกว่า 8 กิโลเมตรหรือไม่ หากอยู่ภายในรัศมี 8 กิโลเมตร ระบบจะทำการแจ้งเตือนผ่าน Notification ของเครื่อง จากนั้นก็ทำการ วนลูป เพื่อทำการรับข้อมูลต่อไป

4. ผลการทดลอง

ผลการทดลองได้ทำการเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อกับระบบเซิร์ฟเวอร์ ได้ผลตามรูปด้านล่าง



รูปที่ 12 หน้าจอการดำเนินงาน

หน้าหลักของแอปพลิเคชันมีข้อมูลต่างๆ ดังนี้

แสดงภาพประจุฟ้าผ่าที่ระบบได้ทำการจับได้ และส่งข้อมูลมายังระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ โดย

- จุดสีฟ้าเป็นพิกัดที่เราอาศัยอยู่



- แทนสัญลักษณ์ตำแหน่งฟ้าผ่าที่ทำการตรวจพบ โดยจะแสดงเป็นสีตามระยะเวลาที่เกิดขึ้น โดยที่สีแดง คือ ฟ้าผ่าได้ผ่าที่ตำแหน่งนี้ไม่เกิน 5 นาทีที่ผ่านมา, สีส้ม คือ ฟ้าผ่าได้ผ่าที่ตำแหน่งนี้ไม่เกิน 10 นาทีที่ผ่านมา และสีเหลือง คือ ฟ้าผ่าได้ผ่าที่ตำแหน่งนี้ไม่เกิน 15 นาทีที่ผ่านมา ซึ่งตามภาพด้านซ้าย คือ สีเหลือง



รูปที่ 13 หน้าจอในการเปิดปิดระบบการแจ้งเตือน

โปรแกรมสามารถที่จะทำการปิด/เปิด การแจ้งเตือนได้ โดยสามารถที่จะเลือกได้ทั้ง ปิด 15 , 30 , 60 นาที หรือจะทำการปิดตลอดเวลา

5. สรุป

เมื่อได้ทำการทดลองแล้วพบว่า ตามแนวทาง TOA method แอปพลิเคชันจะสามารถทำการแจ้งเตือนหาก

เกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่า ในรอบรัศมี 8 กิโลเมตรที่เราได้ทำการกำหนดพิกัดได้ ซึ่งจะแจ้งเตือนภายใน ระยะเวลาไม่เกิน 2 นาที หลังจากที่เกิดฟ้าผ่าขึ้น ซึ่งจะเกิด Notification เกิดขึ้น และจะมีข้อมูลตามรูปด้านล่าง



รูปที่ 14 หน้าจอในการแจ้งเตือนเมื่อเกิดฟ้าผ่าขึ้น โดยระบบจะทำการแจ้งเตือนผ่าน Notification ของเครื่องนั้นๆ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Aratha Rangphung, Pimpa Tachakamonsuk and Anong Sangchantip, “Severe Injuries from Lightning-Related Injuries under National Injury Surveillance System”, Weekly Epidemiological Surveillance Report, Volume 44 , Number 24 , July 12, 2013
- [2] Pranee Wongchantae, “Lightning Phenomena and Protection ,” Journal of Education and Social Development , Volume 9 , No.1 , Academic Year 2013
- [3] Swati Sharma, Shoba Krishnan and Ajay Khandare, “Orthogonal Magnetic Loop Antenna for Lightning Detection”, International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IIAEM) , Special Issue for International Technological Conference-2014
- [4] Miheer Mayekar , Anil Kulkarni , Bijith Marakarkandy , “Design and simulation of low frequency cloud to ground lightning receiver for severe weather monitoring application,” International Conference on Advanced

Computing Technologies and Applications
(ICACTA-2015)

- [5] Hans D. Betz, Kersten Schmidt and Wolf P. Oettinger, "Lightning: Principles, Instrument and Application," Chapter 5 : LINET – An International VLF/LF Lightning Detection Network in Europe , 2009

การวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนที่มี ความสมมาตรรอบแกนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis of Axisymmetric Heat Conduction Problems Using Finite Element Method

ภาสกร เวสสะโกศล¹

จารุวัตร เจริญสุข²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อนภายในวัตถุที่มีลักษณะสมมาตรรอบแกนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำเสนอไว้ในบทความนี้ วิธีการที่ใช้ในการหาการกระจายอุณหภูมิในของแข็งคือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีพื้นฐานมาจากเอลิเมนต์รูปร่างสามเหลี่ยม วิธีการคำนวณเชิงเลขนี้ที่เหมาะสมสำหรับความหลากหลายของเงื่อนไขขอบเขตและรูปร่างมากกว่าวิธีการคำนวณเชิงวิเคราะห์ การประเมินความแม่นยำของวิธีคำนวณปัจจุบันกระทำโดยการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากวิธีเชิงวิเคราะห์หรือผลการคำนวณจากโปรแกรมสำเร็จรูปในปัญหาทดสอบเดียวกัน จำนวนปัญหาทดสอบในบทความนี้คือสามปัญหา ได้แก่ แท่งทรงกระบอกตันที่สามารถผลิตความร้อนได้ แท่งทรงกระบอกสองชั้นและแท่งทรงกระบอกกลวงไม่มีแหล่งผลิตความร้อนแต่มีฟลักซ์ความร้อนที่ผนังด้านใน

คำสำคัญ : วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วัตถุรูปร่างสมมาตรรอบแกน, การนำความร้อน

Abstract

Heat transfer analysis for axisymmetric solid by using the finite element method is presented in this article. The method used to find the temperature distribution in solid is the Finite Element Method based on triangular element. This numerical method is more suitable than the analytical method in dealing with various types of boundary conditions and various shapes of solid. The accuracy of present method is assessed by comparing the calculation results of present method with the results from analytical method or commercial. Three test problems are presented in this article, namely the solid cylinder with uniform heat generation, the fuel cladding composite and the hollow cylinder with heat flux on inner surface.

Keywords : Finite element method, Axisymmetric solid, Heat conduction

1. บทนำ

ความต้องการในการพัฒนาวิธีคำนวณเชิงตัวเลขที่มีความแม่นยำและรวดเร็วสำหรับการจำลองระบบกายภาพเช่น ความแข็งแรงของโครงสร้างอาคารเมื่อได้รับภาระทางกล และภาระทางความร้อน การออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้งานด้านการแพทย์ การไหลของอากาศผ่านอากาศยาน การระบายอากาศและความร้อนในที่พักอาศัย เป็นต้น เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจทั้งในสังคมของนักคณิตศาสตร์ วิศวกร และผู้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยเหลืองานด้านวิศวกรรมนับตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา วิธีคำนวณเชิงตัวเลขได้รับการคิดค้นและเพิ่มสมรรถนะให้สูงขึ้นเรื่อยๆ เริ่มต้นจากวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Method) ซึ่งใช้ได้ดีสำหรับปัญหาที่มีรูปร่างสอดคล้องกับระบบพิกัด แต่มีข้อจำกัดค่อนข้างมากหากปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนหรือรูปร่างที่ไม่สอดคล้องกับระบบพิกัดนั่นเองเช่น ถ้าใช้ระบบพิกัดฉากสองมิติ $(x - y)$ รูปร่างที่เหมาะสมที่สุดกับวิธี Finite Difference Method คือรูปร่างสี่เหลี่ยมเพราะจุดกริดอยู่บนแนวเส้นที่กำหนดโดยพิกัด x และ y ด้วยเหตุนี้จึงเกิดการพัฒนาคิดค้นวิธีคำนวณที่สามารถเอาชนะข้อจำกัดนี้เช่น วิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นมาจากปัญหาด้านพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งเริ่มต้นมาจากปัญหาด้านกลศาสตร์ของแข็ง

ทางผู้วิจัยต้องการนำเสนอทฤษฎีของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาการนำความร้อนในของแข็งสามมิติที่มีความสมมาตรรอบแกน [1, 2] ซึ่งถือว่าสามารถหาคำตอบได้ง่ายกว่าและรวดเร็วกว่าการคำนวณแบบสามมิติจริงๆ การศึกษาถูกจำกัดอยู่ที่ปัญหาที่สภาวะคงตัวหรือปัญหาที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งสมการบังคับและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาจะกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2 สมการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ในหัวข้อที่ 3 ได้มาจากหลักการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของการ์เลอคิน เอลิเมนต์ที่เลือกใช้เป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมสามจุดต่อที่มีจำนวนตัวแปรน้อยที่สุดใดหนึ่งเอลิเมนต์ทำให้ง่ายต่อการตรวจสอบ

ความถูกต้องของการคำนวณแต่มีความแม่นยำน้อยกว่า เอลิเมนต์อันดับสูง หัวข้อที่ 4 เป็นหัวข้อเกี่ยวกับการทดสอบผลการคำนวณที่ได้จากวิธีปัจจุบันกับกับผลการคำนวณจากวิธีเชิงวิเคราะห์ และคำตอบจากโปรแกรมสำเร็จรูป หัวข้อสุดท้ายนำเสนอบทสรุปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นมา

2. สมการบังคับของปัญหาการนำความร้อน

พิจารณาของแข็งที่มีลักษณะสมมาตรรอบแกน z ดังรูปที่ 1 สมมุติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ การกระจายอุณหภูมิในระนาบ $r - z$ ที่มุมใดมุมหนึ่งของแกนสมมาตรสามารถแทนการกระจายอุณหภูมิในของแข็งที่ระนาบของมุมอื่นๆรอบแกนสมมาตรได้ทั้งหมดเพราะเป็นคำตอบเดียวกัน ในบทความนี้พิจารณาเฉพาะของแข็งที่มี คุณสมบัติเชิงความร้อนแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) เท่านั้น ดังนั้นสมการของปัญหาการนำความร้อน สำหรับแบบจำลองสมมาตรรอบแกนที่สภาวะคงตัวคือ [3]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = 0 \quad (1)$$

โดย \dot{Q} คืออัตราการผลิตความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัตถุ T คืออุณหภูมิ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของแข็งซึ่งในบทความนี้ยังไม่พิจารณาคูสมบัติของวัตถุที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและอุณหภูมิ

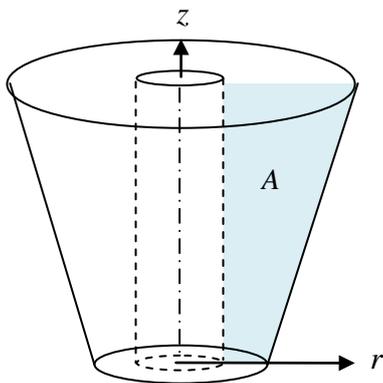
คำตอบของปัญหาการนำความร้อนคือ อุณหภูมิที่กระจายตามตำแหน่ง (r, z) ต่างๆภายในของแข็งต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบของโดเมน (domain) เงื่อนไขขอบของปัญหาการนำความร้อนทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบได้แก่ เงื่อนไขที่ระบุอุณหภูมิ (Dirichlet) บนขอบ Γ_1 , เงื่อนไขที่ระบุฟลักซ์ความร้อน (Neumann) บนขอบ Γ_2 และเงื่อนไขที่ระบุการพาความร้อน (Robin) บนขอบ Γ_3 แสดงอยู่ในสมการที่ (2), (3) และ (4) ตามลำดับ

$$T = \bar{T} \tag{2}$$

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial r} n_r + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) = \bar{q} \tag{3}$$

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial r} n_r + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) = h(T - T_\infty) \tag{4}$$

โดย \bar{T} คืออุณหภูมิที่กำหนดขึ้นมา, \bar{q} คือฟลักซ์ความร้อนที่กำหนดขึ้นมา, h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของของไหลที่สัมผัสกับขอบ Γ_3 , T_∞ คืออุณหภูมิของของไหลที่สัมผัสกับขอบ Γ_3 , เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่พุ่งออกจากขอบของโดเมนมีองค์ประกอบตามแนวรัศมี (r) และแนวแกนสมมาตร (z) เท่ากับ n_r และ n_z ตามลำดับ



รูปที่ 1 การจำลองปัญหาสามมิติด้วยแบบจำลองสองมิติ ชนิดสมมาตรรอบแกน

ฟังก์ชันรูปร่าง (shape function) สำหรับ node หมายเลข 1, 2 และ 3 ตามลำดับดังนี้

$$N_1 = (a_1 + b_1 r + c_1 z)/(2A) \tag{6}$$

$$N_2 = (a_2 + b_2 r + c_2 z)/(2A) \tag{7}$$

$$N_3 = (a_3 + b_3 r + c_3 z)/(2A) \tag{8}$$

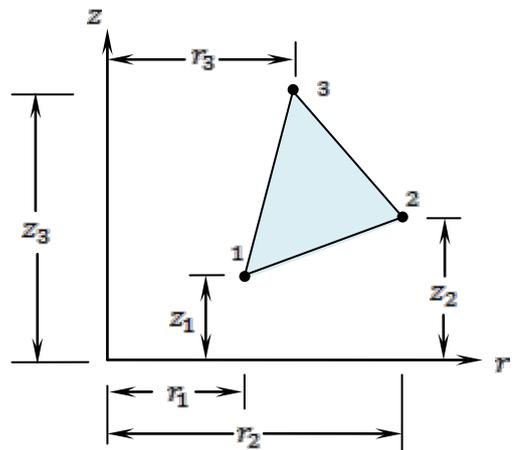
โดย A คือขนาดของพื้นที่สามเหลี่ยมในขณะที่ a_1, a_2 และ a_3 คือตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับพิกัด r และ z ของ node ทั้งสามของสามเหลี่ยมดังสมการ

$$a_1 = r_2 z_3 - r_3 z_2, b_1 = z_2 - z_3, c_1 = r_3 - r_2 \tag{9}$$

$$a_2 = r_3 z_1 - r_1 z_3, b_2 = z_3 - z_1, c_2 = r_1 - r_3 \tag{10}$$

$$a_3 = r_1 z_2 - r_2 z_1, b_3 = z_1 - z_2, c_3 = r_2 - r_1 \tag{11}$$

$$2A = (r_2 z_3 - r_3 z_2) + (r_3 z_1 - r_1 z_3) + (r_1 z_2 - r_2 z_1) \tag{12}$$



รูปที่ 2 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมชนิดสามจุดต่อ

3. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 ฟังก์ชันประมาณค่าภายในเอลิเมนต์

เอลิเมนต์ที่ใช้ในบทความนี้คือ เอลิเมนต์สามเหลี่ยมชนิดสามจุดต่อ (three-noded triangular element) แสดงอยู่ในรูปที่ 2 เป็นเอลิเมนต์ที่กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเอลิเมนต์เป็นฟังก์ชันเส้นตรงดังนี้

$$T = N_1 T_1 + N_2 T_2 + N_3 T_3 \tag{5}$$

โดย T_1, T_2 และ T_3 คืออุณหภูมิที่ node หมายเลข 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ในขณะที่ N_1, N_2 และ N_3 คือ

3.2 การสร้างสมการคำนวณ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนหลักการของกาลเลอร์กิน (Galerkin method) [1, 2] ถูกนำมาใช้เพื่อนำหาอุณหภูมิโดยประมาณโดยไม่ใช้การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยเทคนิคต่างๆของแคลคูลัส การหาคำตอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้นจากการเลือกใช้อิเล็กเมนต์ในการประมาณค่าเพื่อให้ได้สมการของเอลิเมนต์ ต่อจากนั้นนำสมการของเอลิเมนต์ต่างๆมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นสมการของระบบในรูปแบบของเมทริกซ์และเวกเตอร์ ขั้นตอนต่อไปคือการระบุเงื่อนไขให้กับปัญหาดังสมการที่ (2) ถึง (4) แล้วนำ

เมตริกซ์และเวกเตอร์ต่างๆที่ได้ทำการระบุเงื่อนไขขอบเขตแล้วไปทำการหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีเชิงเมตริกซ์เช่น วิธี Gauss Elimination, LU Decomposition หรือ Gauss Seidel เป็นต้น คำตอบจะนำมาแสดงในรูปของกราฟ $x - y$ หรือระดับชั้นของอุณหภูมิ (temperature contour) ในลำดับต่อไป รายละเอียดของการสร้างสมการคำนวณไม่สามารถนำมาแสดงได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงเลือกนำเสนอเฉพาะสมการอินทิเกรตบนหลักการของกาเลอร์กินและสมการของเอลิเมนต์ดังนี้

$$\int N_1 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} \right\} 2\pi r dr = 0 \quad (13)$$

$$\int N_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} \right\} 2\pi r dr = 0 \quad (14)$$

$$\int N_3 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} \right\} 2\pi r dr = 0 \quad (15)$$

หลังจากใช้ค่าโดยประมาณของอุณหภูมิแทนลงในสมการที่ (13) ถึง (15) ต่อจากนั้นคือการใส่ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss theorem) เพื่อสร้างเป็นระบบเมตริกซ์รูปแบบกะทัดรัด (compact form) ดังนี้

$$[k^e] \{T^e\} = \{f^e\} \quad (16)$$

โดย

$$k_{ij}^e = \int \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} k \frac{\partial N_j}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial z} k \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) 2\pi r dr + \int h N_i N_j 2\pi r d\Gamma, (i = 1,2,3; j = 1,2,3) \quad (17)$$

$$f_{ij}^e = \int N_i \dot{Q} 2\pi r dr + \int h N_i N_j 2\pi r d\Gamma + \int \bar{q} N_i 2\pi r d\Gamma, (i = 1,2,3; j = 1,2,3) \quad (18)$$

$$\{T^e\} = [T_1 \ T_2 \ T_3]^T \quad (19)$$

พจน์ที่มี h และ \bar{q} จะถูกนำมาคำนวณเมื่อด้านใดด้านหนึ่งของเอลิเมนต์เป็นขอบเขตโดเมนที่มีการระบุเงื่อนไขการพาความร้อนและฟลักซ์ความร้อนเท่านั้น

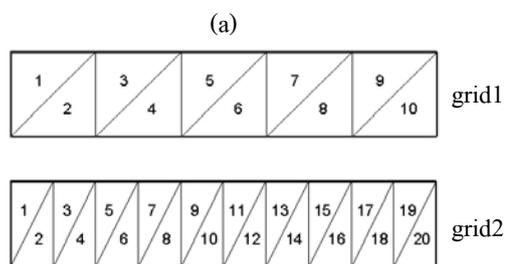
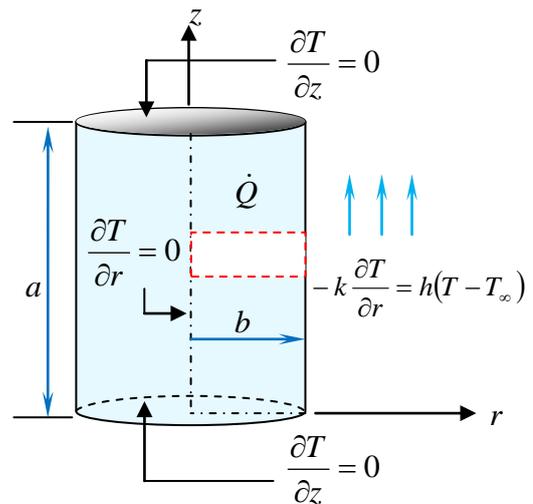
4. การทดสอบ

หลักการทางทฤษฎีในหัวข้อที่ 3 ถูกเปลี่ยนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งพัฒนาขึ้นจากภาษาฟอร์แทรน 90 ให้ชื่อว่า FEM_AXIS เพื่อให้สามารถคำนวณได้หลายปัญหา

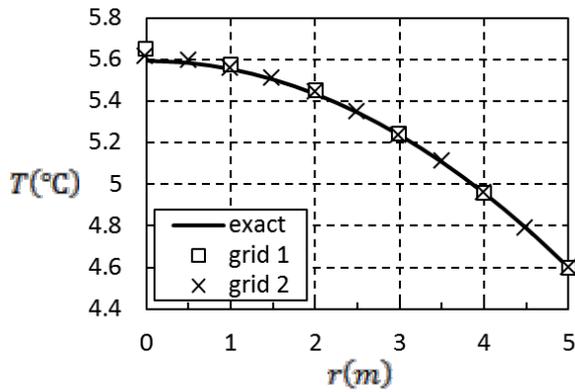
ผ่านทางกรอ่านข้อมูลทางไฟล์นำเข้าที่เป็นไฟล์รหัส ASCII และส่งข้อมูลออกมาทางไฟล์ส่งออกซึ่งเป็นไฟล์รหัส ASCII

4.1 แท่งทรงกระบอกตันที่สามารถผลิตความร้อนได้

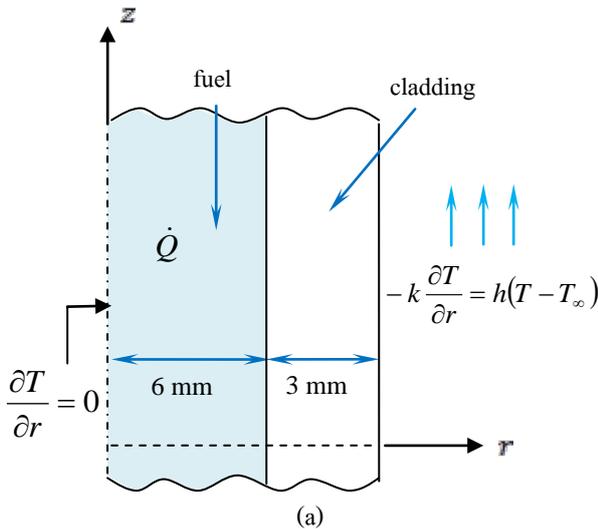
โดเมนและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาแสดงอยู่ในรูปที่ 3 (a) กริดที่เลือกใช้คือ grid1 (กริดหยาบ) และ grid2 (กริดที่ละเอียดขึ้น) ดังรูปที่ 3 (b) แท่งทรงกระบอกตันมีรัศมีเท่ากับ $b = 5\text{ m}$ และความสูงเท่ากับ $a = 5\text{ m}$ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแท่งโลหะมีค่าเท่ากับ $k = 15.1\text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ การผลิตความร้อนด้วยอัตรา $\dot{Q} = 2.4\text{ W}/\text{m}^3$ เกิดขึ้นในแท่งทรงกระบอก ผิวด้านบนและล่างของทรงกระบอกไม่มีไหลผ่านของความร้อน ผิวด้านข้างของวัสดุมีการพาความร้อนไปสู่ของไหลอุณหภูมิ $T_\infty = 4^\circ\text{C}$ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนคือ $h = 10\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ รูปที่ 4 แสดงการกระจายอุณหภูมิจาก FEM_AXIS และวิธีเชิงวิเคราะห์ [3]



รูปที่ 3 (a) รูปร่างและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาที่ 1 (b) กริดสามเหลี่ยมที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 4 การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของทรงกระบอกตันที่ได้จาก FEM_AXIS ซึ่งใช้กริดหยาบ (grid1), กริดที่ละเอียดขึ้น (grid2) และคำตอบที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์



1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37
2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38

(b)

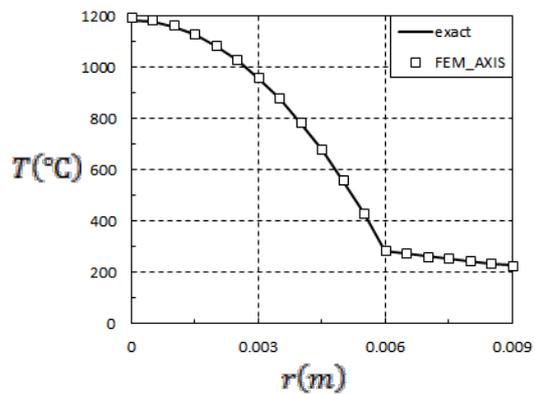
รูปที่ 5 (a) รูปร่างและเงื่อนไขขอบของปัญหาที่ 2

(b) กริดสามเหลี่ยมที่ใช้ในการคำนวณ

4.2 แท่งทรงกระบอกสองชั้น (fuel-cladding composite)

ปัญหานี้เกี่ยวข้องกับแท่งทรงกระบอกที่ซ้อนกันสองชั้น แท่งทรงกระบอกชั้นในคือแท่งทรงกระบอกตันที่ทำจากยูเรเนียมออกไซด์ (UO₂) เรียกว่า fuel element ขนาดรัศมีเท่ากับ 6 mm มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อน $k_f = 2W/(m \cdot ^\circ C)$ อัตราการผลิตความร้อนของ fuel element คือ $\dot{Q} = 2 \times 10^8 W/m^3$ แท่งทรงกระบอกชั้นนอกที่นำมาหุ้มชื่อว่า cladding ทำจากวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน $k_c = 25W/(m \cdot ^\circ C)$ ไม่

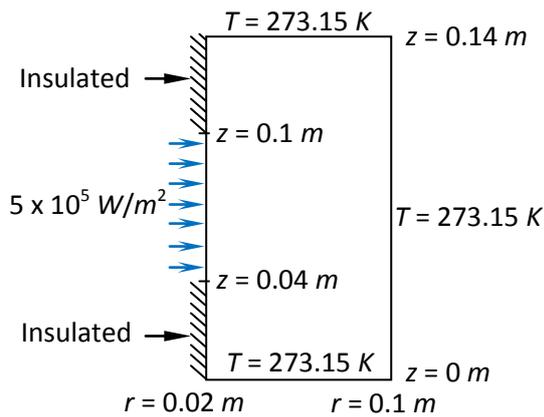
สามารถการผลิตความร้อนได้ ความหนาของ cladding คือ 3 mm ผิวด้านบน ($z = 6m$) และผิวด้านล่าง ($z = 0m$) ของทรงกระบอกทั้งสองได้รับการหุ้มฉนวนเป็นอย่างดี ผิวด้านนอกของ cladding สัมผัสกับของไหลที่มีอุณหภูมิ $T_\infty = 27^\circ C$ และมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย $h = 2000W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ รูปร่างโดเมนและเงื่อนไขของปัญหาที่ 2 แสดงอยู่ในรูปที่ 5 (a) กริดที่ใช้ในการคำนวณแสดงอยู่ในรูปที่ 5 (b) การกระจายอุณหภูมิจาก FEM_AXIS ถูกนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณจากวิธีเชิงวิเคราะห์ในรูปที่ 6



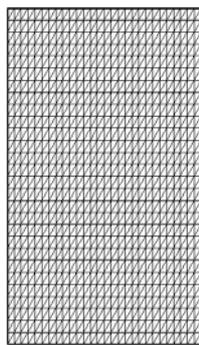
รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของทรงกระบอกซ้อนกันสองชั้นที่ได้จาก FEM_AXIS และคำตอบที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์

4.3 แท่งทรงกระบอกกลวงไม่มีแหล่งผลิตความร้อนแต่มีฟลักซ์ความร้อนที่ผนังด้านใน

พิจารณาทรงกระบอกกลวง ซึ่งมีขนาดรัศมีด้านในและด้านนอกเท่ากับ 2 cm และ 10 cm ตามลำดับ ขนาดความสูงของทรงกระบอกคือ 14 cm ดังรูปที่ 7 (a) ทรงกระบอกไม่มีการผลิตความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุคือ $k = 52W/(m \cdot K)$ อุณหภูมิที่ผิวด้านนอก ผิวด้านบนและผิวด้านล่างของทรงกระบอกมีค่าคงที่เท่ากับ $273.15 K$ ผิวด้านในบางส่วนของทรงกระบอกได้รับฟลักซ์ความร้อน $5 \times 10^5 W/m^2$ ในขณะที่ผิวด้านในบางส่วนได้รับการหุ้มฉนวน จำนวนจุดต่อและเอลิเมนต์ที่ใช้ใน FEM_AXIS คือ 841 และ 1568 ตามลำดับดังรูปที่ 7 (b)

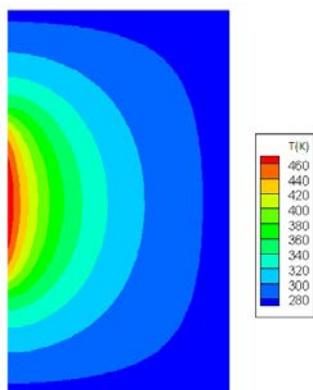


(a)



(b)

รูปที่ 7 (a) รูปร่างสามมิติ, โดเมนสองมิติที่ใช้ในการจำลอง และเงื่อนไขขอบของปัญหาที่ 3 (b) กริดสามเหลี่ยมที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 8 การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของทรงกระบอกกลวงที่ได้จาก FEM_AXIS

การกระจายอุณหภูมิจาก FEM_AXIS แสดงอยู่ในรูปที่ 8 อุณหภูมิที่ตำแหน่ง $r = 0.04 \text{ m}$ และ $z = 0.04 \text{ m}$ ใช้สำหรับการเปรียบเทียบคำตอบระหว่างโปรแกรม FEM_AXIS กับโปรแกรม COMSOL [5] ซึ่งใช้

เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม และจำนวน node เท่ากับโปรแกรม FEM_AXIS อุณหภูมิที่ได้จาก FEM_AXIS คือ 332.97 K และอุณหภูมิที่ได้จาก COMSOL คือ 332.88 K เห็นได้ว่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งดังกล่าวที่ได้จากโปรแกรม FEM_AXIS ใกล้เคียงกับคำตอบที่ได้จากโปรแกรม COMSOL

5. สรุป

บทความนี้อธิบายทฤษฎีและการประยุกต์ใช้การคำนวณเชิงตัวเลขชื่อว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาการนำความร้อนชนิดสมมาตรรอบแกน ที่สภาวะคงตัว องค์ประกอบสำคัญของเนื้อหาได้แก่ การนำเสนอเอลิเมนต์สามเหลี่ยมสามจุดต่อเพื่อการคำนวณอย่างง่าย คำอธิบายเกี่ยวกับสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ขั้นตอนการพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับวิธีอื่น พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำ และเหมาะที่จะใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ ผู้เขียนคาดหวังว่าเนื้อหาในบทความนี้จะประโยชน์ต่อผู้วิจัยท่านอื่นที่ต้องการหาคำตอบเชิงตัวเลขสำหรับปัญหาการนำความร้อนในโดเมนสมมาตรรอบแกนได้โดยไม่ต้องอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปราคาแพงจากต่างประเทศ อย่างไรก็ตาม การศึกษาในครั้งนี้ไม่ได้สนใจผลกระทบของความไม่แม่นยำเชิงเส้นใดๆ เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุ เงื่อนไขขอบเขตการศึกษาในครั้งนี้อาจใช้ข้อมูลเบื้องต้นให้กับปัญหาอื่นๆ ได้แก่ ปัญหาการนำความร้อนภายในวัสดุประกอบ (composite material) ที่สภาวะไม่คงตัว ปัญหาเกี่ยวกับพลศาสตร์ของไหลร่วมกับการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. J., Fagan, Finite Element Analysis Theory and Practice, Pearson Education Limited, 1992.
- [2] L.J., Segerlind, Applied Finite Element Analysis, Wiley, 1984.

- [3] M.N., Ozisik, Heat Transfer A Basic Approach, McGraw-Hill, 1985.
- [4] F.P., Incropera, and D.P., Dewitt, Fundamental of Heat and Mass Transfer, Wiley, 1996.
- [5] R.W., Pryor, Multiphysics modeling using COMSOL: a first approach, Jones and Barlett Publishers, 2011.

การปรับปรุง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกุ้ง

Improvement of Air Chamber of Shrimp Freezer

ชญญา อุไรจรี จารุพล สุริยวานกุล เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ นำเสนอถึงการจำลองการไหลของอากาศ (Airflow) ภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกุ้ง ที่ใช้แช่แข็งกุ้งในอุตสาหกรรมการผลิตกุ้งแช่แข็ง เนื่องจากกระบวนการแช่แข็งอาหารเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างมาก เพราะการไหลของอากาศภายใน Air Chamber ส่งผลกระทบบ้างถึงอัตราการแช่แข็ง อุณหภูมิ และความเร็วลม ทั้งหมดล้วนส่งผลถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์กุ้งแช่แข็ง วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือการปรับปรุงการไหลของอากาศ โดยการติดตั้งแผงกระจายลมด้านบนทางเข้าอากาศในเครื่องแช่แข็งกุ้งแบบเดิม โดยการวิเคราะห์ผลแบบจำลองการไหลของอากาศภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกุ้งด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) แบบจำลองการไหลของอากาศถูกคำนวณด้วยโปรแกรม SC/Tetra เวอร์ชันที่ 13 ผลการคำนวณแบบจำลองการไหลของอากาศภายใน Air Chamber แบบเดิมและแบบปรับปรุงแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการไหลของอากาศแบบปรับปรุงมีความสม่ำเสมอของอัตราการไหลของอากาศทางออกที่ดีขึ้น 13.57% เมื่อเทียบกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลรวมอัตราการไหลของอากาศที่ทางออกอากาศ

คำสำคัญ : พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, การไหลของอากาศ, เครื่องแช่แข็ง, การปรับปรุงเครื่องแช่แข็ง

Abstract

This research presents the simulation of air flow in the air chamber of shrimp freezer. The frozen process is important because discharging airflow from air chamber influences the quality of the product, dependent on the duration of freezing time, temperature, and air velocity. The objective of this study is to improve the air flow by modifying the direction of the air inlet and to analyze by using program SC/Tetra V.13. The results from the simulation show that the improved model improved air-flow rate-uniformity at the outlet increasing by 13.57% from the SD compared to the original model

Keywords : Computational fluid dynamics, Airflow, Freezer, Improvement of freezer.

1. บทนำ

ในปัจจุบัน มีหลากหลายวิธีที่สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารให้คงคุณภาพที่ดีไว้ได้ หนึ่งในวิธีที่ดีที่สุดสำหรับเก็บรักษาอาหารก็คือการแช่แข็ง[1] เครื่องแช่แข็ง (Freezer) มีหลายชนิดที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง เช่น เครื่องแช่แข็งแบบใช้ลมเป่า (Air blast freezers) เครื่องแช่แข็งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed freezers) เครื่องแช่แข็งแบบใช้อากาศเย็นปะทะ (Impingement freezers) และเครื่องแช่แข็งแบบไครโอจินิก (Cryogenics freezer) โดยเครื่องแช่แข็งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งคือ เครื่องแช่แข็งแบบใช้ลมเป่า [2] ซึ่งกระบวนการของเครื่องแช่แข็งชนิดนี้จะใช้อากาศเย็นเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ผลิตภัณฑ์จะถูกเป่าด้วยอากาศเย็น ทำให้ผลิตภัณฑ์ถูกแช่ให้แข็งตัวอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิใจกลาง (Core temperature) ตามที่ต้องการ โดยผลิตภัณฑ์กึ่งแช่แข็งควรมีอุณหภูมิใจกลางที่ -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า

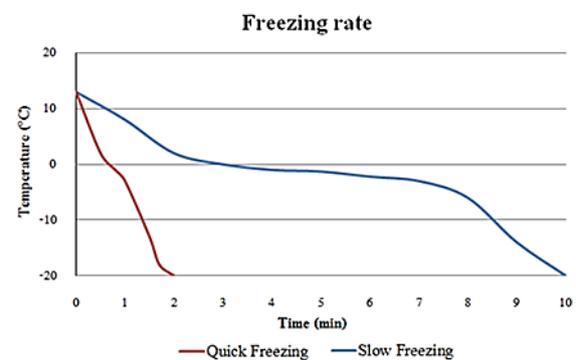
การแช่แข็งเป็นการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อาหารลงจนกระทั่งผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (Freezing point) 1-2 องศาเซลเซียส[3] อุณหภูมินี้จะทำให้แบคทีเรียหยุดเจริญเติบโต ทำให้สามารถยืดระยะเวลาการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์ การแช่แข็งอาหารจึงเป็นวิธีการถนอมอาหารเพื่อยืดระยะเวลาของผลิตภัณฑ์อาหารที่ถูกถนอมไว้ให้คงอยู่ได้นานขึ้น กระบวนการแช่แข็งอาหารจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างมากของอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง

กระบวนการแช่แข็ง เป็นกระบวนการที่ของเหลวภายในอาหารจะแปรสภาพเป็นของแข็ง เรียกว่าการเกิดผลึกน้ำแข็ง (Ice crystal formation) [3],[4] สามารถแบ่งการเกิดผลึกน้ำแข็งออกเป็น 2 ช่วง คือ

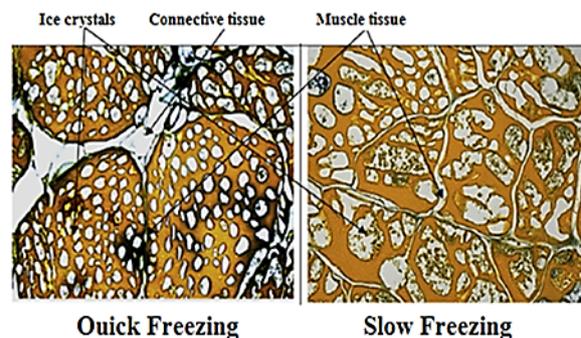
- 1) การเกิดนิวเคลียสน้ำแข็ง (Nucleation)
- 2) การเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง (Crystal growth)

การเกิดผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งจะขึ้นอยู่กับอัตราการแช่แข็ง (Freezing Rate) [1],[4] อุณหภูมิ (Temperature) และความเร็วลม (Air velocity) ทั้งอัตราการแช่แข็ง อุณหภูมิ และความเร็วลม ขึ้นอยู่กับการไหล

ของอากาศ (Airflow) ทั้งหมดเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร ทั้งนี้หากความเร็วในการแช่แข็งเร็ว (Quick freezing) จะทำให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก แต่ช้าความเร็วในการแช่แข็งช้า (Slow freezing) จะทำให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ [5],[6] ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่จะสร้างความเสียหายให้กับเซลล์ของอาหาร ทั้งนี้คุณภาพของอาหารแช่แข็งสามารถวัดได้ด้วย สี (Color) [7] และเนื้อสัมผัส (Texture) [5] เป็นต้น



รูปที่ 1 กราฟแสดงอัตราการแช่แข็งระหว่างการแช่แข็งเร็วและการแช่แข็งช้า



รูปที่ 2 ขนาดผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น เมื่อใช้ความเร็วในการแช่แข็งเร็วและช้า [5]

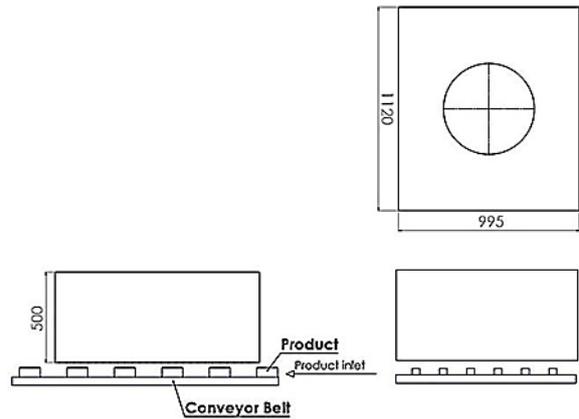
การที่ผู้บริโภคมีความต้องการซื้อผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้อุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งเจริญเติบโตมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ภาคอุตสาหกรรมต้องออกแบบพัฒนาระบบการทำงานของเครื่องแช่แข็ง เพื่อให้ได้เครื่องแช่แข็งที่มีประสิทธิภาพในการแช่แข็งที่สูงขึ้น โดยที่ผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งยังคงคุณภาพที่ดีเหมือนเดิม

เป้าหมายของโครงการวิจัยนี้คือการปรับปรุง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่ง เนื่องจากเครื่องแช่แข็งกึ่งในปัจจุบันอากาศเย็นที่ไหลออก ทางออกอากาศของ Air Chamber ไปยังบริเวณพื้นที่แช่แข็ง (Freezing area) มีการไหลออกของอากาศเย็นที่ไม่สม่ำเสมอจนตลอดหน้าตัดของสายพาน ทำให้ผลิตภัณฑ์กึ่งแช่แข็งที่ผ่านกระบวนการแช่แข็งตลอดพื้นที่หน้าตัดระนาบเดียวกัน ได้รับอากาศเย็นไม่เท่ากัน ทำให้ผลิตภัณฑ์กึ่งแช่แข็งมีการแข็งตัวที่ไม่สม่ำเสมอ จึงเป็นที่มาในการติดตั้งแผงกระจายลมด้านบนทางเข้าอากาศ เพื่อกำจัดหรือลดการไหลของอากาศแบบหมุนวน (Swirling airflow) ภายใน Air Chamber และเพื่อให้ได้ผลลัพธ์การไหลออกของอากาศเย็นที่สม่ำเสมอจนตลอดหน้าตัดของสายพานมากที่สุด โดยการใช่วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) มาวิเคราะห์ผลด้วยการสร้างแบบจำลอง จำลองการไหลของอากาศภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่ง โดยใช้โปรแกรม SC/Tetra เวอร์ชันที่ 13

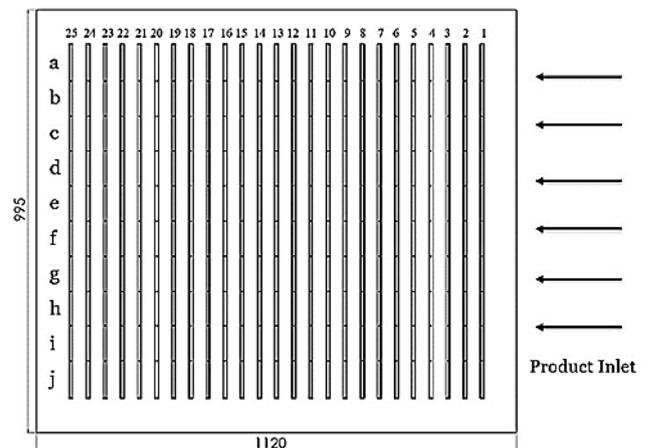
2. ระเบียบวิธีการแก้ปัญหา

2.1 แบบจำลอง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่ง

สร้างแบบจำลอง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่ง มีขนาดห้อง $995 \times 1120 \times 500$ mm³ ทางเข้าอากาศเย็น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 mm โดยที่อากาศเย็นไหลเข้าด้านบนของ Air Chamber และไหลออกด้านล่างของ Air Chamber ทั้ง 25 ช่องทางออกอากาศ มีขนาดพื้นที่ 5×830 mm² ไปยังบริเวณพื้นที่แช่แข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3 ทำการบันทึกผลลัพธ์ค่าอัตราการไหลของอากาศ ที่ทางออกอากาศด้านล่างของ Air Chamber ทั้ง 25 ช่องทางออกอากาศ โดยแต่ละช่องแบ่งการเก็บบันทึกข้อมูลออกเป็น 10 พื้นที่ (พื้นที่แถว a ถึงพื้นที่แถว j) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยทุกพื้นที่การเก็บบันทึกข้อมูลมีขนาดพื้นที่เท่ากัน 5×83 mm² จากนั้นใช้โปรแกรม SC/Tetra สร้างแบบจำลองเมช (Mesh) ขึ้นมา เพื่อทำการคำนวณและวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 3 แบบจำลอง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่งแบบเดิม



รูปที่ 4 พื้นที่บันทึกผลลัพธ์ค่าอัตราการไหลของอากาศ ทั้ง 250 พื้นที่

การวิเคราะห์ความเป็นอิสระของเมช (Mesh Independent Analysis) เพื่อหาแบบจำลองเมชที่มีความเหมาะสม ได้สร้างแบบจำลองเมช 4 ขนาด ที่มีความละเอียดของทางออกอากาศที่แตกต่างกัน พบว่าแบบจำลองเมชขนาด 0.3125 mm จำนวน 10.5 ล้านเอลิเมนต์ มีความเหมาะสมทั้งในแง่ของเวลาที่ใช้คำนวณและผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ

2.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ในงานวิจัยนำเสนอการคำนวณแบบจำลอง turbulence model โดยกำหนดให้การไหลของอากาศเป็นแบบบิบัลไม่ได้ ที่มีความหนาแน่นคงที่ ประกอบไปด้วย

สมการที่ (1) สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

และสมการที่ (2) สมการโมเมนตัม (Momentum conservation equation)

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho g_i \beta (T - T_o) \quad (2)$$

เมื่อ	x_i	Coordination (m)
	u_i	Velocity of flow in x_i -direction (m/s)
	t	Time (s)
	ρ	Density of fluid (kg/m ³)
	p	Pressure of a fluid (Pa)
	μ	Viscosity (Pa-s)
	g_i	Gravity (m/s ²)
	β	Coefficient of volume expansion (1/K)
	T	Temperature of a fluid (K)
	T_o	Reference temperature of a fluid (K)

2.3 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

การกำหนดค่าต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณผลลัพธ์ความเร็วลมของอากาศ โดยโปรแกรม SC/Tetra เลือกใช้การคำนวณแบบสภาวะคงที่ (Steady-State) กำหนดค่าคุณสมบัติของอากาศ (Air properties) ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature) ความหนาแน่น (Density) และความหนืด (Viscosity) ดังแสดงในตารางที่ 1 และกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของพื้นที่ทางเข้าอากาศและทางออกอากาศ (Inlet and outlet air boundary conditions) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอากาศ

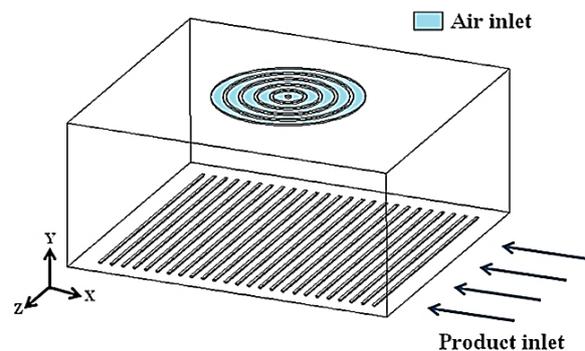
Air properties	
Temperature	-15 °C
Density	1.30410 kg/m ³
Viscosity	1.64720 × 10 ⁻⁵ kg/m-s

ตารางที่ 2 ค่าเงื่อนไขขอบเขตของพื้นที่ทางเข้าอากาศและทางออกอากาศ

Inlet air boundary condition	
Flow rate	2.85885 m ³ /s
Outlet air boundary condition	
Pressure	0 Pa

3. การปรับปรุง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่ง

สร้างแบบจำลองการปรับปรุง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่ง ด้วยการติดตั้งแผงกระจายลมเข้าไปด้านบนของทางเข้าอากาศ ในแบบจำลอง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่งแบบเดิม ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ และค่าเงื่อนไขขอบเขตของพื้นที่ทางเข้าอากาศและทางออกอากาศคงที่ทุกการทดลองจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศ และนำผลการบันทึกอัตราการไหลของอากาศทางออกมาเปรียบเทียบกับระหว่างแบบจำลองเดิมและแบบปรับปรุง



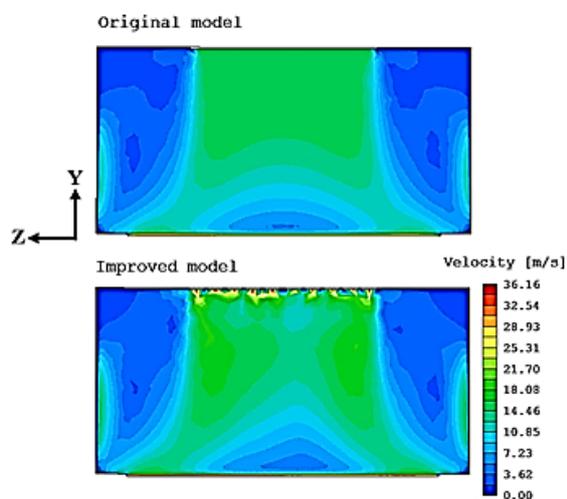
รูปที่ 5 แบบจำลอง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่งแบบปรับปรุง

4. ผลการคำนวณและการอภิปราย

4.1 ผลการจำลองคอนทัวร์ของความเร็วลม

จากการคำนวณแบบจำลองการไหลของอากาศขึ้นภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่งแบบเดิมและแบบปรับปรุง นำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณแบบจำลองมาแสดงในรูปแบบของคอนทัวร์ของความเร็วลม (Contour velocity) ดังแสดงในรูปที่ 6 แสดงคอนทัวร์ของความเร็ว

ลม ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาว Air Chamber ใน ระบาย y-z ที่ตำแหน่ง $x = 560$ mm พบว่าการไหลของ อากาศเย็นภายใน Air Chamber เกิดการไหลของอากาศ แบบหมุนวนทั้งแบบจำลองแบบเดิมและแบบปรับปรุง แต่ จะเห็นได้ว่าในคอนทัวร์ของความเร็วมของแบบจำลอง แบบปรับปรุง เกิดการไหลของอากาศแบบหมุนวนเล็กน้อย ส่งผลทำให้อัตราการไหลของอากาศทางออกอากาศไปยัง บริเวณพื้นที่แช่แข็ง มีอัตราการไหลออกของอากาศเย็นที่มี ความสม่ำเสมอกันตลอดหน้าตัดของสายพานมากขึ้น



รูปที่ 6 คอนทัวร์ของความเร็วมของแบบจำลองการไหล อากาศแบบเดิมและแบบปรับปรุง

4.2 อัตราการไหลของอากาศที่ทางออกอากาศของ Air Chamber

การบันทึกผลลัพธ์ค่าอัตราการไหลของอากาศทั้ง 250 พื้นที่ทางออกอากาศของ Air Chamber ที่แต่ละพื้นที่มี พื้นที่ทางออกเท่ากัน ผลลัพธ์การคำนวณที่ได้จาก แบบจำลองการไหลของอากาศเย็นภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งแบบเดิมและแบบปรับปรุง ถูก นำเสนอด้วยค่าของผลรวมของอัตราการไหลของอากาศ (Total air-flow rate at the outlet) ที่ทางออกอากาศในทุก พื้นที่แถว a ตั้งแต่ทางออกหลักที่ 1 ถึงหลักที่ 25 เรื่อยมา จนกระทั่งพื้นที่แถว j ตั้งแต่ทางออกหลักที่ 1 ถึงหลักที่ 25 พบว่าผลรวมอัตราการไหลของอากาศที่ทางออกอากาศ ภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งแบบปรับปรุง

ดีกว่าแบบเดิม จากการเปรียบเทียบค่าของส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (Standard Deviation, SD) ทั้งนี้ทำให้แบบจำลอง แบบปรับปรุงมีการไหลออกของอากาศเย็นที่มีความ สม่ำเสมอกันตลอดหน้าตัดของสายพานมากกว่า แบบจำลองแบบเดิม ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลรวมอัตราการไหลของอากาศที่ทางออก อากาศในทุกพื้นที่แถว a ถึงพื้นที่แถว j

Total air-flow rate at the outlet (m^3/s)		
Surface	Original model	Improved model
a	0.26219	0.26448
b	0.27386	0.27666
c	0.28919	0.28921
d	0.29938	0.29691
e	0.30445	0.30139
f	0.30452	0.30176
g	0.29964	0.29779
h	0.28944	0.28957
i	0.27414	0.27656
j	0.26204	0.26452
SD	0.01666	0.01440

5. สรุป

ผลกระทบเชิงลบจากการไหลของอากาศแบบหมุนวน ไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงให้เกิดขึ้นได้ ทั้งในแบบจำลอง การไหลของอากาศเย็นภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่ แข็งแบบเดิมและแบบปรับปรุง อย่างไรก็ตามใน แบบจำลองการไหลแบบปรับปรุง ด้วยการติดตั้งแผง กระจายลมเข้าไปด้านบนทางเข้าอากาศ ให้ผลการไหลออก ของอากาศเย็นที่มีความสม่ำเสมอกันตลอดหน้าตัดของ สายพานเพิ่มขึ้น 13.57% เมื่อเทียบกับจากส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของผลรวมอัตราการไหลของอากาศที่ทางออก อากาศจากแบบจำลองเดิม 0.01666 เป็น 0.01440

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม (NSTDA University Industry Research Collaboration) โดยฝ่ายพัฒนาบัณฑิตและนักวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้การสนับสนุนในผลงานวิจัย และขอขอบคุณบริษัท หมายเหตุว่า (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมถึงให้คำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอด

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Luis A., et al, "Cryogenic and air blast freezing techniques and their effect on the quality of catfish fillets," LWT-Food Science and Technology, Vol. 54, pp.377-382, 2013.
- [2] Patrick Dempsey, Pradeep Bansal, "The art of air blast freezing: Design and efficiency considerations," Applied Thermal Engineering, Vol.41, pp.71-83, 2012.
- [3] Lilian Daniel Kaale, Trygve Magne Eikevik, Turid Rustad, Kjell Kolsaker, "Superchilling of food: A review," Journal of Food Engineering, Vol.107, pp. 141-146, 2011.
- [4] Lilian D., Trygve M., Tora B., Elin K., Tom S., "The effect of cooling rates on the ice crystal growth in air-packed salmon fillets during superchilling and superchilled storage," International journal of refrigeration, Vol.36, pp.110-119, 2013.
- [5] Lilian Daniel Kaale, et al, "Ice crystal development in pre-rigor Atlantic salmon fillets during superchilling process and following storage," Food Control, Vol. 31, pp.491-498, 2013.
- [6] R.M. Khadatkar, S. Kumar, S.C. Pattanayak, "Cryofreezing and cryofreezer," Cryogenics, Vol.44, pp.661-678, 2004.
- [7] Abdullah A., et al, "Freezing of fresh Barhi dates for quality preservation during frozen storage," Saudi Journal of Biological Sciences, 2016.

การลดความเร็วการไหลของก๊าซฮีเลียม

ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้สปอยเลอร์

Decreasing of Helium Flow Velocity inside

Hard Disk Drive by Using Spoiler

สุพิชชา ถวิลไพโร จารุพล สุริยวนากุล เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

การติดตั้งอุปกรณ์ลดความเร็วที่ปะทะบริเวณหัวอ่านเขียน (Head Gimbals Assembly) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive) ที่เรียกว่า สปอยเลอร์ (Spoiler) จะช่วยลดการไหลที่ปะทะบริเวณแกนหัวอ่านเขียน ซึ่งก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนที่หัวอ่านเขียนจนเป็นผลให้การส่งผ่านข้อมูลผิดพลาด (Positioning Errors) ได้ ต่อมาได้มีการเติมก๊าซฮีเลียมเข้าไปในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อลดแรงปะทะระหว่างอุปกรณ์ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้กล่าวถึงการศึกษาการไหลของก๊าซฮีเลียม (Helium Flow) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้วและมีความเร็วการหมุน 7,200 รอบต่อนาที โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS เวอร์ชัน 14.5 ผลการจำลองแสดงให้เห็นรูปแบบการกระจายความเร็ว (Velocity Profile) ของสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 25 มิลลิเมตรและมีความยาว 30 มิลลิเมตร สามารถลดการกระจายความเร็วของก๊าซฮีเลียมบริเวณหลังสปอยเลอร์ได้ดีที่สุดจากสปอยเลอร์ทั้งหมด 12 โมเดล เนื่องจากสปอยเลอร์ขนาดดังกล่าวสามารถเบี่ยงเบนการไหลที่มีความเร็วสูงไม่ให้ปะทะบริเวณแกนหัวอ่านเขียนโดยตรงได้ดีกว่าสปอยเลอร์ขนาดอื่น และเมื่อลดการไหลที่ปะทะบริเวณแกนหัวอ่านเขียนได้ ส่งผลให้การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่านเขียนลดลง

คำสำคัญ : ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, การไหลของก๊าซฮีเลียม

Abstract

The installation of spoiler that strikes the (Head Gimbals Assembly: HGA) in hard disk drive, that causes a vibration on the HGA and also causes the positioning errors. Filling helium gas in the hard disk drive is helpful for reducing the strikes force on the parts in hard disk drive. In this research, Helium flow in hard disk drive (3.5 inch with 7,200 rpm) is simulated by using ANSYS fluent v.14.5 software. The results show that the velocity profile of the width 25 and length 30 millimeters spoiler is the most suitable one that reduces and divert the helium flow which strikes the HGA. When the flow of the HGA reduces, therefore the vibration will reduce as well.

Keywords : Hard Disk Drive, Computational Fluid Dynamics, Helium Flow

1. บทนำ

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่สำคัญของคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้มีการพัฒนาความจุข้อมูลให้เพิ่มมากขึ้นและเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงข้อมูล (Access Time) ให้เร็วขึ้น ดังนั้นอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จึงพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยออกแบบหัวอ่านเขียนให้มีขนาดเล็กลง เพื่อให้เขียนข้อมูลได้มากขึ้น และออกแบบให้แผ่นดิสก์หมุนด้วยความเร็วที่สูงขึ้น เพื่อเพิ่มความเร็วในการส่งผ่านข้อมูล เพราะเหตุนี้จึงทำให้การไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่เกิดจากการเพิ่มความเร็วการหมุนนั้น ส่งผลให้แขนหัวอ่านเขียนสิ้นสะเก็ทอนได้ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยลดการสิ้นสะเก็ทอนของอุปกรณ์ภายในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ได้แก่ การติดตั้งสปอยเลอร์ (Spoiler) เพื่อลดความเร็วของอากาศที่ปะทะบริเวณแขนหัวอ่านเขียน ซึ่งสปอยเลอร์นี้ยังมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันไป เช่น ดิสก์เซพวาเรเตอร์ (Disk Separator), แดมเปอร์ (Damper) และแอร์ชราวด์ (Air Shroud) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาวิธีการอื่นเพื่อลดการสิ้นสะเก็ทอนได้แก่ การเติมก๊าซฮีเลียมเข้าไปในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เนื่องจากก๊าซฮีเลียมมีน้ำหนักเบาและมีความหนาแน่นน้อยกว่าอากาศ และที่สำคัญเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟ

ในการออกแบบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการไหลของก๊าซนั้น ปัจจุบันนิยมใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือที่เรียกว่า วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการลดความเร็วการไหลภายในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์พบว่า Hirono และคณะ [1] ทำการติดตั้งสปอยเลอร์ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เพื่อศึกษาผลของความหนาและความยาวของสปอยเลอร์ที่มีผลต่อความเร็วลมที่กระทบบริเวณแขนหัวอ่านเขียน พบว่าสปอยเลอร์สามารถลดความเร็วลมที่ปะทะได้ แต่การเพิ่มความหนาและความยาวของสปอยเลอร์ที่มากเกินไปจะไม่มีผลต่อการลดความเร็วลมปะทะ จากนั้น จารุพล สุริยวานากุล และเกียรติฟ้า ตั้งใจจิต [2]

ทำการศึกษาผลของการลดความเร็วลมในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ความเร็วสูงพบว่า เมื่อความหนาของสปอยเลอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้ความเร็วลมบริเวณขอบนอกของแผ่นดิสก์ลดลง แต่จะทำให้ลมเบี่ยงเบนเข้าสู่บริเวณขอบในของแผ่นดิสก์เพิ่มขึ้น ต่อมา วรรณญา กันแก้ว และเกียรติฟ้า ตั้งใจจิต [3] ได้ศึกษารูปร่างของสปอยเลอร์ที่มีผลต่อการลดความเร็วลมพบว่า สปอยเลอร์ที่มีความยาวมากกว่าจะสามารถลดความเร็วลมปะทะได้มากกว่า ต่อมา Sato และคณะ [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของก๊าซฮีเลียมที่มีผลต่อการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์พบว่าก๊าซฮีเลียมสามารถถ่ายเทความร้อนจากการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ได้อีกทั้งยังลดพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากความต้านการไหลของอากาศ เมื่อพิจารณาการทำงานภายใต้การไหลของอากาศเพื่อเปรียบเทียบกับก๊าซฮีเลียม [5], [6] โดยใช้ ANSYS/CFX Software ในการจำลองการไหลของอากาศและก๊าซฮีเลียม โดยใช้โมเดล Direct Numerical Simulation (DNS) โดยพิจารณาถึงความหนาแน่นของลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผลต่อแขนหัวอ่านเขียน พบว่าที่ความเร็วการหมุนเท่ากันในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่เติมก๊าซฮีเลียมจะสามารถกระจายความเร็วได้ดีกว่าอากาศ และเมื่อความเร็วการหมุนของแผ่นดิสก์เพิ่มขึ้น [7] จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนในก๊าซฮีเลียมมากกว่าในอากาศ แต่เนื่องจากฮีเลียมที่มีความหนืดสูงกว่าอากาศ และมีความหนาแน่นต่ำกว่าอากาศจึงทำให้การไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นกระทบต่อบริเวณแขนหัวอ่านเขียนน้อยมาก เป็นที่น่าสนใจว่าแม้ความเร็วการหมุนของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่เติมก๊าซฮีเลียมเพิ่มขึ้น แต่ยังไม่สามารถลดความปั่นป่วนที่อาจกระทบต่อบริเวณแขนหัวอ่านเขียนได้ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ต้องการติดตั้งสปอยเลอร์เพื่อหาผลกระทบที่เกิดขึ้นในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่เติมก๊าซฮีเลียม

2. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ขอบเขตการไหลของก๊าซฮีเลียมในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์สมมติให้การไหลดังกล่าวเกิดจากของไหลที่บีบอัดไม่ได้

และมีความหนาแน่นคงที่ จะได้สมการอนุรักษ์มวล (1) และสมการโมเมนตัม (2) ดังนี้ [8]

$$\nabla \cdot \underline{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \underline{U}}{\partial t} + \underline{U} \cdot \nabla \cdot \underline{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \underline{U} \quad (2)$$

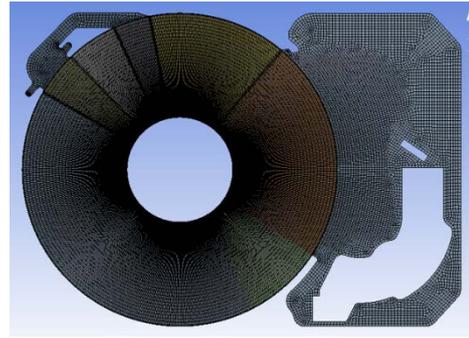
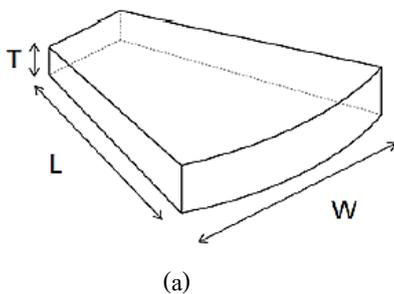
เมื่อ \underline{U} คือความเร็วการไหล, ρ คือความหนาแน่น และ P คือความดันของก๊าซฮีเลียมในขณะที่ทำการทดลอง

สมการความปั่นป่วนที่นิยมใช้ในการจำลองการไหลของก๊าซภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้แก่ โมเดล Realizable k-epsilon เนื่องจากเป็นโมเดลที่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยและสามารถให้ผลการคำนวณที่มีความถูกต้องสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) อีกด้วย [9]

3. ระเบียบวิธีการแก้ปัญหา

3.1 แบบจำลองของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้ในการจำลองการไหลจะมีขนาด 3.5 นิ้วซึ่งมีความเร็วการหมุน 7,200 รอบต่อนาที หมุนในทิศทางเข็มนาฬิกา ซึ่งค่าคุณสมบัติของก๊าซฮีเลียมที่ใช้ในการจำลอง ได้แก่ อุณหภูมิเมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน 50 องศาเซลเซียส [10], ความหนาแน่น 0.1512 kg/m^3 [11] และติดตั้งสปอยเลอร์ทั้งหมด 12 โมเดล โดยกำหนดให้ค่าความหนาของสปอยเลอร์อยู่ที่ 1.3 มิลลิเมตร แบ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวเป็น 4 ขนาดได้แก่ 15, 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร ส่วนความกว้างของสปอยเลอร์นั้น แบ่งเป็น 3 ขนาดได้แก่ 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1

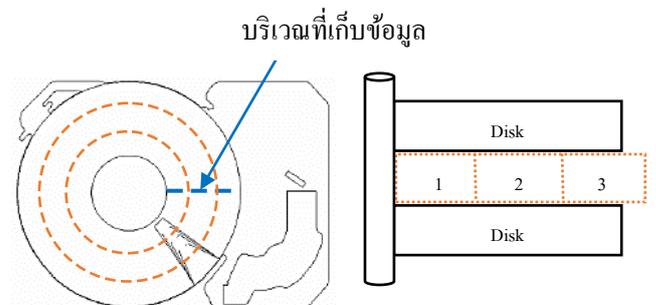


(b)

รูปที่ 1: (a) รูปร่างของสปอยเลอร์โดยกำหนดให้ตัวแปร T คือ ความหนา, W คือ ความกว้าง, L คือ ความยาว และ (b) แบบจำลองเมช

3.2 แบบจำลองการไหลของก๊าซฮีเลียม

ในการสร้างแบบจำลองการไหลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS เวอร์ชัน 14.5 ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้กำหนดให้การคำนวณเป็นแบบสถานะคงที่ (Steady State) โดยจะกำหนดบริเวณที่เก็บข้อมูลความเร็วการไหลอยู่ด้านหลังของสปอยเลอร์ แสดงดังรูปที่ 2 โดยที่ขอบเขตของบริเวณที่เก็บข้อมูลจะอยู่กึ่งกลางระหว่างแผ่นดิสก์ทั้งสองแผ่น



รูปที่ 2: บริเวณที่เก็บข้อมูลความเร็วการไหลหลังสปอยเลอร์โดยตำแหน่งที่ 1,2,3 คือบริเวณขอบใน (ID), กึ่งกลาง (MD) และบริเวณขอบนอก (OD) ของช่องว่างก๊าซระหว่างแผ่นดิสก์

4. ผลการคำนวณและการอภิปราย

จากการคำนวณพบว่า เมื่อติดตั้งสปอยเลอร์จะทำให้การไหลของก๊าซเบี่ยงเบนเข้าสู่บริเวณ ID เนื่องจากสปอยเลอร์นั้นได้ขวางกั้นการไหลไว้ จึงทำให้ความเร็ว

การไหลในบริเวณ ID มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฮาร์ดดิสก์ที่ไม่ได้ติดตั้งสปอยเลอร์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : ความเร็วการไหลที่ลดลง (m/s) เมื่อติดตั้งสปอยเลอร์

โมเดล	ID	MD	OD	ความเร็ว ลดลง เฉลี่ย
W5L15	28.567	19.983	3.802	-9%
W15L15	33.650	6.079	3.931	-6%
W25L15	37.676	7.544	3.885	4%
W5L20	37.571	8.457	4.937	-3%
W15L20	24.471	25.975	3.869	17%
W25L20	26.554	5.067	3.869	45%
W5L25	27.134	4.773	4.113	-16%
W15L25	35.842	5.959	3.969	16%
W25L25	17.296	29.514	6.424	59%
W5L30	14.108	9.686	3.384	-18%
W15L30	11.219	3.725	4.679	-9%
W25L30	28.392	4.899	4.080	12%
No spoiler	12.569	23.919	25.115	-

โดยที่ความเร็วการไหลที่ลดลงและความเร็วการไหลที่ลดลงเฉลี่ยสามารถหาได้จากสมการที่ (3) และสมการที่ (4) ตามลำดับ

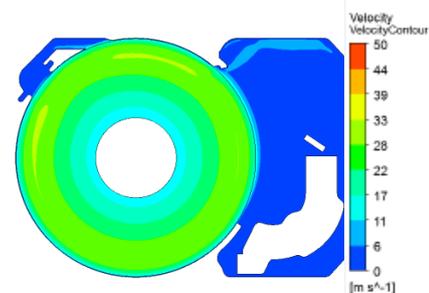
$$DV = \frac{V_{Nospoiler} - V_{spoiler}}{V_{Nospoiler}} \quad (3)$$

$$ADV = \frac{DV_{ID} + DV_{MD} + DV_{OD}}{3} \times 100\% \quad (4)$$

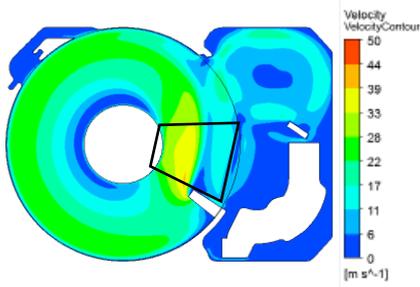
เมื่อ DV คือความเร็วการไหลที่ลดลง(m/s), $V_{Nospoiler}$ คือความเร็วการไหลก่อนติดตั้งสปอยเลอร์(m/s), $V_{spoiler}$ คือความเร็วการไหลเมื่อติดตั้งสปอยเลอร์(m/s), ADV คือความเร็วการไหลที่ลดลงเฉลี่ยและ DV_{ID} , DV_{MD} , DV_{OD} คือความเร็วการไหลที่ลดลง (m/s) ในบริเวณ ID, MD และ OD ตามลำดับ

จากผลการจำลองการไหลของก๊าซฮีเลียมในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์พบว่า เมื่อความยาวของสปอยเลอร์เพิ่มขึ้นความเร็วการไหลที่เข้าสู่บริเวณ ID จะมีค่าสูงขึ้น แต่ในส่วนหนึ่งของบริเวณ MD และ OD จะมีความเร็วลดลง

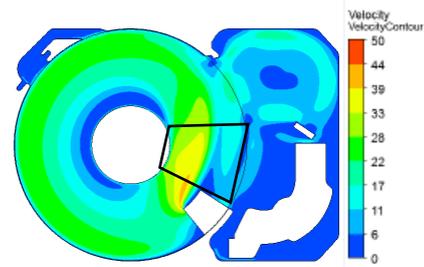
เนื่องมาจากสปอยเลอร์ได้ขวางกั้นการไหลไว้และเมื่อพิจารณาที่ความกว้างของสปอยเลอร์พบว่าความกว้างมีผลต่อความเร็วการไหลที่เข้าสู่บริเวณ ID เช่นกัน จากตารางที่ 1 จะพบว่า สปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 25 มิลลิเมตรและความยาว 25 มิลลิเมตรจะสามารถลดความเร็วเฉลี่ยที่ปะทะบริเวณแขนหัวอ่านเขียนได้มากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาที่รูปแบบการกระจายความเร็ว (Velocity profile) ดังแสดงในรูปที่ 4(a) ถึงรูปที่ 4(i) ประกอบกันพบว่า สปอยเลอร์ขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตรและความยาว 25 มิลลิเมตรนั้น มีการกระจายความเร็วสูงเป็นบริเวณที่กว้างกว่าสปอยเลอร์ขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตร สังเกตได้จากสีของคอนทัวร์ที่มีความเร็วต่ำ (บริเวณสีน้ำเงิน) ซึ่งอยู่ในพื้นที่ที่รอบสื่อด้านหลังสปอยเลอร์ ซึ่งสปอยเลอร์ขนาดความกว้าง 25 ความยาว 30 มิลลิเมตรมีพื้นที่ของคอนทัวร์สีน้ำเงินเป็นบริเวณที่กว้างกว่า ซึ่งแสดงถึงการกระจายความเร็วต่ำที่กว้างกว่าสปอยเลอร์ขนาดอื่น แสดงว่าสปอยเลอร์ขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตรนั้นสามารถลดการกระจายความเร็วบริเวณหลังสปอยเลอร์ได้ดีกว่าขนาดอื่น ซึ่งการลดการกระจายความเร็วบริเวณหลังสปอยเลอร์นั้นมีความสำคัญกว่าค่าความเร็วลดลงเฉลี่ยที่ได้จากจุดเก็บข้อมูลทั้ง 9 จุด เนื่องจากจุดดังกล่าวนี้เป็นจุดที่สุ่มเลือกขึ้นมา จึงไม่สามารถบอกตำแหน่งของแขนหัวอ่านเขียนขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานได้ จึงจำเป็นต้องพิจารณาการกระจายความเร็วบริเวณที่แขนหัวอ่านเขียนทำงานประกอบด้วยเพื่อวิเคราะห์การไหลที่กระทบแขนหัวอ่านเขียนให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น



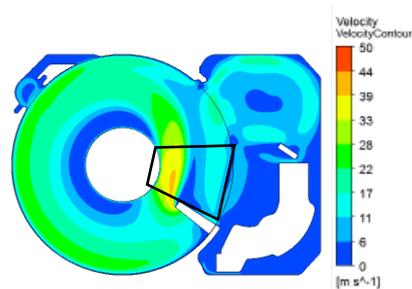
รูปที่ 3: รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กรณีที่ไม่ได้ติดตั้งสปอยเลอร์



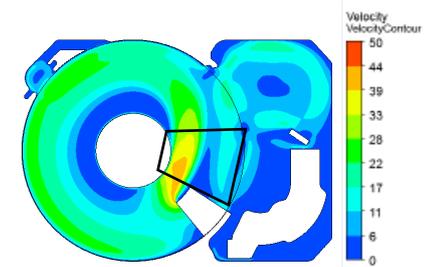
รูปที่ 4(a): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ติดตั้งสล็อตที่มีความกว้าง 5 และความยาว 15 มิลลิเมตร



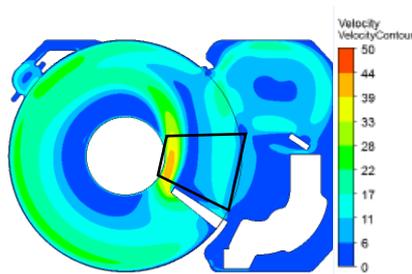
รูปที่ 4(e): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ติดตั้งสล็อตที่มีความกว้าง 15 และความยาว 15 มิลลิเมตร



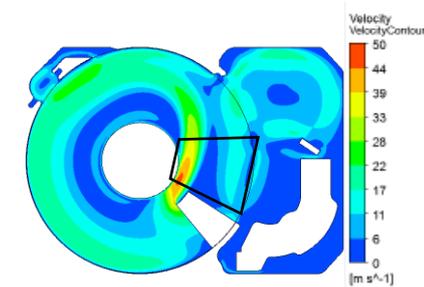
รูปที่ 4(b): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ติดตั้งสล็อตที่มีความกว้าง 5 และความยาว 20 มิลลิเมตร



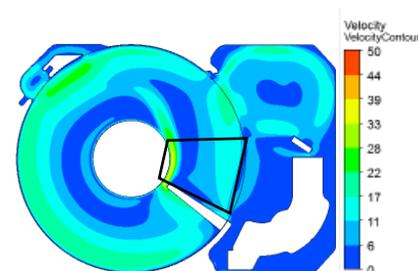
รูปที่ 4(f): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ติดตั้งสล็อตที่มีความกว้าง 15 และความยาว 20 มิลลิเมตร



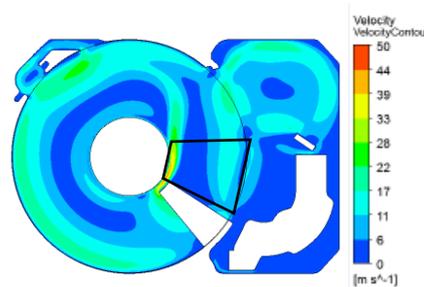
รูปที่ 4(c): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ติดตั้งสล็อตที่มีความกว้าง 5 และความยาว 25 มิลลิเมตร



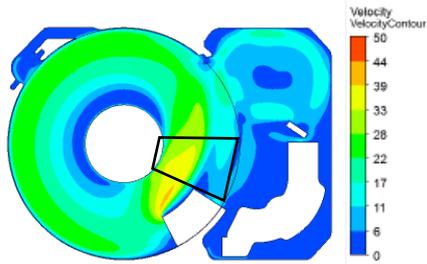
รูปที่ 4(g): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ติดตั้งสล็อตที่มีความกว้าง 15 และความยาว 25 มิลลิเมตร



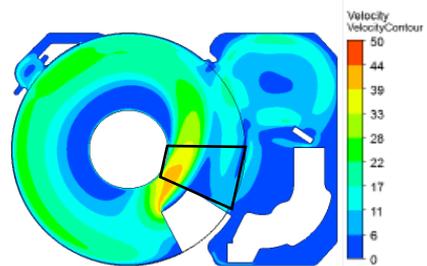
รูปที่ 4(d): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ติดตั้งสล็อตที่มีความกว้าง 5 และความยาว 30 มิลลิเมตร



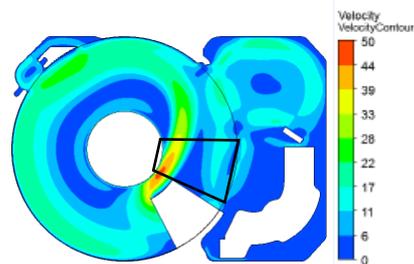
รูปที่ 4(h): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ติดตั้งสล็อตที่มีความกว้าง 15 และความยาว 30 มิลลิเมตร



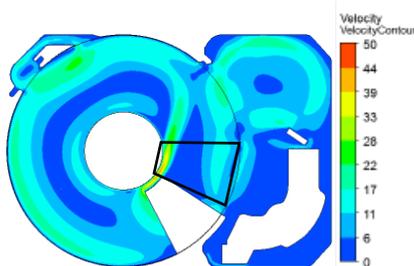
รูปที่ 4(i): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 25 และความยาว 15 มิลลิเมตร



รูปที่ 4(j): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 25 และความยาว 20 มิลลิเมตร



รูปที่ 4(k): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 25 และความยาว 25 มิลลิเมตร



รูปที่ 4(l): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 25 และความยาว 30 มิลลิเมตร

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการไหลของก๊าซฮีเลียมในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์พบว่าเมื่อติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตรและมีความยาว 30 มิลลิเมตรรูปแบบการกระจายความเร็วบริเวณหลังสปอยเลอร์จะมีความเร็วต่ำเป็นบริเวณที่กว้างกว่าสปอยเลอร์ขนาดอื่น แสดงว่าสปอยเลอร์ขนาดดังกล่าวสามารถลดความเร็วการไหลที่ปะทะบริเวณแขนหัวอ่านเขียน ทำให้หัวอ่านเขียนทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์ออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Hirono, T. Arisaka, N. Nishijima, T. Shimizu, S. Nakamura and H. Masuda, "Flow-Induced Vibration Reduction in HDD by Using a Spoiler." IEEE Transactions on magnetics, Vol.4, No. 4, pp. 756-763, 2004.
- [2] J. Suriyawanakul and K. Tangchaichit, "CFD Investigation of Damper Plate Effect on Air Flow in High Speed Rotation Hard Disk Drive by Using K-E with a Partial Model", Applied Mechanics and materials, Vol. 392, pp. 85-89, 2013.
- [3] W. Kankaew and K. Tangchaichit, "Decreasing Airflow Velocity in High Speed Hard Disk Drive by Using Spoiler", Advanced Materials Research, Vol. 1061-1062, pp. 862-865, 2015.
- [4] I. Sato, K. Otani, S. Oguchi and K. Hoshiya, "Characteristics of heat transfer in a helium-filled disk enclosure." IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 11, pp. 571-575, 1988.

- [5] S. W. Kil, J. A. C. Humphrey, H. Haj-Hariri, "Experimental study of the flow-structure interactions in an air- or helium-filled hard disk drive geometry.", *Microsyst Technol*, Vol.18, pp. 43–56, 2012.
- [6] S. W. Kil, J. A. C. Humphrey, H. Haj-Hariri, "Numerical study of the flow-structure interactions in an air- or helium-filled simulated hard disk drive.", *Microsyst Technol*, vol.18, pp. 57–75, 2012.
- [7] S. W. Kil, J. A. C. Humphrey, H. Haj-Hariri, "Turbulence intensity inversion induced by the mass-reducing hole in an air or helium filled hard disk drive", *Microsyst Technol* , Vol.19, pp.31–42, 2013.
- [8] S. W. Kil, J. A. C. Humphrey, H. Haj-Hariri, "Numerical study of the flow-structure interactions in an air- or helium-filled simulated hard disk drive", *Microsystem Technologies*, Vol. 18, Issue 1, pp 57–75, January 2012.
- [9] Ansys Fluent 14.5, User's guide, Chapter 4, 2012 Turbulence, October 2012.
- [10] Seagate Technology LLC, What is the normal operating temperature for Seagate disk drives? http://knowledge.seagate.com/articles/en_US/FAQ/193771en. (2016) Accessed 16 February 2016
- [11] Microelectronics Heat Transfer Laboratory, Fluid Properties Calculator. <http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html>. (2016) Accessed 8 February 2016

Air Flow's Enhancement in Impingement Tunnel

Thanarak Kosalwitr Kiatfa Tangchaichit

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002, Thailand.

Abstract

The air impingement technology has been used in frozen food industry for decades to achieve rapid freezing that can freeze the food with better texture than conventional freezing. In the freezing process the determined freezing time must be selected from the longest time that frozen food temperature is reached -18°C. To minimize the freezing time variation from different locations along the conveyor belt's width, the pressured chamber was investigated using computational fluid dynamics. The SST, $k-\omega$ turbulence model was used in this study. Changing the geometry in the pressured chamber with baffle plates impacted the exit velocity from impingement nozzles, which can deliver better average exit velocity and variation. The mixed model of existing with 2 of P532.5 for 3 chambers impingement tunnel freezer gives a 22.2% better minimum exit velocity than the existing model, and a variation of exit velocity 2.53 times better than the existing model.

Keywords : Impingement freezer, Computational Fluid Dynamic (CFD), SST, Pressured chamber, Impingement nozzle, Exit velocity, Vortexes.

1. Introduction

The freezing rate is one of the important factors to the quality of the frozen food. A slow freezing rate creates large ice crystals, and damages the food cellular structures, which produce bad food texture [1-4]. There are several techniques to achieve rapid freezing with smaller ice crystals such as microwave freezing [5], ultrasonic freezing [6-

11], impingement freezing etc. The air impingement technology has been used in various processes, such as the drying process of textile, the annealing process of glass [12], and the food freezing process, to achieve better freezing rates by directing the high freezing air velocity against the food surface to break the insulating boundary layer which surrounds the product [13,14].

In frozen food processing, the freezing time depends on many factors which are the characteristic of food such as thermal conductivity, shape etc., freezing air temperature and freezing air velocity [15]. In the normal practice of operation, freezing times for tunnel freezer are determined by the slowest freezing rate along the conveyor belt's width to ensure the core temperature of every piece of the frozen food is under -18°C .

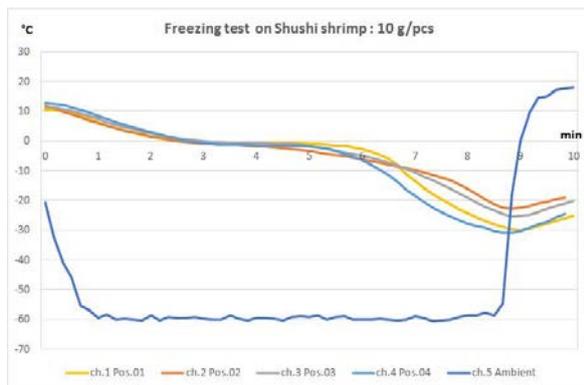


Fig. 1 Shushi shrimp freezing time.

In the example of the Shushi shrimp freezing process, the slowest freezing time is 8 minutes and 10 seconds, while the fastest freezing time is 7 minutes, as shown in Fig. 1. The 8 minute and 10 second freezing time gives processing losses which are the throughput loss and quality loss due to the product over-freezing at -30°C .

There are many alternatives to improve impingement freezer freezing performance such as the nozzle design [17-19], the efficiency of fan, the pressured chamber etc. The good pressured chamber design generates high exit velocity in impingement tunnel freezer which

can be between 15-60 m/s. The numerical simulations are widely used to analyze the heat transfer rate in the air impingement technique. The exit velocity depends on many factors such as the nozzle design [16], the pressured chamber, type of fan etc. which impact the heat transfer rate.

Changing geometry in the pressured chamber is the proper alternative for a quick solution without any big modifications in the impingement tunnel freezer. Therefore, changing the geometry of the pressured chamber is the focus area in this study, and can be done by air guide vane, air entry channel [20], or air baffle plate [20-21]. Introducing the baffle plate in the pressured chamber is the scope of this study.

2. Material and Method

In this study, the impingement tunnel freezer contains with 3 pressured chambers with low freezing air temperature from -35 to -60°C as shown in Fig. 2.

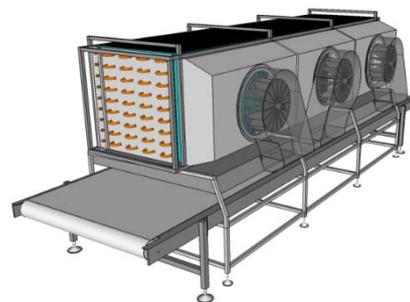


Fig. 2 The single module of impingement freezer.

2.1 Numerical Analysis

The numerical simulations are carried out using the commercial CFD ANSYS version 14. The air flow, exit velocity and turbulence filed use the Shear-Stress Transport (SST), $k-\omega$ turbulence model to the analysis which give an acceptable prediction [21] in the pressured chamber as shown in Fig. 3. Boundary of chamber was set as a stationary wall.

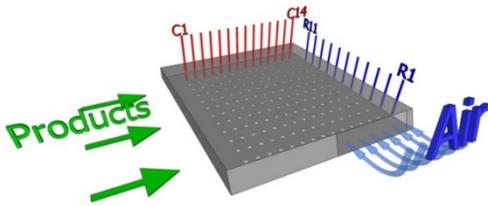


Fig. 3 Pressured chamber

The turbulence model was used in this research. Incompressible fluid and constant density was also used in this simulation. Mass conservation and momentum conservation equations, as following, were used.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

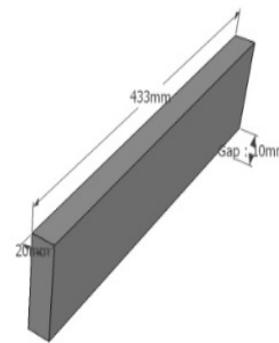
$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho g_i \beta (T - T_o) \quad (2)$$

- x_i Coordination (m)
- u_i Velocity of flow in x_i -direction (m/s)
- t Time (s)
- ρ Density of fluid (kg/m^3)
- p Pressure of a fluid (Pa)

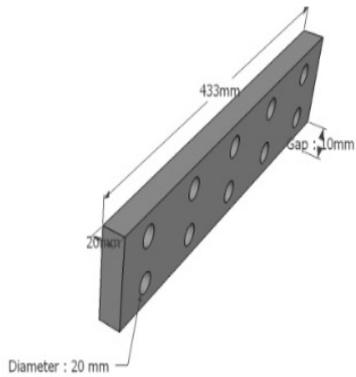
- μ Viscosity (Pa-s)
- g_i Gravity (m/s^2)
- β Coefficient of volume expansion ($1/\text{K}$)
- T Temperature of a fluid (K)
- T_o Reference temperature of a fluid (K)

Four type of elements were used to calculate and compared with the experiment results. Tetrahedral element was chosen to use in this research. Because it gave the minimum error when compared with the experiment result and it's also take less time to calculate.

There are two types of baffle plates applied to the analysis as shown in Fig. 4. The baffle plate dimensions are 433 mm with 20 mm thickness, while the perforated baffle plate has 10 holes with 20 mm diameter. The vertical gap between baffle plate and the pressured chamber is 10 mm.



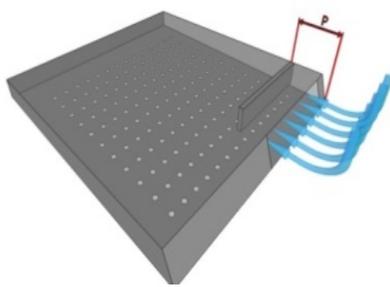
(a)



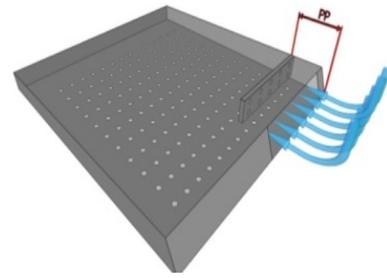
(b)

Fig. 4 Baffle Plate (a) Baffle Plate
(b) Perforated Plate

The pressured chamber has 154 nozzles with 20mm diameter. There are 11 nozzles along conveyor's belt width (R1-R11) and 14 nozzles on another side (C1-C14). The five of baffle plate models are P192.5, P227.5, P362.5, P447.5 and P532.5 and five of perforate plate models which are PP192.5, PP227.5, PP362.5, PP447.5 and PP532.5. The numbers of all models are the distance from entrance edge as shown in Fig. 5.



(a)



(b)

Fig. 5 Pressured chamber with baffle Plate (a) P (b) PP

Property of air used in this research shows in Table 1.

Table 1 Property of Air

Property of Air	
Temperature	-15.0 C
Density	1.37073 kg/m ³
Viscosity	1.6472 x 10 ⁻⁵ kg/m s

2.2. Tools and equipment

The TESTO 545 portable data logger was used to measure the average exit air velocity, as shown in Fig. 6.

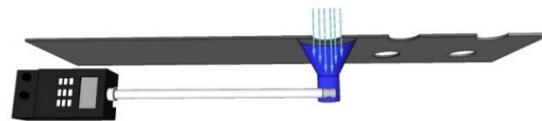


Fig. 6 Exit air velocity measuring device.

3. Results

3.1. Air Flow

All simulation models of the air flow in pressured chambers show the vortices in different locations in the pressured chamber, as shown in Fig. 7 and Fig. 8.

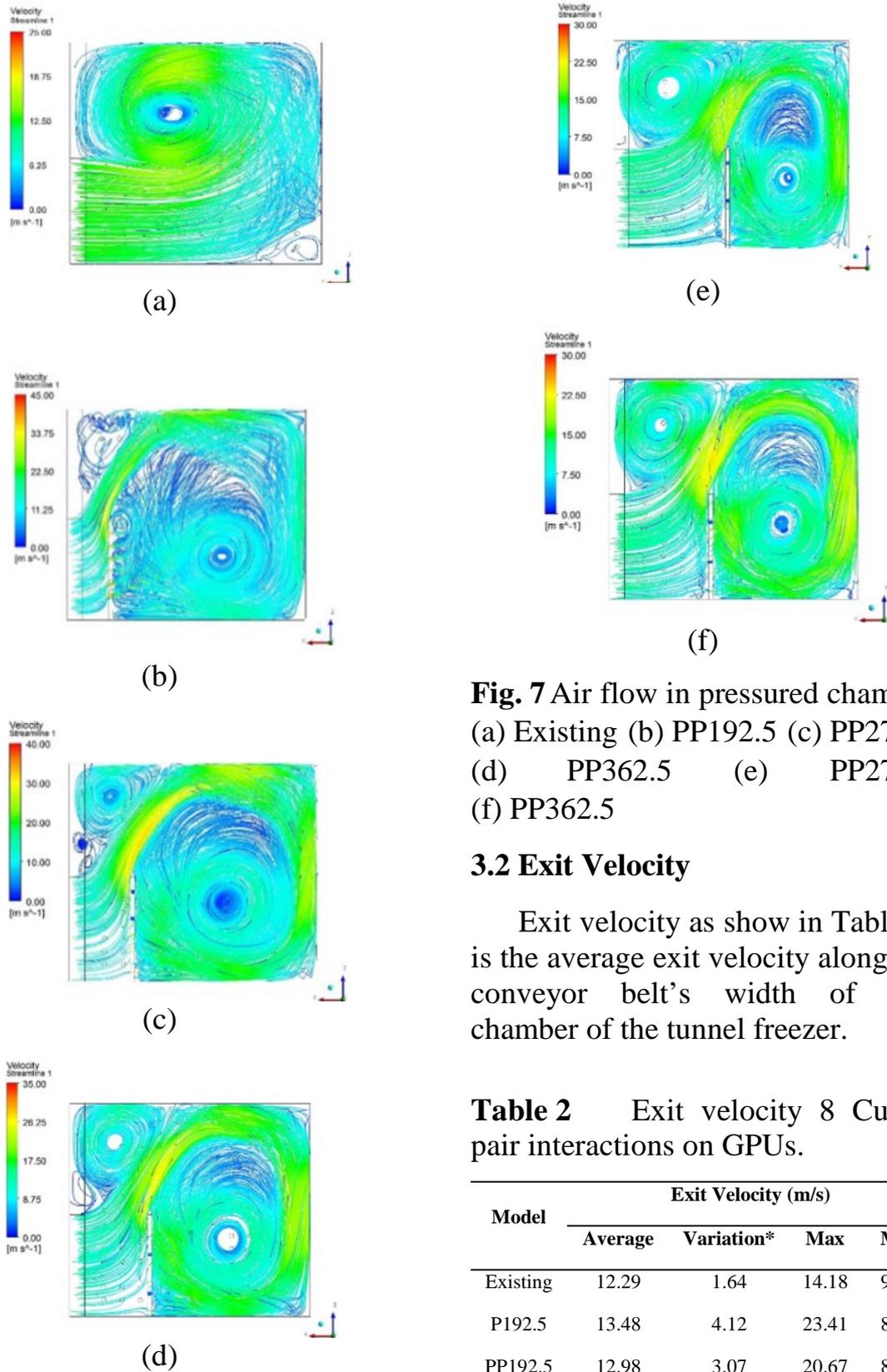


Fig. 7 Air flow in pressured chamber (a) Existing (b) PP192.5 (c) PP277.5 (d) PP362.5 (e) PP277.5 (f) PP362.5

3.2 Exit Velocity

Exit velocity as show in Table 2, is the average exit velocity along the conveyor belt’s width of one chamber of the tunnel freezer.

Table 2 Exit velocity 8 Cutoff pair interactions on GPUs.

Model	Exit Velocity (m/s)			
	Average	Variation*	Max	Min
Existing	12.29	1.64	14.18	9.59
P192.5	13.48	4.12	23.41	8.92
PP192.5	12.98	3.07	20.67	8.45
P277.5	13.38	3.51	20.02	10.07
PP277.5	13.44	3.51	20.03	9.96
P362.5	13.21	3.04	17.54	9.45

PP362.5	13.07	3.07	17.61	9.38
P447.5	13.21	3.04	17.54	9.45
PP447.5	13.06	2.36	16.70	9.80
P532.5	12.78	1.51	15.15	10.67
PP532.5	12.83	1.64	15.34	10.50

Remark: *Variation: Calculated by standard deviation of average exit velocity

All models give the average exit velocity higher than the existing model. However, only P532.5 and PP532.5 models give lower variation of exit velocity than the existing model.

4. Discussion

All simulation models have a vortex effect, which negatively impacts the variations of exit velocity. The mixed model for 3 chambers of this freezer is presented to minimize the variation of freezing time along the conveyor belt's width as shown in Table 3.

Table 3 Exit velocity for 3 pressured chambers.

Model	Exit Velocity (m/s)			
	Average	Variation	Max	Min
3 Existing	12.29	1.64	14.18	9.59
Existing + 2 of P532.5	12.62	0.65	13.44	11.72
Existing + 2 of PP532.5	12.65	0.71	13.46	11.61

The two mixed models, as shown in Table 3, can deliver better minimum exit velocity and variation.

5. Conclusion

The negative impact from vortexes could not be avoided in all simulation models. However, using the baffle plate to change the geometry of the pressured chamber gives positive results in the mixed models as shown in Table 3. The mixed model of existing with 2 of P532.5 for 3 chambers impingement tunnel freezer gives a 22.2% better minimum exit velocity than the existing model, and a variation of exit velocity 2.53 times better than the existing model.

6. Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to Charoen Pokphand Foods Public Company Limited (Chia Tai Group) and Khon Kaen University for all supports to this study.

7. References

- [1] S. Ahmad, P. Yaghmaee, T. Durance, "Optimization of dehydration of lactobacillus salivarius using radiant energy vacuum", Food and Bioprocess Technology, 1-9, 2010.
- [2] A. Delgado, L. Zheng, D. W. Sun, "Influence of ultrasound on freezing rate of immersion-frozen apples", Food and Bioprocess Technology, Vol. 2, 263-270, 2009.

- [3] F. Streit, G. Corrieu, B. C. eal, "Effect of centrifugation conditions on the cryotolerance of lactobacillus bulgaricus cfl1", Food and Bioprocess Technology, Vol. 3, 36-42, 2010.
- [4] V. Soto, R. Borquez., "Impingement jet freezing of bio material", Food Control, Vol. 12, 515-522, 2001.
- [5] T. H. Jackson, A. Ungan, J. K. Critser, and D. Y. Gao, "Novel microwave technology for cryo-preservation of biomaterials by suppression of apparent ice formation", Cryobiology, Vol. 34, 363-372, 1997.
- [6] T. Inada, X. Zhang, A. Yabe, and Y. Kozawa, "Active control of phase change from super cooled water to ice by ultrasonic vibration 1. Control of freezing temperature", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, 4523-4531. 2001.
- [7] M. Saclier, R. Peczalski, J. Andrieu, "Effect of ultrasonically induced nucleation on ice crystals' size and shape during freezing in vials", Chemical Engineering Science, Vol. 65, 3064-3071, 2010.
- [8] R. Chow, R. Blindt, R. Chivers, and M. Povey, "The sono crystallisation of ice in sucrose solutions: primary & secondary nucleation", Ultrasonics, Vol. 41, 595-604, 2003.
- [9] R. Chow, R. Blindt, A. Kamp, P. Grocutt, and R. Chivers, "The microscopic visualisation of the sonocrystallisation of ice using a novel ultrasonic cold stage", Ultrasonics Sonochemistry, Vol. 11, 245-250, 2004.
- [10] G. Rucroft, D. Hipkiss, T. Ly, N. Maxted, and P. W. Cains, "Sonocrystallization: the use of ultrasound for improved industrial crystallization", Organic Process Research & Development, Vol. 9, 923-932, 2005.
- [11] L. Zheng, D. W. Sun, "Ultrasonic assistance of food freezing", In D.-W. Sun (Ed.), Emerging technologies for food processing. Amsterdam; London : Elsevier Academic Press, 2005.
- [12] Yang Geunyoung, Choi Man soo, Sik Lee Joon, "An experimental study of slot jet impingement cooling on concave surface: effects of the nozzle configuration and curvature", International Journal of Heat Transfer, Vol. 42, 2199-2209, 1999.

- [13] Salvadori O. Viviana, Mascheroni H. Rodolfo, "Analysis of impingement freezers performance", *Journal of Food Engineering*, Vol.54, 133–140, 2002.
- [14] Anderson A. Brent, Paul Singh R., "Effective heat transfer coefficient measurement during air impingement thawing using an inverse method", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 29, 281-293, 2006.
- [15] Huan Zhongjie, He a Shaoshu, Ma Yitai, "Numerical simulation and analysis for quick-frozen food processing", *Journal of Food Engineering*, Vol. 60, 267-273, 2003.
- [16] Arnab Sarkar, R.Paul Singh, "Air Impingement technology for food processing: visualization studies", *Lebensm.Wiss. u.Technol*, Vol. 37, 873-879, 2004.
- [17] A. Sarkar, N. Nitin, M. V. Karwe, and R. P. Singh, "Fluid Flow and Heat Transfer in Air Jet Impingement in Food Processing", *Journal of food science*, Vol. 69, No. 4, 113-122, 2004.
- [18] N. K. Chougule, G. V. Parishwad, P. R. Gore, S. Pagnis, and S. N. Sapali, "CFD Analysis of Multi-jet Air Impingement on Flat Plate", *Proceeding of the world Congress on Engineering*, Vol. 3, ISSN: 2078-0966, 2011.
- [19] B. Dahbia, M. Amina, in the Ninth International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD9) Istanbul, Turkey, July 11-15, 2016.
- [20] T. Kosalwitr, K. Tangchaichit, "Freezing time of the impingement tunnel freezer enhancement", *KKU ENGINEERING JOURNAL*, Vol. 43, No. 3, 409-411, 2016.
- [21] D. Prashata, D. Sandip, "Effect of baffle size, perforate and orientation on internal heat transfer enhancement", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, 3005-3013, 1998.
- [22] E.Mehmet, C. Sinan, Z. Muammer, "Experimental Investigation of Heat transfer in a Rectangular Channel with Perforate Ribs", *The Online Journal of Science and Technology*, Vol. 5, Issue 3, 37-44, 2015.

การวิเคราะห์และจัดทำแบบจำลองตารางการให้บริการ

รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

Mass Transit Timetable Modeling and Evaluation

กานต์นภัส ช้าเกตุ วรรณ วระวัฒน์

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบขนส่งมวลชนได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐให้มีการขยายเส้นทางรถไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพื่อรองรับการเติบโตของชุมชนเมือง งานวิจัยนี้ศึกษาเส้นทางรถไฟฟ้าสายสีเขียวส่วนต่อขยายใต้ โดยมีระยะทางรวมประมาณ 35 กิโลเมตร มีสถานีให้บริการบนเส้นทาง 31 สถานี ช่วงสถานีหมอชิตถึงสถานีเคหะสมุทรปราการ โดยศึกษารูปแบบการเดินรถด้วยระบบ Communication Based Train Control (CBTC) ที่เหมาะสม โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์ที่พิจารณาปัจจัย ลักษณะโครงสร้างเส้นทาง ตำแหน่งการกั้บรถ ตัวรถไฟฟ้า และความสามารถในการปล่อยรถ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการให้บริการ จากการจำลองสถานการณ์พบว่ารูปแบบการเดินรถระยะสั้นสามารถใช้เพื่อตอบโต้เส้นทางที่มีความแตกต่างกันของปริมาณผู้โดยสารของ 2 พื้นที่ ดังกรณีรถไฟฟ้าสายสีเขียวส่วนต่อขยายใต้ได้ แต่ทั้งนี้การประยุกต์ใช้รูปแบบการเดินรถระยะสั้น โดยเฉพาะที่ความสามารถในการปล่อยรถเพิ่มขึ้นต้องพิจารณาการบริหารจัดการรูปแบบการกั้บรถ เพื่อลดผลกระทบจากปัญหาความล่าช้าสะสม ในกรณีที่ปริมาณผู้โดยสารส่วนเดิมกับส่วนต่อขยายมีความแตกต่างถึง 2 เท่า ควรประยุกต์ใช้การเดินรถระยะสั้นแบบ 2 ครั้ง (2 short turnings)

คำสำคัญ : ระบบขนส่งมวลชน, รูปแบบการเดินรถระยะสั้น, การจำลองสถานการณ์

Abstract

The mass transit system is supported by Thai Government which expands its in Bangkok Metropolitan Region for serving the growing urban areas. This research focused on the south extension of the metro green line, with total distances of about 35 kilometers and 31 stations (Mochit station to National Housing station). This research studied operation pattern by Communication Based Train Control systems (CBTC) with an application of a simulation method which considered infrastructure, turn back point, rolling stock, and headway (service) that all affect the performance of service. Simulation results showed that a short turn operation solved passenger unbalances that occur between the existing line and the extension line. However, “knock on delay” under the short turn operations, was possible with the increasing of a headway, so the operator of the mass transit should consider turn back point management to reduce the impact of the knock on delay. Hence, in case of double passenger unbalance, the operators should apply 2 short turnings.

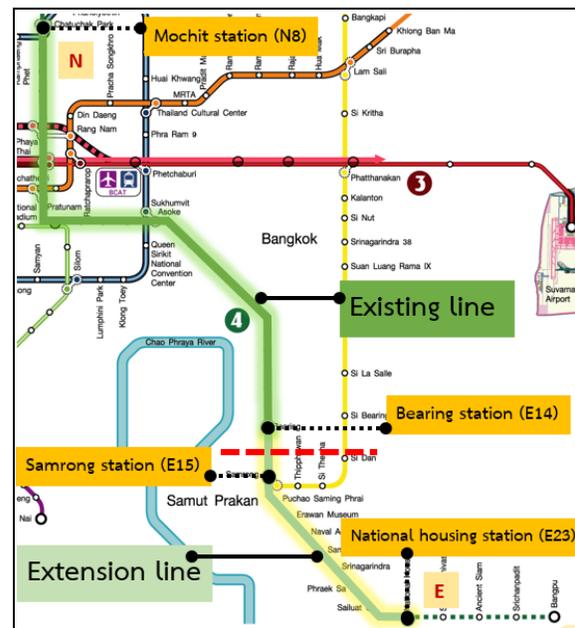
Keywords : Mass transit, Short-turn operation, Simulation

1. บทนำ

ปัจจุบันระบบขนส่งมวลชนทางรางได้รับการส่งเสริมจากภาครัฐบาล ทำให้เกิดเส้นทางรถไฟฟ้าสายใหม่ และโครงการส่วนต่อขยายเกิดขึ้นหลายเส้นทาง กรณีศึกษาเส้นทางรถไฟฟ้าสายสีเขียวส่วนเดิมมีระยะทางประมาณ 22 กิโลเมตร มีสถานีทั้งหมด 22 สถานีให้บริการเดินรถใน 2 ทิศทาง คือ จากสถานีหมอชิตถึงสถานีแบริ่ง(N-E) และจากสถานีแบริ่งถึงสถานีหมอชิต(E-N) ในอนาคตเส้นทางรถไฟฟ้าสายสีเขียวจะถูกต่อขยายไปทางใต้ เป็นระยะทาง 13 กิโลเมตร และสถานีที่ให้บริการเพิ่มเติม 9 สถานี ซึ่งทำให้เส้นทางรถไฟฟ้าสายสีเขียวรวมส่วนต่อขยายใต้มีระยะทางทั้งหมดประมาณ 35 กิโลเมตร มีสถานีที่ให้บริการบนเส้นทางทั้งหมด 31 สถานีช่วงสถานีหมอชิตถึงสถานีเคหะสมุทรปราการ จากกรณีศึกษาพบว่า การคาดการณ์ปริมาณผู้โดยสารเส้นทางส่วนเดิมกับเส้นทางส่วนต่อขยาย มีปัญหาเรื่องปริมาณผู้โดยสารไม่สมดุลกัน (Passenger unbalance problem) โดยเส้นทางส่วนต่อขยายจะมีผู้โดยสารน้อยกว่าเส้นทางส่วนเดิม ดังนั้นหากให้บริการในรูปแบบปัจจุบันที่เดินรถจากต้นทางไปยังปลายทางและหยุดรับส่งผู้โดยสารทุกสถานีจะส่งผลกระทบต่อรรถประโยชน์การใช้งานรถไฟฟ้าในเส้นทางส่วนต่อขยายที่มีผู้โดยสารน้อยกว่า

ในการบริหารจัดการเดินรถในเส้นทางส่วนต่อขยายให้เกิดรรถประโยชน์การใช้งานที่สูงขึ้นควรต้องมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบการเดินรถ อย่างไรก็ตามการบริหารจัดการเส้นทางเดินรถมีความซับซ้อนเนื่องจากต้องพิจารณาปัจจัยที่หลากหลายทั้งประเภทและปริมาณรถที่ให้บริการบนเส้นทาง โครงสร้างพื้นฐาน ความถี่ในการให้บริการ และระบบอาณัติสัญญาณ โดยทั่วไปแบบจำลองสถานการณ์สามารถนำไปใช้เพื่อพิจารณาปรับเปลี่ยนรูปแบบการเดินรถที่ให้บริการและครอบคลุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเดินรถได้หลากหลายในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังไม่

สามารถพิจารณาปัจจัยได้ครบถ้วน [1] งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์ในการวิเคราะห์รูปแบบการเดินรถที่เหมาะสมสำหรับเส้นทางรถไฟฟ้าสายสีเขียวส่วนต่อขยายใต้เพื่อตอบโจทย์เรื่องปริมาณผู้โดยสารที่ไม่สมดุล โดยพิจารณาความถี่ในการให้บริการกับเส้นทางทำให้บริการสายสีเขียวเดิมในปัจจุบัน



รูปที่ 1 เส้นทางรถไฟฟ้าสายสีเขียวส่วนต่อขยายใต้
(ที่มา: www.mrta.co.th)

1.1 รูปแบบการเดินรถ (Train operation) รูปแบบการเดินรถของระบบรางสามารถแบ่งได้ดังนี้ [2] 1.เดินรถที่ขยเปล่า (Deadheading) คือ รถไฟจะเดินรถจากต้นทางไปยังสถานีที่กำหนดโดยที่ระหว่างทางจะไม่หยุดรับผู้โดยสาร 2. การกักรถ (Holding) คือ การเพิ่มเวลาในการจอดรถไฟที่กับรถไฟที่สถานีหรือตำแหน่งที่กำหนดไว้ 3.กำหนดพื้นที่หยุดรถ (Zone scheduling) คือ การกำหนดพื้นที่บนเส้นทางในการหยุดรับส่งผู้โดยสารที่สถานี 4.กำหนดสถานีหยุดรถ (Stop-skipping) คือ การกำหนดสถานีที่จะหยุดรับ-ส่ง ผู้โดยสาร 5.การเดินรถระยะสั้น (Short turning) คือ รถไฟจะเดินรถด้วยระยะทางที่

สั้นกว่าระยะทางปกติ และมีการกำหนดตำแหน่งในการกลับรถเพื่อเปลี่ยนทิศทางการเดินทาง ทั้งนี้รูปแบบการเดินทางแต่ละรูปแบบจะถูกประยุกต์ใช้ตามความเหมาะสมของสถานการณ์ ซึ่งในกรณีปัญหาผู้โดยสารไม่สมดุลกันสามารถแก้ปัญหาได้จากทุกรูปแบบยกเว้นการกักรถ ซึ่งการดำเนินงานที่สอดคล้องและสามารถประยุกต์ใช้ได้กับสถานการณ์ของกรณีศึกษา คือ Short turning ซึ่งเป็นการเดินทางระยะทางสั้น มีการกลับรถระหว่างทาง ตรงจุดกลับรถ (Turn back point) และมีการหยุดรถเพื่อรับ-ส่งผู้โดยสารทุกสถานี

งานวิจัยที่ศึกษารูปแบบการเดินทางแบบ Short turning มีปัญหาลักษณะเหมือนกันคือ ปริมาณผู้โดยสารไม่สมดุลกันของพื้นที่บนเส้นทางเดินทาง จึงประยุกต์ใช้ Short turning เพื่อเพิ่มความถี่ในการให้บริการบนพื้นที่ซึ่งมีผู้โดยสารจำนวนมาก งานวิจัยที่ศึกษาการเดินทางแบบ Short turning สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้ 1. ศึกษาการเดินทางแบบ Short turning เท่านั้น โดยศึกษาเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบด้านเวลาการรอคอยของผู้โดยสาร โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์ [3] และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์[4] ในการวิเคราะห์ ซึ่งพบว่าการเดินทางแบบ Short turning สามารถลดเวลาการรอคอยของผู้โดยสารได้ 2. ประยุกต์ใช้ Short turning ร่วมกับการเดินทางแบบอื่น ดังนี้ ประยุกต์ใช้กับการกักรถ เนื่องจาก Short turning ส่งผลให้ความถี่ในการให้บริการเพิ่มขึ้น การกักรถจะช่วยควบคุมให้ความถี่ในการบริการเป็นไปตามที่กำหนดและควบคุมให้เหมาะสมกับการให้บริการได้ [5] และประยุกต์ใช้กับการเดินทางเที่ยวเปล่า ซึ่งเป็นสนับสนุนการให้บริการร่วมกัน เนื่องจากรถสามารถไปถึงสถานีเป้าหมายได้เร็วด้วยการเดินทางเที่ยวเปล่า และวนรถได้เพิ่มมากขึ้นจากระยะทางที่สั้นลงด้วยการเดินทางแบบ Short turning จึงทำให้สถานีเป้าหมายมีความถี่ในการให้บริการเพิ่มขึ้น [6] ดังนั้นรูปแบบการเดินทาง Short turning จึงสอดคล้องกับปัญหาของงานวิจัยที่พื้นที่ส่วนเดิมมีความต้องการของผู้โดยสารมากกว่าเส้นทางส่วนต่อขยาย

1.2 การจำลองสถานการณ์ (Simulation) แบบจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ Synchronous microscopic simulation model คือ การจำลองสถานการณ์ในระดับที่มีรายละเอียดของระบบ เช่น ตำแหน่งสัญญาณไฟ และตำแหน่งประแจ ทั้งนี้การจำลองสถานการณ์จะไม่ให้เกิดการชนกันของรถไฟในระบบ องค์ประกอบหลักของแบบจำลองประกอบด้วย 3 ส่วน คือ โครงสร้างเส้นทาง ตัวรถไฟ และความถี่หรือตารางเวลาการเดินทาง

2. วิธีการดำเนินงาน

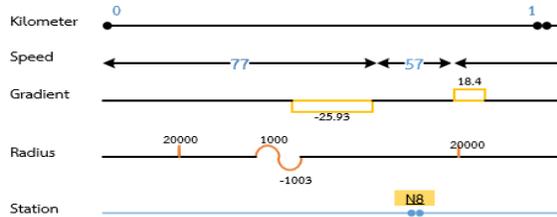
2.1 การศึกษาปัญหา (Problem formulation) เส้นทางรถไฟฟ้าสายสีเขียวส่วนต่อขยายมีการคาดการณ์ปริมาณผู้โดยสารที่น้อยกว่าส่วนเดิม ทำให้เกิดปัญหาความไม่สมดุลกันของผู้โดยสารของ 2 พื้นที่ จึงประยุกต์ใช้รูปแบบการเดินทาง Short turning ในการพิจารณารูปแบบการเดินทางที่เหมาะสมด้วยแบบจำลองสถานการณ์ภายใต้การดำเนินงานปัจจุบัน ดังนี้ ควบคุมการเดินทางแบบ Communication Based Train Control (CBTC) คือ รถไฟฟ้าจะสื่อสารกับระบบควบคุมด้วยคลื่นความถี่เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลและแจ้งตำแหน่งของรถไฟ ซึ่งข้อมูลที่สื่อสารกันจะใช้ในการควบคุมการเดินทางให้เป็นไปอย่างปลอดภัย และรถไฟฟ้า (Electric Multiple Unit: EMU) ที่ใช้คือ Bombardier MOVIA series สามารถรองรับผู้โดยสารได้ 1148 คนต่อขบวน และกำหนดจุดกลับรถสำหรับรูปแบบการเดินทางแบบ Short turning ดังนี้ ตำแหน่งประแจ (Crossover) และ ตำแหน่ง Pocket track

2.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data collection) และ ออกแบบแนวคิดภาพรวมของโครงสร้างเส้นทาง (Conceptual layout) การเดินทางประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก คือ โครงสร้างเส้นทาง ตัวรถไฟ และความถี่ในการปล่อยรถ ซึ่งมีตัวอย่างข้อมูลดังนี้

1. โครงสร้างเส้นทาง -- ตำแหน่งสถานี ตำแหน่งสัญญาณไฟ ความเร็วสูงสุดในแต่ละช่วงเส้นทาง
2. ตัวรถไฟ -- เครื่องยนต์ น้ำหนักรถไฟ ระบบไฟฟ้า

3. ความถี่หรือตารางเวลาการเดินทาง -- ความถี่ในการปล่อยรถ ระยะเวลาที่จอดที่สถานี

ซึ่งการเก็บรวบรวมข้อมูลและจำลองภาพรวมของเส้นทางอย่าง ความโค้ง ความชัน ความเร็ว ตำแหน่งสถานี โดยแสดงรายละเอียดของข้อมูลตามหลักกิโลเมตร จะทำให้เข้าใจภาพรวมการดำเนินงาน ซึ่งสอดคล้องกับการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างโครงสร้างเส้นทาง

2.3 การออกแบบสถานการณ์ (Scenario design) พิจารณาปัจจัยที่ปรับเปลี่ยน 3 ปัจจัย คือ รูปแบบการเดินรถ จุดกลับรถ และความถี่ในการปล่อยรถ ซึ่งสามารถ อธิบายได้ ดังนี้

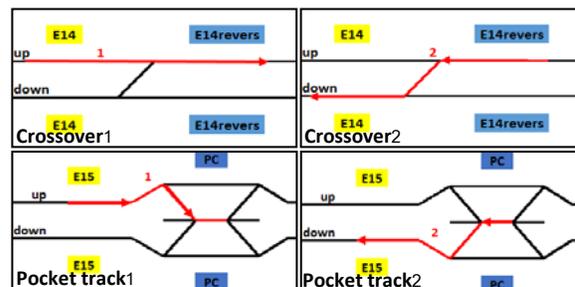
รูปแบบการเดินรถ (Operation pattern) มี 3 รูปแบบ ดังนี้

ตารางที่ 1 รูปแบบการเดินรถ 3 รูปแบบ

รูปแบบ	เส้นทางเดินรถ	รายละเอียด
ปัจจุบัน		รถ ทุกคัน เดินรถ ตั้งแต่ต้นทางจนถึงปลายทาง และหยุดรับส่งผู้โดยสารทุกสถานี
1 short turning		การเดินทางจะสลับรูปแบบปัจจุบัน กับ
		Short turning แบบ
		คันเว้นคัน และหยุดรับส่งผู้โดยสารทุกสถานี

รูปแบบ	เส้นทางเดินรถ	รายละเอียด
2 short turning		การเดินทางจะสลับรูปแบบปัจจุบันกับ
		Short turning แบบ
		คันเว้น2คัน (2 คัน= short turn) และหยุด
		รับส่งผู้โดยสารทุกสถานี

จุดกลับรถ (Turn back point) กำหนดจุดกลับในส่วนขอยต่อของเส้นทางส่วนเดิมกับส่วนต่อขยาย โดยมีจุดกลับรถที่เป็นไปได้ 2 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งประแจและ ตำแหน่ง Pocket track สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งรูปแบบการกลับรถจะส่งผลต่อการจำลองสถานการณ์และวิเคราะห์รูปแบบการเดินรถที่เหมาะสม



รูปที่ 3 รูปแบบการกลับรถที่ตำแหน่งกลับรถ

ความถี่ในการปล่อยรถ (Headway) พิจารณาเลือกความถี่น้อยที่สุดและมากที่สุดของการให้บริการช่วงเวลาเช้าในปัจจุบัน และน้อยที่สุดตามแผน ซึ่งประกอบด้วย 3 ค่าความถี่ในการให้บริการ ดังนี้ 2:40 และ 6:30 และ 1:30 นาที โดยจะมีการปล่อยแบบคงที่ คือ การปล่อยรถแต่ละขบวนจะปล่อยด้วยความถี่ที่เท่ากัน

จากปัจจัยที่ทำการปรับเปลี่ยนทั้ง 3 ปัจจัยคือ รูปแบบการเดินรถ จุดกลับรถและความถี่ในการปล่อยรถ สามารถสรุปสถานการณ์ที่พิจารณาได้ทั้งหมด 15 สถานการณ์ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปสถานการณ์จาก การปรับเปลี่ยนปัจจัย

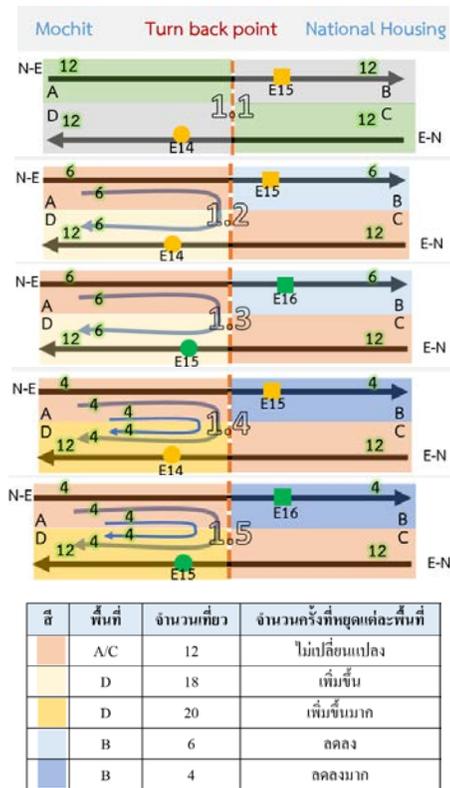
สถานการณ์	การปรับเปลี่ยนปัจจัย		
	ความถี่	รูปแบบการเดินรถ	จุดกลับรถ
S.I.I	2:40	ปัจจุบัน	-
S.I.II	2:40	1 short turning	ประแจ
S.I.III	2:40	1 short turning	Pocket track
S.I.IV	2:40	2 short turning	ประแจ
S.I.V	2:40	2 short turning	Pocket track
S.II.I	1:30	ปัจจุบัน	-
S.II.II	1:30	1 short turning	ประแจ
S.II.III	1:30	1 short turning	Pocket track
S.II.IV	1:30	2 short turning	ประแจ
S.II.V	1:30	2 short turning	Pocket track
S.III.I	6:30	ปัจจุบัน	-
S.III.II	6:30	1 short turning	ประแจ
S.III.III	6:30	1 short turning	Pocket track
S.III.IV	6:30	2 short turning	ประแจ
S.III.V	6:30	2 short turning	Pocket track

2.3 การสร้างแบบจำลอง (Model building) การจำลองสถานการณ์ จะจำลองเหตุการณ์ช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า 7:00-9:00 น. ทั้งหมด 15 สถานการณ์บน โปรแกรม Opentrack 1.8.3 การพิสูจน์ผลจะพิจารณาเวลาเดินรถตลอดของเส้นทางส่วนเดิมกับผลจากแบบจำลองสถานการณ์ด้วยค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (MAPE) ซึ่งทิศทาง N-E คือ 5.4% และที่ทิศทาง E-N คือ 7.3%

3. การวิเคราะห์ผลจำลองสถานการณ์

3.1 การคาดการณ์ผลการจำลองสถานการณ์ จากการปรับเปลี่ยนปัจจัย ส่งผลต่อจำนวนครั้งที่หยุดให้บริการแต่ละพื้นที่เนื่องจากจำนวนเที่ยวเดินรถ (Course) ที่เปลี่ยนไป ดังรูปที่ 3 ตัวอย่าง: การเดินรถแบบปัจจุบัน (1.1) จะปล่อยรถจาก 2 ทิศทาง ทิศทางละ 12 เที่ยว หากเดินรถด้วย short turning ที่พื้นที่ C จะมีจำนวนเที่ยว เท่าเดิม เนื่องจากจะเดินรถแบบปัจจุบันเท่านั้น ส่วนพื้นที่ A จะมีจำนวนเที่ยว เท่าเดิมเช่นกัน แต่มาจากการเดินรถแบบปัจจุบันและ Short turning

ส่วนพื้นที่ B จะมีจำนวนเที่ยวลดลง เนื่องจากการกลับรถทำให้พื้นที่นี้รถที่ผ่านจะเป็นแบบปัจจุบัน ซึ่งจำนวนเที่ยวลดลง 50% และ 66.7% ตามรูปแบบการเดินรถ ทั้งนี้จำนวนที่ลดลงจะเพิ่มขึ้นในพื้นที่ D ตัวอย่างเช่น กำหนดให้มีการปล่อยเที่ยวรถ จำนวน 12 เที่ยว ซึ่งความถี่ที่ปล่อยในแต่ละเที่ยวจะเท่ากัน (ความถี่คงที่) โดยตำแหน่งของการปล่อยเที่ยวรถคือ ต้นทางหมอชิต และต้นทางเคหะสมุทรปราการ ทั้งนี้การปล่อยให้รถไฟเดินรถจนสุดทางโดยไม่กำหนดเวลา ด้วยการเดินรถในรูปแบบปัจจุบันจะทำให้ทุกพื้นที่ที่มีจำนวนเที่ยวรถผ่านเท่ากันทุกเที่ยวคือ 12 เที่ยวดังกรณีที่ 1.1 แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เปรียบเทียบจำนวนครั้งที่หยุดให้บริการแต่ละพื้นที่ แต่หากเดินรถด้วยรูปแบบการเดินรถแบบ short turning จะทำให้มีจำนวนเที่ยวรถที่ผ่านแต่ละพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงไปดังกรณีรูปแบบการเดินรถแบบ 1 short turning (กรณี 1.2) ดังรูปที่ 4 พื้นที่ A และ C มีจำนวนเที่ยวรถผ่าน 12 เที่ยว ส่วนพื้นที่ B จะมีจำนวนเที่ยวรถที่ผ่านลดลง คือ 6 เที่ยว เนื่องจากมีการกลับรถระหว่างทางทำให้มีรถที่ผ่านเข้าพื้นที่ B ลดลง

ในขณะที่พื้นที่ D มีจำนวนเพิ่มขึ้นเป็น 18 เที้ยว เนื่องจากจำนวนเที้ยวที่กลับรถและจำนวนเที้ยวที่เดินรถแบบปัจจุบันจะรวมกันในพื้นที่ D นอกจากนี้รูปแบบการเดินรถอื่นแสดงดังรูปที่ 4

3.2 ผลการจำลองสถานการณ์ จำนวนครั้งที่หยุดให้บริการเพื่อรับ-ส่งผู้โดยสาร พบว่าเมื่อเดินรถที่ความถี่ในการปล่อยรถเพิ่มขึ้น (1:30 นาที) จะส่งผลให้เกิดความล่าช้า (Delay) ซึ่งแบ่งได้ 2 ประเภท 1.ความล่าช้าที่ต้นทางการปล่อยรถที่สถานี (N8 และE23) เนื่องจากปล่อยรถล่าช้า 2.ความล่าช้าสะสม (Knock on delay) ที่ระหว่างเส้นทางในกรณีการเดินรถแบบ Short turning เนื่องจากการจองเส้นทางของรถคันหน้าทำให้ไม่สามารถเดินรถได้ส่งผลให้รถคันถัดไปเกิดการล่าช้าด้วย

พื้นที่ B และ D ความถี่ในการปล่อยรถ 1:30 2:40 6:30 นาที การเดินรถแบบ 1 short turning และ 2 short turning มีจำนวนครั้งที่หยุดแต่ละพื้นที่เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ คือพื้นที่ B จำนวนครั้งในการที่หยุดให้บริการจะลดลง ส่วนพื้นที่ D จำนวนครั้งในการให้บริการจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการเดินรถแบบ 2 short turning จะมีผลกระทบมากกว่าแบบ 1 short turning

พื้นที่ A และ C ความถี่ในการปล่อยรถ 2:40 6:30 นาที มีจำนวนครั้งที่หยุดแต่ละพื้นที่เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ เนื่องจากการเดินรถในพื้นที่ A และ C เป็นพื้นที่ที่ไม่มีผลกระทบจากรูปแบบการเดินรถ Short turning ดังรูปที่4 แต่อย่างไรก็ตามที่ความถี่ในการปล่อยรถ 1:30 นาที พบว่าจำนวนครั้งที่หยุดให้บริการไม่เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ กรณีที่จุดกลับรถประแจ (S.II.II และ S.II.IV) พบว่าที่พื้นที่ A มีจำนวนครั้งที่หยุดให้บริการลดลง เมื่อเทียบกับกรณีการเดินรถปัจจุบัน (S.II.I) ดังตารางที่ 3 ทั้งนี้เนื่องมาจากการปล่อยรถที่สถานีต้นทาง N8 เกิดความล่าช้าเมื่อเทียบกับกรณีการเดินรถปัจจุบัน (S.II.I) ที่พื้นที่ C มีจำนวนครั้งที่หยุดให้บริการเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีการเดินรถปัจจุบัน (S.II.I) (ตารางที่ 3) เนื่องมาจากการปล่อยรถที่สถานีต้นทาง E23 สามารถปล่อยรถได้ตรงตามเวลามากขึ้น เมื่อเทียบกับการ

เดินรถปัจจุบัน (S.II.I) ที่จุดกลับรถ Pocket track รูปแบบการเดินรถแบบ 1 short turning (S.II.III) และ 2 short turning (S.II.V) พบว่ามีจำนวนครั้งที่หยุดให้บริการเท่ากันทั้งพื้นที่ A และ C

ตารางที่ 3 จำนวนครั้งที่หยุดให้บริการแต่ละพื้นที่

สถานการณ์	จำนวนครั้งที่หยุดแต่ละพื้นที่				ช่วงเวลา 7:00-9:00 น.	
	A	B	C	D	ล่าช้าที่จุดปล่อยรถ	ล่าช้าสะสมที่กลับรถ
S.I.I	833	237	380	680	-	-
S.I.II	833	121	380	920	-	-
S.I.III	863	106	341	949	-	-
S.I.IV	833	82	380	1001	-	-
S.I.V	863	72	341	1027	-	-
S.II.I	1472	417	666	1188	E23	-
S.II.II	1461	198	672	1487	N8/E23	√
S.II.III	1517	185	600	1569	N8/E23	-
S.II.IV	1438	100	673	1495	N8/E23	√
S.II.V	1517	124	600	1582	N8/E23	-
S.III.I	348	99	159	285	-	-
S.III.II	348	51	159	384	-	-
S.III.III	360	45	143	397	-	-
S.III.IV	348	36	159	417	-	-
S.III.V	360	32	143	428	-	-

นอกจากนี้การปล่อยรถที่ 1:30 นาที ที่ทิศทาง N-E ส่งผลต่อการเกิดปัญหาความล่าช้าสะสมที่จุดกลับรถประแจ (S.II.I และ S.II.IV) เพราะทำให้การเดินรถแบบ Short turning มีความถี่ที่ให้บริการเพิ่มขึ้นเกินว่าการกลับรถที่ประแจจะบริหารการจองเส้นทางและการปล่อยเส้นทางได้ ส่งผลให้กลับรถไม่ทัน ซึ่งมีลักษณะคือ รถไม่สามารถเข้าไปยังจุดกลับรถได้ หรือรถกลับรถได้แต่ไม่สามารถผ่านประแจมายังสถานีต่อไปได้ เนื่องจากมีรถจองเส้นทางไว้ จึงทำให้รถคันถัดไปเกิดความล่าช้า และความล่าช้าจะเพิ่มขึ้นหากเดินรถแบบ 2 short turning (S.II.IV) แต่เหตุการณ์ดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นที่จุดกลับรถ Pocket track (S.II.III และ S.II.V) เนื่องจากการ

กลับรถที่ Pocket track สามารถบริหารการจอดและการปล่อย
เส้นทางได้ จึงไม่ส่งผลให้เกิดการกลับรถไม่ทัน

4. บทสรุป

การประยุกต์ใช้การให้บริการเดินรถแบบ
ผสมผสานที่มีทั้งการเดินรถแบบเต็มรอบและการเดินรถ
ระยะสั้น (Short turning) ในเส้นทางรถไฟฟ้าสายสีเขียว
สามารถตอบโจทย์เรื่องการให้บริการเดินรถในเส้นทางที่มี
ปริมาณผู้โดยสารไม่สมดุลกันในพื้นที่เดิมและพื้นที่ส่วนต่อ
ขยายได้ อย่างไรก็ตามการที่จะเลือกใช้การเดินรถระยะสั้น
แบบ 1 หรือ 2 รอบนั้น ควรพิจารณาจากความต้องการ
เดินทางของลูกค้ายในสถานการณ์จริงเพิ่มเติมเนื่องจาก
เกี่ยวข้องกับความสะดวกในการใช้บริการของลูกค้ายที่
ต้องการเดินทางในระยะยาวที่ต้องมีการต่อรถ ในกรณีที่มีการ
ปรับความถี่การเดินรถเพื่อให้บริการลูกค้ายในจำนวนที่สูงขึ้น
ผู้ให้บริการต้องพิจารณาตำแหน่งและรูปแบบในการกลับรถ
ที่เหมาะสมเพิ่มเติมเนื่องจากการกลับรถแบบที่ไม่ได้ใช้
Pocket track อาจส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการให้บริการได้
ดังนั้นภายใต้ความถี่ในการให้บริการที่ 2:40 และ 6:30 นาที
สามารถเดินรถได้ทั้ง 3 รูปแบบ แต่ความแตกต่างกันของ
ผู้โดยสารทั้ง 2 พื้นที่จะเป็นตัวกำหนดรูปแบบการเดินรถ
แบบ 1 short turning หรือ 2 short turning และการเลือกจุด
กลับรถสามารถเลือกได้ทั้งตำแหน่งประจำ และ Pocket track
แต่ในกรณีที่เดินรถที่ความถี่ในการให้บริการ 1: 30 นาที
รูปแบบการเดินรถที่เหมาะสมคือ การเดินรถในรูปแบบ
ปัจจุบัน แต่หากความแตกต่างของผู้โดยสารทั้งสองพื้นที่
แตกต่างกันมากจำเป็นต้องเดินรถแบบ short turning ก็ควร
เลือกเดินรถแบบ 1 short turning ที่จุดกลับรถ Pocket track
จึงจะเหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาความล่าช้าสะสม แต่
อย่างไรก็ตามการดำเนินงานด้วยรูปแบบปัจจุบันเป็นรูปแบบ
ที่ง่ายในเชิงปฏิบัติมากกว่ารูปแบบการเดินรถแบบ short
turning ซึ่งรวมไปถึงความถี่ในการให้บริการแบบคงที่ด้วย

ทั้งนี้ในผลงานวิจัยได้กำหนดความถี่ในการ
ให้บริการแบบคงที่ เพื่อประเมินรูปแบบการเดินรถที่
เหมาะสมกับปัญหาปริมาณผู้โดยสารไม่สมดุล อย่างไรก็ตาม
เมื่อเปิดดำเนินงานในอนาคต สามารถขอยอดต่องานวิจัยโดย
การวิเคราะห์การปรับความถี่ในการให้บริการแบบคงที่
หรือไม่คงที่ เพื่อให้เหมาะสมกับจำนวนผู้โดยสารจริงของ
เส้นทางกรณีศึกษา

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ
จำกัด (มหาชน) และโครงการ Rail Exchange ที่ได้ให้การ
สนับสนุนการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hansen, I.A. and J. Pacht, Railway
Timetabling & Operation. 2008.
- [2] Wang, Y., B. Ning, T. van den Boom, and B. De
Schutter, Background: Train Operations and
Scheduling, in Optimal Trajectory Planning and Train
Scheduling for Urban Rail Transit Systems. 2016,
Springer International Publishing: Cham. p. 7-21.
- [3] Deckoff, A.A., The Short Turn as a Real-time Transit
Operating Strategy, in Department of Civil Engineering.
1990, Massachusetts Institute of Technology: United
States.
- [4] Canca, D., E. Barrena, G. Laporte, and F.A. Ortega, A
short-turning policy for the management of demand
disruptions in rapid transit systems. Annals of
Operations Research, 2014: p. 1-22.
- [5] Dell, S.W.O., Optimal control strategies for a rail transit
line, in Department of Electrical Engineering and
Computer Science. 1997, Massachusetts Institute of
Technology: United States.

- [6] Canca, D., E. Barrena, A. Zarzo, F. Ortega, and E. Algaba, Optimal Train Reallocation Strategies under Service Disruptions. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012. 54: p. 402-413.

การปรับปรุงระบบช่องเดินรถสลับทิศทาง ถนนเพชรบุรี

A Reversible Lane System Improvement of Phetchaburi Road

ชาญวิทย์ ยาม่วง วศิน เกียรติโกมล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงช่องเดินรถสลับทิศทางของถนนเพชรบุรี ช่วงตั้งแต่แยกมิตรสัมพันธ์ จนถึง แยกโศก-เพชรบุรี ซึ่งมีการใช้งานช่องเดินรถสลับทิศทางประมาณ 280 เมตร เนื่องจากในปัจจุบัน การใช้งานช่องเดินรถสลับทิศทางบริเวณพื้นที่ศึกษานี้ ได้รับความควบคุมใช้งานโดยเจ้าหน้าที่ตำรวจจราจร ซึ่งขาดความรู้ความเข้าใจในการใช้งาน ส่งผลให้ช่องเดินรถสลับทิศทางใช้งานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยงานวิจัยนี้จะทำการใช้วิธีช่วงเวลาตายตัวในการเลือกทิศทางที่ได้รับสิทธิในการใช้งานช่องเดินรถสลับทิศทาง และทำการเปรียบเทียบโดยผลก่อนและหลังปรับปรุงจากแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม VISSIM ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบพบว่า เมื่อมีการปรับปรุงตามวิธีช่วงเวลาตายตัวแล้วนั้น ปริมาณจราจรที่ผ่านได้ของทิศทางที่ได้รับสิทธิใช้งานช่องเดินรถสลับทิศทางมีปริมาณที่สูงขึ้นในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า ในช่วงเวลา 7:15 – 8:15 น. เพิ่มขึ้นจาก 2,772 pcu เป็น 3,130 pcu คิดเป็นร้อยละ 12.91 จากปริมาณจราจรที่ผ่านได้ก่อนปรับปรุง และในช่วงเวลา 8:15 – 9:15 น. เพิ่มขึ้นจาก 2,700 pcu เป็น 2,788 pcu คิดเป็นร้อยละ 3.26 จากปริมาณจราจรที่ผ่านได้ก่อนปรับปรุง

คำสำคัญ : วิธีช่วงเวลาตายตัว / ระบบช่องเดินรถสลับทิศทาง / แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค

Abstract

This paper presents a reversible lane system improvement of Phetchaburi road from Mitsampan intersection to Asok-Phetchaburi intersection. The length of reversible lane is 280 meter. Currently, this reversible lane system in this study is not effective because it is controlled by traffic policeman that lack knowledge in traffic engineering. Consequently, this research is using the fix time interval to choose a direction that are get permission to use reversible lane and compare the result before and after improvement from VISSIM simulation. When the reversible lane system get improvement by using fix time interval measure. As a result, the throughput vehicle of the selected direction that use reversible lane in morning peak hour at 7:15 – 8:15 a.m. is increase from 2,772 pcu to 3,130 pcu (12.91%) and at 8:15 – 9:15 a.m. is increase from 2,700 pcu to 2,788 pcu (3.26%).

Keywords : Fixed Time Interval / Reversible Lane System / VISSIM Simulation /

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ถนนเพชรบุรี ช่วงแยกมิตรสัมพันธ์ จนถึงแยกโอศก-เพชรบุรี เป็นถนน 7 ช่องจราจร ซึ่งเป็นถนนที่ไม่มีเกาะกลาง (Undivided road) พบว่า มีการจราจรติดขัดในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน (Peak hour) โดยปริมาณจราจรในทิศทางที่มุ่งเข้าสู่แยกมิตรสัมพันธ์สูงกว่าปริมาณจราจรที่มุ่งเข้าสู่แยกโอศก-เพชรบุรีในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้า และในทางกลับกันจะมีปริมาณจราจรในทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกโอศก-เพชรบุรีที่สูงกว่าทิศทางที่มุ่งเข้าสู่แยกมิตรสัมพันธ์ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็น ซึ่งเป็นรูปแบบลักษณะการจราจรที่เกิดจากการเดินทางไปทำงาน (Commuter traffic) จึงได้มีการใช้ระบบช่องเดินรถกลับทิศทาง (Reversible lane system) ในการแก้ไขปัญหาการจราจรติดขัดในชั่วโมงเร่งด่วนเช้า โดยมีการควบคุมระบบโดยเจ้าหน้าที่ตำรวจจราจร ซึ่งพบว่า แม้ว่าจะมีการใช้งานระบบช่องเดินรถกลับทิศทางแล้วนั้น การจราจรยังคงติดขัด ซึ่งอาจเกิดจากการเลือกทิศทางที่จะใช้งานช่องเดินรถกลับทิศทาง บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการนำเสนอการปรับปรุงการเลือกทิศทางที่ได้รับสิทธิในการใช้ช่องเดินรถกลับทิศทางที่เหมาะสมกับปริมาณจราจรในปัจจุบัน โดยจะทำการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงจากแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม VISSIM

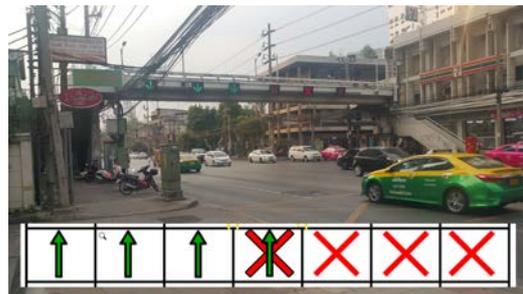
2. ข้อมูลเบื้องต้นของพื้นที่ศึกษา

2.1 ตำแหน่งที่ตั้งและลักษณะทางกายภาพ

ถนนเพชรบุรี ช่วงแยกมิตรสัมพันธ์ ถึงแยกโอศก-เพชรบุรี เป็นถนน 7 ช่องจราจร โดยทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกมิตรสัมพันธ์ 3 ช่องจราจร และทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกโอศก-เพชรบุรี 3 ช่องจราจร และมีช่องเดินรถกลับทิศทาง 1 ช่องจราจร มีระยะจากแยกมิตรสัมพันธ์ถึงแยกโอศก-เพชรบุรี ประมาณ 910 เมตร มีระยะของช่องเดินรถกลับทิศทางประมาณ 278 เมตร ซึ่ง โดยจะมีสัญญาณไฟแสดงทิศทางที่ได้รับสิทธิในการใช้งานช่องเดินรถกลับทิศทางอยู่เหนือช่องจราจร ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของถนนเพชรบุรี ช่วงระหว่างแยกมิตรสัมพันธ์และแยกโอศก-เพชรบุรี



รูปที่ 2 สัญญาณไฟจราจรควบคุมช่องเดินรถกลับทิศทาง ของถนนเพชรบุรี

2.2 การจัดการจราจรในปัจจุบัน

ในช่วงเวลา 6:00 - 9:00 น. ถนนเพชรบุรี ช่วงแยกมิตรสัมพันธ์จนถึงแยกโอศก-เพชรบุรี จะมีการใช้งานระบบช่องเดินรถกลับทิศทางในบริเวณช่วงกึ่งกลางระหว่างแยก โดยระบบช่องเดินรถกลับทิศทางนี้จะถูกควบคุมโดยเจ้าหน้าที่ตำรวจจราจร ซึ่งจะทำการตัดสินใจเลือกทิศทางที่ได้รับสิทธิในการใช้ช่องเดินรถกลับทิศทางโดยการใช้สายดาสังเกต โดยจะสลับทิศทางที่ได้รับสิทธิในการใช้งานช่องเดินรถกลับทิศทางกลับไปกลับมา ดังแสดงในตารางที่ 1 ส่งผลให้บางช่วงเวลา มีการให้สิทธิในการใช้ช่องเดินรถกลับทิศทางแก่ทิศทางที่มีปริมาณจราจรน้อยกว่าอีกทิศทาง

ตารางที่ 1 ระยะเวลาและรูปแบบการแบ่งช่องจราจรตามสัญญาณไฟของช่องเดินรถสี่ทิศทาง ณ วันที่ 2 สิงหาคม

2559

รูปแบบการแบ่งช่องจราจร (ทั้งหมด 7 ช่องจราจร)		ตั้งแต่	ถึง	ระยะเวลา
มุ่งเข้าสู่ แยกมิตร สัมพันธ์ (เลน)	มุ่งเข้าสู่ แยก อโศก- เพชรบุรี (เลน)			
4	3	7:15:00	7:18:56	0:03:56
3	4	7:18:56	7:39:20	0:20:24
4	3	7:39:20	8:00:00	0:20:40
3	4	8:00:00	8:02:40	0:02:40
4	3	8:02:40	8:09:42	0:07:02
3	4	8:09:42	8:17:40	0:07:58
4	3	8:17:40	8:28:43	0:11:03
3	4	8:28:43	8:58:40	0:29:57
4	3	8:58:40	9:00:50	0:02:10
3	4	9:00:50	9:04:00	0:03:10
4	3	9:04:00	9:15:00	0:11:00

3. แนวทางการศึกษา

ในการศึกษารุ่นนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทบทวนถึงรูปแบบการใช้งานระบบช่องเดินรถสี่ทิศทาง ข้อจำกัด และวิธีเลือกทิศทางที่ได้รับสิทธิในการใช้งานช่องเดินรถสี่ทิศทางจากการทบทวนบทวรรณกรรม ทั้งของภายในประเทศและต่างประเทศ จากนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเก็บข้อมูลปริมาณจราจรในแต่ละขาของสี่แยกมิตรสัมพันธ์และแยกอโศก-เพชรบุรี รวมถึงเก็บบริเวณกึ่งกลางระหว่างแยกมิตรสัมพันธ์และแยกอโศก-เพชรบุรี เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุดภาคในโปรแกรม VISSIM โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างสภาพการใช้ช่องเดินรถสี่ทิศทางในปัจจุบันกับสภาพการใช้ช่องเดินรถสี่ทิศทางแบบที่มีการปรับปรุง โดยจะทำการเปรียบเทียบในด้าน

ปริมาณจราจรที่ผ่านได้ และความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะ เป็นต้น

4. การทบทวนแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.1 แนวคิดการใช้งานระบบช่องเดินรถสี่ทิศทาง

การใช้ระบบช่องเดินรถสี่ทิศทางเป็นหนึ่งในวิธีการแก้ไขปัญหาการจราจรติดขัด โดยเป็นการใช้ความสามารถเดิมที่มีอยู่ของปริมาณความจุของถนนและเป็นวิธีการที่ใช้งบประมาณต่ำ [1] โดยประสิทธิภาพการดำเนินงานของช่องเดินรถสี่ทิศทางนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลของกระแสจราจร (Traffic Flow) รูปแบบถนน (Street Pattern) และลักษณะทางเรขาคณิตของถนน (Geometric Feature) [2]

4.2 การใช้งานระบบช่องเดินรถสี่ทิศทางในต่างประเทศ

ระบบช่องเดินรถสี่ทิศทางเป็นวิธีการแก้ไขปัญหาจราจรในช่วงโมงเร่งด่วนในหลายประเทศทั่วโลก โดยได้รับการพัฒนาและใช้งานอย่างแพร่หลายในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเป็นการใช้งานเพื่อแก้ไขปัญหาการจราจรที่เกิดจากการไปทำงานถึง 19 เส้นทาง [3] โดยหน่วยงานที่ใช้งานระบบช่องเดินรถสี่ทิศทางของประเทศสหรัฐอเมริกาส่วนใหญ่ จะใช้ปริมาณอัตราการไหลของจราจร (Traffic flow volume) เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาใช้งานระบบช่องเดินรถสี่ทิศทาง [4] ยกตัวอย่างการใช้งานระบบช่องเดินรถสี่ทิศทางในเมืองต่างๆ เช่น เมือง Dearborn มลรัฐ Michigan มีการใช้งานระบบช่องเดินรถสี่ทิศทาง ส่งผลให้มีปริมาณจราจรที่ผ่านได้เพิ่มมากขึ้นประมาณ 7.1% ในช่วงโมงเร่งด่วน [5] เป็นต้น

4.3 วิธีการเลือกทิศทางที่ได้รับสิทธิในการใช้งานช่องเดินรถสี่ทิศทาง

วิธีการเลือกทิศทางโดยทั่วไปนั้น จะใช้วิธีมาตรฐานในช่วงเวลาตายตัว (Fixed time interval) ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้โดยทั่วไป โดยจะใช้งานในช่วงเวลาเร่งด่วนและเลิกใช้เมื่อหมดช่วงเวลาเร่งด่วน [6] ซึ่งจะทำให้สิทธิในการใช้งานช่องเดินรถสี่ทิศทางแก่ทิศทางที่มีปริมาณจราจรสูง

กว่าอีกทิศทาง ซึ่งวิธีนี้จำเป็นจะต้องทำการนับปริมาณจราจรเพื่อให้ทราบถึงทิศทางที่มีปริมาณจราจรมากกว่า

4.4 ปริมาณการจราจรในหน่วยเทียบเท่ารถยนต์นั่ง (Passenger Car Unit : PCU)

เนื่องจากยานพาหนะแต่ละประเภทมีขนาดและลักษณะการใช้งานที่ต่างกัน เพื่อให้การเปรียบเทียบผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันโดยที่ใช้หน่วยเดียวกันทุกประเภทยานพาหนะ ผู้วิจัยจึงต้องเปลี่ยนให้อยู่ในหน่วยเทียบเท่ารถยนต์นั่ง โดยจะทำการใช้ค่าปริมาณการจราจรในหน่วยเทียบเท่ารถยนต์นั่งของสำนักงานการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร และสำนักอำนวยความปลอดภัยกรมทางหลวง มาปรับปรุงใช้กับงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า PCU ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ปรับปรุงและเพิ่มเติมจากของสำนักงานการจราจรและขนส่ง กทม.)

ประเภทยานพาหนะ	ค่า PCU
รถยนต์	1.00
ตู้ปิคอัพ	1.00
เมลย์ใหญ่	2.10
เมลย์เล็ก	1.50
บรรทุก 6 ล้อ	2.00
โดยสาร 8 ล้อ (รถบัส)	2.10
สามล้อ	0.93
รถจักรยานยนต์	0.33
บรรทุก 10 ล้อ	2.50

ที่มา: สำนักงานการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร

5. การสร้างแบบจำลอง

5.1 ข้อมูลสภาพการจราจร

5.1.1 ปริมาณจราจร

ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจนับปริมาณจราจรบริเวณสี่แยกมิตรสัมพันธ์และแยกอโศก-เพชรบุรี รวมทั้งช่วงกึ่งกลางระหว่างแยกมิตรสัมพันธ์และแยกอโศก-เพชรบุรี ในวันที่อังคารที่ 2 สิงหาคม 2559 ในช่วงเวลา 6:30 – 9:45 น. เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณจราจร พบว่า มีปริมาณจราจรสูงสุด 2 ชั่วโมง ในช่วงเวลา 7:15 – 9:15 น. ซึ่งจะมีปริมาณจราจรในทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกมิตรสัมพันธ์ จำนวน

5,637 pcu และมีปริมาณจราจรในทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกอโศก-เพชรบุรี จำนวน 3,331 pcu

5.1.2 ความเร็วเฉลี่ย

จากการสำรวจในวันที่ 2 สิงหาคม 2559 พบว่าความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะทุกประเภทที่ผ่านบริเวณกึ่งกลางระหว่างแยกมิตรสัมพันธ์และแยกอโศก-เพชรบุรี ในทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกมิตรสัมพันธ์มีความเร็วเท่ากับ 10.59 กิโลเมตร/ชั่วโมง และในทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกอโศก-เพชรบุรีมีความเร็วเท่ากับ 17.09 กิโลเมตร/ชั่วโมง

5.2 การปรับเทียบแบบจำลอง

แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคที่สร้างโดยโปรแกรม VISSIM ของถนนเพชรบุรี ช่วงแยกมิตรสัมพันธ์ ถึงแยกอโศก-เพชรบุรี ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการเลือกใช้ช่องเดินรถสลับทิศทางในปัจจุบันที่ควบคุมโดยการใช้สายตาสังเกตโดยเจ้าหน้าที่ตำรวจจราจรและการเลือกใช้ช่องเดินรถสลับทิศทางโดยวิธีมาตรการช่วงเวลาตายตัว โดยจะทำการปรับเทียบแบบจำลองโดยใช้ค่าปริมาณจราจรและความเร็วเฉลี่ยในการปรับแก้แบบจำลองให้มีสภาพการจราจรสอดคล้องใกล้เคียงสภาพการจราจรจริงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองโครงข่ายการจราจรโดยโปรแกรม

VISSIM ของถนนเพชรบุรี ระหว่างแยกมิตรสัมพันธ์และแยกอโศก-เพชรบุรี ช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า

จากผลการปรับแก้แบบจำลอง พบว่า ปริมาณจราจรและความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะทุกประเภทมีสภาพใกล้เคียงสภาพการจราจรจริง โดยปริมาณจราจรจากแบบจำลองในทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกมิตรสัมพันธ์ เท่ากับ 5,472 pcu และในทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกอโศก-เพชรบุรี เท่ากับ 3,487 pcu ซึ่งคลาดเคลื่อนไปร้อยละ 2.93 และร้อยละ 4.68 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือไม่เกินร้อยละ 15 ของอัตราการไหลรายชั่วโมง [7] และมีความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะทุกประเภทในทิศทางมุ่งเข้า

ผู้แยกมิตรสัมพันธ์เท่ากับ 12 กิโลเมตร/ชั่วโมง และในทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกอโศก-เพชรบุรีเท่ากับ 19 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งคลาดเคลื่อนไปร้อยละ 11.75 และร้อยละ 10.05 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ [7] ดังนั้นแบบจำลองนี้ จะสามารถนำไปใช้ในการทดลองการปรับเปลี่ยนรูปแบบการเลือกช่องเดินรถสลับทิศทางได้ ส่วนในด้านแถวคอยนั้น จากการเก็บข้อมูลพบว่าการจราจรช่วงเวลารุ่งดวง เป็นรูปแบบการจราจรที่ติดขัดแบบแยกชระแยก ทำให้ค่าระยะแถวคอยมีค่าสูงสุดตามระยะทางระหว่างแยกมิตรสัมพันธ์ถึงแยก อโศก-เพชรบุรี

6. การเลือกทิศทางที่ได้รับสิทธิในการใช้ช่องเดินรถสลับทิศทางที่เหมาะสม

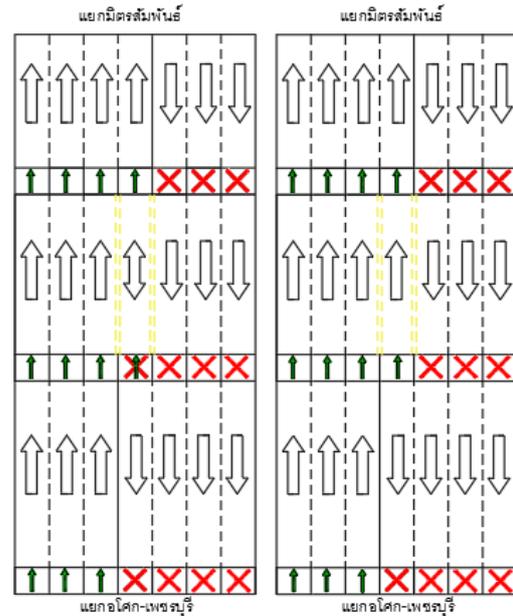
ผู้วิจัยจะทำการใช้วิธีมาตรการช่วงเวลาตายตัวในการเลือกทิศทางที่ได้รับสิทธิในการใช้ช่องเดินรถสลับทิศทาง ซึ่งจะต้องเลือกทิศทางที่มีปริมาณจราจรสูงกว่าอีกทิศทาง ให้ได้รับสิทธิในการใช้งานในช่วงเวลา 7:15 – 8:15 น. ซึ่ง จะพบว่าปริมาณจราจรในทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกมิตรสัมพันธ์ มีปริมาณที่สูงกว่าปริมาณจราจรในทิศทางมุ่งเข้าสู่แยก อโศก-เพชรบุรี ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบปริมาณจราจรในแต่ละทิศทาง

ช่วงเวลา	ปริมาณจราจร	
	ทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกมิตรสัมพันธ์ (pcu)	ทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกอโศก-เพชรบุรี (pcu)
7:15 – 9:15	5,637	3,331

เพราะฉะนั้น ผู้วิจัยจึงได้เลือกให้ทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกมิตรสัมพันธ์ได้รับสิทธิในการใช้งานช่องเดินรถสลับทิศทาง ดังแสดง การจัดลักษณะทิศทางการจราจรในรูปแบบที่

4



รูปที่ 4 การจัดลักษณะทิศทางการจราจรก่อนการปรับปรุง (ซ้าย) และหลังการปรับปรุง (ขวา)

7. การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลอง

7.1 การเปรียบเทียบปริมาณจราจรที่ผ่านได้ของแบบจำลองสภาพการจราจรในปัจจุบันและปริมาณจราจรที่ผ่านได้ของแบบจำลองสภาพการจราจรหลังการปรับปรุงใช้มาตรการช่วงเวลาตายตัว

ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณจราจรจากแบบจำลอง พบว่า ปริมาณจราจรที่ผ่านได้มีค่าเพิ่มขึ้นกว่าสภาพจราจรปัจจุบัน จาก 5,472 pcu เป็น 5,918 pcu คิดเป็นร้อยละ 8.15 ดังแสดงปริมาณจราจรที่ผ่านได้รายชั่วโมงในตารางที่ 4

7.2 การเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะทุกประเภทในแบบจำลองสภาพปัจจุบันและและความเร็วเฉลี่ยของแบบจำลองสภาพการจราจรหลังการปรับปรุงใช้มาตรการช่วงเวลาตายตัว

ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉลี่ยจากแบบจำลอง พบว่า ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะทุกประเภทในทิศทางที่ทำการใช้ช่องเดินรถสลับทิศทางมีค่า แต่ต่างจากเดิมไม่มากนัก แต่ทิศทางที่มีปริมาณจราจรน้อยกว่าจะมีความเร็วเฉลี่ยลดลง เนื่องจากได้เสียสิทธิในการใช้ช่องเดินรถสลับทิศทางบางช่วงเวลาไป ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบปริมาณจราจรที่ผ่านได้ระหว่างแบบจำลองสภาพการจราจรในปัจจุบันและปริมาณจราจรของแบบจำลองสภาพการจราจรหลังการปรับปรุงใช้มาตรการช่วงเวลาตายตัว

ช่วงเวลา	ปริมาณจราจร (pcu/h)					
	ทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกมิตรสัมพันธ์			ทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกอโศก-เพชรบุรี		
	สภาพปัจจุบัน	หลังการปรับปรุง	แตกต่าง (%)	สภาพปัจจุบัน	หลังการปรับปรุง	แตกต่าง (%)
7:15 – 8:15	2,772	3,130	+12.91	1,673	1,673	0.00
8:15 – 9:15	2,700	2,788	+3.26	1,814	1,813	-0.05
รวม	5,472	5,918	+8.15	3,487	3,486	-0.03

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะที่ผ่านได้ระหว่างแบบจำลองสภาพการจราจรในปัจจุบันและปริมาณจราจรของแบบจำลองสภาพการจราจรหลังการปรับปรุงใช้มาตรการช่วงเวลาตายตัว

ช่วงเวลา	ความเร็วเฉลี่ย (pcu/h)					
	ทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกมิตรสัมพันธ์			ทิศทางมุ่งเข้าสู่แยกอโศก-เพชรบุรี		
	สภาพปัจจุบัน	หลังการปรับปรุง	แตกต่าง (%)	สภาพปัจจุบัน	หลังการปรับปรุง	แตกต่าง (%)
7:15 – 8:15	13.9	13.5	-2.88	8.2	4.6	-43.90
8:15 – 9:15	6.4	6.4	0.00	25.2	9.0	-64.29
เฉลี่ย	10.28	10.16	-1.17	17.04	6.89	-59.57

8. สรุป

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงช่องเดินรถสลับทิศทางของถนนเพชรบุรี ช่วงตั้งแต่แยกมิตรสัมพันธ์จนถึงแยกอโศก-เพชรบุรี จากเดิมที่มีการให้สิทธิในการใช้ช่องเดินรถสลับทิศทางสลับไปสลับมาตามการสังเกตของเจ้าหน้าที่ตำรวจจราจร เป็นการเลือกทิศทางที่ได้รับสิทธิในการใช้ช่องเดินรถสลับทิศทางจากวิธีช่วงเวลาตายตัว โดยการวิเคราะห์ปริมาณจราจร ซึ่งจะให้สิทธิในการใช้แก่ทิศทางที่มีปริมาณจราจรที่มากกว่าอีกทิศทางพบว่า เมื่อทำการปรับเลือกทิศทางมาใช้ตามวิธีช่วงเวลาตายตัวแล้วนั้น ปริมาณจราจรที่ผ่านได้มีปริมาณมากขึ้นในทิศทางที่ได้รับสิทธิในการใช้งาน จาก 5,472 pcu เป็น 5,918 pcu หรือคิดเป็นร้อยละ 8.15 และมีความเร็วเฉลี่ยต่างไปจากเดิมเล็กน้อยเนื่องจากมีปริมาณจราจรที่ผ่านได้มากขึ้น ส่วนในทิศทางที่ไม่ได้รับสิทธิในการใช้งานช่องเดินรถสลับทิศทางจะมีปริมาณจราจรที่ผ่านได้เท่าเดิม แต่จะมีความเร็วเฉลี่ยลดลง เนื่องจากเสียสิทธิในการใช้ช่องเดินรถสลับทิศทางไป รวมถึงสัญญาณไฟจราจรที่อยู่บริเวณแยกมิตรสัมพันธ์และแยกอโศก-เพชรบุรีที่ยังไม่ได้

ปรับปรุงเพื่อรองรับการใช้งานระบบช่องเดินรถสลับทิศทาง ดังนั้น ระบบช่องเดินรถสลับทิศทางนี้จะมีประโยชน์เมื่อต้องการให้ทิศทางที่ได้รับสิทธิในการใช้งานมีปริมาณจราจรที่ผ่านได้เพิ่มมากขึ้น แต่ต้องแลกด้วยการสูญเสียความเร็วของยานพาหนะในทิศทางที่เสียช่องจราจรไป

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. A. Guebert, D. Carroll, B. Weston, D. Kinnecom, 2010, "Reversible Lanes in Utah Adding Efficiency Safely", 2010 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, 2010.
- [2] Institute of Transportation engineers, "A Toolbox for Alleviating Traffic Congestion", pp. 49, 1989.
- [3] B. Wolshon and L. Lambert, "Reversible Lane systems: Synthesis of Practice", Journal of Transportation Engineering-ASCE, Vol.132, Issue 12, pp.933-944, December, 2006.
- [4] TRB of the National Academies., "Convertible Roadways and Lanes", NCHRP Synthesis 340, pp.40, 2004.

-
- [5] F. DeRose, "Reversible Center-Lane Traffic System Directional and Left-Turn Usage," Highway Research Record 151, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 1-17., 1966.
- [6] Y. Liu, X. Wang, X. Liang, "Conversion Mechanism of Reversible Lane System under Urban Tidal Flow Condition", ICCTP 2011, pp. 1030-1041, 2011.
- [7] R. Dowling, A. Skabardonis, V. Alexiadis, "Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Software", Federal Highway Administration, pp. 1-132, 2004.

การวางแผนโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ายกระดับ
ด้วยวิธีการวางแผนงานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกัน
กรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว ช่วงเบริง-สมุทรปราการ
Scheduling Elevated Mass Rapid Transit Project
using Repetitive Construction Approach:
A Case Study of MRT Green Line Project
Bearing - Samutprakan Section

นรินทร์ ชาแสง สุรินทร์ กุศลาศัย
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ายกระดับเป็นโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนและมักถูกวางแผนด้วยโปรแกรม Primavera และ Microsoft Project ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวอาศัยวิธี Critical Path Method (CPM) ในการวิเคราะห์หา กำหนดเวลาทำงาน เนื่องจากงานก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้ายกระดับมีงานส่วนใหญ่ที่สามารถแบ่งงานออกเป็นหน่วยย่อยๆ โดยแต่ละหน่วยมีขั้นตอนการทำงานที่มีลักษณะซ้ำกัน (repetitive construction) และกำหนดให้แต่ละขั้นตอนมีกลุ่มคนงานและทรัพยากรเฉพาะเป็นของตนเอง (dedicated resource assignment) หลายงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าหากใช้วิธี CPM ในการวางแผนจะทำให้การทำงานของแต่ละกลุ่มคนงานดำเนินงานไม่ต่อเนื่อง อีกทั้งก่อให้เกิดความสับสนและยุ่งยาก บทความนี้เป็นการนำเสนอขั้นตอนการวางแผนโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ายกระดับด้วยวิธีการวางแผนงานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกัน โดยอาศัยโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว ช่วงเบริง-สมุทรปราการ เป็นกรณีศึกษา เฉพาะในส่วนของการก่อสร้างทางวิ่งยกระดับ และงานสถานี จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าเมื่อวางแผนงานด้วยวิธีการวางแผนงานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกัน กำหนดเวลาทำงานที่ได้ทำให้กลุ่มการทำงานในแต่ละส่วนสามารถดำเนินงานได้อย่างต่อเนื่องรองรับเงื่อนไขการทำงานทางเทคนิคภายใต้กรอบกำหนดเวลาตามสัญญา และมีรูปแบบการนำเสนอที่ค่อนข้างกระชับพร้อมกันนี้ยังสามารถระบุระยะเวลาลดยตัวหรือระยะเวลาเพื่อรองรับความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยยังชี้ให้เห็นว่ารูปแบบการนำเสนอของการวางแผนงานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกันทำให้ผู้วางแผนเห็นถึงทางเลือกการใช้ทรัพยากรเพื่อให้แผนงานมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : การวางแผนงานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกัน, งานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกัน, รถไฟฟ้ายกระดับ, โครงการรถไฟฟ้า, สายสีเขียว

Abstract

An elevated mass rapid transit construction project is a large and complex infrastructure project. The schedules of such projects are often prepared by using superior software such as Primavera and/or Microsoft Project. That is, work programs are calculated based on Critical Path Method (CPM). Since the construction of an elevated mass rapid transit project is considered to be repetitive with dedicated resource assignment, scheduling with repetitive construction approach would be more advantageous. Several researchers suggested the benefits of scheduling with repetitive construction as maximizing resource utilization with minimum interruption in on-going activities. Its diagram allows clear-cut communication. This article presents how the construction of an elevated mass rapid transit can be scheduled via repetitive construction approach using MRT green line Bearing-Samutprakan section as a case study. The result shows uninterrupted schedules of substructure work, segment installation, and the construction of station teams as well as the number of resources required under given technical constraints contract key dates. All work programs are shown in one-page format. Floating time of each construction zone can be determined. Finally, given work schedules in a one-page diagram, an alternative resource utilization becomes evident.

Key words : repetitive scheduling , repetitive construction, elevated mass rapid transit , MRT project, green line

1. บทนำ

โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ายกระดับ เป็นส่วนหนึ่งของแผนการพัฒนาระบบขนส่งมวลชนทางรางในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล 10 เส้นทาง ตามนโยบายรัฐบาลที่แถลงต่อรัฐสภาเมื่อวันที่ 23 สิงหาคม 2554 หากการดำเนินงานเป็นไปตามแผน ภายในปี 2562 จะมีโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าโครงสร้างยกระดับแล้วเสร็จรวมระยะทางประมาณ 379 กิโลเมตร ปัจจุบันมีเส้นทางที่เปิดให้บริการแล้ว 88 กิโลเมตร ได้แก่ สายสีเขียว แอร์พอร์ตเรลลิงก์ และสายสีม่วง คิดเป็น 23% ของระยะทางทั้งหมดโดยยังมีโครงการที่อยู่ในระหว่างการก่อสร้างรวมทั้งโครงการในอนาคตอีกประมาณ 291 กิโลเมตร ระบบประมาณก่อสร้างเฉลี่ย 2,600 ล้านบาทต่อกิโลเมตร แต่ละโครงการมีระยะเวลาก่อสร้าง 3-5 ปี ซึ่งลักษณะโครงการดังกล่าวเป็นโครงการที่มีขนาดใหญ่ งบประมาณสูง และใช้เวลาในการก่อสร้างนาน

โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ายกระดับ ประกอบด้วยสัญญาที่เกี่ยวข้องกับ งานโยธา งานระบบราง และงานระบบรถไฟฟ้า โดยสัญญาของงานโยธา มีขอบเขตงานที่ประกอบด้วย งานก่อสร้างทางวิ่งยกระดับ สถานี อาคารจอดรถ และ ศูนย์ซ่อมบำรุง โดยงานทางวิ่งยกระดับ และงานสถานี คิดเป็นส่วนใหญ่ของมูลค่างานโยธาทั้งหมด ในการก่อสร้างทางวิ่งยกระดับแต่ละช่วง ประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำกัน เริ่มตั้งแต่ งานเสาเข็มเจาะ งานฐานราก งานเสา และงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่ง โดยแต่ละขั้นตอนจะถูกมอบหมายและรับผิดชอบโดยกลุ่มคนงานเฉพาะ การวางแผนงานในลักษณะนี้จึงต้องพิจารณาเงื่อนไขการทำงานของแต่ละกลุ่มคนงานเอง อีกทั้งแผนงานดังกล่าวต้องสอดคล้องกับแผนการทำงานของกลุ่มคนงานอื่น ที่มีขั้นตอนการก่อสร้างที่สัมพันธ์กัน

จากการสัมภาษณ์ผู้รับจ้าง พบว่างานก่อสร้างโครงการดังกล่าวถูกวางแผนด้วยโปรแกรม Primavera และ MS

Project ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวเป็นการวางแผนตามหลักการ Critical Path Method (CPM) ที่วิเคราะห์หา กำหนดเวลาทำงานที่เร็วที่สุดและช้าที่สุดของแต่ละกิจกรรมโดยพิจารณาจากลำดับขั้นตอนการทำงานที่ผู้ใช้โปรแกรมกำหนด งานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าการนำวิธี CPM มาใช้ในการวางแผนงานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกัน อาจส่งผลให้กำหนดเวลาทำงานของแต่ละกลุ่มคนงานขาดความต่อเนื่องอันนำไปสู่การขาดประสิทธิภาพของแผนงาน นอกจากนี้อาจก่อให้เกิดความยุ่งยากและเกิดความผิดพลาดได้ง่ายเมื่อโครงการมีหน่วยก่อสร้างที่ซ้ำกันเป็นจำนวนมาก [1] จำนวนเอกสารที่เกี่ยวข้องจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อจำนวนของกิจกรรมและหน่วยก่อสร้างเพิ่มขึ้น [2] จากปัญหาดังที่กล่าวไว้ในข้างต้นนักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาหลักการวางแผนงานสำหรับงานที่มีลักษณะซ้ำกัน ตัวอย่างเช่น Line-of-Balance (LOB) [3] - [4], Repetitive Scheduling Method (RSM) [1] และ Linear Scheduling Method (LSM) [5] - [6] นอกจากนี้ [7] ได้เปรียบเทียบ วิธี CPM และ วิธี LSM พบว่า วิธี LSM ซึ่งมีลักษณะเป็นแผนภาพที่แทนกิจกรรมด้วยกราฟเส้นตามความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายกว่ากว่าวิธี CPM ปัจจุบันการวางแผนงานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกันยังไม่เป็นที่นิยมน้อยกว่าหลาย เนื่องจากมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนกว่าและไม่มีโปรแกรมสำเร็จรูป จึงไม่สะดวกในการใช้งาน

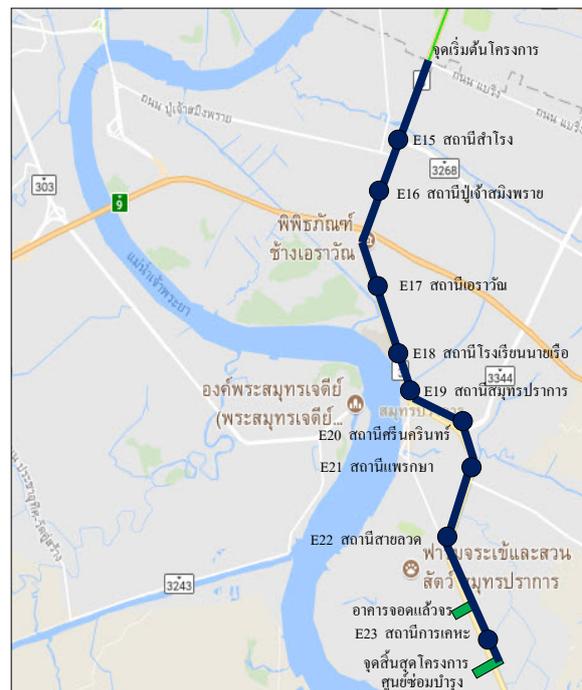
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้หลักการวางแผนงานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกัน ในการวางแผนก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว ช่วงแบริ่ง - สมุทรปราการ เป็นกรณีศึกษา

2. โครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว

ช่วงแบริ่ง-สมุทรปราการ

โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีเขียว ช่วงแบริ่ง - สมุทรปราการ ประกอบด้วย 3 สัญญา ได้แก่ 1) สัญญางานโยธา 2) สัญญาระบบราง 3) สัญญาระบบการเดินรถไฟฟ้า โดยสัญญางานโยธา มีขอบเขตงานหลักคือ

การก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟฟ้ายกระดับ ระยะทาง 12.58 กิโลเมตร และ การก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าจำนวน 9 สถานี แนวเส้นทางเริ่มต้นต่อเนื่องจากแนวเส้นทางของโครงการระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพมหานคร (BTS) ส่วนต่อขยายสายสุขุมวิท ตอนที่ 1 ช่วงอ่อนนุช-แบริ่ง บริเวณซอยสุขุมวิท 107 (แบริ่ง) ไปตามแนวเกาะกลางของถนนสุขุมวิท ผ่านคลองสำโรง ผ่านแยกเทพารักษ์ แยกปู่เจ้าสมิงพราย เมื่อถึงบริเวณจุดตัดกับโครงการถนนวงแหวนรอบนอกด้านใต้แนวจะเบี่ยงจากเกาะกลางไปทางด้านทิศตะวันตกของถนนสุขุมวิท เพื่อข้ามทางต่างระดับสุขุมวิท จากนั้นจึงเบี่ยงกลับมาอยู่ในแนวเกาะกลางถนนสุขุมวิท ผ่านแยกศาลากลาง แยกการไฟฟ้า แยกแพรงษา แยกสายลวด จนถึงจุดสิ้นสุดโครงการบริเวณหน้าสถานีไฟฟ้าย่อยบางปิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 1 สัญญานี้มีงบประมาณก่อสร้าง 17,092 ล้านบาท โดยเริ่มสัญญาวันที่ 1 มีนาคม 2555 และ สิ้นสุดสัญญาวันที่ 7 มิถุนายน 2559 คิดเป็นระยะเวลาก่อสร้าง 1,560 วัน



รูปที่ 1 ขอบเขตงานโยธาช่วงแบริ่ง - สมุทรปราการ

3. ขั้นตอนการก่อสร้าง

งานก่อสร้างทางวิ่งและสถานีของโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว ช่วงแบริ่ง - สมุทรปราการ ได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มงานหลักดังนี้

3.1) กลุ่มงานโครงสร้าง substructure

งาน substructure เป็นการก่อสร้างโครงสร้างรับน้ำหนักทางวิ่งและสถานี ประกอบด้วย งานเสาเข็มเจาะประเภทเหลี่ยม งานฐานราก งานเสา ในส่วนของทางวิ่งที่เข้าสู่บริเวณสถานีสำโรง จะมีงานหัวเสาเพิ่มเข้ามาเพื่อรองรับทางวิ่งที่มากกว่า 2 ช่องทาง และส่วนของเสาสถานีจะมีการก่อสร้างคานขวาง เพื่อรองรับน้ำหนักพื้นสถานี โดยกลุ่มของงานโครงสร้าง substructure มีรายละเอียดการก่อสร้างดังนี้

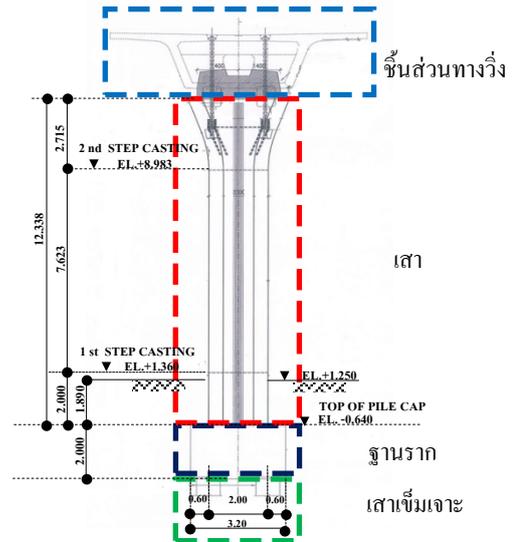
งานเสาเข็มเจาะประเภทเหลี่ยม (barrette pile) มีขั้นตอนเริ่มจากการก่อสร้างกำแพงนำร่อง (guide wall) ขุดดินให้ได้ความลึกที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้เครื่องจักร excavation crane & grab พร้อมกับใส่สารละลายเบนโทไนท์เพื่อป้องกันผนังดินที่ขุดพังทลาย จากนั้นนำเหล็กที่ประกอบเป็นแกนของเสาเข็มลงหลุม และเทคอนกรีตจนถึงระดับที่ต้องการ

งานฐานราก (pile cap) เริ่มจากการติดตั้ง sheet pile ขุดดินจนถึงระดับตัดหัวเข็ม พร้อมติดตั้งค้ำยัน (bracing) ติดตั้งเหล็กเสริม ติดตั้งแบบหล่อคอนกรีต และเทคอนกรีต

งานเสา (column) เริ่มจากการต่อเหล็กเสริมโดยเหล็กเสาบางส่วนได้ถูกติดตั้งในขั้นตอนการก่อสร้างฐานราก ติดตั้งแบบหล่อคอนกรีต และเทคอนกรีต เสาทางวิ่งโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นเสาเดี่ยววางอยู่บนเกาะกลางถนน ดังแสดงในรูปที่ 2 แต่ในกรณีที่ไม่สามารถก่อสร้างในบริเวณเกาะกลางถนนได้ เช่น อุโมงค์ทางลอด ทางเลี้ยวบริเวณแยก โครงสร้างเสาจะถูกออกแบบเป็น portal frame โดยมีลักษณะเป็นเสา 2 ต้น ที่เชื่อมต่อกันด้วย portal beam การก่อสร้างเสาจะใช้วิธีหล่อในที่ ส่วนการก่อสร้าง portal beam จะใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปมาติดตั้งแล้วยึดด้วยลวดแรงดึงสูง

งานหัวเสา (column head) เป็นโครงสร้างที่ต่อจากเสา เพื่อให้สามารถรองรับทางวิ่งที่เพิ่มขึ้นการก่อสร้างเริ่มจากการติดตั้งเหล็กเสริม ติดตั้งแบบหล่อคอนกรีต และเทคอนกรีต

งานคานขวาง (cross beam) เป็นโครงสร้างที่ต่อจากเสาบริเวณสถานีเพื่อรองรับพื้น การก่อสร้างจะเริ่มจากการติดตั้งแบบหล่อคานซึ่งเป็นแบบหล่อสำเร็จรูปโดยภายในแบบจะกลวง จากนั้นใส่เหล็กเสริม และเทคอนกรีตให้เต็มแบบหล่อ ซึ่งแต่ละเสาประกอบด้วยคานขวางเพื่อรองรับพื้นชั้นจำหน่ายตั๋วโดยสารและคานขวางเพื่อรองรับพื้นชั้นชานชาลา



รูปที่ 2 โครงสร้างทางวิ่งยกระดับประเภทเสาเดี่ยว

3.2) กลุ่มงานโครงสร้าง superstructure

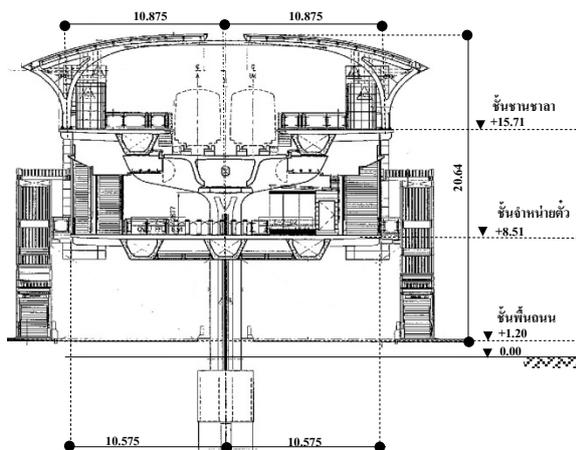
งานโครงสร้าง superstructure หรืองานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่ง (precast segment) สำหรับโครงการนี้การติดตั้งจะทำครั้งละหนึ่งช่วงเสา (span by span erection) โดยใช้อุปกรณ์คานเหล็กยกติดตั้ง (launching truss) มีขั้นตอนเริ่มจาก ขนย้ายชิ้นส่วนทางวิ่งมายังบริเวณช่วงเสา (span) ที่จะติดตั้งซึ่งมีจำนวนชิ้นส่วนทางวิ่งเฉลี่ย 16 ชิ้น/ช่วง การยกติดตั้งจะใช้ launching truss ยกชิ้นส่วนทางวิ่งขึ้นสู่ตำแหน่งจนครบ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 7 ชั่วโมง โดยจะทำงานในช่วงเวลากลางคืนเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบด้านการจราจร หลังจากนั้นยึดด้วยลวดเหล็กแรงดึงสูง (tendon strand) ด้วยแรงดึง 15% ของแรงที่ได้ออกแบบ เทคอนกรีตรอยต่อแบบเปียก (wet joint) เมื่อคอนกรีตได้กำลังตามกำหนดแล้วให้ดึงลวดเหล็กรับแรง 100% จากนั้นจึงเคลื่อน launching truss ไปยังตำแหน่งช่วงเสาถัดไป รวมระยะเวลาก่อสร้างเฉลี่ย 4 วัน/ช่วง

3.3 กลุ่มงานสถานี

สถานีรถไฟ คือ อาคารที่เป็นจุดจอดสำหรับรับ-ส่งผู้โดยสาร มีโครงสร้างเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นพื้นถนน ชั้นจำหน่ายตั๋ว และชั้นชานชาลา มีความกว้างประมาณ 20 - 25 เมตร ยาวประมาณ 150 เมตร ดังรูปที่ 3 ระยะห่างของแต่ละสถานีอยู่ที่ประมาณ 700 - 1,900 เมตร การก่อสร้างสถานีโดยมากจะดำเนินการหลังจากงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งบริเวณสถานีแล้วเสร็จ กิจกรรมก่อสร้างแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ งานโครงสร้างสถานี งานสถาปัตยกรรม งานระบบ และงานตรวจสอบความถูกต้อง มีระยะเวลารวม 574 - 658 วัน รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์และระยะเวลาก่อสร้างของสถานีสายลวด โดยงานก่อสร้างแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1) งานโครงสร้างสถานี สามารถเริ่มงานได้หลังจากที่งานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งบริเวณสถานีแล้วเสร็จ ประกอบด้วย งานติดตั้ง u-girder งานพื้นคอนกรีต งานโครงสร้างเหล็ก และงานโครงหลังคา ใช้ระยะเวลาก่อสร้าง 419 - 524 วัน

2) งานสถาปัตยกรรม สามารถเริ่มงานได้หลังจากที่งานพื้นคอนกรีตของสถานีแล้วเสร็จ ประกอบด้วย งานก่ออิฐ-ฉาบปูนผนังอาคาร งานหลังคา งานตกแต่งพื้น งานตกแต่งผนัง งานประตู-หน้าต่าง งานฝ้าเพดาน และงานทาสี ใช้ระยะเวลาก่อสร้าง 316 - 390 วัน



รูปที่ 3 สถานีรถไฟ

3) งานระบบสถานี สามารถเริ่มงานได้หลังจากที่งานพื้นคอนกรีตของสถานีแล้วเสร็จ ประกอบด้วย งาน

ระบบไฟฟ้า งานระบบเครื่องกลและปรับอากาศ งานระบบประปา งานระบบป้องกันอัคคีภัย งานติดตั้งบันไดเลื่อน งานติดตั้งลิฟท์ และงานทดสอบระบบ ใช้ระยะเวลาก่อสร้าง 320 - 367 วัน

4) งานตรวจสอบความถูกต้องสามารถดำเนินการได้หลังจากที่งานทั้ง 3 กลุ่มของสถานีแล้วเสร็จ ใช้ระยะเวลาประมาณ 60 วัน

กิจกรรม	ระยะเวลา (วัน)	ปีที่ 1												ปีที่ 2											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
งานสถานีสายลวด (E22)	596	[Solid black bar]																							
งานโครงสร้าง	431	[Hatched bar]																							
งานสถาปัตยกรรม	390	[Dotted bar]																							
งานระบบ	348	[Cross-hatched bar]																							
งานตรวจสอบความถูกต้อง	60	[Checkered bar]																							

รูปที่ 4 งานสถานีสายลวด (E22)

4. กรอบกำหนดเวลาสัญญา

ภายหลังจากได้รับหนังสือให้เริ่มงานจากรฟม. ผู้รับจ้างต้องดำเนินงานตามสัญญาภายใต้ขอบเขตงานและกรอบกำหนดเวลาของสัญญา (Key Date) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 Key Date สามารถแบ่งตามขอบเขตงานได้เป็น 3 ส่วน คือ

1) ส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานศูนย์ซ่อมบำรุง ใช้สัญลักษณ์

(a) ต่อท้าย ประกอบด้วย

KD1-1 งานเสาเข็มของศูนย์ซ่อมบำรุง แล้วเสร็จ 20%

KD1-3 งานพื้นศูนย์ซ่อมบำรุง ส่วนติดตั้งรางรถไฟแล้วเสร็จ

KD1-5 งานพื้นศูนย์ซ่อมบำรุงแล้วเสร็จทั้งหมด

KD1-8 งานอาคารปฏิบัติการ แล้วเสร็จพร้อมให้งานติดตั้งระบบรางรถไฟ และงานติดตั้งอุปกรณ์ระบบการเดินรถเข้าดำเนินงาน

KD1-9 งานอาคารศูนย์ควบคุมแล้วเสร็จพร้อมให้งานติดตั้งอุปกรณ์ระบบการเดินรถ เข้าดำเนินงาน

ตารางที่ 1 กรอบกำหนดเวลาสัญญา (Key Date)*

Key Date	Duration (Days)
KD1-1 : Complete 20% Of Depot Piling Works (a)	510
KD1-2 : Complete 50% Of C1 Piling Works (b)	720
KD1-3 : Complete Sufficient Depot Slab for Trackwork Access (a)	1,110
KD1-5 : Complete Civil Works on Depot's Platform Slab (a)	1,320
KD1-6 : Complete Sufficient 4 Stations (E17,E18,E21,E23) for C2, C3 Final Fix Access (c)	1,405
KD1-7 : Complete Sufficient 5 Stations (E15,E16,E19,E20, E22) for C2, C3 Final Fix Access (c)	1,470
KD1-8 : Complete Sufficient Main Workshop for C2, C3 Final Fix Access (a)	1,410
KD1-9 : Complete Sufficient OCC for C3 Final Fix Access (a)	1,410
KD1-10 : Complete Sufficient Viaduct Deck (P1-P199) for C2 Track Work Access (b)	1,440
KD1-11 : Complete Sufficient Viaduct Deck (P200-P380) for Track Work Access (b)	1,440
KD1-12 : C1 Final Contract Completion	1,560

*ข้อมูลอ้างอิง DWP R02.2 แก้ไข ณ วันที่ 9 เมษายน 2557

2) ส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานทางวิ่งยกระดับ ใต้ สัญลักษณ์ (b) ต่อท้าย ประกอบด้วย

KD1-2 งานเสาเข็มทางวิ่งยกระดับแล้วเสร็จ 50%

KD1-10 งานก่อสร้างทางวิ่งยกระดับบริเวณต่อม่อที่ 1 ถึง ต่อม่อที่ 199 แล้วเสร็จเพียงพอสำหรับงานติดตั้งราง

KD1-11 งานก่อสร้างทางวิ่งยกระดับบริเวณต่อม่อที่ 200 ถึง ต่อม่อที่ 380 แล้วเสร็จเพียงพอสำหรับงานติดตั้งราง

3) ส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานสถานีรถไฟฟ้า ใต้สัญลักษณ์ (c) ต่อท้าย ประกอบด้วย

KD1-6 งานก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าจำนวน 4 สถานี (E17, E18, E21, E23) แล้วเสร็จเพียงพอสำหรับงานติดตั้งระบบราง และ งานติดตั้งอุปกรณ์ระบบการเดินรถ

KD1-7 งานก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าจำนวน 5 สถานี (E15, E16, E19, E20, E22) แล้วเสร็จเพียงพอสำหรับงานติดตั้งระบบราง และ งานติดตั้งอุปกรณ์ระบบการเดินรถ

KD1-12 เสร็จสิ้นงานก่อสร้าง

โดยงานวิจัยนี้จะวางแผนงานก่อสร้างโดยใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างทางวิ่งยกระดับ (b) และ งาน

ก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้า (c) เท่านั้น ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 80 ของมูลค่าโครงการ

5. การวิเคราะห์กำหนดเวลาทำงาน

การจัดทำกำหนดเวลาทำงานและการกำหนดทรัพยากรที่ใช้เป็นขั้นตอนที่ต้องทำก่อนเริ่มดำเนินการก่อสร้าง เพื่อให้แน่ใจว่างานก่อสร้างจะสามารถแล้วเสร็จภายใต้กรอบกำหนดเวลาสัญญา จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น งานทั้งหมดถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ งานโครงสร้าง substructure งานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่ง และงานสถานีตามลำดับขั้นตอนการก่อสร้าง แต่ลำดับในการวางแผนงานจะมีทิศสวนทางกับลำดับขั้นตอนการก่อสร้าง โดยการวิเคราะห์กำหนดเวลาทำงานจะเริ่มจากงานสถานีก่อน จากนั้นเป็นงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่ง และงานโครงสร้าง substructure เป็นลำดับสุดท้ายโดยการวิเคราะห์กำหนดเวลาทำงานจะเริ่มต้นจากวันสิ้นสุดสัญญา คัดย้อนกลับไปยังวันเริ่มต้น กำหนดเวลาเริ่มต้นและแล้วเสร็จของแต่ละกิจกรรม พร้อมจำนวนทรัพยากรที่ต้องการจะถูกกำหนดภายใต้เงื่อนไขของกรอบระยะเวลาที่มี เพื่อให้แน่ใจว่างานจะไม่ล่าช้ากว่ากำหนด

กำหนดเวลาทำงานของการก่อสร้างสถานี

เมื่อพิจารณาขั้นตอนการดำเนินงาน และระยะเวลาการก่อสร้างของกลุ่มงานสถานีร่วมกับเงื่อนไขของกรอบเวลาทำงานดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจะเห็นได้ว่าระยะเวลาทำงานที่มีก่อนข้างจำกัด ผู้รับจ้างจึงกำหนดทีมทำงานเฉพาะสำหรับแต่ละสถานี เพื่อให้ทุกสถานีสามารถดำเนินงานก่อสร้างได้ขนานกัน การกำหนดแผนงานเริ่มจากการนำเข้าข้อมูลกรอบระยะเวลาการทำงานที่เป็นไปตามเงื่อนไขในตารางที่ 1 โดยกำหนดให้วันสุดท้ายของการก่อสร้างแต่ละสถานีคือวันสิ้นสุดสัญญา (KD1-12) กำหนดเวลาของงานสถานีจะถูกคิดย้อนกลับโดยอาศัยข้อมูลระยะเวลาของแต่ละสถานีตามตารางที่ 2 จากนั้นตรวจสอบกรอบกำหนดเวลาสัญญา KD1-6 ซึ่งกำหนดให้งานระบบ (E&M) ของสถานี E17, E18, E21 และ E23 แล้วเสร็จเพียงพอสำหรับงานติดตั้งราง (track work) และงานติดตั้งอุปกรณ์ระบบการเดินรถไฟฟ้า (M&E) ถัดมา

ตรวจสอบกรอบกำหนดเวลาสัญญา KD1-7 ซึ่งกำหนดให้ งานระบบ (E&M) ของสถานี E15, E16, E19, E20 และ E22 แล้วเสร็จเพียงพอสำหรับงานติดตั้งราง (track work) และงานติดตั้งอุปกรณ์ระบบการเดินรถไฟไฟฟ้า (M&E) จากเงื่อนไขข้างต้น กำหนดเวลาทำงานของแต่ละสถานีแสดง ได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งนั่นคือกำหนดเวลาเริ่มต้นงานที่ช้าที่สุด (late start) และกำหนดเวลาแล้วเสร็จที่ช้าที่สุด (late finish) สำหรับงานก่อสร้างสถานีภายใต้เงื่อนไขกรอบเวลาสัญญา

ตารางที่ 2 ระยะเวลาก่อสร้างสถานี

สถานี	ระยะเวลาก่อสร้าง (วัน)			
	งานโครงสร้าง	งานสถาปัตยกรรม	งานระบบ	งานตรวจสอบ
ลำโรง(E15)	419	358	320	60
ปู่เจ้าสมิงพราย (E16)	446	382	367	60
พิพิธภัณฑ์ช้างเอราวัณ(E17)	505	363	341	60
โรงเรียนนาพระ (E18)	462	316	365	60
สมุทรปราการ(E19)	450	378	352	60
ศรีนครินทร์(E20)	459	370	344	60
แพรงษา(E21)	523	377	365	60
สายลวด(E22)	431	390	348	60
การเคหะแห่งชาติ(E23)	524	366	358	60

การกำหนดเวลาทำงานของการติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่ง

การติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งจะดำเนินการได้หลังจากงาน โครงสร้าง substructure แล้วเสร็จและต้องดำเนินการให้ แล้วเสร็จก่อนที่งานโครงสร้างสถานีจะเริ่มต้น ด้วยกรอบ เวลาทำงานอันจำกัด การวางแผนงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่ง จึงต้องมีการกำหนดจำนวน launching truss และ การ กำหนดทิศทางเคลื่อนที่ของ launching truss

- การกำหนดจำนวน launching truss ผู้รับจ้างจะทำการแบ่งขอบเขตงานออกเป็นพื้นที่ย่อยหรือโซน เพื่อให้ งานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งในแต่ละพื้นที่สามารถดำเนินงาน ได้ขนานกัน โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณาจุดแบ่งโซน ดังนี้ 1) พิจารณาลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ก่อสร้างซึ่ง จุดแบ่งโซนมักกำหนดให้อยู่ในบริเวณทางตรงและไม่เป็น เขตชุมชนที่มีการจราจรหนาแน่นเพื่อให้สะดวกต่อการ ติดตั้ง launching truss 2) มีกำหนดเวลาส่งมอบพื้นที่ ใกล้เคียงกัน 3) จำนวนพื้นที่ย่อยหรือโซนจะพิจารณาจาก ระยะเวลาที่มีสำหรับการติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่ง จาก หลักการดังกล่าวโครงการนี้แบ่งพื้นที่ก่อสร้างออกเป็น 7

โซนโดยแต่ละโซนจะใช้ launching truss โซนละ 1 ชุด รวมทั้งสิ้น 7 ชุด

- การกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของ launching truss เนื่องจากงาน โครงสร้างสถานีจะเริ่มได้ก็ต่อเมื่อได้ ดำเนินการติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งบริเวณสถานีแล้วเสร็จ ดังนั้นในแต่ละโซน launching truss จะถูกกำหนดทิศทาง ให้วิ่งเข้าสู่สถานีที่ใกล้ที่สุด และจากเงื่อนไข KD1-6 และ KD1-7 ทิศทางการเคลื่อนที่จะเคลื่อนจากสถานีที่อยู่ใน กลุ่ม 4 สถานีแรกที่ต้องส่งมอบงานก่อน ไปยังสถานีที่อยู่ใน กลุ่ม 5 สถานีหลัง

ความชันของเส้นการทำงานของงานติดตั้งชิ้นส่วนทาง วิ่งถูกกำหนดจากระยะเวลาติดตั้ง 4 วัน/ช่วง การกำหนด ตำแหน่งของเส้นการทำงานจะพิจารณาจากเงื่อนไขการ ก่อสร้างที่วางแผนโครงสร้างสถานีจะเริ่มได้ก็ต่อเมื่องาน ติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งบริเวณสถานีแล้วเสร็จ ดังนั้นเส้นการ ทำงานของงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งที่ลากผ่านกำหนดเวลา เริ่มต้นที่ช้าที่สุดของงานโครงสร้างสถานี (control point ในทฤษฎี RSM [1]) จึงเป็นกำหนดเวลาที่ช้าที่สุดที่ทำให้ กิจกรรมติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง จากนั้นตรวจสอบกรอบกำหนดเวลาสัญญา KD1-10 ซึ่ง กำหนดให้งานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งบริเวณตำแหน่ง P1-P199 แล้วเสร็จเพียงพอสำหรับงานติดตั้งราง (track work) และกรอบกำหนดเวลาสัญญา KD1-11 ซึ่งกำหนดให้งาน ติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งบริเวณตำแหน่ง P200-P380 แล้ว เสร็จเพียงพอสำหรับงานติดตั้งราง (track work) จาก เงื่อนไขที่กล่าวไว้ในข้างต้น ทำให้กำหนดเวลาทำงานและ ทิศทางการทำงานของ launching truss ในแต่ละโซน แสดงดังรูปที่ 6 ได้ดังนี้

T1 วิ่งเข้าหา สถานี E15 ในทิศทาง ขวาไปซ้าย

T2 วิ่งเข้าหา สถานี E16 ในทิศทาง ซ้ายไปขวา

T3 วิ่งเข้าหา สถานี E17 ในทิศทาง ซ้ายไปขวา

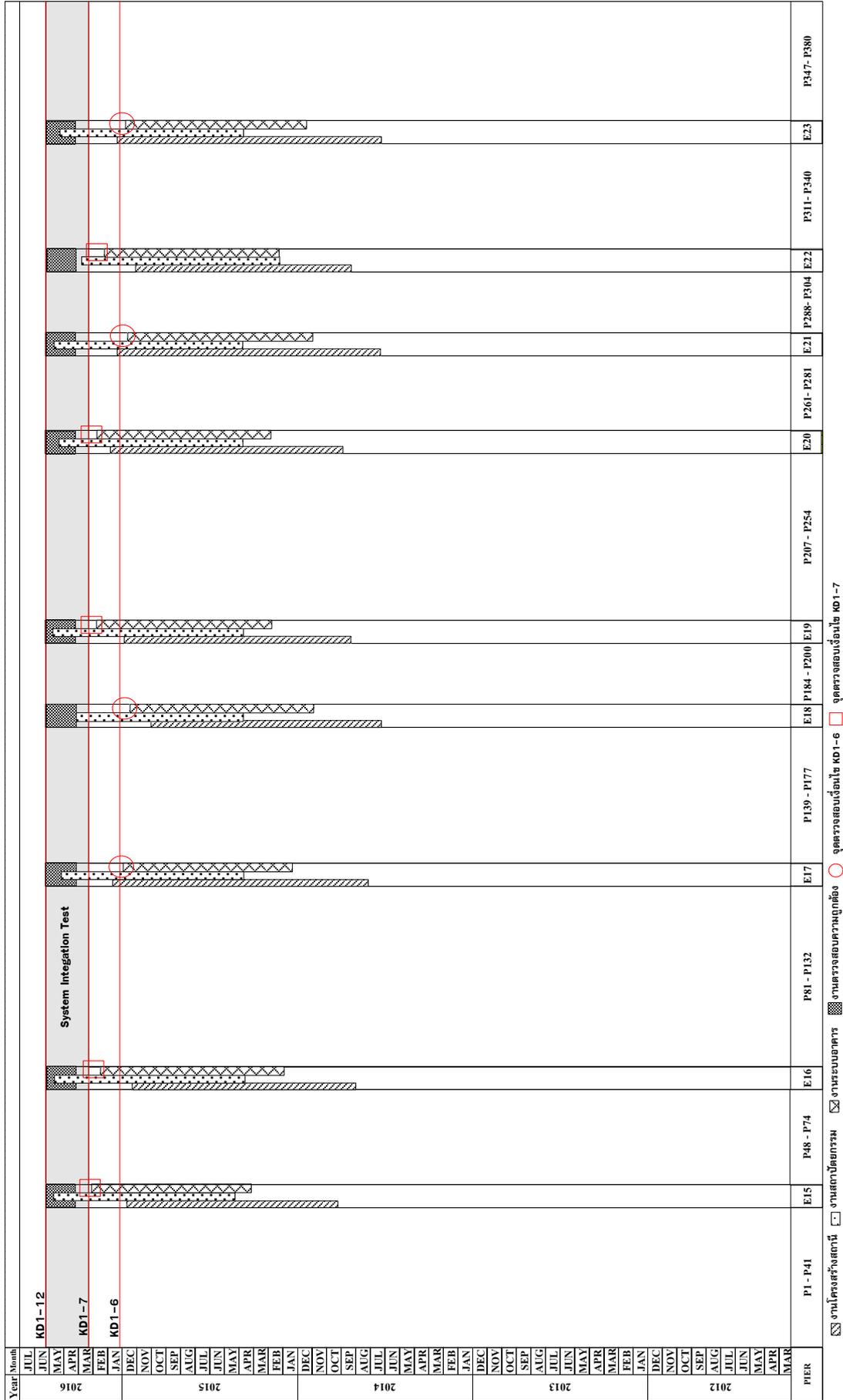
T4 วิ่งเข้าหา สถานี E18 ไปยัง สถานี E19

ในทิศทาง ซ้ายไปขวา

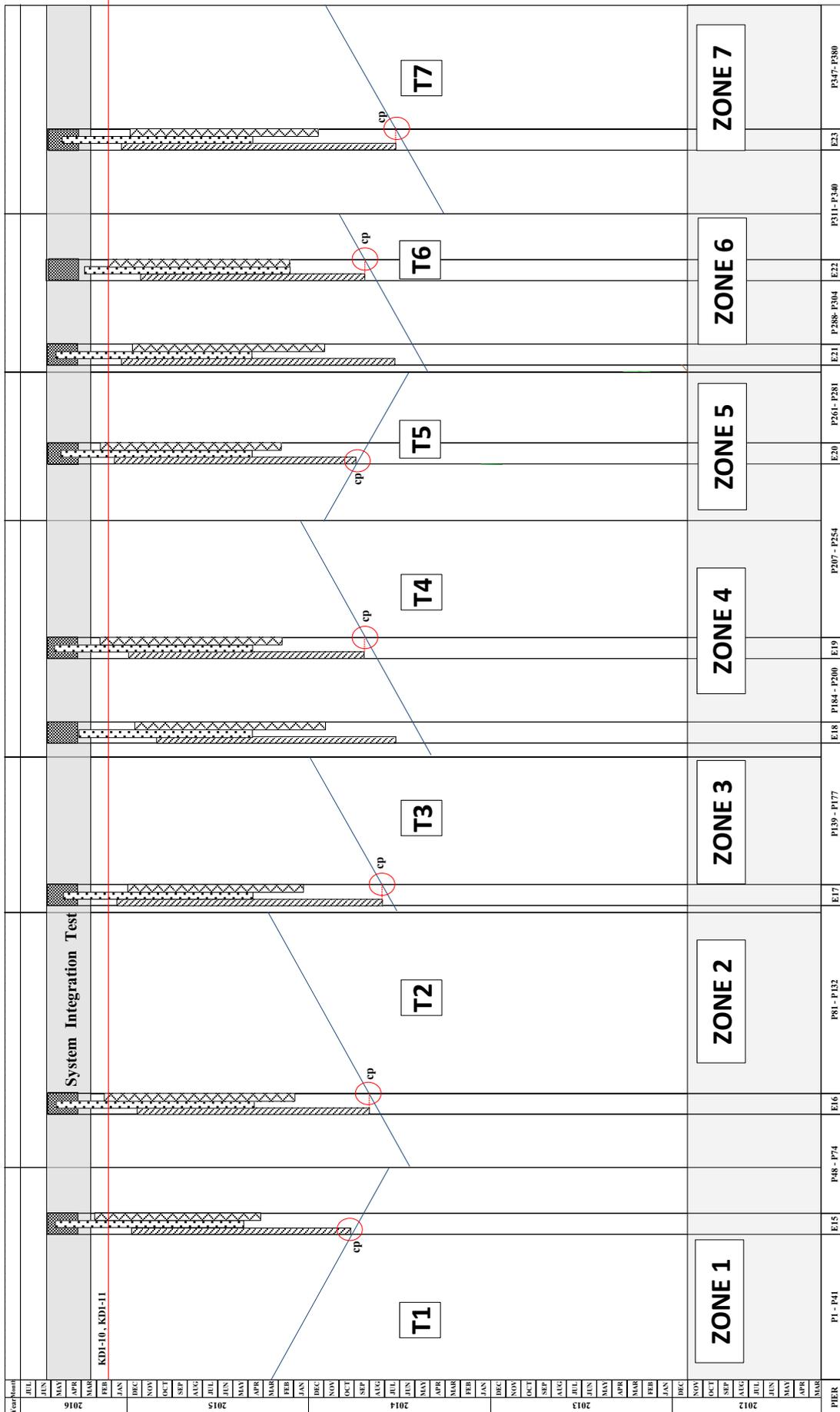
T5 วิ่งเข้าหา สถานี E20 ในทิศทาง ขวาไปซ้าย

T6 วิ่งเข้าหา สถานี E21 ไปยัง สถานี E22

ในทิศทาง ซ้ายไปขวา



รูปที่ 5 การกำหนดเวลางานก่อสร้างสถานี



T7 วังเข้าหา สถานี E23 ในทิศทาง ซ้ายไปขวา

กำหนดเวลาทำงานของโครงสร้าง substructure

งานโครงสร้าง substructure เป็นงานที่มีระยะเวลาก่อสร้างที่ไม่แน่นอนเนื่องจากมีอุปสรรคระหว่างการทำงานมากกว่ากลุ่มงานอื่น เช่น ปัญหาการเวนคืนพื้นที่ล่าช้า ปัญหาระหว่างการรื้อย้ายสาธารณูปโภค และสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการก่อสร้าง กำหนดเวลางานก่อสร้างของงานกลุ่มนี้จึงถูกพิจารณาให้เริ่มต้นงานให้เร็วที่สุดและสามารถเริ่มงาน ได้ทันทีหลังจากที่งานรื้อย้ายสาธารณูปโภคแล้วเสร็จและแบบก่อสร้างได้รับการอนุมัติ โดยแต่ละ โชนจะมีทีมทำงานเป็นของตัวเองเพื่อให้งานสามารถเริ่มต้นได้พร้อมกัน และทิศทางการทำงานจะสอดคล้องกับงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่ง จากนั้นตรวจสอบกรอบกำหนดเวลาสัญญา KD1-2 ซึ่งกำหนดให้งานเสาเข็มเจาะประเภทเหลี่ยมบริเวณทางวิ่งแล้วเสร็จ 50% ของปริมาณงานเสาเข็มเจาะประเภทเหลี่ยมบริเวณทางวิ่งทั้งหมด จากเงื่อนไขข้างต้น กำหนดเวลาทำงานของงานโครงสร้าง substructure แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งการกำหนดเส้นการทำงานมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

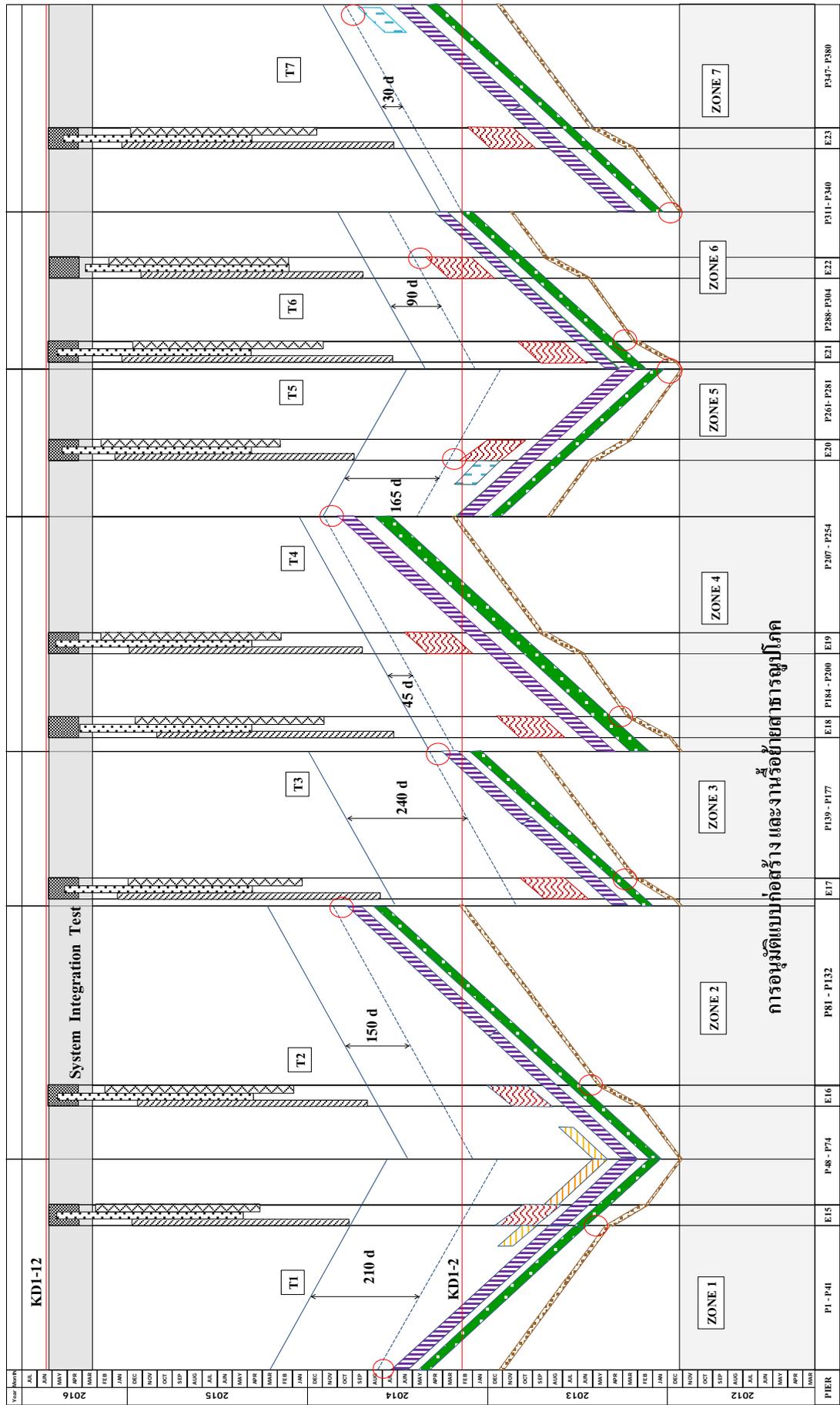
- งานเสาเข็มเจาะประเภทเหลี่ยม สามารถเริ่มงานได้ทันทีหลังจากที่งานรื้อย้ายสาธารณูปโภคแล้วเสร็จ ระยะเวลาก่อสร้างบริเวณทางวิ่งเฉลี่ย 2.5 วัน/ต้น ส่วนบริเวณสถานีระยะเวลาก่อสร้างเฉลี่ย 4 วัน/ต้น ซึ่งบริเวณทางวิ่งจะมีเสาเข็ม 2 ต้น และสถานีมีเสาเข็ม 4 ต้น ทำให้ความชันของเส้นการทำงานของงานเสาเข็มเจาะบริเวณทางวิ่ง (5 วัน/เสา 1 ต้น) แตกต่างจากเส้นการทำงานของเสาเข็มเจาะบริเวณสถานี (16 วัน/เสา 1 ต้น) เส้นการทำงานของงานเสาเข็มเจาะถูกแทนด้วยแถบ  ความหนาของแถบจะแทนเวลาทำงานในแต่ละตอม่อ

- งานฐานรากถูกกำหนดให้เริ่มงานได้หลังจากที่งานเสาเข็มเจาะประเภทเหลี่ยมแล้วเสร็จอย่างน้อย 28 วัน ระยะเวลาก่อสร้างฐานรากบริเวณทางวิ่งเฉลี่ย 21 วัน/ตอม่อ ส่วนบริเวณสถานีเฉลี่ย 28 วัน/ตอม่อ โดยขั้นตอนการก่อสร้างฐานรากถูกแบ่งออกเป็นงานย่อยๆ แต่ละงานย่อยมีระยะเวลาการทำงาน 7 วันเพื่อให้ การทำงานเกิดการเหลื่อมกันซึ่งทำให้ความชันเท่ากับ 7 วัน/ตอม่อ ตำแหน่ง

ของเส้นการทำงานของงานฐานรากถูกกำหนดจากเงื่อนไขความสัมพันธ์ทางเทคนิคกับงานเสาเข็มเจาะประเภทเหลี่ยมที่วางงานฐานรากสามารถเริ่มงานได้หลังจากงานเสาเข็มเจาะประเภทเหลี่ยมแล้วเสร็จ 28 วัน หากพิจารณาความชันของเส้นการทำงานของงานก่อนหน้าพบว่างานเสาเข็มทางวิ่งมีอัตราการการทำงานหรือความชันเท่ากับ 5 วัน/เสา 1 ต้น ในขณะที่บริเวณสถานีมีความชันเท่ากับ 16 วัน/เสา 1 ต้น เนื่องจากงานฐานรากมีความชันที่มากกว่างานเสาเข็มทางวิ่ง ตาม [1] ตำแหน่งของเส้นการทำงานของงานฐานรากจะอยู่ที่หน่วยการทำงานแรกแต่หากพิจารณาความชันของเสาเข็มสถานีพบว่างานฐานรากมีความชันของเส้นการทำงานที่น้อยกว่า ตาม [1] ตำแหน่งของเส้นการทำงานของงานฐานรากจะอยู่ที่หน่วยงานสุดท้าย ในกรณีนี้เพื่อให้กลุ่มงานฐานรากสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องจุดควบคุม (control point) จึงเป็นหน่วยการทำงานหรือตำแหน่งเสาที่ทำให้งานฐานรากเริ่มต้นทันทีหลังจากที่งานเสาเข็มแล้วเสร็จ 28 วัน เส้นการทำงานของงานฐานรากถูกแทนด้วยแถบ  งานฐานรากในแต่ละโชนมีจุดควบคุมที่แตกต่างกัน ไปขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสถานี และทิศทางของ launching truss ดังแสดงในรูปที่ 7

- งานเสาถูกกำหนดให้เริ่มงานได้หลังจากที่งานฐานรากแล้วเสร็จอย่างน้อย 28 วัน มีระยะเวลาก่อสร้างเฉลี่ย 35 วัน/ต้น การทำงานจะมีลักษณะเหลื่อมกันและมีความชันเท่ากับ 7 วัน/ต้น เช่นเดียวกับงานฐานราก เนื่องจากความชันของงานเสาเท่ากับความชันของงานฐานรากทำให้เส้นการทำงานของงานเสานานกับเส้นการทำงานของงานฐานรากโดยมีระยะห่างระหว่างงานเท่ากับ 28 วัน เส้นการทำงานของเสาถูกแทนด้วยแถบ 

- งาน portal beam ถูกกำหนดให้เริ่มงานได้หลังจากที่งานเสาแล้วเสร็จอย่างน้อย 28 วัน และมีระยะเวลาก่อสร้างเฉลี่ย 45 วัน/ชุด การทำงานจะมีลักษณะเหลื่อมกันและมีความชันเท่ากับ 7 วัน/ต้น เช่นเดียวกับงานเสาทำให้เส้นการทำงานของงาน portal beam ขนานกับเส้นการทำงานของงานเสาโดยมีระยะห่างระหว่างงานเท่ากับ 28 วัน เส้นการทำงานของงาน portal beam ถูกแทนด้วยแถบ 



รูปที่ 7 การกำหนดเวลางาน โครงสร้าง substructure

- งานห้วเสาถูกกำหนดให้เริ่มงานได้หลังจากที่งานเสาแล้วเสร็จอย่างน้อย 28 วันและมีระยะเวลาก่อสร้างเฉลี่ย 28 วัน/ต้น การทำงานจะมีลักษณะเหลื่อมกันและมีความชันเท่ากับ 7 วัน/ต้น เช่นเดียวกับงานเสาทำให้เส้นการทำงานของงานห้วเสา ขนานกับเส้นการทำงานของงานเสาโดยมีระยะห่างระหว่างงานเท่ากับ 28 วัน เส้นการทำงานของงานห้วเสาถูกแทนด้วยแถบ 

- งานคานขวางถูกกำหนดให้เริ่มงานได้หลังจากที่งานเสาบริเวณสถานีแล้วเสร็จอย่างน้อย 28 วัน และมีระยะเวลาก่อสร้างเฉลี่ย 28 วัน/ตัว โดยแต่ละเสาต้องใช้คานดังกล่าว 2 ตัวการทำงานจะมีลักษณะเหลื่อมกันและมีความชันเท่ากับ 7 วัน/ต้น เช่นเดียวกับงานเสาทำให้เส้นการทำงานของงานคานขวางขนานกับเส้นการทำงานของงานเสาโดยมีระยะห่างระหว่างงานเท่ากับ 28 วัน เส้นการทำงานของคานขวางถูกแทนด้วยแถบ 

6. ระยะเวลาลอยตัว

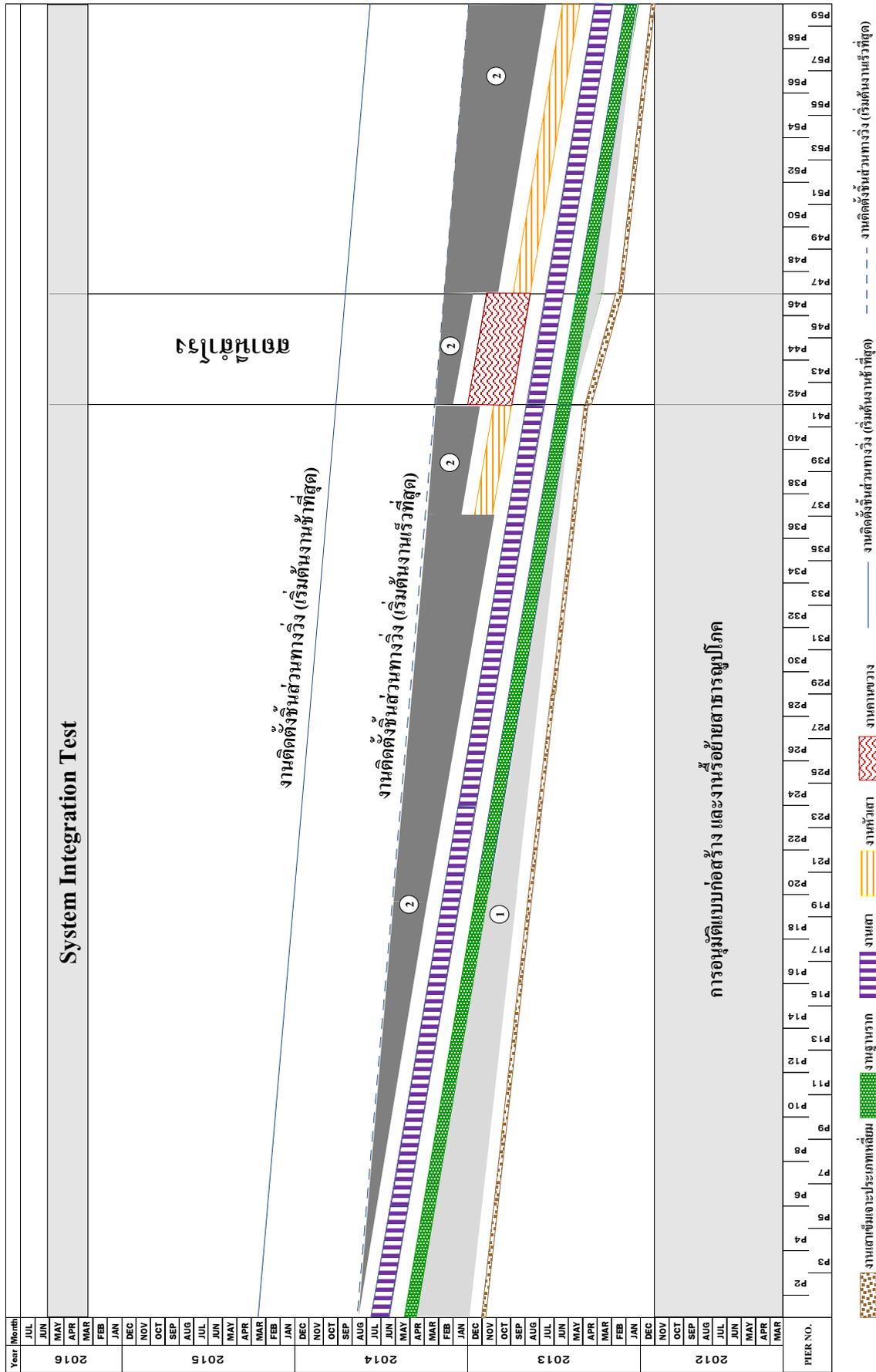
จากแผนงานที่ได้จะเห็นว่า งานสถานี และงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งถูกกำหนดให้เริ่มต้นช้าที่สุดในขณะที่งานโครงสร้าง substructure ถูกกำหนดให้เริ่มต้นเร็วที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากงาน สถานีและงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งมีระยะเวลาก่อสร้างที่แปรปรวนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับงานโครงสร้าง substructure แต่หากพิจารณาให้ตำแหน่งเส้นการทำงานของงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งถูกกำหนดจากเงื่อนไขความสัมพันธ์ทางเทคนิคกับงานโครงสร้าง substructure ที่ว่างานโครงสร้าง substructure ต้องแล้วเสร็จ 28 วันก่อนดำเนินการติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่ง จะทำให้ได้เส้นการทำงานของงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งอีกเส้นหนึ่งตามกำหนดเวลาเริ่มต้นเร็วที่สุดที่ทำให้งานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง โดยผลต่างระหว่างเส้นการทำงานของงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งทั้งสองนี้ คือระยะเวลาลอยตัวของงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งที่เกิดขึ้นในแต่ละโซนดังแสดงในรูปที่ 7

นอกจากนี้ระยะเวลาลอยตัวยังพบได้ในกลุ่มงานโครงสร้าง substructure โดยกิจกรรมที่มีระยะเวลาลอยตัวคือกิจกรรมที่มีอัตราการทำงาน (หรือความชันของเส้นการ

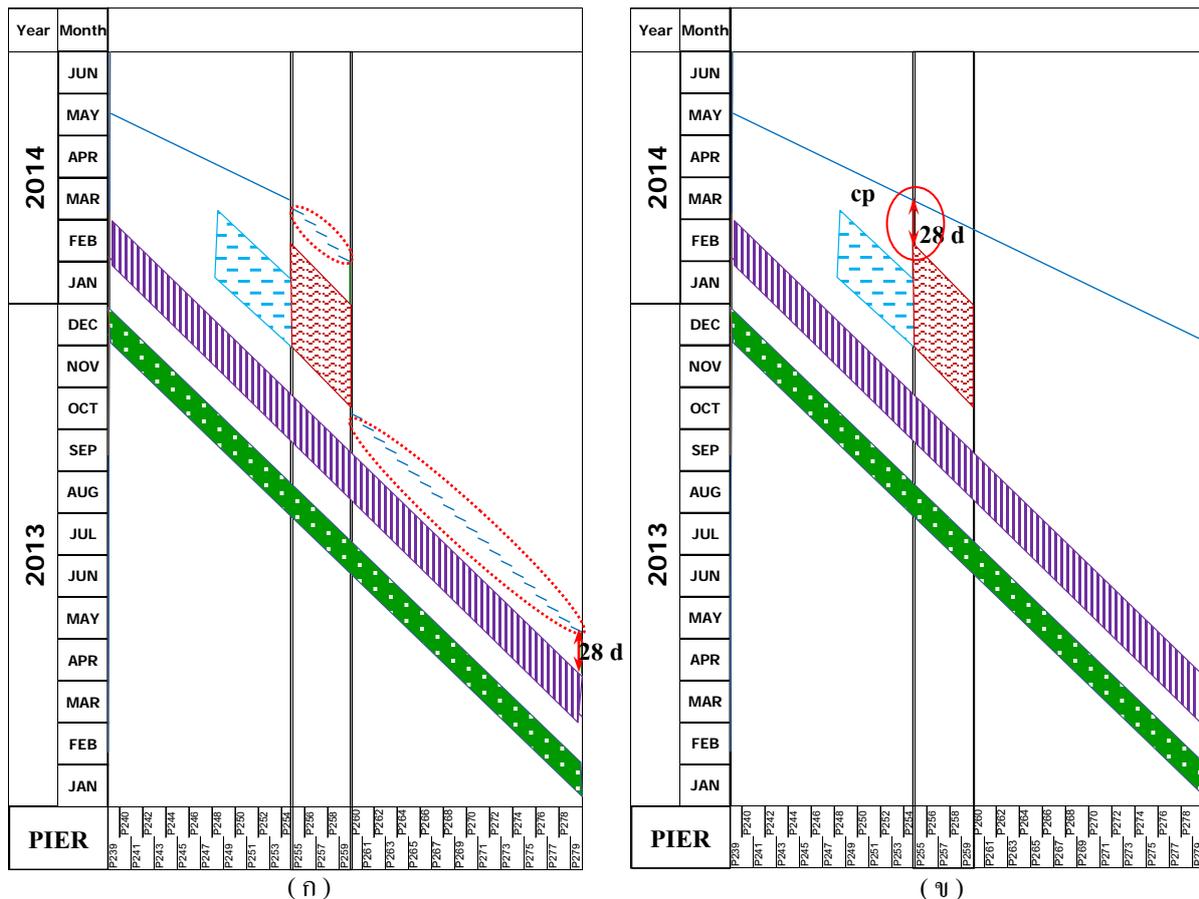
ทำงาน) แตกต่างจากกิจกรรมที่ตามมา รูปที่ 8 แสดงระยะเวลาลอยตัวของกลุ่มงานโครงสร้าง substructure ของ zone 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีระยะเวลาลอยตัวเกิดขึ้น 2 บริเวณคือ 1) ระหว่างกลุ่มงานเสาเข็มเจาะประเภทเหลี่ยมและงานฐานราก เนื่องจากงานเสาเข็มทางวิ่งมีอัตราการทำงาน 5 วัน/ต้น และงานเสาเข็มสถานีมีอัตราการทำงาน 16 วัน/ต้น ในขณะที่งานฐานรากมีอัตราการทำงานเท่ากับ 7 วัน/ต้น ด้วยอัตราการทำงานที่แตกต่างกันระยะเวลาลอยตัวของงานเสาเข็มเจาะประเภทเหลี่ยมของตำแหน่งเสาใดๆ คำนวณได้จากกำหนดเวลาเริ่มต้นของงานฐานรากของตำแหน่งเสานั้นๆ ลบด้วยกำหนดเวลาแล้วเสร็จของงานเสาเข็มหักระยะเวลาบ่มคอนกรีต 28 วัน หรือระยะตามแนวตั้งของพื้นที่แรง $\textcircled{1}$ 2) ระหว่างงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งและงานก่อนหน้า ได้แก่งานเสา ห้วเสา และ คานขวาง เนื่องจาก งานเสา ห้วเสา และคานขวาง มีการแบ่งงานออกเป็นงานย่อยๆ มีกำหนดเวลาทำงานของแต่ละงานเท่ากับ 7 วันทำให้ความชันของเส้นการทำงานมีค่าเท่ากับ 7 วัน/ต้น ในขณะที่งานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งมีอัตราการทำงานอยู่ที่ 4 วัน/ช่วงเสา ระยะเวลาลอยตัวของงานเสา ห้วเสา และคานขวาง ของตำแหน่งเสาใดๆ คำนวณได้ในลักษณะที่คล้ายกับงานเสาเข็มเจาะประเภทเหลี่ยม ซึ่งคือผลต่างของกำหนดเวลาเริ่มต้นของงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งของตำแหน่งเสานั้นๆ กับกำหนดเวลาแล้วเสร็จของงานเสา ห้วเสา และคานขวาง หักระยะเวลาบ่มคอนกรีต 28 วันหรือระยะตามแนวตั้งของพื้นที่แรง $\textcircled{2}$

7. ทางเลือกของการใช้ทรัพยากร

จากรูปที่ 7 หากพิจารณาดำเนินงานของเส้นการทำงานที่ช้าที่สุดของงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งในโซน 4 และตำแหน่งของเส้นการทำงานที่เร็วที่สุดของงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งในโซน 3 จะเห็นได้ว่าทั้งสองเส้นอยู่ในตำแหน่งที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งหมายความว่าผู้ก่อสร้างสามารถใช้ launching truss ชุดเดียวกันติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งในโซน 3 แล้วต่อเนื่องไปยังโซน 4 ได้ทำให้สามารถลดการใช้งาน launching truss ได้ 1 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายการใช้เครื่องจักรลงได้ โดยยังสามารถ



รูปที่ 8 ระยะเวลาโดยตัวของกลุ่มงานโครงสร้าง substructure ของ zone 1



งานฐานราก งานเสา งาน portal beam งานคานขวาง งานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่ง

รูปที่ 10 กำหนดเวลางานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่ง บริเวณ zone 5 (ก) วิธี Critical Path Method (ข) วิธี Repetitive Construction Approach

ดำเนินงานได้แล้วเสร็จตามสัญญา แต่ทั้งนี้จะทำให้งานโครงสร้าง substructure บริเวณโซน 3 งานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งบริเวณโซน 3 และโซน 4 รวมถึงงานสถานี E19 ไม่มีระยะเวลาเพื่อความล่าช้าซึ่งถือเป็นงานวิกฤติ เนื่องจากถ้าเกิดความล่าช้าในงานดังกล่าวจะทำให้การดำเนินงานไม่เสร็จตามกรอบเวลาของสัญญา เพื่อป้องกันความเสี่ยงดังกล่าว ผู้รับจ้างจึงยังคงเลือกใช้ launching truss บริเวณดังกล่าวโซนละ 1 ชุด

8. ผลกระทบของกำหนดเวลาที่วางแผนด้วยวิธี

สายงานวิกฤติ (CPM)

การวางแผนงานด้วยวิธีที่ต่างกัน ส่งผลทำให้กำหนดเวลาทำงานที่ได้แตกต่างกัน [1] ได้อธิบายความแตกต่างระหว่างการวางแผนแบบ CPM และ RSM ไว้

อย่างละเอียดโดยจะเห็นได้ว่า วิธี CPM พิจารณาแต่ละงานของแต่ละหน่วยก่อสร้างเป็นหนึ่งกิจกรรม ซึ่งกำหนดเวลาทำงานของแต่ละกิจกรรมถูกกำหนดจาก (1) ความสัมพันธ์ทางเทคนิคของขั้นตอนการก่อสร้างภายในหน่วยก่อสร้างเดียวกัน (2) ลำดับการทำงานของหน่วยก่อสร้างของกลุ่มคนงานเดียวกัน ในขณะที่วิธี RSM กำหนดให้เส้นการทำงาน 1 เส้นแทนการทำงานนั้นๆ ของทุกหน่วยก่อสร้าง จึงมั่นใจได้ว่าการทำงานของกลุ่มคนงานจะทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และตำแหน่งของเส้นการทำงานหรือกำหนดเวลาของการทำงานถูกกำหนดจากความสัมพันธ์ทางเทคนิคซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบความสัมพันธ์และอัตราการทำงานของกิจกรรมก่อนหน้าเพื่อให้เกิดความชัดเจนในกรณีนี้บทความนี้ขอยกตัวอย่างการวิเคราะห์กำหนดเวลาทำงานของงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งของโซน 5 ซึ่งหากวางแผน

ด้วยวิธี CPM การติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งในแต่ละช่วงเสา นับเป็น 1 กิจกรรม โดยที่อัตราการติดตั้งเท่ากับ 4 วัน/ช่วงเสา ในขณะที่อัตราการทำงานของกิจกรรมก่อนหน้า (งานเสา, งาน portal beam , งานคานขวาง) เท่ากับ 7 วัน/ต้น ดังนั้นกำหนดเวลาเริ่มต้นที่เร็วที่สุดของการติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งของเสา P279 คือ 28 วันหลังจากที่งานเสา P279 แล้วเสร็จและจะทำงาน 4 วันแล้วหยุด 3 วันในทุกช่วงเสา เนื่องจากมีอัตราการทำงานที่เร็วกว่างานเสา จากนั้นเมื่อเข้าสู่บริเวณสถานีจะต้องหยุดรอเพื่อให้งานคานขวางบริเวณสถานีแล้วเสร็จทำให้เกิดการขาดช่วงของการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 10 (ก) ในขณะที่การวางแผนด้วยวิธี Repetitive Construction Approach จะมีการกำหนดจุดควบคุม (control point, cp) บริเวณตำแหน่งเสา P255 ซึ่งเป็นเสาสุดท้ายของสถานีโดยมีระยะห่างระหว่างเส้นการทำงานของงานเสาเท่ากับ 28 วันเพื่อให้การติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งที่มีอัตราการทำงานที่เร็วกว่าสามารถดำเนินงานได้อย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 10 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าทั้งสองวิธีมีกำหนดเวลาแล้วเสร็จที่เท่ากัน วิธี Repetitive Construction Approach เป็นการชะลอการเริ่มต้นงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่งเพื่อป้องกันการขาดช่วงของการทำงาน

9. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงขั้นตอนในการวางแผนโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ายกระดับด้วยวิธีการวางแผนงานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกัน ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้าประกอบด้วย การก่อสร้างทางวิ่งยกระดับ และการก่อสร้างสถานี ซึ่งผู้รับจ้างแบ่งทีมงานเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ กลุ่มงานก่อสร้างสถานี กลุ่มงานติดตั้งชิ้นส่วนทางวิ่ง และ กลุ่มงานโครงสร้าง substructure จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า การวางแผนงานด้วยวิธีการวางแผนงานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกัน สามารถวิเคราะห์หา กำหนดเวลาทำงานของแต่ละส่วนงาน โดยที่กลุ่มการทำงานสามารถดำเนินงานได้อย่างต่อเนื่อง รองรับเงื่อนไขการทำงานทางเทคนิค และมีรูปแบบการนำเสนอที่ค่อนข้างกระชับ พร้อมกันนี้ยังสามารถระบุระยะเวลา

ลยตัวหรือระยะเวลาเพื่อเพื่อรองรับความเสี่ยงกับงานที่จะเกิดขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอทางเลือกของการใช้ทรัพยากรเพื่อปรับปรุงแผนงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นเพียงการวางแผนเพื่อกำหนดกรอบเวลาการทำงานเพื่อกำหนดจำนวนทรัพยากร/กลุ่มการทำงานเท่านั้น การวิเคราะห์หา กำหนดเวลาทำงานของกิจกรรมที่ละเอียดในระดับวันที่ตามปฏิทินยังมีความยุ่งยากและควรมีการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน

10. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) บริษัท ช.การช่างจำกัด (มหาชน) กลุ่มบริษัทที่ปรึกษา GBSC ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล ให้ความเห็น และสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ รวมถึงให้ข้อเสนอแนะและคำแนะนำตลอดการทำวิจัย

11. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. B. Harris and P. G. Ioannou, Repetitive Scheduling Method, Center for Construction Engineering and Management, The University of Michigan, UMCEE Report No.98-35, Nov., 1998.
- [2] D. Arditi, B. O. Tokdemir and K. Suh, "Challenges in Line-of-Balance Scheduling," Journal of Construction Engineering and Management, Vol.128, No.6, pp.545-556, 2002.
- [3] K. El-Rayes, and O. Moselhi, "Resource-driven scheduling of repetitive activities," Construction Manage and Economics, Vol.16, No.4, pp.433-446, 1998.
- [4] I-Tung Yang and P. G. Ioannou, "Resource-driven scheduling for repetitive project: a pull-system approach," The 9th International Group for Lean Construction Conference, National University of Singapore, 6-8 August 2001.

-
- [5] E. N. Chrzanowski and D. W. Johnson, "Application of Linear Scheduling," *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.112, No.4, pp.476-491, 1988.
- [6] D. J. Harmelink and J. E. Rowing, "Linear Scheduling Model: Development of Controlling Activity Path," *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.124, No.4, pp.263-268, 1998.
- [7] A. Yamin and D. Harmelink , "Comparison of Linear Scheduling Model (LSM) and Critical Path Method (CPM)," *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.127, No.5, pp.374-381, 2001.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความฉบับนี้

ทางกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง ขอขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการพิจารณาบทความด้วยความชอบคุณยิ่ง และหวังว่าคงได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดีในโอกาสต่อไป

ศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ

ผศ.ดร.เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์

รศ.ดร.วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร.วินัย รักสุนทร

รศ.ดร.ศรีจิตรา เจริญลาภนพรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.ดร.ศุภชัย สุรพันธ์

ดร.ธีระภัทร จริยะนวิรัช

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา

ผศ.ดร.จุฑา พิษิตลำเค็ญ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

และการบินอวกาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

ผศ.ดร.ต้นคิด จันทรัมย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

และการบินอวกาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

ดร.สิริวิษณุ สว่างนพ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

รศ.ดร.เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

รศ.ดร.สุพรชัย อุทัยนฤมล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

ผศ.ดร.วิศนุรักษ์ เวชสกล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ

“บทความทางวิชาการ” หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไป สำหรับประชาชน

“บทความวิจัย” หมายความว่า บทความที่มีลักษณะเป็นเอกสารที่มีรูปแบบของการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น มีการตั้งสมมติฐาน หรือมีการกำหนดปัญหาที่ชัดเจนสมเหตุสมผล โดยจะต้องระบุถึงวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนแน่นอน มีการค้นคว้าอย่างมีระบบ มีการรวบรวมข้อมูลพิจารณาวิเคราะห์ ตีความ และสรุปผลการวิจัยที่สามารถให้คำตอบบรรลุวัตถุประสงค์ หรือหลักการบางอย่างที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการ หรือการนำวิชาการนั้นมาประยุกต์ใช้

รูปแบบในการพิมพ์บทความ

บทความที่เสนอควรจัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word (หรือซอฟต์แวร์อื่น ที่ขนาดตัวอักษรกำหนดได้ใกล้เคียงกัน) ขนาดกระดาษที่จัดพิมพ์จะเป็นขนาด A4 โดยกำหนดขอบ (Margins) ในการตั้งหน้ากระดาษ (Page Setup) ดังนี้

- ระยะบน (Top Margin) 1” หรือ 2.54 ซม.
- ระยะล่าง (Bottom Margin) 1” หรือ 2.54 ซม.
- กั้นซ้าย (Left Margin) 1” หรือ 2.54 ซม.
- กั้นขวา (Right Margin) 1” หรือ 2.54 ซม.

การแบ่งส่วน (Section) ควรแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรก กำหนด (format) เป็นคอลัมน์เดียว ส่วนที่สอง กำหนดเป็น 2 คอลัมน์ โดยระยะห่างระหว่างคอลัมน์เป็น 0.26” หรือ 0.7 ซม. เนื้อเรื่อง ผู้เขียนและผู้ร่วมงาน สถานที่ทำงาน และบทคัดย่อจะอยู่ในส่วนแรก ส่วนอื่น ๆ ที่เหลือของบทความจะอยู่ในส่วนที่สอง

ขนาดตัวอักษร

รูปแบบของตัวอักษรให้ใช้ Angsana UPC สำหรับบทความที่มีภาษาไทยปนกับภาษาอังกฤษ และให้ใช้รูปแบบตัวอักษร Times New Roman สำหรับบทความซึ่งเป็นภาษาอังกฤษล้วน ขนาด (Pica Size) ของแบบตัวอักษรแบบ Angsana UPC กำหนดดังนี้ (หากเป็นรูปแบบ Times New Roman ให้ใช้ขนาดของตัวอักษรที่มีความสูงเท่ากัน)

- ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
ขนาด 26 ตัวหนา
- ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน
ขนาด 14 ตัวปกติ
- สถานที่ทำงาน
ขนาด 12 ตัวปกติ
- คำว่า “บทคัดย่อ”
ขนาด 16 ตัวหนา
- ส่วนของเนื้อความในบทคัดย่อ
และส่วนของเนื้อความทั้งหมด
ขนาด 14 ตัวปกติ
- คำว่า “Abstract”
ขนาด 16 ตัวหนา
- ส่วนของเนื้อความใน Abstract
ให้ใช้ Angsana UPC ขนาด 16 ตัวปกติ

- หัวข้อและหมายเลขประจำหัวข้อ
ขนาด 16 ตัวหนา
- หัวข้อย่อยและหมายเลขประจำหัวข้อย่อย
ขนาด 14 ตัวหนา
- คำว่า “กิตติกรรมประกาศ” หรือ
“Acknowledgement”
ขนาด 16 ตัวหนา
- คำว่า “เอกสารอ้างอิง” หรือ “Reference”
ขนาด 16 ตัวหนา

การพิมพ์บทความ

ให้ใช้ระยะห่างบรรทัดปกติ (Single space) เมื่อขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้น 1 บรรทัด ในกรณีเมื่อเอกสารจัดพิมพ์ด้วย Times New Roman ทั้งหมด ให้ใช้ระยะห่างบรรทัด เป็นหนึ่งบรรทัด (Single space) หรือ หนึ่งบรรทัดครึ่ง

ชื่อบทความ ชื่อผู้เขียน และสถานที่ทำงาน
ให้จัดพิมพ์ในตำแหน่งกลางหน้ากระดาษ

หัวข้อและหมายเลขหัวข้อ
ให้จัดพิมพ์แบบชิดซ้าย (Right Justified)

บทคัดย่อและเนื้อเรื่อง
ให้จัดพิมพ์แบบเต็มขอบ
(Left & Right Justified)

สมการ หรือ พจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน
ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor
(รวมอยู่ใน Microsoft Word แล้ว)
โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับสมการ
ซึ่งอยู่ในวงเล็บเล็ก

คำสำคัญ (Keywords)

ให้ใส่คำสำคัญ 3 – 5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับ
กับบทความที่นำเสนอโดยให้จัดพิมพ์
ใต้บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความมีความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์

ติดต่อขอส่งได้ที่ ส่วนวิศวกรรมลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์

E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com

บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซีดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด

ติดต่อสอบถามข้อมูลได้ที่

งานบริหารการวิจัย (วิศวกรรมลาดกระบัง)
ชั้น 2 อาคาร 6 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โทรศัพท์ / โทรสาร 02-329-8317

แบบฟอร์มการส่งบทความ

เลขที่อ้างอิง.....

วันที่ส่ง.....

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

.....

ชื่อบทความ(ภาษาอังกฤษ).....

.....

ประเภทบทความ



บทความวิชาการ



บทความวิจัย

Keywords (คำสำคัญ).....

.....

ชื่อ - นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย)

และ

(ภาษาอังกฤษ)

1..... 1.....

2..... 2.....

3..... 3.....

4..... 4.....

5..... 5.....

6..... 6.....

จำนวนหน้า.....หน้า

ชื่อและที่อยู่ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้

ชื่อ - นามสกุล.....

ที่อยู่.....

.....

เบอร์โทรศัพท์.....

E-mail.....

เอกสารประกอบการส่งบทความ

บทความต้นฉบับ 1 ชุด และ

สำเนา 3 ชุด (พร้อมลบชื่อผู้แต่งและที่อยู่)

แบบฟอร์มสั่งซื้อวิศวกรรมลาดกระบัง และ สมัครงาน

ชื่อ.....นามสกุล.....

สถานที่จัดส่งหนังสือ.....

จังหวัด.....รหัสไปรษณีย์.....โทรศัพท์.....

สมัครงานวิศวกรรมลาดกระบัง

- | | | | | | |
|--------------------------|---------|------------------|--------------------------|---------|------------------|
| <input type="checkbox"/> | ปี 2555 | ค่าสมัคร 200 บาท | <input type="checkbox"/> | ปี 2558 | ค่าสมัคร 200 บาท |
| <input type="checkbox"/> | ปี 2556 | ค่าสมัคร 200 บาท | <input type="checkbox"/> | ปี 2559 | ค่าสมัคร 200 บาท |
| <input type="checkbox"/> | ปี 2557 | ค่าสมัคร 200 บาท | <input type="checkbox"/> | ปี 2560 | ค่าสมัคร 200 บาท |

หมายเหตุ ปีละ 4 ฉบับ (รวมค่าจัดส่ง)

ต้องการซื้อวิศวกรรมลาดกระบัง

- | | | | | | |
|--------------------------|--|--------------|--------------------------|------------------|--------------|
| <input type="checkbox"/> | เล่มที่ 1 / 2558 | ราคา 100 บาท | <input type="checkbox"/> | เล่มที่ 1 / 2559 | ราคา 100 บาท |
| <input type="checkbox"/> | เล่มที่ 2 / 2558 | ราคา 100 บาท | <input type="checkbox"/> | เล่มที่ 2 / 2559 | ราคา 100 บาท |
| <input type="checkbox"/> | เล่มที่ 3 / 2558 | ราคา 100 บาท | <input type="checkbox"/> | เล่มที่ 3 / 2559 | ราคา 100 บาท |
| <input type="checkbox"/> | เล่มที่ 4 / 2558 | ราคา 100 บาท | <input type="checkbox"/> | เล่มที่ 4 / 2559 | ราคา 100 บาท |
| <input type="checkbox"/> | อื่น ๆ ปีที่.....ฉบับที่.....ประจำเดือน.....พ.ศ..... | | | | |

รวมรายการทั้งหมด.....รายการ เป็นเงิน.....บาท

ชำระค่าสั่งซื้อโดย

เงินสด แผนกตำรา วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ธนาคารตั้งจ่ายในนาม แผนกตำรา

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร 10520 **ที่ทำการเคาน์เตอร์บริการเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 00016**

ผ่านบัญชีออมทรัพย์ธนาคารไทยพาณิชย์ สาขาซอยเทคโนโลยีฯ เจ้าคุณทหาร

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร 10520

ชื่อบัญชี “แผนกตำราและประชาสัมพันธ์” เลขที่ 088 - 2 15272 - 2

ถ่ายสำเนาใบสั่งซื้อ และส่งเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่ :

งานบริหารการวิจัย (วิศวกรรมลาดกระบัง) ส่วนสนับสนุนวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 0-2329-8000 ต่อ 3464, 3465

(ท่านสามารถפקซ์ใบสั่งซื้อ และเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่เบอร์פקซ์ : 0-2329-8317

การจัดส่งหนังสือจะรวดเร็วขึ้น)

Ladkrabang Engineering Journal

The Ladkrabang Engineering Journal is a technical journal belonging to the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, (KMITL).

Contents:

The journal contains research reports, articles concerning development work and research activities carried out by the faculty staff. The objectives are to publicize and promote the research contributions and innovative works in the field of engineering.

Frequency:

The journal is published quarterly.

Policy:

Articles and reports should have engineering research values whether containing substantial supported theories, innovative works, substantial experiment results and/or fulfilled with useful and constructive discussions or reviews standardized to regional or international acceptance.

Manuscripts:

Four copies which are not exceed 8 pages with two-columns (one copy with author names, three copies without author names) of either Thai or English are to be submitted in camera ready form. The page charge from the 9th page is 500 Baht per page. To ensure that all papers are at the same standard, authors are asked to prepare their manuscripts in computerized format. Microsoft Word for windows[®] is recommended as a text processor. Others associated components such as graphs or figures should be prepared using windows-based packages.

Manuscripts are to be reviewed by at least 3 referees who are specialists in that fields. Comments and suggestions (if any) are summarized before they are passed to authors. Revised form of the manuscripts have to be resubmitted with a copy of the manuscript in a disk file.

For convenience in printing and to common standard in publication, submitted manuscripts should conform to the following orders.

Titles: Should be given in both Thai and English.

Author and co-authors: Are given without any title.

Correspondent address: Specify short address of authors. If authors are students, institution address (department, faculty and institution) is required.

Abstract: Should be given in both Thai and English.

Main theme: Should contain the following sections.

- 1.Introduction
- 2.Theory
- 3.Construction and experimental procedures
- 4.Experimental results and discussions
- 5.Conclusion or Summary

Acknowledgement: (if required)

References: Should follow the pattern given below.

- [1] P. Choeksuwan and S. Choomchuay, "The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic," Ladkrabang Engineering Journal, Vol.30, No.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltas, "Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol.39, No.4, pp.312-315, Sept., 1992.
- [3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

Submission:

1. Submit two pdf files Manuscript with and without authors / affiliation at the first page.
2. Submit the pdf file of the paper submission form.
At E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com

Published by

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Tel : (662) 329-8000 Ext 3464,3465

Fax : (662) 329-8317

Advisors

Dean of Engineering

Assoc.Prof. Dr.Komsan Maleesee

Editor-in-chief

Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

Editorial Staff

Mr.Komol Wadkhean

Cover Design and Photo Books

Mrs.Atisuda Chanvikorn

Liaise & Member Relationships

Create Original Artwork & Proofreading

Distributed by

Faculty of Engineering,

Mrs.Atisuda Chanvikorn

Tel : (662) 329-8317