

The Journal of
Industrial Technology

Suan Sunandha Rajabhat University

Volume 8 / Number 1 / January - June 2020

ISSN 2351-0811

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม มิถุนายน 2563)



**FACULTY OF
INDUSTRIAL TECHNOLOGY**

จัดพิมพ์โดย : คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

1 ถนนอุทองนอก เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300

โทร 0 2160 1438 ต่อ 22 เว็บไซต์ <http://www.fit.ssu.ac.th>

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

วัตถุประสงค์ของการจัดพิมพ์วารสาร

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยที่มีคุณภาพด้านเทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. เพื่อเป็นช่องทางในการนำเสนอและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นด้านเทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ชุตินาฏณ์ ศรีวิบูลย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลัง วงษ์ธนสุภรณ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรวิชัย บุญศรีเมือง

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพิฤกษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงวุฒิ เอกวุฒิจวงศา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาภา เนตรประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หาญสืบสาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร.วินัย ใจกล้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจนา จันทราสา

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นารีนารถ รักสุนทร

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ดร.ชนมภัทร โตระสะ

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

คณะกรรมการประเมินบทความ

รองศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ ปัทมวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.อุทัย ผ่องศรีศรี

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

รองศาสตราจารย์ศิวพันธุ์ ชูอินทร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โกวิท สุวรรณหงษ์

มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ สอนสุวิทย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ เพ็ชรประยูร

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทชัย ชุตินันท์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สชาติตรี รตนโนภาส สุวรรณลี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ ขาวเน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เผชิญ จันทรสา

ดร.อภิวัฒน์ สู่ยะโพธิ์

ดร.วรัญ วงศ์ประชุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

มหาวิทยาลัยรังสิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

สุวรรณภูมิ

ฝ่ายประสานงานและจัดการ

นางสาววรฤทัย หาญโชติพันธ์

กำหนดการเผยแพร่

ปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม – มิถุนายน) และ ฉบับที่ 2 (เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม)

เจ้าของวารสาร

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

สำนักงาน

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เลขที่ 1 ถนนอุทัยนอก เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

โทรศัพท์ 0 2160 1438 ต่อ 22 โทรสาร 0 2160 1440 www.fit.ssu.ac.th

พิมพ์ที่

ห้างหุ้นส่วนจำกัด ดี-วิทย์ (สำนักงานใหญ่) 589/1091 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงบางอ้อ เขตบางพลัด กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 081 810 1419

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่องค์ความรู้การวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งเป็นที่รวบรวมองค์ความรู้จากผู้เชี่ยวชาญในหลากหลายด้าน นักวิจัยและประชาชนทั่วไปสามารถนำความรู้จากวารสารนี้ไปต่อยอดในการสร้างนวัตกรรมใหม่และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้จริงในอนาคต

วารสารฉบับนี้เป็นฉบับที่ 1 ของปีที่ 8 (เดือนมกราคม- มิถุนายน 2563) บทความวิจัยในเล่มนี้มี 7 เรื่อง ประกอบด้วย การวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรในกระบวนการอัดเม็ดด้วยเทคนิค FMEA กรณีศึกษาโรงงานชีวมวลอัดเม็ด, การพัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการแก้ไขค่าอคติของฝนจากดาวเทียม, ผลของการลดความชื้นต่อความสลายเชิงความร้อนโดยใช้ปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศขนาดเล็ก, ระบบการตรวจวัด รายงานผล ทวนสอบ สำหรับระบบซื้อขายสิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในประเทศไทย: กรณีศึกษา อุตสาหกรรมแปรรูปพลาสติก, การลดการถ่ายเทความร้อนผ่านฝ้าเพดานด้วยระบบระบายอากาศเซลล์แสงอาทิตย์, กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ไฮดรอลิก, การพัฒนาระบบแจ้งเตือนสถานการณ์หลักในของผู้ขับรถยนต์บนท้องถนน ซึ่งเนื้อหาของบทความทั้งหมดนี้ได้เรียบเรียงจากผลการวิจัยที่เป็นนวัตกรรมใหม่ มีความร่วมสมัยและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เหมาะสำหรับการประกอบการศึกษาค้นคว้าของคณาจารย์ นักวิชาการและผู้ที่เกี่ยวข้องทั่วไป

สำหรับวารสารฉบับต่อไป คือ ฉบับที่ 2 ของปีที่ 8 (เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม 2563) โดยเปิดรับบทความวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ ด้านเทคโนโลยี และด้านวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งวารสารมีพื้นที่ให้ผู้สนใจนักวิจัย อาจารย์และนักศึกษาส่งผลงานมาพิจารณาเพื่อการตีพิมพ์ วารสารยินดีเป็นสื่อกลางสำหรับการเผยแพร่ผลงาน โดยบทความจะได้รับการประเมินคุณภาพจากกองบรรณาธิการและพิจารณาถ่วงดุล (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิตามสาขาที่เกี่ยวข้อง

ในนามของกองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่เกี่ยวข้อง และขอขอบคุณสมาชิกวารสารและผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมทำให้วารสารวิชาการฉบับที่ 1 ประจำปี 2563 สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรวิชัย บุญศรีเมือง
บรรณาธิการ

สารบัญ

หน้า

บทความวิจัย

การวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรในกระบวนการอัดเม็ดด้วยเทคนิค FMEA กรณีศึกษาโรงงานชีวมวลอัดเม็ด Machine Maintenance Planning for Pelletizing Processes using FMEA Technique, A Case Study of the Pellet Biomass Factory จารุวรรณ พรหมเงิน	1-12
การพัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการแก้ไขค่าอคติ ของฝนจากดาวเทียม Development of GIS Application for Satellite Rainfall Bias Correction ปรีชาติ เวชยนต์, ศราวุฒิ ไวยสุศรี, กัญญมณี สุ่มประดิษฐ์, เพียงหนึ่ง นงค์นาง	13-21
ผลของการลดความชื้นต่อความสบายเชิงความร้อนโดยใช้ปล่องหน้าต่างรังสี อาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศขนาดเล็ก Effect of moisture reduction on thermal comfort by solar chimney window with small ventilation fans วิทยา พวงสมบัติ, ดิษฐา นนธิวรรณ, ทอรั้ง โลหะภัณฑ์สมบูรณ์	22-30
ระบบการตรวจวัด รายงานผล ทวนสอบ สำหรับระบบซื้อขายสิทธิการปล่อย ก๊าซเรือนกระจกในประเทศไทย: กรณีศึกษา อุตสาหกรรมแปรรูปพลาสติก Measurable Reportable and Verifiable (MRV) system for an Emission Trading Scheme in Thailand: A Case Study of Plastic Converter Industry ภาณุวัฒน์ อุส่าห์เพียร	31-38
การลดการถ่ายเทความร้อนผ่านฝ้าเพดานด้วยระบบระบายอากาศเซลล์ แสงอาทิตย์ Heat gain reduction through ceiling by PV ventilation system จิระศักดิ์ พุกดำ, สมชาย ทิพย์ชัย, ดิณณภาพ แพงผม	39-47

สารบัญ

หน้า

บทความวิจัย

กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพ ด้วยซีเมนต์ไฮดรอลิก Unconfined Compressive Strength of Hydraulic Cement-Stabilized Soft Clay อิทธิพล มีผล, วนากานต์ มาศโอสถ, ปฐม คงคะดี	48-55
การพัฒนาระบบแจ้งเตือนสถานะการหลับในของผู้ขับรถบนท้องถนน A Development of Real-Time Driver Drowsiness Detection System ธีรวัช พิเชฐจุโรจน์, ศุภิสรา พิมพ์ตะการ, ธนัยรัตน์ มาต๊ะ	56-65

การวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรในกระบวนการอัดเม็ดด้วยเทคนิค FMEA

กรณีศึกษาโรงงานชีวมวลอัดเม็ด

จารุวรรณ พรหมเงิน^{1*}, อธิภัทร จงรักษ์¹

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

Email: jaruwan.p@pkru.ac.th^{1*}

Received: May 1, 2020

Revised: June 16, 2020

Accepted: June 19, 2020

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยเสี่ยงของเครื่องจักรโดยประยุกต์ใช้เทคนิค FMEA และเสนอแนวทางในการบำรุงรักษาชิ้นส่วนของเครื่องจักร โดยวิเคราะห์ปัญหา อาการขัดข้องและผลกระทบ ประเมินและจัดทำแผนตามแนวทางการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเครื่องจักร ผลการศึกษาพบว่า ค่า RPN ของลูกปืนเครื่องอัดเม็ดและใบมีดเครื่องสับ มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 36 จัดอยู่ในระดับความเสี่ยงสูง แสดงให้เห็นว่าเมื่อชิ้นส่วนเครื่องจักรที่เกิดการขัดข้องทำให้กระบวนการผลิตหยุดชะงักและสูญเสียเวลาซ่อมเครื่องจักรเป็นเวลานาน บางครั้งช่างซ่อมบำรุงไม่สามารถซ่อมเองได้ และกระทบต่อการส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้า ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์รากของปัญหาโดยใช้แผนผังสาเหตุและผล เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของเครื่องจักรที่เกิดการขัดข้อง พบว่าขาดการวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรและพนักงานขาดความสม่ำเสมอในการตรวจเช็คเครื่องจักรก่อนการผลิต และใช้ค่าระดับความเสี่ยงของชิ้นส่วนเครื่องจักร คู่มือของเครื่องจักรออกแบบใบตรวจสอบเพื่อใช้วางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของเครื่องจักรก่อนเกิดการขัดข้องและให้แผนวิศวกรรมทำการตรวจสอบเครื่องจักรเป็นรายวัน รายสัปดาห์และรายเดือน ตามลำดับความเสี่ยง พบว่า ระยะเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) ของเครื่องอัดเม็ด เครื่องสับ เครื่องบดหยาบ และเครื่องบดละเอียด ลดลงร้อยละ 2.74, 2.92, 3.07 และ 5.96 ตามลำดับ ระยะเวลาเฉลี่ยก่อนเกิดเหตุขัดข้อง (MTBF) เพิ่มขึ้นร้อยละ 30.00, 15.97, 18.92 และ 18.75 ตามลำดับ และความพร้อมในการใช้งานของเครื่องจักร (AF) เพิ่มขึ้นร้อยละ 9.25, 14.55, 28.93 และ 25.72 ตามลำดับ

คำสำคัญ : เทคนิค FMEA, การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน, แผนผังสาเหตุและผล

Machine Maintenance Planning for Pelletizing Processes using FMEA Technique, A Case Study of the Pellet Biomass Factory

Jaruwan Promngurn^{1*}, Teerapat Jongrak¹

¹Industrial Technology, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University

Email: Jaruwan.p@pkru.ac.th^{1*}

Received: May 1, 2020

Revised: June 16, 2020

Accepted: June 19, 2020

Abstract

The objective of this research is to study the risk factors of machines by applying the FMEA technique and propose guidelines for maintenance of machine parts, beginning with the analysis of problems, faults and effects. After that evaluate and make plans according to the guidelines for preventive maintenance of machines. The results show that the RPN value of the pellet bearing and shredding machine blade has the highest value of 36, which is considered as a high-risk level, it shows that when the machine parts fail, causing the production process to stop and waste of time, which has been repaired for a long time. Sometimes, the repair technician is unable to repair by themselves and affects the delivery of the product to the customer. The researcher analyzed the root cause of the problem by using the cause and effect diagram to analyze the cause of the machine causing the failure. It was found that the lack of maintenance plan for the machine and the staff lack the consistency in checking the machine before production. Next, use the risk level of the machine parts and the manual of the machine inspection sheet to plan the preventive maintenance of the machine before the failure. And assign the engineering department to inspect the machines on a daily, weekly, and monthly, respectively on risk level. It was found mean time to repair (MTTR) of pellet machines, crushers, coarse crushers and grinding machines decreased by 2.74, 2.92, 3.07 and 5.96 percent, respectively, mean time before failure (MTBF) increased by 30.00, 15.97, 18.92 and 18.75 percent, respectively and availability factor (AF) increased by 9.25, 14.55, 28.93 and 25.72 percent respectively.

Keywords : FMEA technique, Preventive maintenance, Cause and effect diagram

บทนำ

ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นพื้นที่ที่ปลูกยางพารา มากที่สุด โดยพระยารัษฎานุประดิษฐ์นำเข้ามาปลูก เป็นครั้งแรกในประเทศไทย ที่อำเภอกันตัง จังหวัดตรัง ในปี พ.ศ. 2442 และมีการขยายพื้นที่เพาะปลูกจน ยางพารา กลายมาเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของ ประเทศไทย จากเหตุผลดังกล่าวอุตสาหกรรมที่ เกี่ยวข้องกับยางพาราจึงเติบโตขึ้นอย่างหลากหลาย อาทิเช่น โรงงานน้ำยางข้น โรงงานแปรรูปยางแท่งและ ยางแผ่น โรงงานถลุงมียาง รวมไปถึงโรงงานแปรรูป ไม้ยางพารา ทำให้สร้างรายได้ให้แก่ประชากรใน ท้องถิ่น

ชีวมวลอัดเม็ดเป็นอีกหนึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก การแปรรูปไม้ยางพารา โดยการนำส่วนที่เหลือจาก โรงเลื่อยไม้ ได้แก่ เศษไม้ ปีกไม้ และปลายไม้ เข้าสู่ กระบวนการบดย่อยลดขนาดให้เล็กลง จากนั้นเข้า กระบวนการลดความชื้นเพื่อให้วัตถุดิบมีความชื้นที่ เหมาะสมกับกระบวนการอัด แล้วจึงนำมาเข้าเครื่อง อัดขึ้นรูปวัตถุดิบให้เป็นเม็ด โดยใช้แรงดันสูงเพื่อให้ สารลิกนินในเนื้อไม้ละลายออกมา ส่งผลให้ไม้เกาะ ติดกันแล้วระบายความร้อนให้เย็นลงเพื่อคงรูปของ เชื้อเพลิง แต่ในขณะเดียวกันการควบคุมความชื้น ของไม้ที่เข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถ ควบคุมได้ทำให้เครื่องจักรเกิดการขัดข้องกะทันหัน (Break Down) ส่งผลให้ผลผลิตที่ได้ไม่เป็นไปตาม แผนที่วางไว้ และสินค้าที่ผลิตออกมาก็จะไม่ได้ คุณภาพตามที่ลูกค้าต้องการ [1] จากการเก็บข้อมูล เบื้องต้นพบว่าเครื่องจักรขาดการบำรุงรักษาอย่าง เป็นระบบ ผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญกับกระบวนการ อัดเม็ด เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นกระบวนการหลัก ของโรงงาน ผู้วิจัยจึงศึกษาปัจจัยเสี่ยงของเครื่องจักร ในกระบวนการอัดเม็ดที่ส่งผลต่อการผลิต โดยใช้ ประยุกต์ใช้เทคนิค FMEA และใช้แผนผังสาเหตุและ ผลในการวิเคราะห์รากของปัญหา เสนอแนวทาง บำรุงรักษาชิ้นส่วนของเครื่องจักร โดยใช้ระยะเวลา เฉลี่ยในการซ่อม (Mean Time To Repair, MTTR)

ระยะเวลาเฉลี่ยก่อนเกิดเหตุขัดข้อง (Mean Time Between Failures, MTBF) และเปอร์เซ็นต์ความพร้อม ในการใช้งานของเครื่องจักร (Availability Factor, AF) [2] เป็นตัวชี้วัดในการปรับปรุงการวางแผนการ บำรุงรักษาเชิงป้องกัน [3]

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยเสี่ยงของเครื่องจักรใน กระบวนการอัดเม็ด โดยประยุกต์ใช้เทคนิค FMEA และเสนอแนวทางการบำรุงรักษาของเครื่องจักร
2. เพื่อประเมินแนวทางการบำรุงรักษาโดยใช้ หลักการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและจัดทำแผนการ บำรุงรักษาเชิงป้องกัน

ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาปัจจัยเสี่ยงของ เครื่องจักรในกระบวนการอัดเม็ด โดยประยุกต์ใช้ เทคนิค FMEA และเสนอแนวทางการบำรุงรักษา ของเครื่องจักร โดยมีลำดับขั้นตอน ดังนี้

- 1) ศึกษาสภาพการทำงานของโรงงานและ วิเคราะห์ปัญหาและความถี่ในกระบวนการอัดเม็ด
- 2) คัดเลือกและวิเคราะห์เครื่องจักรตามความ วิกฤตและวิเคราะห์หน้าที่เพื่อวิเคราะห์ปัญหาของ เครื่องอัดเม็ด
- 3) วิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบเพื่อ วิเคราะห์อาการหลักและผลกระทบของอาการของ ชิ้นส่วนของเครื่องจักร
- 4) ประเมินแนวทางการบำรุงรักษาโดยใช้หลัก การงานหลักการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและจัดทำ แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน
- 5) การเปรียบเทียบผลการดำเนินการปรับปรุง แผนการบำรุงรักษา

ผลการวิจัย

จากการศึกษาตามลำดับขั้นตอนการวิจัย มีผล การศึกษาตามขั้นตอน ดังนี้

ผลการศึกษาสภาพการทำงานของโรงงาน และวิเคราะห์ปัญหาในกระบวนการอัดเม็ด

กระบวนการผลิตชีวมวลอัดเม็ดประกอบด้วย 6 ขั้นตอน เริ่มต้นจากการนำขี้เลื่อยที่เหลือจากการเลื่อยเพื่อเข้าสู่กระบวนการอัดเม็ด จนกระทั่งถึงกระบวนการบรรจุ มีขั้นตอนและลำดับการทำงานแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กระบวนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด

ขั้นตอน	กระบวนการทำงาน	
1	การนำขี้เลื่อยจากกระบวนการเลื่อยมาเก็บในบริเวณลานเก็บวัตถุดิบ	
2	การจัดส่งขี้เลื่อยจากที่เก็บของโรงงานมาที่กระบวนการแยกวัตถุดิบและกระบวนการอัดเม็ด	
3	กระบวนการลำเลียงวัตถุดิบเพื่อส่งเข้าเครื่องอัดเม็ด	
4	กระบวนการอัดเม็ด	
5	การส่งวัตถุดิบเข้าไปในที่เก็บและเตรียมกระบวนการบรรจุ	
6	กระบวนการบรรจุวัตถุดิบเพื่อเตรียมการส่งออก	

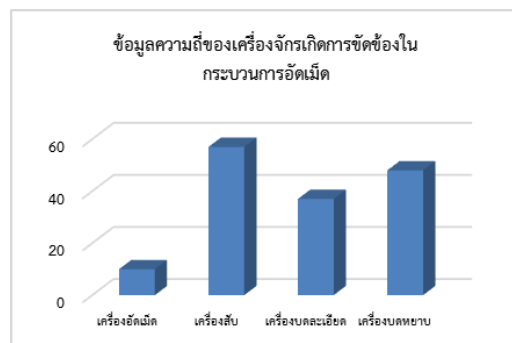
จากนั้นผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเวลาที่เครื่องจักรขัดข้องที่ต้องทำการซ่อมอย่างเร่งด่วน คือ เวลาที่สูญเสียของเครื่องจักร หรือเวลาที่ใช้ในการ

ซ่อมบำรุงเครื่องจักรในกระบวนการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงเครื่องจักร

รายการเครื่องจักร	เวลา (นาที)
1. เครื่องอัดเม็ด	705
2. เครื่องสับ	6,055
3. เครื่องบดละเอียด	4,110
4. เครื่องบดหยาบ	3,730

จากตารางที่ 2 พบว่า เครื่องสับใช้เวลาในการซ่อมบำรุงมากที่สุด รองลงมาคือ เครื่องบดละเอียด เครื่องบดหยาบ และเครื่องอัด ตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงเท่ากับ 14,600 นาที และเมื่อพิจารณาความถี่ของเครื่องจักรเกิดการขัดข้องในกระบวนการอัดเม็ดดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความถี่ของเครื่องจักรเกิดการขัดข้อง

จากข้อมูลความถี่ของเครื่องจักรเกิดการขัดข้องในกระบวนการอัดเม็ด พบว่า ปัญหาที่มีความถี่มากที่สุดเกิดจากเครื่องสับ เครื่องบดหยาบ เครื่องบดละเอียด และเครื่องอัดเม็ด ตามลำดับ รวม 152 ครั้ง ในระยะเวลา 8 เดือน ซึ่งการขัดข้องของเครื่องจักรมีความถี่ค่อนข้างสูง ผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญกับเครื่องจักรดังกล่าวที่มีผลต่อกระบวนการผลิต และนำขึ้นส่วนของเครื่องจักรที่มีการขัดข้องไปวิเคราะห์ต่อไป

คัดเลือกและวิเคราะห์เครื่องจักรตามความวิกฤตและวิเคราะห์หน้าที่เพื่อวิเคราะห์ปัญหาของเครื่องจักรในกระบวนการอัดเม็ด

ผู้วิจัยใช้การจัดลำดับความสำคัญในการของคัดเลือกชิ้นส่วนเครื่องจักร โดยวิธีการค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average) จากเกณฑ์ทั้ง 4 ด้าน [4] โดยค่า X_n คือ คะแนนของเกณฑ์ด้านที่ n ในการประเมินชิ้นส่วนเครื่องจักร ซึ่งทีมงานแผนกวิศวกรรมบำรุงรักษาของโรงงานผลิตชีวมวลอัดเม็ดเป็นผู้กำหนดค่าคะแนนและให้ค่า W_n ดังนี้

1) ความมากน้อยในการใช้งานชิ้นส่วนเครื่องจักร ให้แทน W_1 แทนค่าถ่วงน้ำหนัก เท่ากับ 20 เปอร์เซนต์ หรือเท่ากับ 2

2) ราคาชิ้นส่วนเครื่องจักร ให้แทน W_2 แทนค่าถ่วงน้ำหนัก เท่ากับ 25 เปอร์เซนต์หรือเท่ากับ 2.5

3) ระยะเวลา ที่ใช้ในการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนทดแทนชิ้นส่วนเครื่องจักร ให้แทน W_3 แทนค่าถ่วงน้ำหนัก เท่ากับ 25 เปอร์เซนต์หรือเท่ากับ 2.5

4) ผลกระทบต่อชิ้นส่วนเครื่องจักรอื่น เมื่อชิ้นส่วนที่พิจารณาเกิดความเสียหาย ให้แทน W_4 แทนค่าถ่วงน้ำหนัก เท่ากับ 30 เปอร์เซนต์ หรือเท่ากับ 3

จากนั้นทำการพิจารณาค่าเฉลี่ยความสำคัญของชิ้นส่วนเครื่องจักร (Critical Component: CC) ดังสมการที่ 1

$$CC = \frac{\sum_{n=1}^4 W_n X_n}{\sum_{n=1}^4 W_n} \quad (1)$$

โดยที่ W_n คือ ผลคูณเชิงน้ำหนักของปัจจัย

X_n คือ คะแนนของปัจจัยที่ n

เมื่อกำหนดค่าเฉลี่ยความสำคัญของชิ้นส่วนเครื่องจักรแล้วนำค่าดังกล่าวมาพิจารณาเพื่อหากลุ่ม

ลำดับความสำคัญของชิ้นส่วนเครื่องจักร ดังเกณฑ์แสดงในตารางที่ 3 [4]

ตารางที่ 3 เกณฑ์ลำดับความสำคัญของเครื่องจักร

ลำดับความสำคัญ	ลักษณะการบำรุงรักษา	ค่าเฉลี่ยความสำคัญ
A	สำคัญมาก ได้รับความเอาใจใส่ในการบำรุงรักษาเป็นอย่างดี	≥ 2.75
B	สำคัญปานกลาง ได้รับความเอาใจใส่ในการบำรุงรักษาพอสมควร	2.01-2.74
C	สำคัญน้อย ได้รับความเอาใจใส่ในการบำรุงรักษาไม่มาก	≤ 2.00

เมื่อกำหนดเกณฑ์ลำดับความสำคัญของเครื่องจักรแล้ว ผู้วิจัยและทีมฝ่ายวิศวกรรมของโรงงานที่เกี่ยวข้องในการควบคุมเครื่องจักรของกระบวนการอัดเม็ด ได้ร่วมกันคัดเลือกชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการอัดเม็ด ถ้าเครื่องจักรเครื่องใดเครื่องหนึ่งเกิดการขัดข้องกระบวนการผลิตไม่สามารถดำเนินการผลิตต่อไปได้ ซึ่งเครื่องจักรในกระบวนการอัดเม็ด แบ่งออกเป็น 4 รายการ ได้แก่ เครื่องอัดเม็ด เครื่องสับ เครื่องบดหยาบและเครื่องบดละเอียด และคัดเลือกชิ้นส่วนที่มีความสำคัญกับเครื่องจักรแต่ละรายการ จำนวน 18 ชิ้นส่วน โดยเครื่องอัดเม็ดมีจำนวนชิ้นส่วนที่สำคัญจำนวน 6 ชิ้นส่วน เครื่องสับ เครื่องบดละเอียด และเครื่องบดหยาบ มีจำนวนชิ้นส่วนที่สำคัญ จำนวน 4 ชิ้นส่วน สามารถแสดงค่าเฉลี่ยความสำคัญของชิ้นส่วน ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยชิ้นส่วนเครื่องจักรที่สำคัญ

รายการเครื่องจักร	ค่าเฉลี่ย	ลำดับ ความสำคัญ
เครื่องอัดเม็ด		
สายพาน	2.05	B
ริงตาย	1.8	C
หน้าแปลน	1.55	C
ลูกปืน	2.85	A
น็อตยึดหน้าแปลน	2.3	B
มอเตอร์เครื่องอัดเม็ด	1.3	C
เครื่องสับ		
สายพาน	1.75	C
ใบมีด	2.35	B
หมามเตย	1.55	C
มอเตอร์เครื่องสับ	1.3	C
เครื่องบดละเอียด		
ใบค้อนบดละเอียด	1.5	C
แกนใบค้อนบดละเอียด	2.05	B
ตะแกรง 6 มม.	2.25	B
มอเตอร์เครื่องบดละเอียด	1.25	C
เครื่องบดหยาบ		
ใบค้อนบดหยาบ	1.5	C
แกนใบค้อนบดหยาบ	2.05	B
ตะแกรง 22 มม.	2.35	B
มอเตอร์เครื่องบดละเอียด	1.3	C

หลังจากทำการจัดลำดับความสำคัญของชิ้นส่วนเครื่องจักรสามารถสรุปลำดับความสำคัญของชิ้นส่วนเครื่องจักรย่อย เป็นกลุ่ม A, B และ C จำนวน 1, 7 และ 10 รายการตามลำดับ ผู้วิจัยและทีมงานโรงงานกรณีศึกษาได้ทำการเลือกชิ้นส่วนเครื่องจักรที่มีความสำคัญมากในลำดับความสำคัญ A และ B จำนวน 8 รายการ มาวิเคราะห์คุณลักษณะความผิดพลาด และผลกระทบต่อการผลิตเมื่อเครื่องจักรเกิดความเสียหาย

การวิเคราะห์หาการขัดข้องและผลกระทบเพื่อวิเคราะห์หาการหลักและผลกระทบของอากาศของชิ้นส่วนของเครื่องจักร

การวิเคราะห์คุณลักษณะความเสียหายของเครื่องจักรในกระบวนการอัดเม็ดที่คัดเลือกจากลำดับความสำคัญ 8 รายการ โดยใช้เครื่องมือ FMEA และพิจารณาค่า RPN หรือค่าดัชนีความเสี่ยงขึ้นเป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกโดยประเมินค่าความรุนแรง (Severity, SEV) โอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง (Occurrence, OCC) และสามารถในการตรวจพบข้อบกพร่อง (Detection, DET) คำนวณได้จากสมการที่ 2

$$RPN = SEV \times OCC \times DET \quad (2)$$

ซึ่งเกณฑ์การประเมินอ้างอิงจาก [5] ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เกณฑ์คะแนนที่ใช้กำหนดค่า SEV, OCC และ DET

ลำดับ คะแนน	เกณฑ์การตัดสินใจ		
	SEV	OCC	DET
5	จัดให้เป็นระดับสูงมาก เนื่องจากส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตความปลอดภัย ความเสียหายของเครื่องจักร	มีความสูญเสียเกิดขึ้นบ่อยได้ที่สุด (มีค่าอยู่ในช่วง 81-100 ของจำนวนครั้งของปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมดในคาบเวลา)	ไม่มีการ แก้ไข และ ควบคุมกระบวนการในการตรวจจับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น
4	จัดให้เป็นระดับสูงเนื่องจากส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต ทำให้การปฏิบัติงานในบางขั้นตอนต้องหยุดชะงัก	มีความสูญเสียเกิดขึ้นได้บ่อย (มีค่าอยู่ในช่วง 61-80 ของจำนวนครั้งของปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมดในคาบเวลา)	ทราบวิธีการแก้ไขแต่ไม่มีการควบคุมกระบวนการในการตรวจจับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น
3	จัดให้เป็นระดับปานกลางเนื่องจากส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตบางส่วน ทำให้การปฏิบัติงานขัดข้อง	มีความสูญเสียเกิดขึ้นค่อนข้างบ่อย (มีค่าอยู่ในช่วง 41-60 ของจำนวนครั้งของปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมดในคาบเวลา)	มีการแก้ไขและควบคุมกระบวนการในระดับปานกลางในการตรวจจับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น
2	จัดให้เป็นระดับต่ำ เนื่องจากส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต แต่ไม่ทำให้การปฏิบัติงานขัดข้อง	มีความสูญเสียเกิดขึ้นนาน ๆ ครั้ง (มีค่าอยู่ในช่วง 21-40 ของจำนวนครั้งของปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมดในคาบเวลา)	มีการแก้ไขและควบคุมกระบวนการได้ การตรวจจับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น เป็นไปได้โดยอัตโนมัติ
1	ไม่มีเหตุผลที่คาดว่าจะส่วนเล็กน้อยในธรรมชาติของข้อบกพร่องนั้น จะเป็นสาเหตุให้เกิดผลกระทบอย่างจริงจังต่อกระบวนการผลิต	มีความสูญเสียเกิดขึ้นน้อยมากหรือไม่เคยเกิดขึ้น (มีค่าอยู่ในช่วง 20 ของจำนวนครั้งของปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมดในคาบเวลา)	มีการแก้ไขและควบคุมกระบวนการได้ การตรวจจับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น เป็นไปได้อย่างแน่นอนโดยอัตโนมัติ

จากตารางที่ 4 เมื่อมีการกำหนดเกณฑ์ประเมินระดับความเสี่ยงที่เกิดขึ้นแล้ว จากนั้นผู้วิจัยวิเคราะห์คุณลักษณะความเสียหาย และผลกระทบของชิ้นส่วนเครื่องจักรในกระบวนการเครื่องอัดเม็ด เพื่อหาค่าคะแนน RPN ของแต่ละปัญหาให้สอดคล้องกับผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด [3] โดยระดมความคิดจากทีมฝ่ายวิศวกรรมของโรงงาน ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณลักษณะความเสียหายและผลกระทบของชิ้นส่วนเครื่องจักรในกระบวนการเครื่องอัดเม็ด

ชิ้นส่วนเครื่องจักร	คุณลักษณะของความเสียหาย	ผลกระทบจากความเสียหาย	SEV	สาเหตุคุณลักษณะความเสียหาย	OCC	วิธีการควบคุมในปัจจุบัน	DET	RPN
	สายพานเสื่อมสภาพจากความร้อน	ไม่สามารถเดินเครื่องผลิตต่อได้	3	เกิดจากการเสียดสีระหว่างมู่เล่กับสายพาน	2	ตรวจสอบความตึงของสายพาน (ต้องไม่ตึงและหย่อนเกินไป) เพื่อลดการเสียดสีสายพาน	3	18
	ลูกปืนแตก	ไม่สามารถเดินเครื่องผลิตต่อได้	4	เกิดจากจาระบีไม่เข้าลูกปืน	3	เช็คจาระบีกับลูกปืนก่อนเดินเครื่อง	3	36
	เกลียวหว่าน	ไม่สามารถเดินเครื่องผลิตต่อได้	2	เกิดจากขันน็อตแน่นจนเกินไป	2	ขันน็อตจนพอประมาณไม่ให้แน่นจนเกินไป	3	12
	ใบมีดบิ่น	ประสิทธิภาพการสับไม้ลดลง(ทำให้ชิ้นงานใหญ่ขึ้น)	4	เหล็กเข้าใบมีด น็อตยึดหน้าแปลนทำให้ใบมีดบิ่น	3	ติดตั้งเซ็นเซอร์จับโลหะ	3	36
	แกนใบค้อนสึกหรอ	ไม่สามารถเดินเครื่องผลิตต่อได้	3	การเสียดสีของใบค้อนขณะเดินเครื่อง	2	ไม่มีวิธีการควบคุม	5	30
	ตะแกรงชำรุด	ไม่สามารถเดินเครื่องผลิตต่อได้	2	เกิดจากใบค้อนชนตะแกรงตอนเดินเครื่อง	1	ตรวจสอบเช็คใบค้อนให้มีระยะห่างจากตะแกรง 5 มม.	3	6

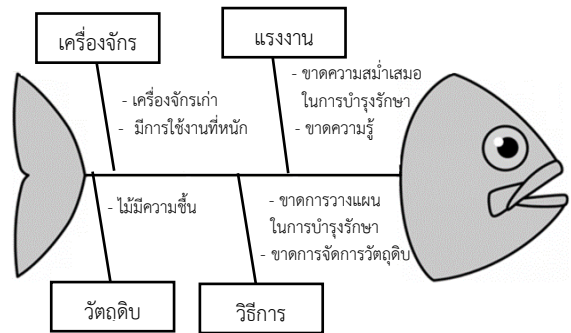
ตารางที่ 5 (ต่อ)

ชิ้นส่วนเครื่องจักร	คุณลักษณะ ของความ เสียหาย	ผลกระทบจาก ความเสียหาย	SEV	สาเหตุ คุณลักษณะ ความเสียหาย	OCC	วิธีการควบคุม ในปัจจุบัน	DET	RPN
แกนใบค้อนบดหยาบ 	แกนใบค้อน สึกหรอ	ไม่สามารถ เดินเครื่อง ผลิตต่อได้	3	การเสียดสีของ ใบค้อนขณะ เดินเครื่อง	2	ไม่มีวิธีการควบคุม	5	30
ตะแกรง 22 มม. 	ตะแกรงชำรุด	ไม่สามารถ เดินเครื่อง ผลิตต่อได้	2	เกิดจากใบค้อน ชนตะแกรงขณะ เดินเครื่อง	1	ตรวจเช็คใบค้อน ให้มีระยะห่าง จากตะแกรง 5 มม.	3	6

จากตารางที่ 5 แสดงค่า RPN ของชิ้นส่วนเครื่องจักร ในกระบวนการอัดเม็ดมีค่ามากที่สุด คือ ลูกป็น เครื่องอัดเม็ด และใบมีดเครื่องสับ มีค่า RPN เท่ากับ 36 เนื่องจากค่า RPN เป็นตัวชี้วัดความเสี่ยงของ สภาวะที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องจักร [6] ผู้วิจัย จึงทำการวิเคราะห์สาเหตุของความเสียหาย เพื่อ วางแผนในการแก้ไขปัญหาและการวางแผนในการ บำรุงรักษาต่อไป

ประเมินแนวทางการบำรุงรักษาโดยใช้ หลักการงานหลักการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและ จัดทำแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์รากของปัญหาโดยใช้ แผนผังสาเหตุและผล (cause and effect diagram) ร่วมกับทีมฝ่ายวิศวกรรมของโรงงาน จำแนกสาเหตุ ของปัญหาออกเป็น 4 ด้าน ได้แก่ ด้านแรงงาน ด้าน เครื่องจักร ด้านวัตถุดิบและด้านวิธีการ [3] เพื่อใช้ เป็นข้อมูลในการประเมินและวางแผนการบำรุง รักษาเชิงป้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังสาเหตุและผล

การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนผัง สาเหตุและผล ดังรูปที่ 2 พบว่า ด้านแรงงาน พนักงานควบคุมเครื่องจักรขาดความรู้ในการ บำรุงรักษาและพนักงานฝ่ายวิศวกรรมที่ทำหน้าที่ ซ่อมบำรุงขาดความสม่ำเสมอในการตรวจเช็ค เครื่องจักรก่อนการผลิต ซึ่งส่งผลให้เครื่องจักรเกิด การขัดข้องในระหว่างการผลิต และส่งผลให้ทั้ง กระบวนการหยุดชะงัก

ด้านเครื่องจักร ระบบการทำงานของเครื่องจักร ค่อนข้างเก่าและวัตถุดิบที่เข้าสู่เครื่องจักรไม่สามารถ ควบคุมคุณภาพและปริมาณความชื้นส่งผล เครื่องจักรทำงานหนัก

ด้านวิธีการ ในส่วนนี้เห็นได้ชัดเจนว่าขาดการวางแผนในการบำรุงรักษาส่งผลให้เครื่องจักรเกิดการขัดข้องบ่อย

ด้านวัตถุดิบ ในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดไม่สามารถควบคุมคุณภาพและปริมาณความชื้นของวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตได้ เนื่องจากทางโรงงานยังขาดการจัดการวัตถุดิบที่ดี

โดยทั้ง 4 สาเหตุดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้เครื่องจักรในกระบวนการเกิดการขัดข้อง ดังนั้น การลดปัญหาดังกล่าวต้องมีการกำหนดแนวทางหลักการบำรุงรักษาที่ต้อง เพื่อลดความสูญเสียที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยนำค่า RPN ของชิ้นเครื่องจักรมาใช้ในการแบ่งเกณฑ์ระดับเสี่ยงเป็น 3 ระดับ ประกอบด้วย ระดับความเสี่ยงสูง (H-High Risk) มีคะแนนอยู่ในช่วง 31-45 ระดับปานกลาง (M-Medium Risk) มีคะแนนอยู่ในช่วง 16-30 และระดับต่ำ (L-Low Risk) 1-15 ซึ่งถ้าหากค่า RPN สูง แสดงว่า สภาวะนั้นมีความพร้อมที่จะก่อให้เกิด ปัญหาในกระบวนการผลิต [6] ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่า RPN ของชิ้นส่วนเครื่องจักร

ลำดับ ที่	ชิ้นส่วน เครื่องจักรของ เครื่องอัดเม็ด	ค่า RPN จากมาก ไปน้อย	ระดับค่า ความเสี่ยง		
			H	M	L
1	ลูกปืนเครื่อง อัดเม็ด	36	H		
2	ใบมีดเครื่องสับ	36	H		
3	แกนใบค้อน บดละเอียด	30		M	
4	แกนใบค้อนบด หยาบ	30		M	
5	สายพานเครื่อง อัดเม็ด	18		M	
6	น็อตยึดหน้า แปลน	12			L
7	ตะแกรง 6 มม.	6			L
8	ตะแกรง 22 มม.	6			L

จากตารางที่ 6 แสดงค่า RPN ของชิ้นส่วนเครื่องจักรในกระบวนการอัดเม็ด โดยแบ่งระดับความเสี่ยงระดับสูง หมายถึง ชิ้นส่วนเครื่องจักรที่เกิดการขัดข้องทำให้กระบวนการผลิตหยุดชะงักและสูญเสียเวลาซ่อมเครื่องจักรเป็นเวลานาน บางครั้งช่างซ่อมบำรุงไม่สามารถซ่อมเองได้ และกระทบต่อการส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้า ได้แก่ ลูกปืนเครื่องอัดเม็ดและใบมีดเครื่องสับ ความเสี่ยงระดับปานกลาง หมายถึง ชิ้นส่วนเครื่องจักรเกิดการขัดข้องทำให้กระบวนการผลิตหยุดชะงัก และผลผลิตเกิดความเสียหาย ได้แก่ แกนใบค้อนบดละเอียด แกนใบค้อนบดหยาบ และสายพานเครื่องอัดเม็ด และความเสี่ยงระดับต่ำ หมายถึง ชิ้นส่วนเครื่องจักรเกิดการขัดข้องทำให้ไม่สามารถเดินเครื่องต่อได้ แต่ไม่เกิดความเสียหายต่อผลผลิต ได้แก่ น็อตยึดหน้าแปลน ตะแกรง 6 มม. และตะแกรง 22 มม.

ทั้งนี้ทุกชิ้นส่วนของเครื่องจักรมีความสำคัญต่อกระบวนการอัดเม็ด ถ้าหากชิ้นส่วนเหล่านี้เกิดความเสียหาย หรือเกิดการชำรุดจะส่งผลให้กระบวนการผลิตหยุดชะงัก ผู้วิจัยจึงใช้ค่าระดับความเสี่ยงของชิ้นส่วนเครื่องจักร และพิจารณาคู่มือของเครื่องจักรออกแบบใบตรวจสอบเพื่อเป็นแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของเครื่องจักรก่อนเกิดการขัดข้อง และออกแบบใบตรวจสอบการบำรุงรักษาและทำการตรวจสอบเครื่องอัดเม็ดเป็นรายวัน รายสัปดาห์และรายเดือน ตามลำดับความเสี่ยง ส่งผลให้เครื่องจักรเกิดการขัดข้องลดลงและสามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้ง่ายขึ้น

การเปรียบเทียบผลการดำเนินการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษา

จากผลการการบำรุงรักษาก่อนการใช้แผนการบำรุงรักษาเปรียบเทียบกับหลังการใช้แผนการบำรุงรักษา พบว่า ในกรณีที่ปล่อยให้เครื่องจักรเกิดการขัดข้องทำให้เกิดการสูญเสียเวลาในการปฏิบัติงาน ค่าแรงงาน ค่าอะไหล่ในการซ่อมบำรุง

ผู้วิจัยนำข้อมูลที่รวบรวมมาวิเคราะห์เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบและเวลาที่สูญเสียไปในการซ่อมแซมแต่ละครั้งโดยใช้ ระยะเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (Mean Time To Repair, MTTR) หมายถึง ระยะเวลาเฉลี่ยของการหยุดเครื่องเพื่อซ่อมบำรุง โดยนำเวลาที่ใช้เพื่อซ่อมบำรุงทั้งหมดหาค่าเฉลี่ย เพื่อตรวจสอบความสามารถ ความยากง่ายของการซ่อมบำรุง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$MTTR = \frac{\text{ผลรวมเวลาซ่อมบำรุง}}{\text{จำนวนครั้งที่หยุดซ่อม}} \quad (3)$$

ระยะเวลาเฉลี่ยก่อนเกิดเหตุขัดข้อง (Mean Time Between Failures, MTBF) เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรว่ามีค่ามากน้อยเท่าไร ถ้าค่า MTBF มีค่ามากหมายถึงเครื่องจักรนั้นนาน ๆ เกิดการขัดข้องครั้งหนึ่ง แต่ถ้าค่า MTBF มีค่าน้อย

หมายถึงเครื่องจักรมีเกณฑ์การขัดข้องเกิดขึ้นบ่อยครั้ง ดังสมการที่ 4

$$MTBF = \frac{\text{เวลาที่เครื่องจักรเดินทั้งหมด}}{\text{จำนวนครั้งที่เครื่องจักรชำรุด}} \quad (4)$$

เมื่อกำหนดค่า MTTR และ MTBF เพื่อวัดประสิทธิภาพนั้นจะวัดโดยใช้เปอร์เซ็นต์ความพร้อมในการใช้งานของเครื่องจักร (Availability Factor, AF) ดังแสดงในสมการที่ 5

$$AF = \frac{\text{เวลารับภาระ} - \text{เวลาหยุด}}{\text{เวลารับภาระ}} \quad (5)$$

ผลจากการเปรียบเทียบก่อนและหลังการใช้แผนการบำรุงรักษา ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบก่อนและหลังการใช้แผนการบำรุงรักษา

เครื่องจักร	MTTR (นาท)		MTBF (นาท)		ความพร้อมใช้งาน (%)	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
เครื่องอัดเม็ด	70.50	68.57	291.20	416.00	75.79	83.52
เครื่องสับ	106.23	103.13	220.07	261.33	51.73	58.15
เครื่องบดละเอียด	111.08	107.67	169.51	209.07	34.47	48.50
เครื่องบดหยาบ	77.71	73.08	130.67	160.82	40.53	54.56

จากตารางเปรียบเทียบก่อนและหลังการใช้แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยผู้วิจัยใช้ข้อมูลเครื่องจักรในกระบวนการอัดเม็ดมาเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่า ระยะเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (Mean Time To Repair, MTTR) ของเครื่องจักรทั้ง 4 เครื่องลดลง แต่สังเกตได้ว่าการลดลงค่อนข้างน้อย เนื่องจาก กระบวนการซ่อมเครื่องจักรเมื่อเกิดการขัดข้อง ใช้วิธีการเดิม อีกทั้งการรอคอยอะไหล่สำรองค่อนข้างนานทำให้เครื่องจักรต้องหยุดการทำงาน ในส่วนของระยะเวลาเฉลี่ยก่อน

เกิดเหตุขัดข้อง (Mean Time Between Failures, MTBF) และความพร้อมในการใช้งานของเครื่องจักร (Availability Factor, AF) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จึงกล่าวได้ว่าถ้าหากทุกชิ้นส่วนของเครื่องจักรได้รับการบำรุงรักษาตามรอบเวลาจะส่งผลให้เครื่องจักรมีระยะเวลาในการทำงานก่อนที่จะขัดข้องเพิ่มระยะเวลาในการซ่อมลดลง และความพร้อมในการใช้งานเพิ่มขึ้นอีกด้วย

สรุปและอภิปราย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยเสี่ยงของเครื่องจักรในกระบวนการอัดเม็ด โดยประยุกต์ใช้เทคนิค FMEA และเสนอแนวทางการบำรุงรักษาของเครื่องจักร และประเมินแนวทางการบำรุงรักษาโดยใช้หลักการงานหลักการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและจัดทำแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ผลจากการวิจัย พบว่า ปัญหาของกระบวนการอัดเม็ด คือเครื่องจักรเกิดการขัดข้องอย่างกะทันหัน เนื่องจากขาดการวางแผนการบำรุงรักษาอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้เกิดเวลาที่สูญเสียของเครื่องจักร หรือเวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงเครื่องจักร และส่งให้กระทบต่อชิ้นส่วนของเครื่องจักรเมื่อเกิดการชำรุด หรือเสียหายแล้ว ทำให้กระบวนการผลิตหยุดชะงัก จากผลการวิจัยพบว่า ค่า RPN ของลูกปืนเครื่องอัดเม็ดและใบมีดเครื่องสับ มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 36 และจัดอยู่ในระดับความเสี่ยงที่สูง นั้นหมายความว่าชิ้นส่วนเครื่องจักรที่เกิดการขัดข้องทำให้กระบวนการผลิตหยุดชะงักและสูญเสียเวลาซ่อมเครื่องจักรเป็นเวลานาน บางครั้งช่างซ่อมบำรุงไม่สามารถซ่อมเองได้ และกระทบต่อการส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้า ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์รากของปัญหาโดยใช้แผนผังสาเหตุและผล เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของเครื่องจักรที่เกิดการขัดข้อง พบว่าขาดการวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรและพนักงานขาดความสม่ำเสมอในการตรวจเช็คเครื่องจักรก่อนการผลิต และใช้ค่าระดับความเสี่ยงของชิ้นส่วนเครื่องจักร และคู่มือของเครื่องจักรออกแบบใบตรวจสอบเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของเครื่องจักรก่อนเกิดการขัดข้องและให้แผนวิศวกรรมทำการตรวจสอบเครื่องอัดเม็ดเป็นรายวัน รายสัปดาห์ และรายเดือนตามลำดับความเสี่ยง พบว่า ระยะเวลาเฉลี่ยในการซ่อมของเครื่องอัดเม็ด เครื่องสับ เครื่องบดหยาบ และเครื่องบดละเอียด ลดลงร้อยละ 2.74, 2.92, 3.07 และ 5.96 ตามลำดับ ระยะเวลาเฉลี่ยก่อนเกิดเหตุขัดข้อง เพิ่มขึ้นร้อยละ 30.00, 15.97, 18.92

และ 18.75 ตามลำดับ และความพร้อมในการใช้งานของเครื่องจักรเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.25, 14.55, 28.93 และ 25.72 ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเทคนิค FMEA สามารถนำมาหาระดับความเสี่ยงของเครื่องจักรและนำข้อมูลที่ได้มาทำการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่เหมาะสมของแต่ละเครื่องจักรให้เป็นมาตรฐานในการบำรุงรักษาซึ่งพบว่าอัตราความพร้อมใช้งานและค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างความเสียหายของเครื่องจักรเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีจำนวนความถี่ในการเกิดความเสียหายลดลง [7] สอดคล้องกับ [8] ที่ใช้วิธีการ บำรุงรักษาเชิงป้องกันบนพื้นฐานทฤษฎีความน่าเชื่อถือที่สามารถลดเวลาสูญเสียและเพิ่มความพร้อมในการใช้งานให้กับเครื่องจักรซึ่ง [9] ยังกล่าวได้ว่า FMEA สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุปัญหาและผลกระทบของปัญหาที่มีต่อกระบวนการได้อย่างชัดเจน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากแผนกวิศวกรรมโรงงานผลิตชีวมวลอัดเม็ดในจังหวัดตรัง

References

- [1] P. Kaewsaitom, "The Applications of Reliability Based Maintenance for Reducing Downtime in the Sample Paper Factory," M.Eng. (Engineering Management), Silpakorn University, Nakhon Pathom, 2011.
- [2] K. Rungruang, "Alternative: Preventive Maintenance Planning for Industrial Relay Machinery," M.Sc. (Engineering Management), Dhurakij Pundit University, Bangkok, 2009.

- [3] S. Wongjirattikarn and S. Ratanakuakangwan, "Improvement of Preventive Maintenance Planning of an Automobile Shaft Manufacturer by FMEA Technique," *The Journal of KMUTNB*, vol. 23, no. 3, pp. 643-653, September - December 2013.
- [4] S. Sinlapapiphat, "Design of Maintenance Plan for the Multi-Plant Ready-Mixed Concrete Industry," M.Eng. (Industrial Engineering), Chulalongkorn University, Bangkok, 1994.
- [5] T. Juntasom, "Process Improvement by Using FMEA and AHP in Dyeing Section in the Sample Factory," M.Eng. (Engineering Management), Silpakorn University, Nakhon Pathom, 2010.
- [6] W. Punyangarm, "Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) for a Maintenance System Development: A Case Study of Meat Processing," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 33, no. 4, pp. 24-31, Dec. 2016.
- [7] S. Silaard, *Machine Productivity Improvement by Preventive Maintenance Case Study : Beverage Industrial*, M.Eng. (Industrial Engineering), King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 2008.
- [8] S. Samrit, A. Kengpol and S. Talabgaew, "Reduction of Downtime Loss by Using Reliability Theory Based Preventive Maintenance: A Case Study of the Concrete Industry," *KKU Research Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 145-158, Feb. 2011.
- [9] P. Pahakij and A. Krairit, "Integrating QFD and FMEA for Customer Satisfaction A Case Study in Automotive Industry," *The Journal of Industrial Technology : Suan Sunandha Rajabhat University*, vol. 5, no. 1, pp. 13-23, January – June 2017.

การพัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เพื่อการแก้ไขค่าอคติของฝนจากดาวเทียม

ปริชาติ เวชยนต์^{1*}, คธาวุฒิ ไวยสุศรี², กัญญมณี สุ่มประดิษฐ์¹, เพียงหนึ่ง นงคินาง¹

¹ภาควิชาภูมิศาสตร์และภูมิสารสนเทศ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

²สาขาวิชาภูมิศาสตร์และภูมิสารสนเทศ คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

Email : parichatw@g.swu.ac.th^{1*}

Received: May 16, 2020

Revised: June 16, 2020

Accepted: June 19, 2020

บทคัดย่อ

การประเมินฝนด้วยดาวเทียมนั้น มีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อน หรือ ค่าอคติในการตรวจวัด เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องจึงต้องทำการแก้ไขค่าอคติก่อนนำมาใช้ ดังนั้น การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและทดสอบแอปพลิเคชันสำหรับการแก้ไขค่าอคติของฝนจากดาวเทียมบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ข้อมูลอัตราการตกของฝนรายเดือนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552-2561 เป็นระยะเวลา 10 ปี จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน กรมอุตุนิยมวิทยา และอัตราการตกของฝนรายเดือนจากการตรวจวัดด้วยดาวเทียม GPM นำมาคำนวณค่าอคติ (Bias) และ สอบเทียบความถูกต้องด้วยการปรับแก้ค่าอคติ 2 วิธี ได้แก่ การปรับแก้ด้วยวิธีแบบบวก (Additive method) และ การปรับแก้ด้วยวิธีแบบคูณ (Multiplicative method) พบว่า วิธีแบบคูณสามารถลดค่าอคติของประมาณอัตราการตกของฝนของดาวเทียม GPM ได้มากกว่าวิธีแบบบวก จึงนำวิธีแบบคูณมาสร้างเป็นฟังก์ชันแอปพลิเคชันบนโปรแกรมภูมิสารสนเทศ ซึ่งผลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานแสดงให้เห็นความถูกต้องที่เพิ่มขึ้นทั้งเชิงปริมาณ และเชิงพื้นที่ โดยมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อใช้กับข้อมูลฝนที่มีอัตราการตกปานกลาง ส่วนอัตราการตกของฝนระดับสูงและต่ำแอปพลิเคชันมีประสิทธิภาพรองลงมา

คำสำคัญ : การแก้ไขค่าอคติ, ฝน, ดาวเทียม GPM, แอปพลิเคชันบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

Development of GIS Application for Satellite Rainfall Bias Correction

Parichat Wetchayont^{1*}, Katawut Waiyasusri², Kantamanee Sumpradit¹,
Piangueng Nongnang¹

¹Department of Geography Faculty of Social Sciences Srinakharinwirot University

²Geography and Geo-Informatics Program, Faculty of Humanities and Social Sciences,

Suan Sunandha Rajabhat University

Email : parichatw@g.swu.ac.th^{1*}

Received: May 16, 2020

Revised: June 16, 2020

Accepted: June 19, 2020

Abstract

Rainfall estimation by using satellite always include uncertainty or bias due to many factors. To obtain better accuracy of satellite rainfall estimation, bias should be removed. In this study aim to develop and test a bias correction application based on Geographic Information System (GIS) by using 10-year (1998-2018) rainfall dataset from rain gauge providing by Thai Meteorological Department and Global Precipitation Measurement (GPM) satellite network. The two rainfall datasets were used to calculate bias values and correct GPM rainfall with two methods: additive and multiplicative method. The results showed a better performance of bias correction on multiplicative method when applied to GPM rainfall. Thus, multiplicative method was used to develop as a bias correction function of GPM rainfall in GIS application. The testing results revealed that a bias correction application works well and improves accuracy in both quantity and spatially distribution. The application showed best performance when applied to rainfall with moderate intensity and lower performance to rainfall with high and low intensity, respectively.

Keywords : Bias Correction, Rainfall, GPM satellite, GIS Application

บทนำ

การตรวจวัดปริมาณฝนที่แม่นยำและรวดเร็วเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้เกษตรกรวางแผนการเพาะปลูกให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำในแต่ละช่วงเวลา อีกทั้งข้อมูลปริมาณฝนยังเป็นข้อมูลสำคัญในการบริหารจัดการน้ำในแม่น้ำลำคลองและเขื่อน ที่สำคัญยังใช้ในการเตือนภัยน้ำท่วมและน้ำแล้งอีกด้วย ปริมาณฝนนั้นตรวจวัดได้จากเครื่องมือภาคพื้นดิน (rain gauge) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำที่สุด แต่เนื่องจากการตรวจวัดแบบจุด จึงไม่ครอบคลุมพื้นที่กว้าง ปัจจุบันการสำรวจระยะไกลสามารถประเมินปริมาณฝนได้ เริ่มนิยมใช้มากขึ้นเพราะครอบคลุมพื้นที่ได้กว้าง ดาวเทียมในยุคแรกที่สามารถวัดปริมาณฝนได้นั้นคือ Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) ในปัจจุบันมีการพัฒนาเครือข่ายดาวเทียมเพื่อประเมินปริมาณฝนทั่วโลกชื่อว่า Global Precipitation Measurement (GPM) ซึ่งตรวจวัดได้ถี่ขึ้นทั้งเชิงพื้นที่และเชิงเวลา (<https://gpm.nasa.gov/gpm>) แต่เนื่องจากการสำรวจระยะไกลนั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้เกิดค่าอคติ (Bias) ปนมาด้วยเสมอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้ค่าอคติก่อนนำมาใช้ ซึ่งมีหลายวิธีได้แก่ 1) วิธีเดลต้า (Delta method) (<http://www.worldclim.org/downscaling>) 2) วิธีทางสถิติ แบ่งเป็น วิธีแบบบวก (Additive method) [1-4] และ วิธีแบบคูณ (Multi-plicative method) 3) วิธีแผนที่ควอนไทล์ (quantile mapping) [5] แต่วิธีที่เป็นพื้นฐาน ไม่ซับซ้อน และได้ผลดี เป็นที่นิยมได้แก่ วิธีบวกและวิธีคูณ ซึ่ง [6] ใช้วิธีคูณในการแก้ค่าอคติของฝนจากเรดาร์และดาวเทียมก่อนนำมาผนวกกับ พบว่าค่าฝนที่ได้มีค่าความถูกต้องเพิ่มขึ้นมาก

การวิเคราะห์ข้อมูลสำรวจระยะไกลนั้นส่วนใหญ่นิยมใช้เทคโนโลยีระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geoinformatics) [7] เนื่องจากการแก้ค่าอคติฝนดาวเทียมต้องใช้ข้อมูลหลายช่วงเวลา การทำงานบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์จึงใช้เวลานาน ดังนั้น

การสร้างฟังก์ชันแก้ค่าอคติฝนดาวเทียมบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อเป็นแอปพลิเคชันนั้นจำเป็นอย่างยิ่ง ช่วยทำงานวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณฝนนั้นดำเนินไปอย่างรวดเร็วและทันเหตุการณ์

ดังนั้น การศึกษารั้วนี้จึงพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อแก้ค่าอคติของฝนดาวเทียมบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และทำการทดสอบแอปพลิเคชันต้นแบบเพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้งานจริงของแอปพลิเคชัน

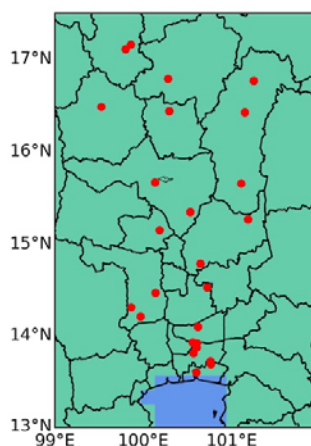
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบและหาวิธีแก้ค่าอคติของฝนดาวเทียม GPM ที่เหมาะสมกับข้อมูล
2. เพื่อพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันแก้ค่าอคติของฝนดาวเทียม GPM บนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

ระเบียบวิธีวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

การศึกษารั้วนี้เลือกพื้นที่ภาคกลางซึ่งเป็นที่ราบลุ่ม มีสภาพภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่ม บนพื้นที่ 91,798.64 ตารางกิโลเมตร ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาในภาคกลางและจุดสีแดงแสดงตำแหน่งของสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน (rain gauge) จำนวน 25 สถานี

2. รวบรวมข้อมูลฝนและจับคู่

ข้อมูลอัตราการตกของฝนรายเดือน (monthly rainfall intensity) ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2552 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 จากเครื่องตรวจวัดปริมาณฝนภาคพื้นดินแบบอัตโนมัติ (rain gauge) จำนวน 25 สถานีของกรมอุตุนิยมวิทยา และดาวเทียม GPM ที่ตรวจวัดทุก 3 ชั่วโมงแล้วนำมาคำนวณเป็นข้อมูลอัตราการตกของฝน Level 3 รายเดือน มีความละเอียดเชิงพื้นที่ โดยนำข้อมูลอัตราการตกของฝนดาวเทียม GPM มาจับคู่กับฝนผิวดิน ณ เวลาเดียวกันที่ตำแหน่งที่มีเครื่องตรวจวัดผิวดินติดตั้งอยู่ ดังรูปที่ 2 จากนั้นผู้วิจัยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 ใช้ในการหาค่าอคติ และชุดที่ 2 ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของข้อมูลอัตราการตกของฝนดาวเทียม GPM ที่ได้รับการแก้ค่าอคติแล้ว

3. การแก้ค่าอคติ (Bias correction)

ข้อมูลชุดที่ 1 ใช้หาค่าอคติ เพื่อให้ได้ค่าอคติประจำสถานีผิวดิน 25 สถานี แล้วใช้วิธีแก้ค่าอคติ 2 วิธี คือ วิธีแบบบวก [8] ดังสมการที่ (1) และวิธีแบบคูณ [9] ดังสมการที่ (2)

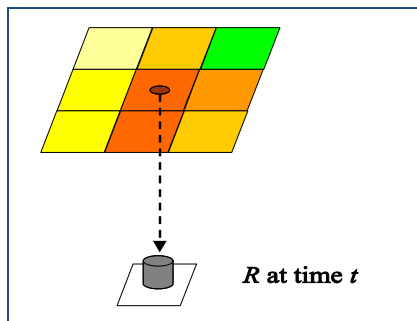
$$\text{Bias} = \text{Rain}_G - \text{Rain}_{\text{GPM}} \quad (1)$$

$$\text{Bias} = \text{Rain}_G / \text{Rain}_{\text{GPM}} \quad (2)$$

Bias คือ ค่าอคติ หรือ ค่าอัตราการตกของน้ำฝนจากดาวเทียมที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าอัตราการตกของฝนของสถานีตรวจวัดผิวดินด้วย Rain gauge

Rain_G คือ ข้อมูลของอัตราการตกของน้ำฝนรายเดือนจากเครื่องตรวจวัดผิวดิน Rain gauge

Rain_{GPM} คือ ข้อมูลของอัตราการตกของน้ำฝนรายเดือนจากดาวเทียม GPM



รูปที่ 2 การจับคู่ข้อมูลฝนดาวเทียม GPM และฝนจาก Rain gauge [9]

4. การทดสอบความถูกต้องของค่าอคติ (Validation)

ข้อมูลชุดที่ 2 นำมาใช้ในการทดสอบความถูกต้องของข้อมูลที่แก้ค่าอคติแล้วในข้อ 3. โดยใช้ค่าทางสถิติสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) ดังสมการที่ (3) และค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (root-mean-square error, RMSE) ดังสมการที่ (4) เพื่อบ่งชี้วิธีที่เหมาะสมในการแก้ค่าอคติของฝนจากดาวเทียม GPM [11]

$$R^2 = \frac{\sum (\text{Rain}_G - \text{Rain}_G)^2}{\sum (\text{Rain}_{\text{GPM}} - \text{Rain}_{\text{GPM}})^2} \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (\text{Rain}_G - \text{Rain}_{\text{GPM}})^2}{n}} \quad (4)$$

n คือ จำนวนของข้อมูลทั้งหมด

5. สร้างแอปพลิเคชันระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และทดสอบประสิทธิภาพ

เมื่อนำวิธีแก้ค่าอคติในข้อ 4. มาสร้างเป็นแอปพลิเคชันระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แล้วทำการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน โดยเลือกข้อมูล มา 3 เหตุการณ์ คือ ในช่วงเวลาที่มีอัตราการตกของฝนต่ำ (<0.15 mm/h) ปานกลาง (<0.25 mm/h) และสูง (>0.25 mm/h) โดยเลือกจากชุดข้อมูลที่ 2 ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน

บ่งชี้จากค่าสถิติ R^2 และ RMSE ของข้อมูลฝนก่อนและหลังใช้แอปพลิเคชัน

ผลการวิจัย

1. คำนวณค่าอคติ

ข้อมูลอัตราการตกของฝนรายเดือนจำนวน 10 ปี สามารถจับคู่ได้ทั้งหมด 2,744 คู่ เมื่อแบ่งข้อมูลเป็น 2 ชุดๆ ละ 1,372 คู่ ข้อมูลชุดที่ 1 ใช้คำนวณค่าอคติพบว่าค่าอคติจากวิธีแบบบวกรวม ในหน่วย mm/h ของ 25 สถานีตรวจวัดฝนภาคพื้นดินนั้น มีค่าเป็นลบทุกสถานี และค่าอคติจากวิธีแบบคูณมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าดาวเทียม GPM ประเมินอัตราการตกของฝนได้สูงกว่าที่สถานีภาคพื้นดินตรวจวัดได้ ดังตารางที่ 1

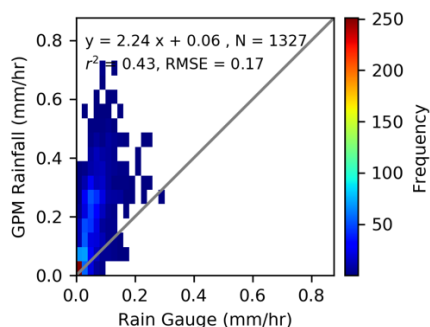
2. การแก้ค่าอคติและการสอบเทียบ

เมื่อนำค่าอคติที่คำนวณได้จากข้อมูลชุดที่ 1 (ตารางที่ 1) มาแก้ค่าอคติกับข้อมูลชุดที่ 2 พบว่าอัตราการตกของฝนที่ประเมินได้จากดาวเทียม GPM มีค่ามากกว่าอัตราการตกของฝนที่ตรวจวัดจากสถานีภาคพื้น โดยดาวเทียม GPM มีความสัมพันธ์กับฝน Rain gauge ร้อยละ 43 ($R^2 = 0.43$) และ มีค่าฝนคลาดเคลื่อน 0.17 mm/h (RMSE = 0.17) อัตราการตกของฝนที่ปรากฏบ่อยในชุดข้อมูลชุดที่ 2 คือ < 0.1 mm/h ดังแสดงในรูปที่ 3

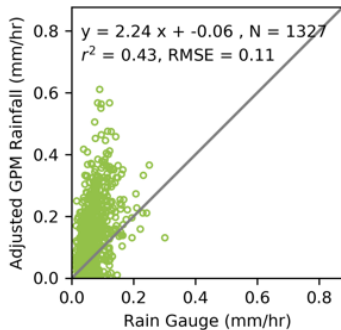
หลังจากการปรับแก้ค่าอคติข้อมูลชุดที่ 2 ด้วยค่าอคติจาก วิธีแบบบวกรวม และ วิธีแบบคูณ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) และ (ข) พบว่าการปรับแก้ทั้งสองวิธีมีค่า R^2 เท่าเดิมก่อนการแก้ไข คือ 0.43 แต่ค่า RMSE จากเดิม 0.17 mm/h ลดลงมาอยู่ที่ 0.11 mm/h (วิธีบวกรวม) และ 0.03 mm/h (วิธีคูณ) ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากผลพบว่าวิธีคูณสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนได้มากกว่าวิธีบวกรวม ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปจะนำวิธีแก้ค่าอคติแบบคูณไปใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

ตารางที่ 1 ค่าอคติของสถานีวัดฝน 25 สถานี ด้วยวิธีบวกรวมในหน่วย (mm/h) และวิธีคูณ

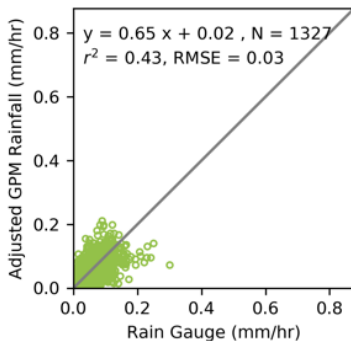
ลำดับ	สถานีตรวจวัดปริมาณฝนภาคพื้นดิน	ค่าอคติวิธีบวกรวม	ค่าอคติวิธีคูณ
1	จ.สุโขทัย	-0.1166	0.4172
2	ศรีสำโรง จ.สุโขทัย	-0.1258	0.3152
3	จ.พิษณุโลก	-0.1227	0.4574
4	จ.เพชรบูรณ์	-0.1047	0.4015
5	หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์	-0.1133	0.3145
6	วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์	-0.1118	0.5315
7	จ.กำแพงเพชร	-0.1260	0.5480
8	จ.พิจิตร	-0.1243	0.3741
9	จ.นครสวรรค์	-0.1231	0.3048
10	ตากฟ้า จ.นครสวรรค์	-0.1101	0.5068
11	ชัยนาท จ.ชัยนาท	-0.1272	0.3907
12	จ.พระนครศรีอยุธยา	-0.1289	0.6091
13	จ.ปทุมธานี	-0.1492	0.4032
14	จ.สุพรรณบุรี	-0.1133	0.3286
15	อู่ทอง จ.สุพรรณบุรี	-0.1168	0.4023
16	จ.ลพบุรี	-0.1210	0.4060
17	บัวชุม จ.ลพบุรี	-0.1110	0.4235
18	นาร่อง จ.สมุทรปราการ	-0.1778	0.3372
19	จ.สมุทรปราการ	-0.1562	0.4916
20	สนามบินสุวรรณภูมิ	-0.1666	0.2969
21	จ.นครปฐม	-0.1240	0.3898
22	กรุงเทพมหานคร	-0.1360	0.5100
23	ท่าเรือคลองเตย	-0.1350	0.4283
24	บางนา กรุงเทพฯ	-0.1395	0.4485
25	สนามบินดอนเมือง	-0.1443	0.5234



รูปที่ 3 แผนภาพการกระจายข้อมูลฝนชุดที่ 2



(ก) การปรับค่าอคติแบบบวก

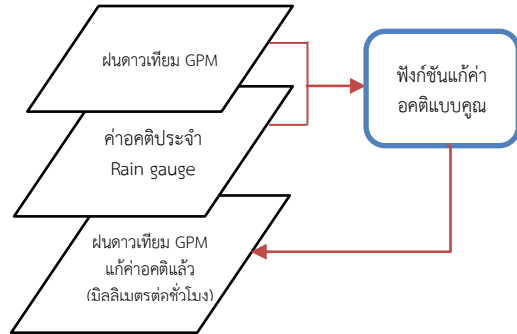


(ข) การปรับค่าอคติแบบคูณ

รูปที่ 4 การแก้ค่าอคติวิธีบวก (ก) และวิธีคูณ (ข)

3. แอปพลิเคชันบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

แอปพลิเคชันแก้ค่าอคติฝนดาวเทียมบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ถูกสร้างขึ้นบนซอฟต์แวร์ QGIS เวอร์ชัน 3.12.0 โดยทำการสร้างและบันทึกสมการที่ (2) เป็นฟังก์ชันใน QGIS ขั้นตอนการทำงานของแอปพลิเคชัน คือ นำเข้าข้อมูลอัตราการตกของฝนดาวเทียม GPM และ ข้อมูลค่าอคติประจำ Rain gauge ด้วยวิธีแบบคูณ จากตารางที่ 1 แล้วจึงเรียกใช้ฟังก์ชันที่สร้างไว้ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าแอปพลิเคชันใช้เวลาในการประมวลไม่นาน และผลลัพธ์ที่ได้มีอัตราการตกของฝนดาวเทียม GPM ที่แก้ค่าอคติแล้ว มีค่าใกล้เคียงกับอัตราการตกของฝนจาก Rain gauge มากขึ้น



รูปที่ 5 ขั้นตอนการทำงานของแอปพลิเคชันแก้ค่าอคติฝนดาวเทียมบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

4. การทดสอบประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน

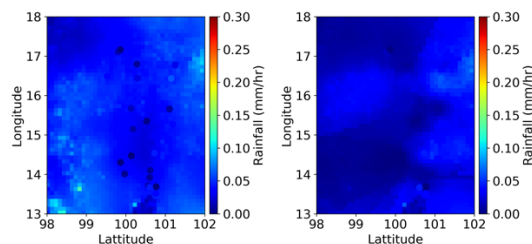
แอปพลิเคชันแก้ค่าอคติฝนดาวเทียมบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ที่สร้างขึ้นนั้น จะต้องทำการทดสอบประสิทธิภาพ โดยทดลองกับข้อมูลฝนจาก 3 ตัวอย่างที่เลือกจากชุดข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งเลือกฝนที่มีอัตราการตกของฝนต่ำ (<0.15 mm/h) ปานกลาง (<0.25 mm/h) และ สูง (>0.25 mm/h) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันกับข้อมูลฝนที่มีอัตราการตกของฝนหลากหลายช่วง โดยค่าสถิติที่ใช้บ่งชี้ประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันนั้นดูจาก RMSE ที่ลดลงเป็นปัจจัยหลัก และ R^2 ที่เพิ่มขึ้นเป็นปัจจัยรอง เนื่องจากแอปพลิเคชันนี้สร้างขึ้นเพื่อลดค่ารบกวนที่ไม่ใช่ฝนและปนอยู่ในข้อมูลไม่ได้มุ่งเน้นเพิ่มความสัมพันธ์กันของข้อมูลสองชุดจากการทดสอบพบว่า แอปพลิเคชันแก้ค่าอคติฝนดาวเทียมบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สามารถลดค่าอคติได้ดี และปรับข้อมูลอัตราการตกของฝนดาวเทียม GPM ให้สัมพันธ์กับอัตราการตกของฝนจาก Rain gauge มากขึ้นด้วย จาก 3 ตัวอย่างอัตราการตกของฝนที่เลือกมาจากอัตราการตกของฝนที่ต่างกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแอปพลิเคชันแก้ค่าอคติฝนดาวเทียมบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์นี้มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้กับข้อมูลฝนที่มีอัตราการตกปานกลาง จากค่าทางสถิติก่อนแก้ค่าอคติมีค่า $R^2 = 0.20$ และ ค่า $RMSE = 0.05$ เมื่อแก้ค่าอคติด้วยแอปพลิเคชันแล้วมีค่า $R^2 = 0.97$

(เพิ่มขึ้น 77%) และ ค่า RMSE = 0.01 (ลดลง 80%) ดังแสดงในตารางที่ 2 แอปพลิเคชันมีประสิทธิภาพรองลงมาเมื่อใช้กับข้อมูลฝนที่มีอัตราการตกสูง ค่าทางสถิติก่อนแก้ค่าอคติมีค่า $R^2 = 0.23$ และค่า RMSE = 0.11 เมื่อถูกแก้ค่าอคติด้วยแอปพลิเคชัน มีค่า $R^2 = 0.74$ (เพิ่มขึ้น 51%) และ ค่า RMSE = 0.03 (ลดลง 73%) แอปพลิเคชันมีประสิทธิภาพต่ำที่สุดเมื่อใช้กับข้อมูลฝนที่มีอัตราการตกต่ำ ค่าทางสถิติก่อนแก้ค่าอคติมีค่า $R^2 = 0.14$ และ ค่า RMSE = 0.02 เมื่อถูกแก้ค่าอคติด้วยแอปพลิเคชัน มีค่า $R^2 = 0.84$ (เพิ่มขึ้น 70%) และ ค่า RMSE = 0.01 (ลดลง 50%) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสถิติ R^2 และ RMSE จากการทดสอบประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันแก้ค่าอคติ

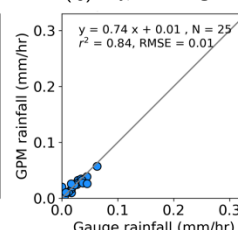
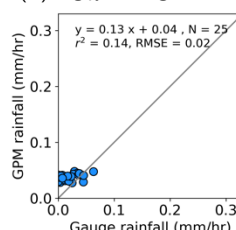
อัตราการตกของฝน	ก่อนแก้ค่าอคติ		หลังแก้ค่าอคติ	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
ต่ำ (<0.15 mm/h)	0.14	0.02	0.84	0.01
ปานกลาง (<0.25 mm/h)	0.20	0.05	0.97	0.01
สูง (>0.25 mm/h)	0.23	0.11	0.74	0.03

ความถูกต้องเชิงพื้นที่นั้นประเมินได้จากการวิเคราะห์ภาพทับซ้อนกันบนแผนที่โดยวางชั้นพื้นหลังเป็นข้อมูลอัตราการตกของฝนดาวเทียม GMP และทับซ้อนด้วยข้อมูลอัตราการตกของฝนจาก Rain gauge ดังแสดงในรูปที่ 6 – 8 พบว่าแผนที่อัตราการตกของฝนดาวเทียม GMP ที่ยังไม่ได้ปรับแก้ค่าอคตินั้นมีค่าสูงกว่าอัตราการตกของฝนจาก Rain gauge ทำให้เห็นสีของจุดฝนจาก Rain gauge ได้ชัดเจน เมื่อแก้ค่าอคติด้วยแอปพลิเคชันแล้ว จุดฝนจาก Rain gauge จะกลืนไปกับพื้นหลังซึ่งหมายความว่าค่าอัตราการตกของฝนดาวเทียมที่อยู่พื้นหลังได้ถูกปรับให้มีค่าใกล้เคียงกับฝนจาก Rain gauge แล้ว ซึ่งแสดงผลชัดเจนในรูปที่ 7 ซึ่งบริเวณกลางแผนที่แสดงฝนจาก Rain gauge ที่มีค่าสูงกว่าฝนดาวเทียม GMP แต่เมื่อปรับแก้แล้วทำให้ฝน GMP ที่มีค่าสูงปรับมามีค่าใกล้เคียงกัน



(ก) ก่อนแก้ค่าอคติ

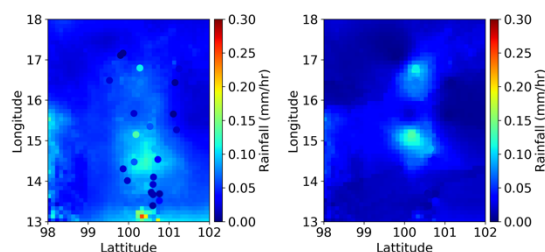
(ข) หลังแก้ค่าอคติ



(ค) ก่อนแก้ค่าอคติ

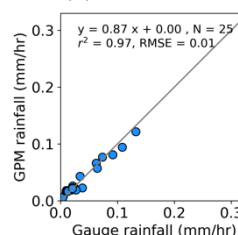
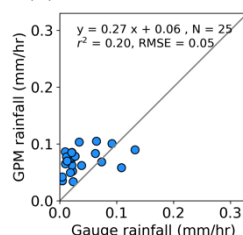
(ง) หลังแก้ค่าอคติ

รูปที่ 6 ผลการทดสอบฝนที่มีอัตราการตกต่ำ



(ก) ก่อนแก้ค่าอคติ

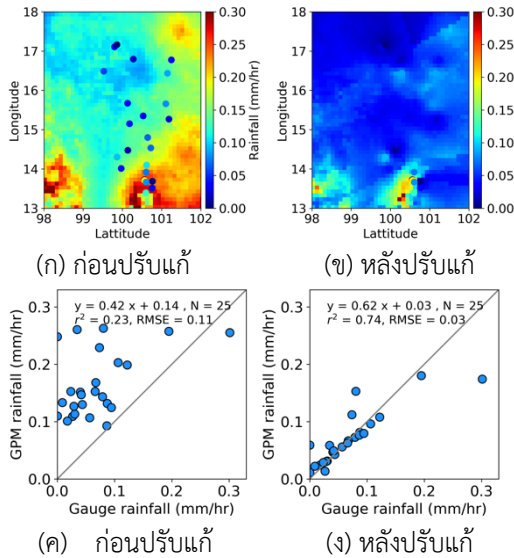
(ข) หลังแก้ค่าอคติ



(ค) ก่อนแก้ค่าอคติ

(ง) หลังแก้ค่าอคติ

รูปที่ 7 การทดสอบฝนที่มีอัตราการตกปานกลาง



รูปที่ 8 การทดสอบฝนที่มีอัตราการตกสูง

สรุปและอภิปรายผล

ในพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทยดาวเทียม GPM ประเมินอัตราการตกของฝนสูงกว่าข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือภาคพื้นดิน Rain gauge การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการแก้ค่าอคติ 2 วิธี คือ วิธีแบบบวก และวิธีแบบคูณ พบว่าการแก้ค่าอคติด้วยวิธีการคูณสามารถเพิ่มความแม่นยำของการประเมินฝนด้วยดาวเทียม GPM ของมากกว่าวิธีบวก ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ [6] ที่พบว่าวิธีคูณเหมาะสมกับการแก้ค่าอคติของฝนมากกว่าวิธีบวก เมื่อนำผลการแก้ค่าอคติด้วยวิธีการคูณมาสร้างเป็นแอปพลิเคชันบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์และทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแอปพลิเคชันแล้วพบว่ามีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้กับฝนที่มีอัตราการตกปานกลาง (<0.25 mm/h) และประสิทธิภาพจะลดลงในฝนที่มีอัตราการตกสูง (>0.25 mm/h) และต่ำ (<0.15 mm/h) ตามลำดับนอกจากแอปพลิเคชันจะปรับปรุงความแม่นยำในเชิงปริมาณแล้ว ยังแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงความแม่นยำเชิงพื้นที่อีกด้วย

References

- [1] M. Vrac, P. Marbaix, D. Paillard, and P. Naveau, "Non-linear statistical downscaling of present and LGM precipitation and temperatures over Europe," *Climate of the Past*, vol. 3, no.4, pp. 669–682, Dec. 2007.
- [2] G. Levvasseur, M. Vrac, D. Roche, D. Paillard, A. Martin, and J. Vandenberghe, "Present and LGM permafrost from climate simulations contribution of statistical downscaling," *Climate of the Past*, vol. 7, pp. no.10, 1225–1246, Oct. 2011.
- [3] M.-N. Woillez, G. Levvasseur, A.-L. Daniau, M. Kageyama, D. Urrego, M.-F. Sánchez-Goñi, and V. Hanquiez, "Impact of precession on the climate, vegetation and fire activity in southern Africa during MIS4," *Climate of the Past*, vol. 10, no.6, pp. 1165–1182, Jun. 2014.
- [4] G. Latombe, A. Burke, M. Vrac, G. Levvasseur, C. Dumas, M. Kageyama, and G. Ramstein, "Comparison of spatial downscaling methods of general circulation model results to study climate variability during the Last Glacial Maximum," *Geoscientific Model Development*, vol. 11, no.7, pp. 2563–2579, Jul. 2018.
- [5] D. J. Lorenz, D. Nieto-Lugilde, J. L. Blois, M. C. Fitzpatrick, and J. W. Williams, "Downscaled and debiased climate 30 simulations for North America from 21,000 years ago to 2100 AD," *Scientific data*, vol. 3, pp. 160 048, Jul. 2016.

- [6] P. Wetchayont, T. Hayasaka, T. Satomura, S. Katagiri and S. Baimoung, "Retrieval of rainfall by combining rain gauge, ground - based radar and satellite measurements over Phimai, Thailand," *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, vol. 9, pp. 166-169, Nov. 2013.
- [7] K. Waiyasusri, S. Imtua, and S. Inhom, "Geomorphological Classification and the Coastal change in Prachuap Khiri Khan Province during 1978 – 2018," *The Journal of Industrial Technology : Suan Sunandha Rajabhat University*, vol. 7, no.1, pp. 31-40, Jun. 2019.
- [8] J. H. Friedman, and W. Stuetzle, "Projection Pursuit Regression," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 76, no.376, pp. 817–23, Dec. 1981.
- [9] E. Diletti, D. Hauschke, and V. W. Steinijans, "Sample size determination for bioequivalence assessment by means of confidence intervals," *Int. J. Clin Pharmacol. Ther. Toxicol*, vol. 29, no.1, pp. 1–8, Jan. 1991.
- [10] R. V. Calheiros, and I. Zawadzki, "Reflectivity-rain rate relationships for hydrology in Brazil," *J. Climate Appl. Meteor*, vol. 26, no.1, pp. 118–132, Jan. 1987.
- [11] J. Bai, X. Chen, A. Dobermann, H. Yang, K. G. Cassman, and F. Zhang, "Evaluation of NASA satellite- and model-derived weather data for simulation of maize yield potential in China," *Agronomy Journal*, vol. 102, no. 1, pp. 9–16, Jan. 2010.

**ผลของการลดความชื้นต่อความสบายเชิงความร้อน
โดยใช้ปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศขนาดเล็ก
วิทยา พวงสมบัติ^{1*}, ดิษฐา นนธิวรวงศ์², ทอรั้ง โลหะภักดิ์สมบูรณ์¹**

^{1*}สุดกำแพง 82 หมู่ 5 ถนนพหลโยธิน ต.โกสัมพีนคร อ.โกสัมพีนคร จ.กำแพงเพชร 62000

²บริษัท Arch G tech จำกัด 770/25 ซอยพัฒนาการ 38 ถนนพัฒนาการ สวนหลวง กรุงเทพฯ

Email: w.puangsombut@hotmail.com^{1*}

Received: May 21, 2020

Revised: June 16, 2020

Accepted: June 19, 2020

บทคัดย่อ

การศึกษาเชิงทดลองได้ดำเนินการเกี่ยวกับสมรรถนะของปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศขนาดเล็กที่ทำหน้าที่เป็นปล่องระบายอากาศเพื่อลดความชื้นของบ้านพักอาศัย ในงานวิจัยนี้ห้องทดสอบมีจำนวน 2 ห้องที่ไม่มีเครื่องปรับอากาศและแต่ละห้องมีปริมาตร 30 m³ โดยห้องทดสอบ 1 ห้องถูกใช้เป็นห้องอ้างอิง พัดลมขนาดเล็กสองตัวถูกติดตั้งที่ปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์เพื่อให้การระบายอากาศที่สอดคล้องกับจำนวนอัตราการเปลี่ยนอากาศในห้องทดสอบ การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาปริมาณความชื้นที่ลดลงและการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระบายอากาศซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.141-6.16 g_w/kg_{da} และ 0.6-18.5 kJ/kg_{da} ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพิจารณาการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับผ่านหน้าต่าง ผลการทดลองพบว่าปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์สามารถลดความร้อนที่ได้รับเฉลี่ยประมาณ 10.24 W/m² ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพมากในการลดความชื้นและทำให้เกิดความสบายเชิงความร้อนภายในที่พักอาศัย

คำสำคัญ : ความชื้น, ความสบายเชิงความร้อน, ปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์, การระบายอากาศ, ความร้อนที่ได้รับ

Effect of moisture reduction on thermal comfort by solar chimney window with small ventilation fans

Withaya Puangsombut^{1*}, Dittha Nonthiworawong²,

Thorrung Lohapansomboon¹

^{1*}Sood-Kamphaeng 82 Moo 5 Phaholyothin Rd, Kosamphi, Kosamphi Nakhon, KamphaengPhet Thailand 62000

²Arch G Tech Co., Ltd., 770/25 Soi Patthanakarn 38, Patthanakarn Rd., Suanluang, Bangkok, Thailand

Email : w.puangsombut@hotmail.com^{1*}

Received: May 21, 2020

Revised: June 16, 2020

Accepted: June 19, 2020

Abstract

An experimental study has been conducted on the performance of a solar chimney window with small ventilation fans that also function as an air ventilated stack for moisture content reduction of a residential house. In this study; two rooms without air conditioner were tested, each with a volume 30 m^3 , one of them served as a reference. Two small fans were installed to supply ventilation corresponding to the number of air change in the test room. Data analysis was made to determine the moisture reduction and heat flow due to ventilation, which were ranged $0.141\text{-}6.16 \text{ g}_w/\text{kg}_{da}$ and $0.6\text{-}18.5 \text{ kJ/kg}_{da}$, respectively. In addition, heat gain through the window was considered. The result showed that solar chimney window could reduce the average heat gain by about 10.24 W/m^2 . The experimental result pointed out that solar chimney window is very effective for reducing moisture and providing the indoor thermal comfort.

Keywords : Moisture, Thermal comfort, Solar chimney window, Ventilation, Heat gain

บทนำ

ความชื้นเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความสบายเชิงความร้อนและการทำความเย็นเครื่องปรับอากาศและเนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น ทำให้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงตลอดทั้งปี ดังนั้นการศึกษาการลดความร้อนและความชื้นสะสมในที่พักอาศัยควรได้รับการพิจารณาเพื่อเป็นการลดความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงของอากาศภายในบ้านพักอาศัย อย่างไรก็ตามการลดความร้อนและความชื้นสะสมภายในที่พักอาศัยจำเป็นต้องมีการถ่ายเทอากาศซึ่งความเร็วลมของการถ่ายเทอากาศนั้นเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญด้วยเช่นกัน ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์ทางด้านอาคาร [1] ได้นำเสนอแผนภูมิความสบายของการถ่ายเทอากาศสำหรับประเทศไทย โดยตัวแปรที่มีความสำคัญ ได้แก่ ความเร็วลม อุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ ที่ $0.2-3 \text{ m/s}$, $26-36^{\circ}\text{C}$ และ $50-80\%$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นแนวทางในการออกแบบระบบถ่ายเทอากาศสำหรับห้องที่ไม่มีการปรับอากาศ ต่อมาได้มีการศึกษาการระบายอากาศในห้องใต้หลังคาเพื่อลดภาระการทำความเย็นโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ [2, 3] จากการใช้ระบบระบายอากาศเซลล์แสงอาทิตย์สามารถช่วยลดความร้อนและความชื้นสะสมภายในห้องใต้หลังคาและภายในห้องพักอาศัย อีกทั้งสามารถลดการถ่ายเทความร้อนผ่านฝ้าเพดานและสร้างอัตราการเปลี่ยนอากาศให้กับบ้านพักอาศัยได้เป็นอย่างดี หลังจากนั้นได้ทดลองศึกษาการลดความชื้นสะสมในที่พักอาศัยโดยการระบายอากาศแบบธรรมชาติผ่านฝ้าเพดานแบบรูปทรงแปดหน้า [4, 5] เปรียบเทียบกับฝ้าเพดานปกติ จากการศึกษาทดลองเปรียบเทียบกับฝ้าเพดานแบบรูปทรงแปดหน้าสามารถลดความชื้นสะสมภายในบ้านพักอาศัยทำให้อุณหภูมิอากาศภายในบ้านพักอาศัยลดลงและทำให้เกิดสภาวะความสบายเชิงความร้อนใน

ห้องพักอาศัยรวมถึงการลดความชื้นสะสมภายในห้องน้ำได้เช่นเดียวกัน

การศึกษาการระบายอากาศผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ ทั้งกรณีที่มีการระบายอากาศแบบธรรมชาติ [6] และกรณีที่มีการระบายอากาศโดยใช้ระบบระบายอากาศเซลล์แสงอาทิตย์ [7] จากการศึกษาข้อมูลแสดงให้เห็นว่าปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์สามารถสร้างอัตราการไหลของอากาศที่ทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนอากาศได้ในช่วง $5-15 \text{ ACH}$ และลดฟลักซ์ความร้อนผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ ได้ในช่วง $3-20 \text{ W/m}^2$ ในกรณีของการระบายอากาศแบบธรรมชาติ และ 33 ACH และ $5-30 \text{ W/m}^2$ ในกรณีการระบายอากาศโดยใช้ระบบระบายอากาศเซลล์แสงอาทิตย์ และทั้งสองกรณียังสามารถใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติที่ส่องผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ ซึ่งให้ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยจากแสงธรรมชาติอยู่ในช่วง $500-1500 \text{ Lux}$

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าการระบายอากาศสามารถลดความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารและลดความชื้นสะสมภายในที่พักอาศัยได้เป็นอย่างดี ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาทดลองการลดความชื้นสะสมโดยการระบายอากาศผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ที่ติดตั้งพัดลมระบายอากาศ เพื่อสร้างอัตราการระบายอากาศที่ทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนอากาศไม่น้อยกว่า 7 เท่าของปริมาตรห้องภายใน 1 ชั่วโมง [8]

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อลดความชื้นสะสมภายในที่พักอาศัยซึ่งมีผลต่อความสบายเชิงความร้อนในที่พักอาศัย
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ในการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระบายอากาศภายในที่พักอาศัย

ทฤษฎี

จากการระบายอากาศผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นในที่พักอาศัย ซึ่งมีผลทำให้ความชื้นและเอนทัลปีจำเพาะของอากาศภายในที่พักอาศัยมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

จากแผนภูมิไซโครเมตริกแสดงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติต่างๆ ที่เป็นส่วนผสมของอากาศแห้งและไอน้ำในช่วงอุณหภูมิ 0-50°C [9] สามารถคำนวณอัตราส่วนความชื้นและค่าเอนทัลปีจำเพาะ ได้ดังนี้

$$W = 0.62198(p_w/P - p_w) \quad (1)$$

เมื่อ W คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ ($\text{kg}_w/\text{kg}_{da}$)

P คือ ความดันบรรยากาศ (Pa)

ความดันของไอน้ำ p_w คำนวณจาก

$$p_w = \phi \cdot p_{ws} \quad (2)$$

เมื่อ ϕ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

p_{ws} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Pa) และ p_{ws} สามารถคำนวณได้จาก

$$P_{ws} = e^{(\alpha)} \quad (3)$$

และ

$$\alpha = A \cdot T^2 + B \cdot T + C + D \cdot T^{-1} \quad (4)$$

$$\text{เมื่อ } A = +0.1255001965 \times 10^{-4}$$

$$B = -0.1923595289 \times 10^{-1}$$

$$C = +0.2705101899 \times 10^{+2}$$

$$D = -0.6344011577 \times 10^{+4}$$

และสามารถคำนวณค่าเอนทัลปีจำเพาะ ได้จาก

$$h = T + W(2501 + 1.805 \cdot T) \quad (5)$$

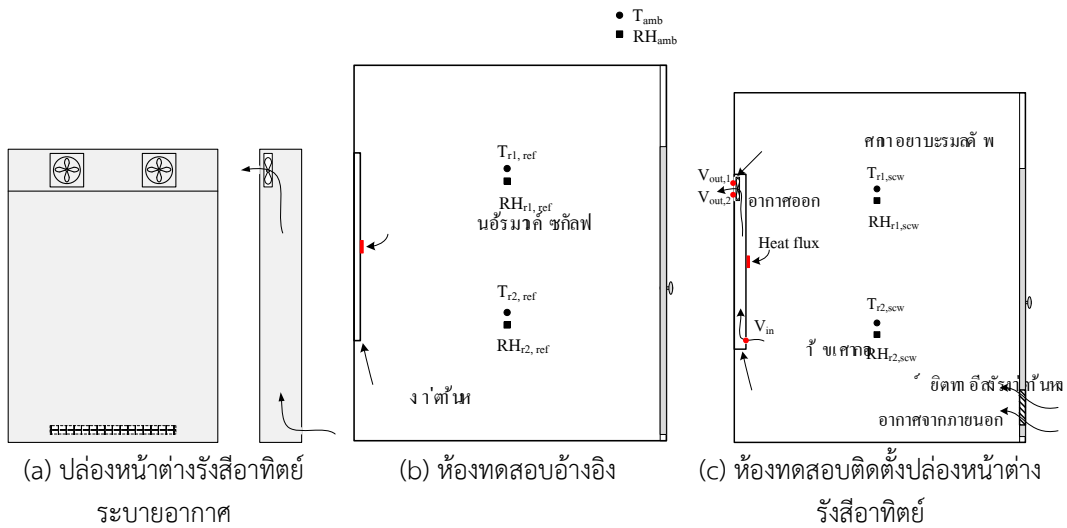
เมื่อ h คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของอากาศ (kJ/kg_{da})

T คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับบ้านพักอาศัยจริงในห้องทดสอบจำนวน 2 ห้อง ที่มีขนาดห้อง 30 m^3 เท่ากัน โดยห้องที่ 1 เป็นห้องอ้างอิงไม่มีการระบายอากาศ และห้องที่ 2 เป็นห้องที่มีการติดตั้งปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์พร้อมพัดลมระบายอากาศ

รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งการตรวจวัดข้อมูลในบ้านทดสอบ โดยอุปกรณ์บันทึกข้อมูลค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (UNI-T: model. UT330B) ความเร็วลมของอากาศ (KIMO: model. VT 100) และค่ารังสีอาทิตย์ (Delta ohm: model. HD2102.2)



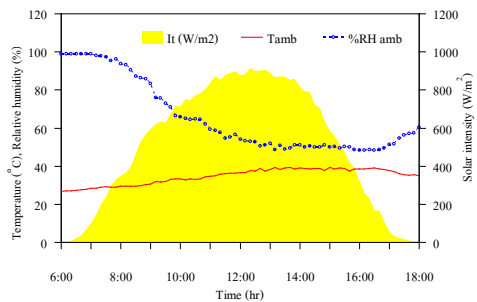
รูปที่ 1 ห้องทดสอบ

ผลการวิจัย

ดังที่ได้กล่าวในตอนต้นถึงการสร้างอัตราการเปลี่ยนอากาศผ่านห้องพักอาศัยไม่ควรน้อยกว่า 7 เท่าของปริมาตรห้องภายใน 1 ชั่วโมง และจากแผนภูมิความสบายของการถ่ายเทอากาศสำหรับประเทศไทย ความเร็วลมที่ไหลผ่านห้องทดสอบที่ 0.5 m/s ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับอัตราการเปลี่ยนอากาศ

1. สภาพอากาศแวดล้อม

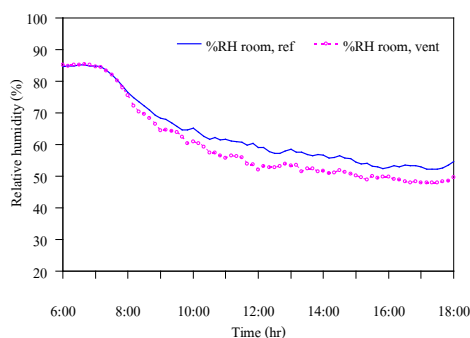
หลังจากได้ทำการทดสอบ ข้อมูลการทดสอบที่มีผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมน้อยที่สุดได้ถูกนำเสนอในบทความ ในรูปที่ 2 แสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมและค่ารังสีอาทิตย์ จะเห็นได้จากค่ารังสีอาทิตย์ที่วัดได้ ไม่มีผลกระทบจากเงาของสิ่งปลูกสร้างหรือต้นไม้และเงาจากการเคลื่อนที่ของเมฆ ซึ่งค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงสุดอยู่ที่ 900 W/m² และ 40°C ตามลำดับ ในส่วนความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงสุดประมาณ 99%ในช่วงเช้าและจะมีค่าลดลงต่ำสุดในช่วง 13:00 น. ประมาณ 48%



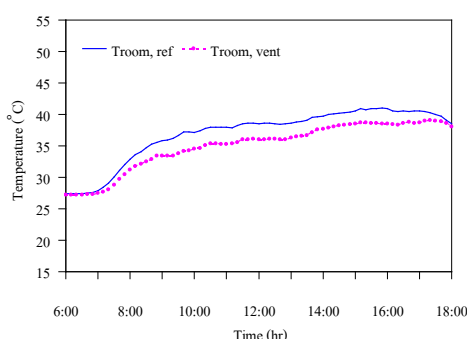
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง และค่ารังสีอาทิตย์

2. ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ

จากรูปที่ 3 และ 4 แสดงความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศภายในห้องทดสอบ จะเห็นได้ว่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิกระเปาะแห้งในห้องทดสอบที่ติดตั้งปลองหน้าต่างรังสีอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับห้องทดสอบอ้างอิง ซึ่งค่าเฉลี่ยของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ลดลงของห้องทดสอบที่ติดตั้งปลองหน้าต่างรังสีอาทิตย์อยู่ที่ 3.6% และ 1.9°C ตามลำดับ



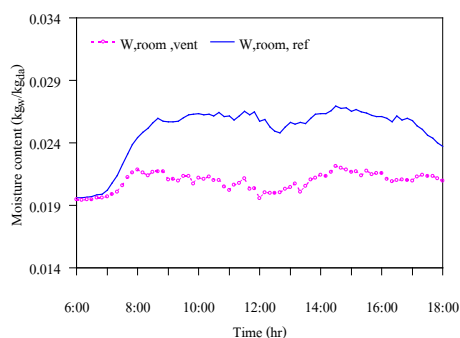
รูปที่ 3 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ



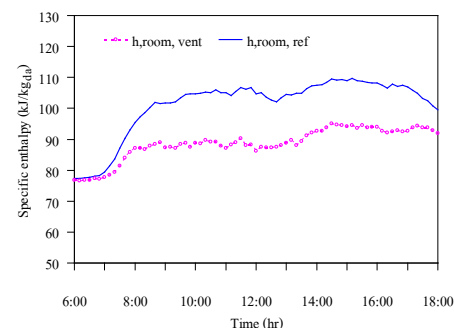
รูปที่ 4 อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ

3. อัตราส่วนความชื้นและเอนทัลปีจำเพาะ จากข้อมูลในรูปที่ 3 และ 4 นำมาคำนวณหา ค่าอัตราส่วนความชื้นในอากาศและค่าเอนทัลปีจำเพาะ ได้จากสมการที่ (1) ถึง (5)

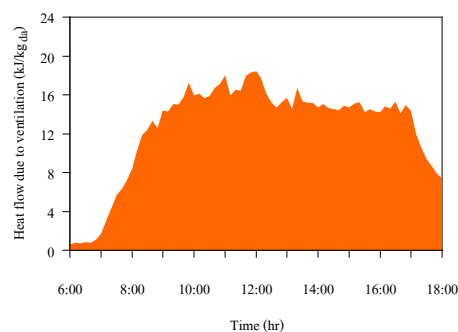
รูปที่ 5 แสดงค่าอัตราส่วนความชื้นในห้องทดสอบ ซึ่งห้องทดสอบที่ติดตั้งปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์สามารถลดความชื้นได้ในช่วง 0.141-6.16 g_w/kg_{da} และเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ 4.11 g_w/kg_{da} ซึ่งเกิดจากการลดความชื้นด้วยการถ่ายเทอากาศโดยพัดลมระบายอากาศผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์นั้นส่งผลให้ค่าเอนทัลปีจำเพาะของอากาศลดลง ในช่วง 0.6-18.5 kJ/kg_{da} และเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ 12.6 kJ/kg_{da} ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 อัตราส่วนความชื้นของอากาศ



รูปที่ 6 เอนทัลปีจำเพาะของอากาศ

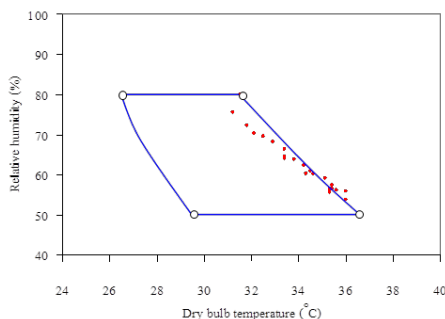


รูปที่ 7 การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระบายอากาศ

จากข้อมูลในรูปที่ 6 สามารถแสดงค่าการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระบายอากาศ ได้ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งผลรวมของค่าการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระบายอากาศออกจากห้องทดสอบที่ติดตั้งปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ตลอดทั้งวันมีค่าประมาณ 918 kJ/kg_{da} และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 15 kJ/kg_{da}

4. ความสบายเชิงความร้อน

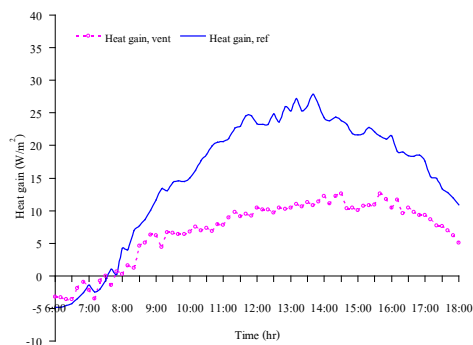
จากการลดความชื้นโดยการระบายอากาศผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ เมื่อนำค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ได้จากการเก็บข้อมูล ปล็อตลงในแผนภูมิความสบายการถ่ายเทอากาศดังแสดงในรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของกลุ่มข้อมูลระหว่างความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิกระเปาะแห้งส่วนใหญ่อยู่ในขอบเขตของแผนภูมิความสบายของการถ่ายเทอากาศ ทั้งนี้เกิดจากการระบายอากาศผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ อย่างไรก็ตามหากมีการเพิ่มอัตราการเปลี่ยนอากาศหรือความเร็วลมของอากาศที่ไหลผ่านห้องทดสอบจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระบายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะมีผลทำให้ความชื้นและอุณหภูมิภายในห้องมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 8 แผนภูมิความสบายของการถ่ายเทอากาศ [1]

5. ความร้อนส่งผ่านกระจก

จากการลดความชื้นด้วยการระบายอากาศผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์



รูปที่ 9 ความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกและปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์

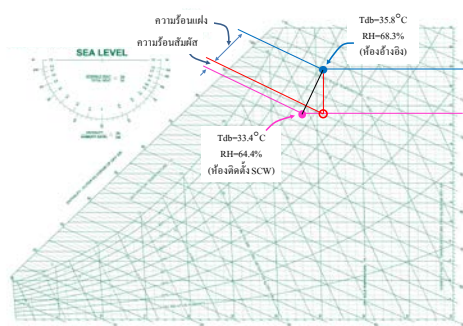
เมื่อทำการวัดค่าความร้อนส่งผ่านหน้าต่างกระจกด้วยอุปกรณ์วัดค่าฟลักซ์ความร้อน เปรียบเทียบระหว่างห้องทดสอบอ้างอิงและห้องทดสอบที่ทำการติดตั้งปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าห้องทดสอบที่ติดตั้งปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์สามารถลดความร้อนส่งผ่านกระจกเข้าสู่ห้องทดสอบได้ในช่วง $2-17 \text{ W/m}^2$ และเฉลี่ยอยู่ที่ 10.24 W/m^2 ซึ่งผลของการลดความชื้นโดยการระบายอากาศผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ช่วยลดความร้อนส่งผ่านหน้าต่างเข้าสู่ที่พักอาศัยได้อีกด้วย

การแสดงค่าด้วยแผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric chart) ซึ่งเป็นแผนภูมิแสดงคุณสมบัติต่างๆ ของอากาศแห้งและไอน้ำ ซึ่งคุณสมบัติบนแผนภูมิไซโครเมตริก ประกอบด้วย อุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียก ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราส่วนความชื้น ปริมาตรจำเพาะ เอนทัลปีจำเพาะ และอุณหภูมิอิมพั ดังแสดงในรูปที่ 10

เพื่อให้เข้าใจถึงเหตุผลในการลดความชื้นในห้องพักอาศัยได้มากยิ่งขึ้น จึงยกตัวอย่างจากผลการทดลองที่ทำการเก็บข้อมูลของห้องทดสอบที่ติดตั้งปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์และห้องอ้างอิง ดังข้อมูลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าที่ได้จากการทดสอบ

ค่า	ห้อง	อ้างอิง	ติดตั้ง SCW
T_{db} ($^{\circ}\text{C}$)		35.8	33.4
RH (%)		68.3	64.4
W ($\text{kg}_w/\text{kg}_{da}$)		25.8	21.14
h (kJ/kg_{da})		102.209	87.737



รูปที่ 10 แสดงการลดความชื้นบนแผนภูมิไซโครเมตริก [10]

ข้อมูลในตารางที่ 1 เป็นข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลของห้องทดสอบที่ติดตั้งปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ และห้องอ้างอิง ที่เวลา 9:00 น. เมื่อนำค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของห้องทดสอบที่ติดตั้งปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ ($T_{db}=33.4^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=64.4\%$) และห้องอ้างอิง ($T_{db}=35.8^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=68.3\%$) กำหนดจุดลงในรูปที่ 10 จะเห็นว่าตำแหน่งของห้องทดสอบที่ติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าห้องอ้างอิง ซึ่งเกิดจากผลของการระบายอากาศผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ และทำให้ค่าเอนทัลปีจำเพาะมีค่าลดลง ซึ่งจะเห็นว่าค่าเอนทัลปีจำเพาะที่ลดลงนั้นคือค่าความร้อนแฝงและค่าความร้อนสัมผัสของอากาศ

สรุปและอภิปรายผล

การลดความชื้นโดยการระบายอากาศผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ด้วยพัดลมระบายอากาศเป็นวิธีการที่น่าสนใจและมีประสิทธิภาพ จากผลการทดสอบสามารถลดความชื้นเฉลี่ยภายในห้องทดสอบได้ประมาณ $4.11 \text{ g}_w/\text{kg}_{da}$ และช่วยถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระบายอากาศเฉลี่ย $15 \text{ kJ}/\text{kg}_{da}$ อีกทั้งยังสามารถลดอุณหภูมิภายในห้องทดสอบได้ประมาณ 1.9°C

ในส่วนของการลดค่าความร้อนส่งผ่านหน้าต่างนั้น การระบายอากาศผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์สามารถลดความร้อนส่งผ่านเฉลี่ยได้ประมาณ $10.24 \text{ W}/\text{m}^2$

จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมและสามารถนำไปออกแบบและส่งเสริมสำหรับการติดตั้งกับหน้าต่างบ้านพักอาศัย เพื่อช่วยการลดความชื้นและอุณหภูมิของอากาศภายในบ้านพักอาศัย อีกทั้งยังช่วยทำให้เกิดการประหยัดพลังงานของเครื่องปรับอากาศ

ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาการลดความชื้นด้วยการระบายอากาศผ่านปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์โดยใช้พัดลมระบายอากาศนั้น การศึกษาที่เสนอแนะในครั้งต่อไปคือ

1. การติดตั้งอุปกรณ์อัตโนมัติสำหรับควบคุมพัดลมระบายอากาศ
2. ทำการศึกษาอัตราส่วนของช่องเปิดที่ปล่องหน้าต่างรังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระบายอากาศ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ “สุดกำแพง” ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัย (switched2020@gmail.com) ในครั้งนี้ และขอบคุณ นางสาวณัชชา พวงสมบัติ ที่ช่วยดำเนินการเก็บข้อมูลการทดลอง

References

- [1] J. Khedari, N. Yamtraipat, N. Pratintong and J. Hirunlabh, "Thailand ventilation comfort chart," *Energy and Buildings*, vol.32, pp. 245-249, Sep. 2000.
- [2] W. Puangsombut, "Cooling load reduction by PV attic ventilation," M. Eng. Thesis (Thermal Technology), King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, TH, 2000.
- [3] J. Hirunlabh, W. Puangsombut, J. Waewsak and J. Khedari, "PV attic ventilation: a simple tool for reducing cooling load and providing comfort," *International Journal of Ambient Energy*, vol.23, no.3 pp. 159-168, Jul. 2002.
- [4] W. Puangsombut, J. Hirunlabh, J. Khedari and U-C. Shin, "Field investigation on moisture reduction by perforated ceiling," *Sustainable Energy and Green Architecture (SEGA) 2003, International Conference*, Bangkok, 2003, pp. (GA213-219).
- [5] N. Nankongnab, W. Puangsombut, S. Insiripong, J. Hirunlabh, J.Khedari and U-C. Shin, "Field investigation on hygrothermal performance of full-vent perforated soffit and ceiling," *Solar Energy*, vol.80, no.8, pp. 936-948, Aug. 2006.
- [6] W. Puangsombut, "Experimental Performance of solar chimney window on school building," *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand*, vol.20, no.4, pp. 70-75, Dec. 2009.
- [7] W. Puangsombut and E. Susakunpaisan, "Enhancement the thermal performance of solar chimney window by PV ventilation system," *INTA-SEGA 2009, International Conference*, Bangkok, 2009, pp. (INTA00145-00207).
- [8] T. Ananacha, W. Puangsombut, J. Hirunlabh and J. Khedari, "Field investigation of the thermal performance of a Thai modern façade wall," *International Journal of Ventilation*, vol.12, no.3, pp. 223-233, Dec. 2013.
- [9] Y. O. Devres, "Psychrometric properties of humid air: Calculation procedures," *Applied Energy*, vol.48, no.1, pp. 1-18, 1994.
- [10] ASHRAE, *Fundamental Hand- book: Chapter 6 Psychrometrics*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, New York, 2001.

ระบบการตรวจวัด รายงานผล ทวนสอบ สำหรับระบบซื้อขายสิทธิการปล่อย ก๊าซเรือนกระจกในประเทศไทย: กรณีศึกษา อุตสาหกรรมแปรรูปพลาสติก ภานุวัฒน์ อู่สารห์เพียร

วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Email: Parnuwat.usa@rmutr.ac.th

Received: May 17, 2020

Revised: June 19, 2020

Accepted: June 22, 2020

บทคัดย่อ

ระบบการตรวจวัด รายงานผล และการทวนสอบ (Measurable, Reportable, and Verifiable: MRV) เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการติดตามประสิทธิภาพของโปรแกรมหรือโครงการลดก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบซื้อขายสิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้น เป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษา ระบบ MRV สำหรับระบบดังกล่าว เพื่อรองรับการติดตามผลในอนาคต วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ สร้าง แนวทางการตรวจวัด รายงานผล และการทวนสอบ สำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปพลาสติก ระบบซื้อขายสิทธิ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในประเทศไทย ข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้ถูกรวบรวมจากการสัมภาษณ์จากผู้ที่มีส่วนได้ ส่วนเสีย การประชุม และงานวิจัย ขอบเขตระบบที่ทำการประเมิน กระบวนการวิธีการ ที่เกี่ยวข้องกับการประเมิน ก๊าซเรือนกระจกถูกนำมาพิจารณาความเหมาะสม ผลที่ได้พบว่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกโรงงานแปรรูป พลาสติกที่เข้าร่วมเป็นกรณีศึกษา อยู่ในระดับ 22,000 – 26,000 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี สัดส่วนแหล่ง ปล่อยก๊าซเรือนกระจก ร้อยละ 97 มาจากการใช้พลังงานไฟฟ้า ร้อยละ 3 เกิดจากน้ำมันเชื้อเพลิงรถยนต์ รถฟอร์คลิฟท์ และอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกการผลิตไฟฟ้าที่ใช้ใน การศึกษานี้ควรได้รับการปรับปรุง เนื่องจากไม่สะท้อนถึงเทคโนโลยีที่โรงไฟฟ้าใช้ในปัจจุบัน ในอนาคตอาจจะ ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงระดับความเหมาะสมความไม่แน่นอนของข้อมูล เพื่อสะท้อนถึงความน่าเชื่อถือของ ระบบ MRV ต่อไป

คำสำคัญ : ระบบเอ็มอาร์วี, อุตสาหกรรมแปรรูปพลาสติก, ระบบซื้อขายสิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจก, การปล่อยก๊าซเรือนกระจก

Measurable Reportable and Verifiable (MRV) system for an Emission Trading Scheme in Thailand: A Case Study of Plastic Converter Industry

Parnuwat Usapein

Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment,

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Email : Parnuwat.usa@rmutr.ac.th

Received: May 17, 2020

Revised: June 19, 2020

Accepted: June 22, 2020

Abstract

Measurable, Reportable, and Verifiable (MRV) system is an instrument tool for tracking the performance of greenhouse gas (GHG) mitigation actions, especially Emission Trading System (ETS). Therefore, it is important to study the MRV system for such program to support future monitoring. The objective of this study is to create the guideline of monitoring, reporting, and verifying GHG data for plastic converter industry using in carbon emission trading system in Thailand. Data related in this study were gathered from interviewing stakeholders, meeting, and research papers. Boundary system and research methodology related with GHG assessment were examined. The result was found that the level of greenhouse gas emission from plastic converter factory participating in this program was in the range of 22,000 – 26,000 tCO₂/year. The obtained data in this study indicated that the proportion of greenhouse gas emission of 97 percent generated from the electricity consumption, while the residual of 3 percent came from fuel consumption using in mobile sources and others. However, the emission factor of electricity production using in this study should be improved because it does not reflect the technology that power plants use today. In the future, it may need to be further studies to determine the degree of uncertainty in the data to reflect the reliability of the MRV system for the emission trading scheme.

Keywords : MRV system, Plastic converter industry, Carbon emission trading system, GHG emissions

บทนำ

ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกกำลังให้ความสำคัญต่อระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโลก เนื่องจากเป็นที่ชัดเจนว่าผลกระทบดังกล่าวส่งผลต่อสุขภาพและความเป็นอยู่ของมนุษย์ [1] หลัง ปี ค.ศ.2020 ประเทศต่าง ๆ ได้มีมติที่จะช่วยกันลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยแต่ละประเทศจะดำเนินการส่งแผนการลดก๊าซเรือนกระจก (Intended Nationally Determined Contributions: INDCs) ให้กับสหประชาชาติ เพื่อรับมือกับระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วง 5-10 ปีข้างหน้า ทั้งนี้ ในการประชุมรัฐภาคีกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สมัยที่ 21 (COP21) มากกว่า 180 ประเทศ (หรือคิดเป็นร้อยละ 90 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดทั่วโลก) ได้ส่งแผนดังกล่าวให้กับสหประชาชาติเรียบร้อยแล้ว จากสถานการณ์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าทั่วโลกมีความจริงจังกับการต่อสู้ปัญหาภาวะโลกร้อนเป็นอย่างมาก ประเทศไทยเป็นหนึ่งในหลายประเทศที่ส่งแผนการลดก๊าซเรือนกระจกให้กับสหประชาชาติ นอกจากนั้น ประเทศไทยยังได้จัดทำแผนแม่บทเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พ.ศ. 2558 – 2593 ซึ่งเป็นกรอบการดำเนินงานเพื่อให้ประเทศเตรียมพร้อม ปรับตัว และลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยเป้าหมายระยะสั้นระบุไว้ว่า จะประยุกต์ใช้เครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์เพื่อช่วยในการพัฒนาสังคมคาร์บอนต่ำ เป้าหมายระยะกลาง คือ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลง 7-20% เทียบกับการเติบโตตามสถานการณ์ปกติภายในปี 2020 และเป้าหมายระยะยาว คือ ลดค่าความเข้มพลังงานอย่างน้อย ร้อยละ 25 เทียบกับการเติบโตตามสถานการณ์ปกติ [2]

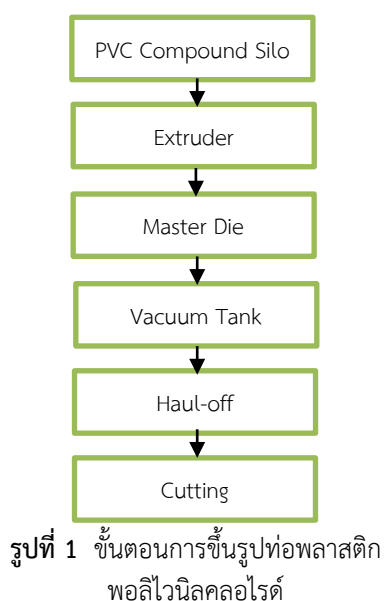
เพื่อตอบสนองต่อเป้าหมายดังกล่าว รัฐบาลไทยจึงต้องดำเนินกลยุทธ์เชิงรุกและใช้เครื่องมือทางนโยบายสำหรับบรรเทาปัญหาที่เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ระบบซื้อขายใบอนุญาต (Emission

Trading System: ETS) เป็นหนึ่งในมาตรการที่มีศักยภาพซึ่งออกแบบมาเพื่อช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [3] ระบบนี้จะดำเนินการจำกัดเพดานการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และแบ่งโควตาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้กับแต่ละโรงงาน หรือโควตาการปล่อยอาจได้มาจากการประมูล ในแต่ละปีโรงงานสามารถปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ไม่เกินโควตาที่ตนเองได้รับ หากโรงงานใดปล่อยเกินโควตาจะต้องหาซื้อส่วนต่างที่เกินจากโรงงานอื่น ในกรณีเดียวกัน หากโรงงานใดสามารถปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ต่ำกว่าระดับโควตาที่ตนเองมี ส่วนที่เหลือสามารถนำมาขายให้กับโรงงานอื่นได้ ทั่วไปตลาดจะเป็นผู้กำหนดโดยตัวของมันเองว่าโรงงานใดจะเป็นผู้ซื้อ หรือผู้ขาย [4] การพิจารณาเป็นผู้ซื้อหรือผู้ขายในตลาดของระบบนี้นั้นจะต้องคำนึงต้นทุนในการลดก๊าซเรือนกระจกของตนเอง เทียบกับราคาของคาร์บอนในตลาด หากต้นทุนการลดก๊าซเรือนกระจกสูงกว่าราคาคาร์บอนในตลาด โรงงานนั้นควรพิจารณาตนเองเป็นผู้ซื้อ ในทางกลับกัน หากต้นทุนในการลดก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่าราคาคาร์บอนในตลาด โรงงานนั้นควรพิจารณาตนเองเป็นผู้ขาย ระบบนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในต่างประเทศ และมีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นกับผู้ประกอบการมากกว่าเมื่อเทียบกับระบบการจัดเก็บภาษีคาร์บอน และเป็นระบบที่รับรองได้ว่าระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจะลดลงเนื่องจากมีการกำหนดเพดานการปล่อยที่แน่นอน

ปัจจุบันประเทศไทย โดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ได้จัดตั้งระบบซื้อขายใบอนุญาตการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจ (Thailand Voluntary Emission Trading System: Thailand V-ETS) เพื่อศึกษาการทำงานของระบบให้เข้ากับบริบทของประเทศไทย อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การติดตามผลการดำเนินโครงการเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีระบบ

ติดตามความก้าวหน้าและประสิทธิภาพของโครงการระบบการตรวจวัด รายงานผล และทวนสอบ (Measurable, Reportable, and Verifiable system: MRV system) เป็นระบบที่มีการใช้ในการบริหารจัดการและดำเนินงานโครงการที่เกี่ยวข้องกับก๊าซเรือนกระจก วัดผลกระทบของการมีระบบนี้ คือ ช่วยให้ข้อมูลที่เกิดขึ้นภายในโครงการมีความแม่นยำถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือ ระบบนี้ถือเป็นส่วนสำคัญของการดำเนินกรอบนโยบาย เพราะสามารถบ่งชี้การกระทำที่มีนัยสำคัญซึ่งเกิดจากการดำเนินนโยบายด้านก๊าซเรือนกระจก [5] ระบบ MRV ดำเนินการภายใต้หลักพื้นฐาน 5 หลัก ได้แก่ ความตรงประเด็น ความสมบูรณ์ ความไม่ขัดแย้ง ความถูกต้อง และความโปร่งใส [6] ซึ่งเป็นหลักสำคัญสำหรับการติดตามความก้าวหน้าของระบบและประเมินประสิทธิภาพของนโยบายที่ใช้ในการลดก๊าซเรือนกระจก

กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก ประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญ คือ การปรับปรุงคุณสมบัติเม็ดพลาสติก การขึ้นรูป การหล่อขึ้นงาน และการตกแต่งชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 1



จากรูปที่ 1 พงพอลิไวนิลคลอไรด์เรซิน หรือพีวีซีเรซิน ถูกนำมาผสมกับสารเติมแต่งที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์และจัดเก็บไว้ในหน่วย PVC Compound Silo จากนั้นเข้าเครื่องอัดรีด (Extruder) โดยใช้ฮีตเตอร์ให้ความร้อนเมื่อพีวีซีหลอมจะถูกดันให้ไหลออกมาสู่แบบแม่พิมพ์ (Master Die) ผลิตภัณฑ์ชนิดแข็ง เช่น ท่อ จะใช้อุณหภูมิในการหลอมตัวในช่วง 170-210 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปด้วยระบบสุญญากาศ (Vacuum Tank) และกระบวนการลำเลียงสายท่อ (Haul-off) และตัดตามขนาดที่ต้องการ (Cutting) ทั้งนี้สังเกตได้ว่าแหล่งพลังงานทั้งหมดในกระบวนการผลิตมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด ส่วนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจะมาจากการจัดเก็บ และขนส่งผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้า

การศึกษารังนี้มีวัตถุประสงค์ ศึกษาแนวทางการตรวจวัด รายงานผล และการทวนสอบ สำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปพลาสติก (Plastic Converter) ระบบซื้อขายสิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในประเทศไทย เพื่อบ่งชี้ถึงอุปสรรคในการศึกษาระบบ MRV และนำเสนอข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาปรับปรุงระบบดังกล่าว

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาแนวทางการ ตรวจวัด รายงานผล และการทวนสอบ สำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปพลาสติก (Plastic Converter) ระบบซื้อขายสิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในประเทศไทย
2. เพื่อบ่งชี้ถึงอุปสรรคในการศึกษาระบบ MRV และนำเสนอข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาปรับปรุงระบบดังกล่าว

ระเบียบวิธีวิจัย

1. กระบวนการคัดเลือกโรงงานเพื่อเข้าร่วมโครงการ
ในขั้นตอนนี้ นักวิจัยแนะนำให้เสนอระบบซื้อขายสิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแก่โรงงาน และสนใจ

โรงงานที่มีศักยภาพในการเข้าร่วมโครงการในการศึกษานี้ อุตสาหกรรมแปรรูปพลาสติกเป็นกลุ่มเป้าหมายหลัก เนื่องจากเกี่ยวข้องโดยตรงกับอุตสาหกรรมต้นน้ำที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสูง โดยโรงงานที่เข้าช่วยการคัดเลือกจะประกอบด้วยคุณสมบัติต่อไปนี้ 1) โรงงานมีความสามารถในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรได้ 2) องค์กรมีนโยบายที่ชัดเจนที่เกี่ยวข้องกับการลดก๊าซเรือนกระจก 3) องค์กรสามารถอนุญาตให้มีการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ ซึ่งรวมถึงการปล่อยทางตรงและทางอ้อม โดยในการศึกษานี้ มีบริษัทแปรรูปพลาสติกเข้าร่วม 1 โรงงาน เพื่อเป็นกรณีศึกษาของกลุ่มอุตสาหกรรมนี้

2. กระบวนการ MRV

2.1 การตรวจวัด และเก็บข้อมูล

นักวิจัยเข้าสำรวจแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโรงงานกรณีศึกษา พร้อมทั้งเก็บข้อมูลการตรวจวัดในแต่ละแหล่งปล่อย โดยจะต้องบ่งชี้แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ครบทุกแหล่ง นอกจากนั้นนักวิจัยกรอกแบบฟอร์มการเก็บข้อมูลในรูปแบบไฟล์ Excel

2.2 กระบวนการรายงานผล

หลังจากเก็บข้อมูลครบถ้วนแล้วดำเนินการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละแหล่งสำหรับระบบซื้อขายสิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจ ประเทศไทย จะพิจารณาประเภทของก๊าซเรือนกระจก เฉพาะ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่านั้น การรายงานทำในรูปแบบไฟล์ Word ซึ่งจัดทำในรูปแบบเดียวกันกับการรายงานผลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกองค์กร (Carbon footprint organization) ที่จัดทำขึ้นโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) หรือ อบก.

2.3 กระบวนการทวนสอบ

หลังจากดำเนินการจัดทำรายงานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเสร็จเรียบร้อยแล้ว ดำเนินการติดต่อผู้ทวนสอบที่ขึ้นทะเบียนกับ อบก. เพื่อทำการทวนสอบ ทั้งนี้ ประเด็นข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เกิดขึ้น

ระหว่างกระบวนการทวนสอบ จะถูกเก็บรวบรวมเพื่อนำไปสู่การปรับปรุงในอนาคต

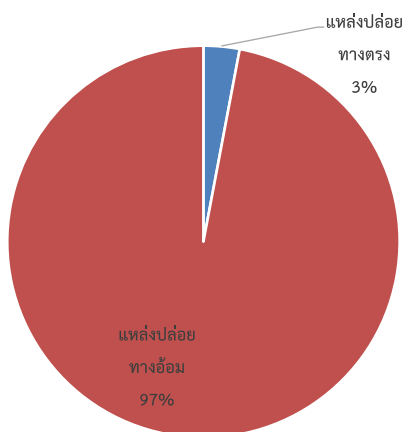
2.4 ขอบเขตการประเมินระบบ

ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการเก็บข้อมูล ปีฐานและปีที่ใช้เปรียบเทียบปัจจุบัน เพื่อประเมินการลดลงของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กรและประเมินระเบียบวิธีการคำนวณที่เหมาะสมในแต่ละแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ผลการวิจัย

1. ผลการประเมินก๊าซเรือนกระจก

จากการเก็บข้อมูลโรงงานกรณีศึกษาที่เข้าร่วมในโครงการ พบว่า แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโรงงานแปรรูปพลาสติก ประกอบด้วย แหล่งปล่อยทางตรง และแหล่งปล่อยทางอ้อม จากรูปที่ 2 พบว่า แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกร้อยละ 97 (ประมาณ 23,055 ตันคาร์บอนไดออกไซด์) มาจากแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม ส่วนที่เหลือมาจากแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง (ประมาณ 704.13 ตันคาร์บอนไดออกไซด์) ทั้งนี้ ร้อยละ 97 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว



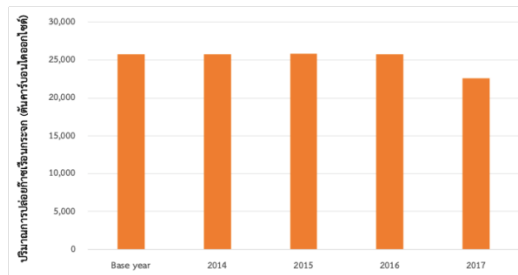
รูปที่ 2 จำแนกแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโรงงานแปรรูปพลาสติก

สำหรับแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง ส่วนใหญ่ประกอบด้วยแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกขนาดเล็ก แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงและสัดส่วนการปล่อย

ลำดับที่	แหล่งปล่อย	สัดส่วน
การเผาไหม้เคลื่อนที่		
	น้ำมันดีเซลรถพนักงาน	17.79
	น้ำมันดีเซลรถฟอร์คลิฟท์	48.63
	น้ำมันเบนซินสำหรับรถยนต์บริษัท	11.22
	LPG สำหรับรถฟอร์คลิฟท์	18.33
การเผาไหม้อยู่กับที่		
	น้ำมันดีเซลสำหรับ Fire Pump + Generator	0.58
	น้ำมันดีเซลสำหรับข้อมดับเพลิงประจำปี	0.004
	น้ำมันเบนซินสำหรับการข้อมดับเพลิง	0.015
	ก๊าซหุงต้มสำหรับโรงอาหาร	3.38
	ก๊าซหุงต้มสำหรับข้อมดับเพลิง	0.01
	การเกิดการเผาไหม้ก๊าซอะเซทิลีนในการเชื่อมบำรุง	0.03
การรั่วไหล		
	ถังดับเพลิงประเภท CO ₂	0.01

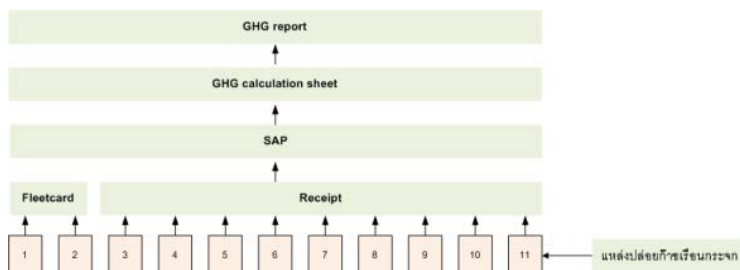
การเก็บข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ช่วงปี ค.ศ. 2014-2017 เทียบกับ ปีฐาน แสดงดังรูปที่ 3 พบว่า ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละปี มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นในปี ค.ศ. 2017 ระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลงร้อยละ 12 เมื่อเทียบกับปีฐาน



รูปที่ 3 ปริมาณปล่อยก๊าซเรือนกระจก ช่วงปี ค.ศ. 2014-2017 เทียบกับปีฐาน

2. กระบวนการทวนสอบ

ระดับการทวนสอบรายงานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับระบบซื้อขายสิทธิภาคสมัครใจ ประเทศไทย ถูกกำหนดให้ต้องเป็นระดับ สมเหตุสมผล เท่านั้น ซึ่งถือเป็นครั้งแรกของประเทศไทยที่จะต้องดำเนินการทวนสอบด้วยระดับนี้ การทวนสอบตามมาตรฐาน ISO14064-3 จะแบ่งออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่ ระดับจำกัด (Limited) และระดับสมเหตุสมผล (Reasonable) ซึ่งระดับสมเหตุสมผล จะมีความคลุมเคล้าในการตรวจสอบข้อมูลมากกว่า กล่าวคือ ผู้ทวนสอบจะลงลึกถึงที่มาของข้อมูลมากกว่าระดับจำกัด โดยจะตรวจสอบถึงความถูกต้องของข้อมูลและความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์เก็บข้อมูล รวมถึงความเสี่ยงของความผิดพลาดในการเคลื่อนย้ายข้อมูลแต่ละช่วง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผังการเก็บข้อมูลแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพื่อจัดทำรายงาน

3. ข้อเสนอแนะ

จากการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผล พบว่า ข้อที่ควรปรับปรุงระบบ MRV ได้แก่

1) การเลือกใช้ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission factor: EF) เพื่อคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้า (แหล่งปล่อยทางอ้อม) ควรมีการปรับปรุง แหล่งผลิตไฟฟ้าของโรงงานกรณีศึกษาที่รับซื้อเข้ามาใช้เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมซึ่งใช้เชื้อเพลิงหลักได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันค่า EF ที่เลือกใช้เป็นค่ากลางของประเทศซึ่งมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง หากเลือกใช้ค่า EF ซึ่งใช้เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าประเภทเดียวกันจะสะท้อนถึงความเป็นจริงมากกว่า

2) แหล่งปล่อยทางตรง ประกอบด้วย 11 แหล่ง ซึ่งแต่ละแหล่งมีส่วนน้อยมาก เห็นควรพิจารณาให้ไม่ต้องรายงานแหล่งปล่อยที่ไม่มีความสำคัญ เพื่อลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการเก็บข้อมูล เช่น น้ำมันเบนซิน และดีเซลในการซ่อมดับเพลิง การเผาไหม้ก๊าซอะเซทิลีนในการเชื่อมบำรุง และถังดับเพลิงประเภท CO₂ เป็นต้น

สรุปและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ ระบบ MRV ได้ถูกจัดตั้งขึ้นเพื่อดำเนินการควบคุมดูแลข้อมูลการจัดทำรายงานการปล่อยก๊าซเรือนกระจก สำหรับระบบซื้อขายใบอนุญาตการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจ ประเทศไทย โรงงานแปรรูปพลาสติก ซึ่งมีผลิตภัณฑ์หลัก คือ ท่อพีวีซี ได้เข้าร่วมเป็นกรณีศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ ผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกพบว่า โรงงานมีระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ที่ 23,759 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเกิดจากแหล่งปล่อยทางตรง ร้อยละ 3 และ แหล่งปล่อยทางอ้อม (การใช้พลังงานไฟฟ้า) ร้อยละ 97

อย่างไรก็ตาม ประเด็นที่ควรปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรายงานผลการปล่อยก๊าซเรือน

กระจก ได้แก่ การเลือกใช้ค่า EF ของการผลิตไฟฟ้าที่สะท้อนตรงกับความเป็นจริงของเทคโนโลยีที่ใช้ และการขอยกเลิกการรายงานแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ไม่มีความสำคัญ เพื่อลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการเก็บข้อมูล

โดยสรุปแล้ว พบว่า ระบบ MRV ที่สร้างขึ้นในปัจจุบันสามารถนำมาใช้งานได้กับโรงงานแปรรูปพลาสติก แต่อาจจะต้องมีการปรับปรุงเล็กน้อยตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตาม เพื่อปรับปรุงคุณภาพของข้อมูลก๊าซเรือนกระจก ควรตรวจสอบระดับความไม่แน่นอนที่เหมาะสมในแต่ละแหล่งที่มา การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty assessment) สามารถสะท้อนคุณภาพของข้อมูลก๊าซเรือนกระจกและความน่าเชื่อถือของระบบ MRV ที่ใช้ในโครงการได้ จากกรณีศึกษานี้ แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่เกิดจากการใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นแหล่งก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม เมื่อประเมินความไม่แน่นอนของบัญชีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกพบว่า อยู่ในระดับ ดี (มีค่าความไม่แน่นอน ไม่เกิน ± 15) ซึ่งคุณภาพบัญชีก๊าซเรือนกระจกจะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับโรงงานกรณีศึกษาที่อยู่ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้นที่มีแหล่งก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่มาจากแหล่งปล่อยโดยตรง [1] และมีอุปกรณ์การตรวจวัดที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำ ประสิทธิภาพความแม่นยำสูง อยู่ในระดับ ดีมาก (มีค่าความไม่แน่นอน ไม่เกิน ± 5)

References

- [1] P. Usapein, O. Chavalparit, "A start-up MRV system for an emission trading scheme in Thailand: A case study in the petrochemical industry," *Journal of Cleaner Production*, vol.142, pp. 3396-3408, 2017.

- [2] Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, *Thailand Climate Change Master Plan*, Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, Bangkok, Thailand, 2015.
- [3] Z. Liao, X. Zhu, and J. Shi, “Case study on initial allocation of Shanghai carbon emission trading based on Shapley value,” *Journal of Cleaner Production*, vol.103, pp. 338-344, 2015.
- [4] OECD, *Adopted by the OECD Committee on Fiscal Affairs on 26 June 2014*, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, France, 2014.
- [5] UNFCCC, *Views on the General Guidelines for Domestic Measurement, Reporting and Verification of Domestically Supported Nationally Appropriate Mitigation Actions by Developing Country Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, Bonn, Germany, 2013.
- [6] Y. Pang, G. Thistlethwaite, J. Watterson, S. Okamura, J. Harries, A. Varma, E.L. Cornu, *How to Set up National MRV Systems, Draft 4.0*, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Bonn, Germany, 2016.

การลดการถ่ายเทความร้อนผ่านฝ้าเพดานด้วยระบบระบายอากาศ เซลล์แสงอาทิตย์

จิระศักดิ์ พุกคำ^{1*}, สมชาย ทิพย์อ้าย², ดิณณภพ แพงผม³

¹สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²สถาปัตยกรรมและการออกแบบชุมชนเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Email : Jirasak.puk@rmutr.ac.th^{1*}

Received: May 28, 2020

Revised: June 23, 2020

Accepted: June 24, 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดความร้อนและการพาความร้อนผ่านฝ้าเพดานที่มีการระบายอากาศซึ่งใช้ระบบระบายอากาศเซลล์แสงอาทิตย์ มุมหลังคาที่ใช้ในการทดสอบคือ 30° โดยขนาดของตัวห้อง กว้าง 1 m ยาว 1 m สูง 1 m ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิสูงห้องใต้หลังคามีค่า 47-48°C อุณหภูมิผิวเพดานด้านบนบ้านอ้างอิงมีค่าสูงสุด 44.5°C ซึ่งสูงกว่าบ้านทดสอบ 3.2°C ผิวเพดานด้านล่างของบ้านทดสอบมีค่าอุณหภูมิสูงสุด 41.5°C ค่าอุณหภูมิแตกต่างสูงสุดที่ผิวเพดานด้านล่างมีค่า 4.3°C จากการถ่ายเทความร้อนผ่านเพดาน บ้านที่ติดตั้งด้วยระบบระบายอากาศด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่า โดยความแตกต่างของอุณหภูมิห้องสูงสุดของบ้านทั้งสองคือ 4.2°C จำนวนอากาศเปลี่ยนแปลง (ACH) คือ 127-132 m³/hr ค่าการพาความร้อนของบ้านที่ติดตั้งระบบระบายจะมีค่าต่ำกว่าบ้านอ้างอิงเฉลี่ยตลอดทั้งวัน 190 W/m².K และเปอร์เซ็นต์การลดการถ่ายเทความร้อนผ่านฝ้าเพดานเฉลี่ยทั้งวันมีค่า 30-34 % ผลจากการติดตั้งระบบระบายอากาศเซลล์แสงอาทิตย์สามารถลดปริมาณความร้อนสะสมภายในห้องทดสอบ

คำสำคัญ : ระบบระบายอากาศเซลล์แสงอาทิตย์, การถ่ายเทความร้อน, การพาความร้อน

Heat gain reduction through ceiling by PV ventilation system

Jirasak Pukdum^{1*}, Somchai Thiye², Tinnapob Phengpom³

¹Department of Facility Management, Faculty of Architecture and Design Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Salaya, Puthamonthon, Nakhonpathom, Thailand

²Department of Architecture Urban Design, Faculty of Architecture and Design Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Salaya, Puthamonthon, Nakhonpathom, Thailand

³Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment (RCSEE), Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Salaya, Puthamonthon, Nakhonpathom, Thailand

Email : Jirasak.puk@rmutr.ac.th^{1*}

Received: May 28, 2020

Revised: June 23, 2020

Accepted: June 24, 2020

Abstract

The objective of this research is to study heat gain reduction and convective heat transfer through the ceiling by PV ventilation system. The roof of the test house is an angle of 30 degrees. The dimension of the room as (W:1xL:1 xH:1 m). The results indicated that the attic temperature is 47-48°C. The upper ceiling surface temperature of reference house is 44.5°C, which is higher than the test house 3.2°C. The bottom ceiling surface of the test house has a maximum temperature of 41.5°C. The maximum temperature difference at the bottom ceiling surface is 4.3°C. From heat transfer through the ceiling, the house was equipped with a PV ventilation system shown lower temperature values. The highest room temperature difference of both houses is 4.2 °C. The number of air changes (ACH) is 127-132 m³/hr. The convective heat transfer of the house with PV ventilation system is lower than the reference house throughout the day about 190 W/m². K. The average percentage of heat gain reduction through the ceiling during the day is 30-34%. The result of installing a PV ventilation system can reduce the amount of heat accumulated in the house.

Keywords : PV ventilation system, Heat transfer, The convective heat transfer

บทนำ

ด้วยอิทธิพลจากค่ารังสีอาทิตย์จะแผ่เข้ามาสู่ตัวอาคารหรือที่พักอาศัย หลังคาจึงเป็นส่วนหนึ่งที่มีสัมผัสกับแสงแดดมากที่สุด [1] ความร้อนส่วนนี้จะถูกถ่ายเทเข้ามาสู่บริเวณห้องใต้หลังคา และไปยังบรรยากาศของห้อง ด้วยวิธีการนำ การพา และการแผ่รังสี เหตุนี้จึงนำไปสู่การใช้วัสดุผนังหลังคาเพื่อลดการแผ่รังสีอาทิตย์เข้าสู่ตัวบ้าน การใช้หลังคาสะท้อนแสง และการควบคุมการแผ่รังสีเพื่อลดภาระระบบปรับอากาศภายในบ้าน [2] การปรับปรุงคุณสมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของวัสดุหลังคาเพื่อช่วยป้องกันความร้อนสะสมของพื้นผิวภายนอก [3] นอกจากการเลือกใช้วัสดุในการมุงหลังคาเพื่อลดค่าการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวบ้านแล้ว [4] ยังพัฒนาการระบายความร้อนออกจากห้องใต้หลังคาหรือตัวบ้านโดยใช้ระบบพัดลมระบายอากาศร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อลดภาระความร้อนที่สะสมอยู่ภายในหลังคา การควบคุมของระบบเป็นการทำงานของการพัดลมระบายอากาศ จากการทดลองพบว่าระบบนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าเพียง 30 W และลดภาระความร้อนประมาณ 250 W ที่พื้นที่เพดาน 100 m² สามารถคืนทุนภายใน 1 - 1.34 ปี เมื่อใช้ในห้องที่มีการปรับอากาศวันละ 4 - 8 hr/day นอกจากนี้ [5] ทดสอบติดตั้งพัดลมติดตั้งชนิดดูดอากาศ (Propeller Ventilation Fan) จำนวน 7 ตัวจากพื้นที่ที่ครอบคลุมระยะความยาวทั้งหมด 225 m โดยอุณหภูมิอากาศลดลงคิดเป็นร้อยละ 26.6 ซึ่งต่อมา [6] ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างหลังคาคอนกรีตทั่วไป (SRC) กับหลังคาฉนวนกันความร้อนอากาศแบบธรรมชาติร่วมกับพัดลมกระแสตรง (RSCTV) ผลการทดลองพบว่าบ้านที่ติดตั้งหลังคาฉนวนกันความร้อนอากาศ มีอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องต่ำกว่าบ้านที่ติดตั้งหลังคาคอนกรีตทั่วไป

สำหรับประเทศไทยแล้วค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ทั่วประเทศมีค่ารายวันเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 18.0 MJ/m²-day [7] จะเห็นว่าประเทศไทยมีค่า

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง จึงมีการพัฒนาการใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มาติดตั้งเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งทำให้มีการนำระบบหลังคาเซลล์แสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้ระบายอากาศห้องใต้หลังคาพร้อมกับพัดลมไฟฟ้า ซึ่งสามารถช่วยลดความร้อน ผ่านหลังคาเข้าสู่ตัวบ้านได้ดีกว่า เมื่อทดลองเปรียบเทียบกับหลังคาคอนกรีตทั่วไปประมาณร้อยละ 56.45 [8] แต่ปัญหาการระบายอากาศเกินความจำเป็นออกจากห้องปรับอากาศนั้นเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานของระบบปรับอากาศ ชุดควบคุมพัดลมระบายอากาศได้ถูกพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการควบคุมการระบายอากาศสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากการระบายอากาศเย็นทั้งได้ประมาณ 15% [9] ซึ่งจะเห็นได้จากการติดตั้งพัดลมระบายอากาศสามารถลดความร้อนภายในห้องใต้หลังคาหรือภายในบ้านได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาการลดการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนผ่านฝ้าเพดานโดยการติดตั้งระบบพัดลมระบายอากาศด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดการถ่ายเทความร้อนจากห้องใต้หลังคาผ่านฝ้าเพดานโดยใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนผ่านฝ้าเพดานเข้าสู่ตัวบ้านด้วยวิธีการพาความร้อน

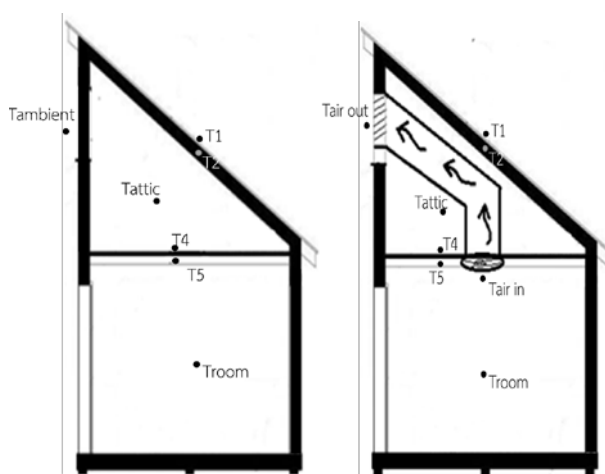
ลักษณะของบ้านทดสอบและการติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดลอง

ในการดำเนินการทดลองได้ทำการทดสอบกับบ้านขนาดเล็กจำนวนสองหลังซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 โดยแต่ละหลังมีขนาด 1 m³ ผนังบ้านทั้งสี่ด้านทำจากแผ่นสมาร์ทบอร์ด และหลังคาบ้านทดสอบทำจากแผ่นเมทัลชีทไม่มีฉนวนติดตั้งในพื้นที่ใต้หลังคา และมีมุมหลังคา 30° [10] จำนวน 2 หลัง โดยที่ 1 หลัง จะไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ระบายอากาศ หลังที่ 2 จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ระบายอากาศด้วยเซลล์

แสงอาทิตย์ขนาด 32 W ใ้บริเวณฝ้าเพดานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.24 cm ซึ่งระบบระบายอากาศด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 50 Wp อุปกรณ์ควบคุมการประจุไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar charge controller) ต่อเข้ากับพัดลมระบายอากาศ

การเก็บข้อมูลนั้นสายเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K (ช่วง: 0 - 800 ° C, ± 0.4 ° C) ติดตั้งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของบ้าน ติดตั้งตัววัดค่ารังสีอาทิตย์ (Kipp & Zonen :

รุ่น CMP11, <2%) หัววัดการถ่ายเทความร้อน (EKO: MF-180 $\pm 2\%$) ดังแสดงในรูปที่ 1 อุปกรณ์ทั้งหมดเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล (Hioki: รุ่น LR8422 - 20, $\pm 0.7\%$) บันทึกข้อมูลทุก 5 นาที ทำการทดลอง ณ ชั้น 10 คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ อ.ศาลายา จ. นครปฐม ที่ละติจูด 13 ° 47'41.3 "N และลองจิจูด 100 ° 17'56.7" E ในช่วงเดือนเมษายน 2562



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดของบ้านตัวอย่างและบ้านทดสอบ

ในช่วงเวลากลางวันการถ่ายเทความร้อนภายในบ้านพักอาศัยจะเกิดขึ้นโดย การแผ่รังสีอาทิตย์ตกกระทบบนผิวหลังคาบางส่วนโดยถูกดูดกลืนและแผ่รังสีเข้าสู่ตัวห้องใต้หลังคาเข้าไปสู่ตัวบ้าน ความร้อนเคลื่อนที่จากผิวหลังคาด้านบนสู่ผิวด้านล่าง และเกิดการพาความร้อน ระหว่างอากาศใต้หลังคา กับผิวหลังคาด้านล่าง ทำให้อากาศบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น และทำให้เกิดการพาความร้อนระหว่างอากาศใต้หลังคาและเพดานเกิดการนำความร้อนขึ้นภายในเนื้อวัสดุฝ้าเพดาน ส่งผลให้ความร้อนเคลื่อนตัวสู่เพดานด้านล่าง จากเพดานจะเกิดการพาความร้อนระหว่างอากาศภายในบ้านกับเพดาน เป็นผลให้อุณหภูมิภายในบ้านเพิ่มขึ้น

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นผิวเพดานและชั้นอากาศใกล้เคียงเพดานสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (1)

$$Q_{cc} = A_c h_{cc} (t_{ac} - t_c) \quad (1)$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่ของเพดาน (m^2)
 h_{cc} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างพื้นผิวเพดานและชั้นอากาศใกล้เคียง ($W/m.K$)
 t_c คือ อุณหภูมิผิวเพดาน ($^{\circ}C$)
 t_{ac} คือ อุณหภูมิอากาศใกล้เคียงผิวเพดาน ($^{\circ}C$)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างพื้นผิวเพดานและชั้นอากาศใกล้เคียงสำหรับบ้านที่ติดตั้งพัดลมระบายอากาศด้วยเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) ซึ่งแนะนำโดย [11]

$$h_{cc} = 0.49ACH^{0.8} \quad (2)$$

สำหรับบ้านที่ไม่ได้ติดตั้งพัดลมระบายอากาศสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างพื้นผิวเพดานและชั้นอากาศใกล้เคียง (h_{cc}) สามารถหาได้จาก

$$Nu = \frac{h.L}{k} \quad (3)$$

เมื่อ Nu คือ ค่านัสเซลน์เบอร์

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างพื้นผิวเพดานและชั้น อากาศใกล้เคียง ($W/m.K$)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m.K$)

ค่าเรย์เลห์ (Rayleigh Number) หรือค่า Ra_L สามารถหาได้จาก

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\alpha)L^3}{\alpha\nu} \quad (4)$$

เมื่อ g คือ ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง (m/s^2)

B คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของอากาศ ($1/K$)

L คือ ค่าความยาวของฝ้าเพดาน (m)

T_s คือ อุณหภูมิผิวเพดาน ($^{\circ}C$)

T_α คือ อุณหภูมิอากาศใกล้เคียงผิว เพดาน ($^{\circ}C$)

α คือ ค่าการแพร่ความร้อน (m/s^2)

ν คือ ความหนืดคินแมติก (m/s^2)

สำหรับค่า $10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}$ เนื่องจากลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่านฝ้าเพดานเข้าสู่ตัวบ้านมีลักษณะการจัดวางเป็นแบบผิวร้อนคว่ำลงดังนั้น

$$Nu = 0.27 Ra_L^{1/4} \quad (5)$$

$$h = \frac{Nu.k}{L} \quad (6)$$

จำนวนการเปลี่ยนอากาศ (Number of air change, ACH) ในบ้านทดสอบคำนวณจาก

$$ACH = Q/V \quad (7)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของบ้านทดสอบ (m^3)

Q คือ อัตราการระบายอากาศ (m^3/hr)

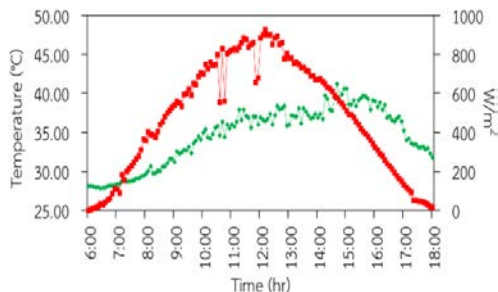
อัตราการไหลของอากาศผ่านฝ้าเพดานที่มีการระบายอากาศโดยใช้ระบบระบายอากาศเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จาก

$$Q = A_c v \quad (8)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของอากาศผ่านช่องเปิด (m/s)

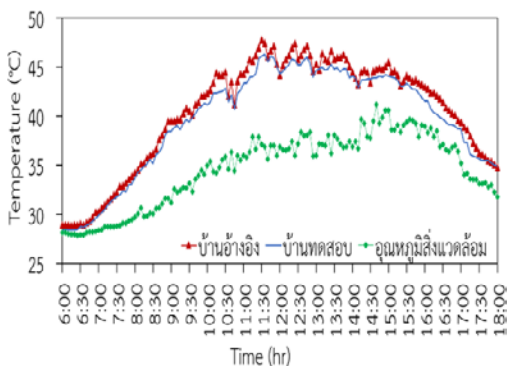
ผลการวิจัย

การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าในช่วงเวลาเช้า ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีค่าสูงสุดที่ $920 W/m^2$ ที่เวลา 12.10 น. ตั้งแต่ช่วงเวลา 13:00 น. ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ค่อย ๆ ลดลง สำหรับค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงสุด $41.2^{\circ}C$ และมีค่าเฉลี่ยประมาณ $36^{\circ}C$ ค่าความเข้มแสงรังสีอาทิตย์เฉลี่ยทั้งวันประมาณ $650 W/m^2$ ตามลำดับ



รูปที่ 2 ค่ารังสีอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

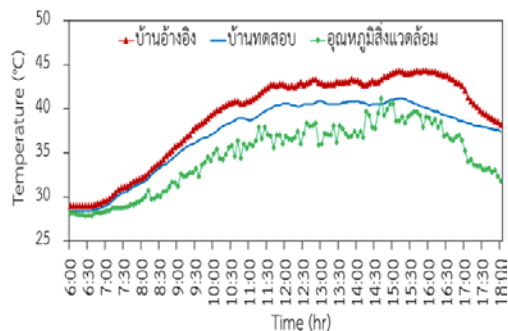
ค่าอุณหภูมิในบริเวณห้องใต้หลังคาได้รับอิทธิพลโดยตรงจากอุณหภูมิด้านล่างของแผ่นวัสดุหลังคา โดยที่วัสดุหลังคาทำมาจากแผ่นเมทัลชีสซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิห้องใต้หลังคาของบ้านอ้างอิง และบ้านทดสอบจะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงเช้าในช่วง 8.40 น. บ้านอ้างอิงเริ่มมีอุณหภูมิที่สูงกว่าเล็กน้อย มีการสะสมความร้อนเพิ่มสูงขึ้นในช่วงเวลากลางวันโดยมีค่าอุณหภูมิสูงประมาณ 47-48°C ในขณะที่บ้านทดสอบจะมีค่าอุณหภูมิสะสมที่ห้องใต้หลังคาต่ำกว่าบ้านอ้างอิงตลอดทั้งวันเฉลี่ย 0.7°C เนื่องจากอากาศบริเวณรอบ ๆ ห้องใต้หลังคาถูกดึงผ่านท่อของระบบระบายอากาศ



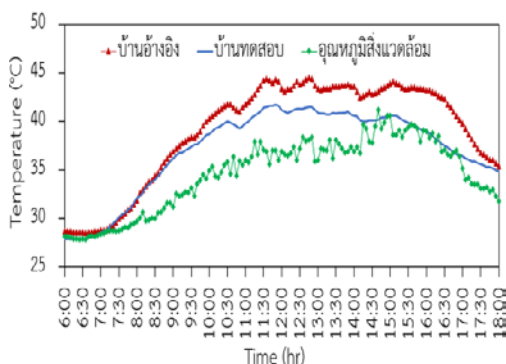
รูปที่ 3 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิห้องใต้หลังคา

การถ่ายเทความร้อนของอุณหภูมิอากาศบริเวณห้องใต้หลังคาและอุณหภูมิห้อง เมื่อพิจารณาแล้วอุณหภูมิผิวเพดานด้านบนและผิวเพดานด้านล่างซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 และ 5 ในช่วงเวลาเริ่มต้นตั้งแต่

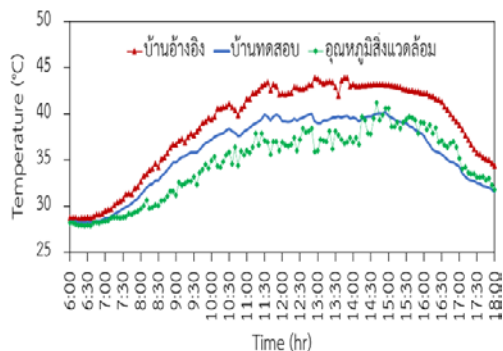
06:00 - 9:00 น. พบว่าเป็นช่วงที่อุณหภูมิสะสมที่บริเวณพื้นผิวด้านบนของฝ้าเพดาน และอุณหภูมิค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่ในช่วงเวลา 10:00 น. โดยอุณหภูมิที่ผิวด้านบนและด้านล่างของฝ้าเพดานบ้านทั้ง 2 หลัง มีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นและลดลงไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิสถานะแวดล้อม โดยบ้านอ้างอิงมีค่าอุณหภูมิผิวเพดานด้านบนสูงสุด 44.5°C ซึ่งสูงกว่าบ้านทดสอบ 3.2°C ความร้อนจากพื้นผิวด้านบนถ่ายเทผ่านเนื้อวัสดุฝ้าเพดาน จากนั้นก็จะเกิดการสะสมความร้อนและการนำความร้อนผ่านเนื้อวัสดุมายังผิวเพดานด้านล่าง โดยที่ผิวเพดานด้านล่างของบ้านทดสอบมีค่าอุณหภูมิสูงสุด 41.5°C ซึ่งในช่วงบ่ายค่าอุณหภูมิแตกต่างสูงสุดที่ผิวเพดานด้านล่างมีค่า 4.3°C เนื่องจากในช่วงบ่ายอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวเพดานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตาม ในขณะที่บ้านอ้างอิงนั้นมีการติดตั้งพัดลมระบายอากาศจึงทำให้ค่าอุณหภูมิไม่ได้สูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4 เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวเพดานด้านบน

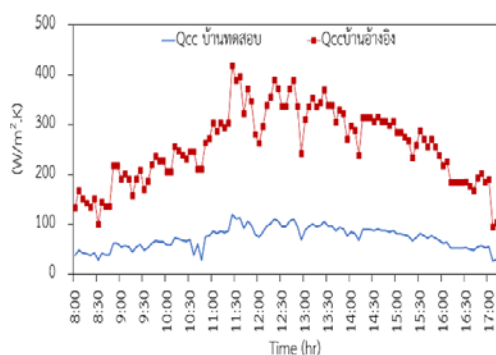


รูปที่ 5 เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวเพดานด้านล่าง



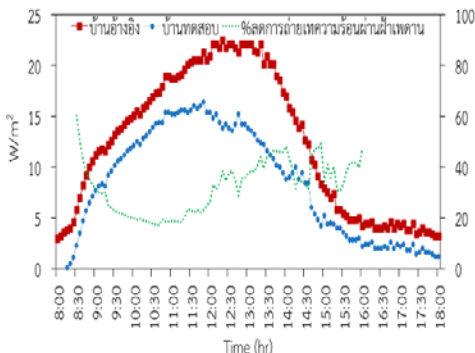
รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิห้อง

อุณหภูมิที่กลางห้องทดสอบของบ้านแสดงดังรูปที่ 6 เมื่อเพดานด้านล่างได้ถ่ายเทความร้อนเข้ามายังภายในห้อง ทำให้เห็นได้ว่าในช่วงเวลา 6:00-7:00 น. มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น อุณหภูมิห้องของบ้านอ้างอิงและทดสอบจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีค่าเพิ่มสูงกว่าอุณหภูมิสภาพแวดล้อม โดยบ้านอ้างอิงมีอุณหภูมิสูงกว่าบ้านทดสอบประมาณ 1-2°C และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุด 4.2°C เนื่องจากการดึงความร้อนผ่านฝ้าเพดานด้วยระบบระบายอากาศเซลล์แสงอาทิตย์จากภายในห้องออกไปยังภายนอกของบ้านทดสอบ ในขณะที่อัตราการไหลของอากาศผ่านฝ้าเพดาน (Q) และจำนวนการเปลี่ยนอากาศ (ACH) ในบ้านที่ติดตั้งพัดลมระบายมีการระบายอากาศโดยใช้ระบบระบายอากาศเซลล์แสงอาทิตย์จากสมการที่ (7) และ (8) มีค่า 127-132 m³/hr ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าอัตราการระบายอากาศในบ้านทดสอบเมื่อมีค่าสูง จะส่งผลให้ค่าอุณหภูมิห้องบ้านทดสอบจะลดลงโดยมีความสอดคล้องกัน และผลจากระบายอากาศด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลให้ค่าการพาความร้อนผ่านผิวเพดานของบ้านทั้ง 2 หลัง ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (1) ถึง (6) จะมีค่าที่แตกต่างกัน โดยค่าการพาความร้อนของบ้านที่ติดตั้งพัดลมระบายอากาศด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าต่ำกว่าบ้านอ้างอิงเฉลี่ยตลอดทั้งวัน 190 W/m².K ซึ่งแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าการพาความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านฝ้าเพดานโดยการใช้หวัตการถ่ายเทความร้อนติดตั้งที่บริเวณด้านล่างของผิวฝ้าเพดาน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8 ค่าการถ่ายเทความร้อนของบ้านที่ติดตั้งระบบระบายอากาศด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำกว่า บ้านอ้างอิง 5-7 W/m² โดยจะเห็นได้ชัดในช่วงเวลา 12:00น.-14:00น. และมีค่าเปอร์เซ็นต์การลดการถ่ายเทความร้อนผ่านฝ้าเพดานเฉลี่ยทั้งวันมีค่า 30-34 %



รูปที่ 8 ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวด้านล่าง ผ้าเพดาน

สรุปและอภิปรายผล

จากการทดลองเพื่อศึกษาการลดค่าการถ่ายเทความร้อนจากห้องใต้หลังคาผ่านผ้าเข้าสู่ตัวบ้านโดยใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าให้กับพัดลมระบายอากาศขนาด 32 W เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พัดลมระบายอากาศแบบใช้ไฟฟ้าทั่วไปสามารถช่วยการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 140.16 kWh/year สำหรับการวิเคราะห์ผลของการถ่ายเทความร้อนผ่านเข้าสู่ตัวบ้านด้วยวิธีการพาความร้อน พบว่าระบบพัดลมระบายอากาศเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศ และเพิ่มจำนวนอัตราการเปลี่ยนอากาศ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนอากาศภายในบ้านทดสอบ 127-132 m³/hr และทำให้อุณหภูมิที่ผิวเพดานด้านบนและด้านล่างภายในบ้านทดสอบมีค่าลดลงประมาณ 1.9-2.0°C มีค่าการพาความร้อนต่ำกว่าบ้านอ้างอิงเฉลี่ยตลอดทั้งวัน 190 W/m².K และค่าเปอร์เซ็นต์การลดการถ่ายเทความร้อนผ่านผ้าเพดานเฉลี่ยทั้งวันมีค่า 30-34% จึงส่งผลให้อุณหภูมิห้องของบ้านทดสอบมีค่าต่ำกว่าบ้านอ้างอิงเฉลี่ย 2.9°C ซึ่งผลจากการติดตั้งพัดลมระบายอากาศเซลล์แสงอาทิตย์สามารถลดปริมาณความร้อนสะสมภายในห้องทดสอบที่มีผลต่อการออกแบบขนาดของเครื่องปรับอากาศ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

References

- [1] M. D'Orazio, C. Di Perna, P. Principi and A. Stazi, "Effects of roof tile permeability on the thermal performance of ventilated roofs: analysis of annual performance," *Energy Build*, pp. 911-916, 2008.
- [2] Haider I. Mohameda, Jeehwan Leea, and Jae D. Changb, (2016). The Effect of Exterior and Interior Roof Thermal Radiation on Buildings Cooling Energy, *International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction*, pp 987 – 994.
- [3] A.L. Pisello, V.L. Castaldo, G. Pignatta, F. Cotana, and M. Santamouris, Experimental in-lab and in-field analysis of waterproof membranes for cool roof application and urban heat island mitigation, *Energy Build*, 114: pp. 180-190, 2016.
- [4] Hataitap Wongsuwarn, "Automatic Air Ventilation System for Air Space under Roof with Microcontroller," *The 24th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand 20-22 Oct., Ubon Ratchathani*, 2009.
- [5] Velapon Buranakitvisut and Sompong Putvisutisak, "The Evaluation of Temperature Reduction Effectiveness in Warehouse by Ventilation Improvement," *Energy Research Institute*, Vol.8, No1, pp.58-62, 2011.

- [6] Preeda Chantawong and Vichan Vimanjan, "Natural Ventilation of Houses Model by a Roof Solar Cells Turbine Ventilator Assisted with DC Fan under Climate of Bangkok," The Journal of KMUTNB., Vol. 22, No. 2, pp.305-314, May - Aug, 2012.
- [7] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, The Renewable and Alternative Energy Development Plan for 25 Percent in 10 Years (AEDP 2012–2021). Bangkok: Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, 2012.
- [8] Preeda Chantawong and Boonchorb Sotprawati, "Field Study of Cooling Load Reduction and Thermal Performance of Simple Roof Concrete and Roof Solar Cells Attic Ventilation Assisted with DC Fan of Two Models," Ladkrabang Engineering Journal, vol.22, no.1, pp.53 – 70, 2013.
- [9] Akekachai Deesiri, Thanapat Promwatanapakde and Prakt Liengpradis, "Improving an Automatic Air Ventilation Control System for Energy Saving Using Oxygen Sensor and Carbon Dioxide Sensor," 13th National and International Conference of Sripatum University, 2019, pp.2469-2478.
- [10] Sahachai Phiraphata, Ratthasak Prommasa and Withaya Puangsombut, (2017). Experimental study of natural convection in PV roof solar collector, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 89, pp. 31-38.
- [11] Sheng Zhanga, Yong Chengb, Chao Huanc, Zhang Lin, "Heat removal efficiency based multi-node model for both stratum ventilation and displacement ventilation," *Building and Environment*, No.143, pp.24–35, 2018.

กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพ ด้วยซีเมนต์ไฮดรอลิก

อิทธิพล มีผล^{1*}, ฆนากานต์ มาศโอสถ¹, ปฐม คงคะดี¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการศึกษา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Email : ittipon.m@fte.kmutnb.ac.th^{1*}

Received: May 31, 2020

Revised: June 22, 2020

Accepted: June 23, 2020

บทคัดย่อ

การศึกษากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ของดินเหนียวอ่อน ที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิดใช้งานทั่วไป (GU) และนำไปเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (OPC) โดยแปรผันปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 10, 15, 20, และ 25% ต่อน้ำหนักดินเหนียวเปียกแปลงสภาพ ที่ควบคุมปริมาณน้ำ เท่ากับ 130% ในทุกอัตราส่วนผสม ซึ่งปูนซีเมนต์แต่ละชนิดจะถูกกวนผสมกับน้ำจนเป็นครีมเหลว จึงนำไปผสมกับดินเหนียวอ่อนแปลงสภาพจนกลายเป็นดินซีเมนต์ จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเมื่อบ่มดินซีเมนต์ตัวอย่างที่ระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน พบว่า ดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มีค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงสุดที่ปริมาณซีเมนต์ 25% อายุบ่ม 28 วัน เท่ากับ 777.90 kPa . ซึ่งสูงกว่าดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงสุดเท่ากับ 700.40 kPa หรือคิดเป็นร้อยละ 9.96

คำสำคัญ : การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน, ซีเมนต์ไฮดรอลิก, กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

Unconfined Compressive Strength of Hydraulic Cement-Stabilized Soft Clay

Ittipon Meepon^{1*}, Kanakan Masosot¹, Patom kongkadee¹

¹Department of Teacher Training in Civil Engineering, Faculty of Technical Education,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Email : ittipon.m@fte.kmutnb.ac.th^{1*}

Received: May 31, 2020

Revised: June 22, 2020

Accepted: June 23, 2020

Abstract

The study of unconfined compression of soft clay improved by using hydraulic cement (GU) and compare to the result of unconfined compression test of soft clay improved by using ordinary Portland cement (OPC) varying with 10, 15, 20 and 25% of cement quantity per weight of remold clay with water content control of 130% in every proportion. Each type of cement was mixed into slurry before mixing soft clay which was transformed into cement clay. The result of unconfined compression test after curing cement-clay sample for 7, 14 and 28 days elucidated that the soft clay improved by using hydraulic cement had the highest unconfined compression value with 25% of cement quantity and 28 days of curing having 777.90 kPa which was higher than the soft clay improved by using ordinary Portland cement with unconfined compression value of 700.40 kPa or 9.96 percent

Keywords : Soft soil Improvement, Hydraulic cement, Unconfined Compression

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาด้านเสถียรภาพและการทรุดตัวของโครงสร้างในพื้นที่กรุงเทพมหานครรวมถึงลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างนั้น เกิดจากชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งโดยทั่วไปชั้นดินนี้จะเป็นดินที่มีเม็ดละเอียดมากสีเทาเข้ม มีความลึกประมาณในช่วง 4-15 เมตรจากผิวดิน มีปริมาณน้ำ (Water Content) อยู่ระหว่างร้อยละ 47-54 มีขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) อยู่ระหว่างร้อยละ 60-100 [1] กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) ของดินเหนียวอ่อนจะไดจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวจะมีค่าอยู่ระหว่าง 16-17 kPa [2] ขณะที่โมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Elastic Modulus, E_u) อยู่ระหว่าง 1500-1700 kPa [3]

การใช้วิธีปรับปรุงคุณภาพดินประเภทต่าง ๆ เพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของดิน ลดการทรุดตัว มีระยะเวลาการทำงานที่สั้น และประหยัดค่าใช้จ่าย โดยในปัจจุบันมีเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินหลายวิธีเช่น การใช้เครื่องจักรบดอัด การบดอัดแบบ Dynamic การใช้เครื่องจักรที่ติดตั้งหัวสั่นสะเทือน (Vibroflotation) การให้น้ำหนักแก่ดินก่อน (Preloading) เสาค้ำทราย และเสาค้ำหิน (Sand stone columns) การใช้สารผสมเพิ่ม (admixtures) การฉีดอัดน้ำปูน (Jet grouting) หรือการใช้ผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextiles) เป็นต้น [4]

ซีเมนต์เป็นวัสดุที่นิยมนำมาก่อสร้างถนน สนามบินคันทาง หรือดาดคลองส่งน้ำ โดยเริ่มนำมาผสมดินเหนียวเพื่อปรับปรุงความแข็งแรง ลดการบวมตัวและเพิ่มความสามารถรับแรงแบกทาน [5] การใช้ปูนซีเมนต์ เพื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพดิน (Cement Stabilization) ได้มีการใช้อย่างแพร่หลาย โดยวิธีการนี้ได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 เป็นต้นมาทั้งในประเทศสวีเดนและประเทศญี่ปุ่น ส่วนในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ก็นิยมใช้ปูนซีเมนต์มาปรับปรุงคุณภาพดินเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีราคาถูกกว่าการใช้ปูนขาว (Lime) อีกทั้งความแข็งแรงที่ได้

จากการใช้ซีเมนต์เพื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพดิน ยังพบว่ามากกว่าการใช้ปูนขาว (Lime) ที่มีขีดจำกัดด้านกำลังสูงสุด [6]

ซึ่งนอกจากการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ในปัจจุบันปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกก็เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีการนำมาใช้ในการก่อสร้างซึ่งปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (GU) มีส่วนประกอบจากปูนเม็ด ยิปซัม ส่วนประกอบแคลเซียมและสารเพิ่มความแข็งแรง มีคุณภาพตาม มอก. 2594-2556 โดยอนุภาคของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีการเรียงตัวอย่างหนาแน่นเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (OPC)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด หรือแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Stress) ของดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ประเภทใช้งานทั่วไป (GU) เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวกับดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (OPC) เมื่อใช้อัตราส่วนผสมที่เท่ากัน โดยพิจารณาที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ไฮดรอลิก
2. เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยซีเมนต์ไฮดรอลิกกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มาปรับปรุงคุณภาพดิน กล่าวคือนำมาผสมกับดินเหนียวอ่อน จากนั้นทำการทดสอบหาลำดับรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) โดยเตรียมซีเมนต์เพสต์ ในอัตราส่วนผสม ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water cement ratio, w/c) เท่ากับ 0.6

ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ใช้เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบ



รูปที่ 1 ซีเมนต์เพสต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6

จากนั้นนำไปผสมกับดินเหนียวอ่อนแปลงสภาพที่ปริมาณน้ำทั้งหมด (Total water content) เท่ากับ 130% ในทุกสัดส่วนผสม ที่อัตราส่วน 10%, 15%, 20% และ 25% ต่อปริมาตรของดินเปียกตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยสัดส่วนผสมของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 ผสมซีเมนต์เพสต์กับดินเหนียวอ่อน

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมปริมาณซีเมนต์และปริมาณน้ำทั้งหมดของดินแปลงสภาพ

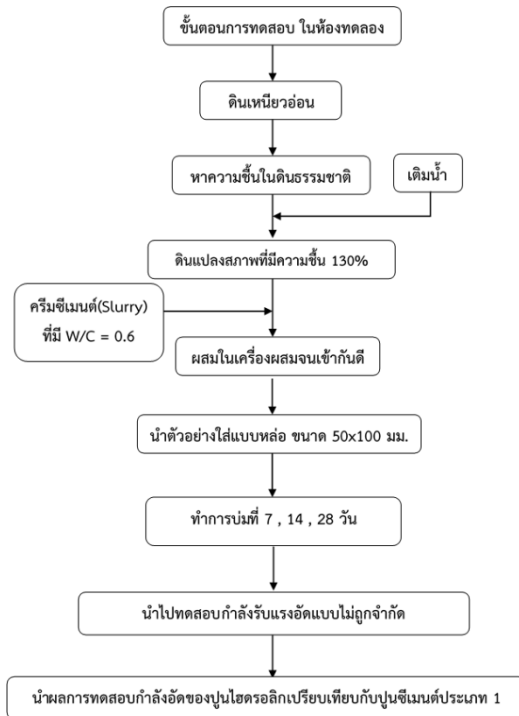
ตัวอย่าง	สัดส่วนปูนซีเมนต์ ต่อน้ำหนักดินเปียก (%)	ปริมาณน้ำ ทั้งหมด (%)
C10 MC130	10	130
C15 MC130	15	130
C20 MC130	20	130

เมื่อ C-xx- คือ ปริมาณซีเมนต์ MC-xx คือ ปริมาณน้ำของดินแปลงสภาพ

เมื่อดินเหนียวอ่อนที่ต้องการปรับปรุงได้ผสมกับซีเมนต์แต่ละชนิดจนเข้ากันดีแล้ว จากนั้นจึงนำไปใส่ในแบบหล่อ PVC ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 10 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยใส่ตัวอย่างลงในแบบหล่อเป็นชั้น ๆ ชั้นละประมาณ 1/4 ของความสูงแบบหล่อ จากนั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้ง (Tamper Rod) และนำไปทดสอบตามขั้นตอนการทดสอบ ดังแสดงขั้นตอนการทดสอบในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ใส่ในแบบหล่อ PVC



รูปที่ 4 ผังขั้นตอนการทดสอบ

ดินเหนียวอ่อนตัวอย่างที่นำมาปรับปรุงคุณภาพเป็นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) ที่ได้จากพื้นที่กรุงเทพมหานคร มีสมบัติทางวิศวกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนตัวอย่าง

สมบัติทางวิศวกรรม	ค่า/ปริมาณ
ความชื้นในธรรมชาติ (w)	81.41 %
หน่วยน้ำหนักเปียก (γ)	1.779 t/m ³
ความถ่วงจำเพาะ (Gs)	2.63
ค่าขีดจำกัดเหลว (LL)	89.00 %
ค่าขีดจำกัดพลาสติก (PL)	40.79 %
ค่าดัชนีพลาสติก (P.I.)	48.21 %

เมื่อตัวอย่างดินซีเมนต์ได้อายุบ่ม (Curing Time) ตามกำหนดที่ 7, 14 และ 28 แล้ว จึงนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Unconfined Compression Test ในจำนวนสัดส่วนผสมละ 3 ตัวอย่าง และนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยใช้อัตราเร็วของการทดสอบเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรต่อนาที [7] ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

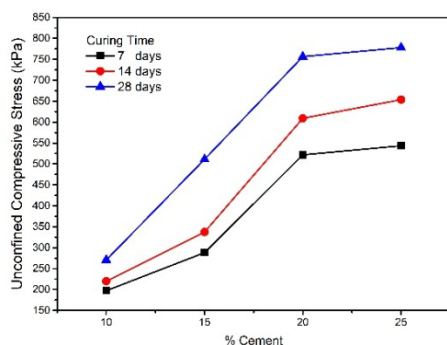
ผลการวิจัย

การรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ทั้งสองประเภท การแข็งตัวเกิดขึ้นสองส่วน คือ การแข็งตัวของซีเมนต์ (Hardened Cement Bodies) และการแข็งตัวของดิน (Hardened Soil Bodies) ซึ่งการเกิดการแข็งตัวของดินเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) ระหว่างดินเหนียวและไฮดรอลามที่ที่เกิดจากปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮดรชัน [6]

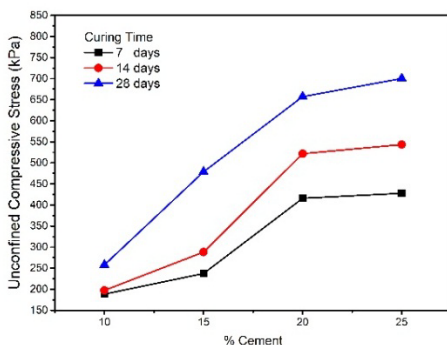
ดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ไฮดรอลิก ประเภทใช้ทั่วไป (GU) เมื่อทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Unconfined Compression Test จะมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น ตามสัดส่วนปริมาณซีเมนต์ที่ผสมลงไปในตัวอย่าง เมื่อมีสัดส่วนปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 10, 15, 20 และ 25 ให้กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด มีค่าเท่ากับ 270.8 kPa, 511.1

kPa, 756.4 kPa และสูงสุด 777.9 kPa ที่อายุบ่ม 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนผสมซีเมนต์ไฮดรอลิก

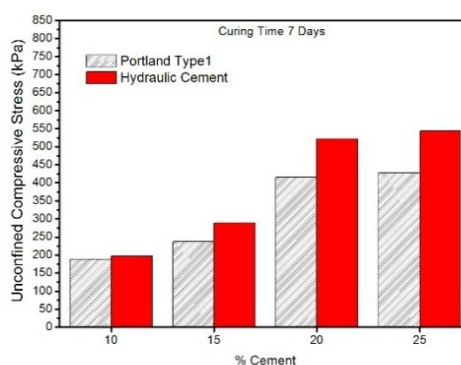
การพัฒนา กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 จะเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนซีเมนต์ และอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการใช้ซีเมนต์ไฮดรอลิก ซึ่งการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์โดยอาศัยน้ำ ทำให้ซีเมนต์ละลายและเกิดไอออนขึ้น โดยกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงสุด ที่ปริมาณซีเมนต์ 25% อายุบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 704.9 kPa ดังแสดงในรูปที่ 7



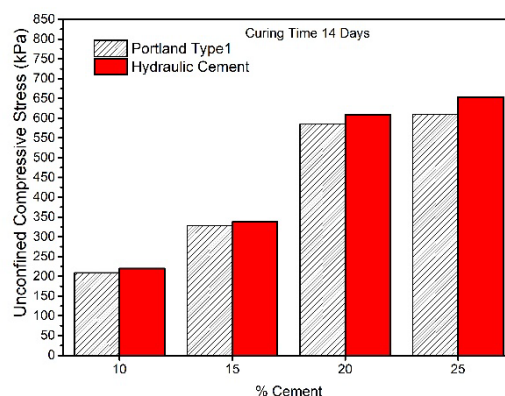
รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนผสมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1

เปรียบเทียบการรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ไฮดรอลิกเปรียบเทียบกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่ออายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน พบว่า ดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ไฮดรอลิกให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ดังแสดงในรูปที่ 8-10 เนื่องจากอนุภาคของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีขนาดเล็กและมีการเรียงตัวของอนุภาคอย่างหนาแน่นเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (OPC)

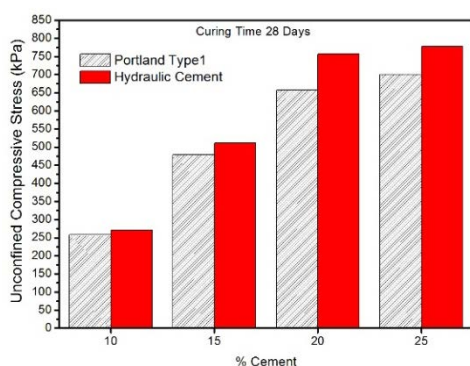


รูปที่ 8 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกที่อายุบ่ม 7 วัน



รูปที่ 9 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกที่อายุบ่ม 14 วัน

เมื่ออายุบ่ม 28 วัน ดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ไฮดรอลิก เมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 10 15 20 และ 25 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ที่ปริมาณเดียวกัน อยู่ร้อยละ 4.73, 6.34, 13.1 และ 9.96 ตามลำดับ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป จนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกที่ อายุบ่ม 28 วัน

สรุปและอภิปรายผล

1. ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ไฮดรอลิก ประเภททั่วไป (GU) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีเมนต์ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันเมื่อใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1
2. ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ไฮดรอลิก ประเภททั่วไป (GU) ที่ปริมาณการใช้ซีเมนต์เท่ากัน มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันเมื่อใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1

3. ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ไฮดรอลิก ประเภททั่วไป (GU) มีค่ามากกว่าตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ในทุกสัดส่วนปริมาณซีเมนต์

4. เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ไฮดรอลิก เมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 10 15 20 และ 25 มีค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเท่ากับ 270.8 kPa, 511.1 kPa, 756.4 kPa และสูงสุดเท่ากับ 777.9 kPa ที่อายุบ่ม 28 หรือสูงกว่า การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 25 ที่อายุอยู่ร้อยละ 9.96

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท สยามซีเมนต์ กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนตัวอย่างซีเมนต์ไฮดรอลิก สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

References

- [1] S. Shibuyal, S.B. Tamrakal and N. Theramasaf. "Geotechnical site characterization on engineering properties of Bangkok clay," *Geotechnical Engineering*, Vol 32, no3. pp.139-151, 2001.
- [2] Uddin, K. "Strength and deformation characteristics of cement-treated Bangkok clay." Ph.D. Dissertation. No. GT-94-1 Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1995.
- [3] P. Jamsawang, "Full Scale Test on Stiffened Deep Cement Mixing (SDCM) Pile Including 3D Finite Element Simulation," Ph.D. Dissertation, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand., 2009.

- [4] V.N. Murthy, *“Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering,”* New York: Marcel Dekker Ink, 2003.
- [5] C. Teerawattanasuk, P. Voottipruex and S. Inthapichai, “Strength Characteristic of Foam Cement Admixed Clay,” *The Journal of KMUTNB.*, vol. 24, no. 2, pp.234-246, 2014.
- [6] D.T. Bergado, L.R. Anderson, N. Miura and A.S. Barasubramaniam. “Soft ground improvement in lowland and other environments,” New York: ASCE Press, 1996.
- [7] C. Srijaroen, R. Rachan and S. Horpibulsuk, “Strength Development in Soil Cement Column and Soil Fly ash Cement Column in Soft Bangkok Clay Deposit,” *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 37, no. 2, pp. 151-164, 2557.

การพัฒนาระบบแจ้งเตือนสถานะการหลับในของผู้ขับรถบนท้องถนน ธีรวัช พิเชษฐจริโรจน์¹, ศุภิสรา พิมพ์ตะการ¹, ธนัยรัตน์ มาติะ^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Email : tanairat.m@mail.rmutk.ac.th^{1*}

Received: May 25, 2020

Revised: June 22, 2020

Accepted: June 24, 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบแจ้งเตือนสถานะการหลับในของผู้ขับรถบนท้องถนน สำหรับช่วยลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุในขณะขับรถ ระบบนี้สามารถตรวจและวิเคราะห์ลักษณะอาการของผู้ขับรถ และส่งสัญญาณเตือนเมื่อผู้ขับรถมีลักษณะหลับในทันที ในบทความฉบับนี้ทำการตรวจจับลักษณะคนขับรถ และวิเคราะห์ถึงลักษณะอาการหลับใน โดยใช้การวิเคราะห์อาการจาก 3 ลักษณะ ประกอบไปด้วย ลักษณะของดวงตา ลักษณะของศีรษะ และลักษณะของปาก ตามลำดับ โดยจะตรวจจับภาพผ่านโมดูลกล้องแล้วนำไปประมวลผลด้วยราสเบอร์รี่พาย รุ่น 3B+ แบบเรียลไทม์ ร่วมกับการประยุกต์ใช้การประมวลผลทางภาพมาวิเคราะห์ภาพเปรียบเทียบภาพที่ตรวจจับได้กับภาพลักษณะต้นแบบ เมื่อผลการวิเคราะห์พบว่าผู้ขับรถมีลักษณะที่แตกต่างไปจากสภาวะปกติ ระบบจะตัดสินใจว่าผู้ขับรถในขณะนั้นมีอาการหลับใน โดยระบบจะทำการส่งเสียงแจ้งเตือนโดยตรงไปยังผู้ขับรถเพื่อกระตุ้นให้กลับมาอยู่ในสภาวะปกติในทันที โดยจากผลการทดลองในบทความฉบับนี้ สามารถยืนยันได้ว่าการพัฒนาระบบแจ้งเตือนสถานะการหลับในของผู้ขับรถบนท้องถนน มีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์เพื่อใช้งานในการตรวจจับและวิเคราะห์ลักษณะอาการหลับในขณะขับรถได้จริง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในการตอบสนองการตรวจจับลักษณะของดวงตา ศีรษะ และปาก ประมาณ 4%, 5.36% และ 4.12% ตามลำดับ

คำสำคัญ : สถานะการหลับใน, การตรวจจับลักษณะของดวงตา ศีรษะ และปาก, เรียลไทม์

A Development of Real-Time Driver Drowsiness Detection System

Teerawat Pichatrujiroj¹, Supisara Pimtakarn¹, Tanairat Mata^{1*}

¹Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Krungthep

Email : tanairat.m@mail.rmutk.ac.th^{1*}

Received: May 25, 2020

Revised: June 22, 2020

Accepted: June 24, 2020

Abstract

This paper proposes a development of real-time driver drowsiness detection system for reducing the chance of car accidents. The proposed system can detect and analyze the characteristics of the driver and warn the driver immediately when he is sleeping. In this paper, the system will detect the driver sleepiness from the characteristics of the eyes head and mouth, respectively via the camera module and perform their images by image processing with the Raspberry Pi 3B+ in real-time. From the experimental results in this paper, it can be confirmed that the proposed system has the potential capability to apply in the real use with the low detection response errors which are approximately 4%, 5.36% and 4.12% from eye head and mouth detector respectively.

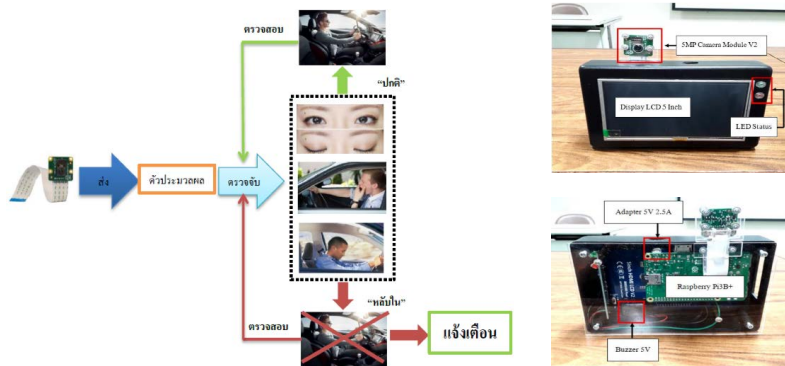
Keywords : Driver sleepiness, Driver drowsiness detection (eyes, head and mouth), Real time

บทนำ

ปัจจุบันอุบัติเหตุบนท้องถนนในประเทศไทยมีสถิติเพิ่มขึ้น ทราบได้จากในจำนวนคน 22,356 คน เป็นจำนวนยอดผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุบนท้องถนนในประเทศไทย ในปี 2559 ที่ผ่านมา เฉลี่ยวันละ 62 ราย หรือคิดเป็นชั่วโมงละ 2-3 ราย โดยมีผู้รักษาตัวในโรงพยาบาลจากกรณีรถยนต์ชนประมาณ 1 แสนราย และกลายเป็นผู้พิการประมาณ 6 หมื่นคนต่อปี จากข้อมูลขององค์การอนามัยโลก ประเทศไทยมีสถิติการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุบนท้องถนนเป็นอันดับ 1 ของเอเชีย และเป็นอันดับ 2 ของโลก ด้วยตัวเลขอัตราการเสียชีวิต 36.2 ต่อประชากร 100,000 คน เป็นรองเพียงประเทศลิเบียที่มีอัตราการเสียชีวิต 73.4 ต่อประชากร 100,000 คน โดยอุบัติเหตุบนท้องถนนส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงเทศกาล ซึ่งมีสาเหตุหลาย ๆ อย่าง อาทิเช่น การขับรถเร็วเกินกำหนด การดื่มแอลกอฮอล์ขับรถยนต์ตัดหน้ากระชั้นชิดทัศนวิสัยการขับขี่ไม่ดี รวมถึงการหลับใน เป็นต้น จากสาเหตุต่าง ๆ จึงมีการณรงค์เช่น เมาไม่ขับ ง่วงไม่ขับ โดยจากการรณรงค์ดังกล่าวยังไม่สามารถลดปัญหาได้เท่าที่ควร เพราะผู้ขับขี่ไม่ปฏิบัติตามเท่าที่ควร ดังนั้นจึงมีผู้คิดค้นอุปกรณ์หรือนวัตกรรมต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้เพื่อลดอุบัติเหตุบนท้องถนน อาทิเช่น อุปกรณ์ช่วยเตือนหลับในขณะขับรถด้วยสัญญาณสมอง โดยจะตรวจจับความเป็นไปได้อีก่อนเกิดอาการหลับใน จากการวิเคราะห์คลื่นไฟฟ้า

สมองบริเวณส่วนหน้าร่วมกับการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของการกระพริบตา โดยจะทำงานร่วมกับการวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนไหวของศีรษะ ซึ่งจะตรวจจับโดยใช้ระบบโมดูลกล้อง โดยเป็นการตรวจจับใบหน้ามากกว่าหนึ่งจุด ตรวจจับการเคลื่อนไหวของเปลือกตา ปาก และรวมไปถึงท่าทางของอาการคนหลับในและแสดงเป็นเสียงแจ้งเตือน [1]

จากการค้นคว้าการตรวจจับใบหน้าโดยการวิเคราะห์การรู้จำใบหน้า [2-4] จะมี 2 อัลกอริทึมหลัก คือ Eigen faces Fisher faces และ Local Binary Patterns Histogram ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาระบบแจ้งเตือนสถานะการหลับในของผู้ขับรถบนท้องถนน โดยนำหลักการจากทั้ง 2 อัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับการประมวลผลโดย Raspberry Pi เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมหลักใจของผู้ขับโดยตรวจจับการเคลื่อนไหวของเปลือกตา ปาก และศีรษะผ่านโมดูลกล้อง โดยจะนำภาพที่ตรวจจับได้มาทำการเปรียบเทียบกับภาพต้นแบบในฐานข้อมูล หากมีค่าที่ไม่สอดคล้องกันหรือไม่มีการตอบสนองตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ระบบจะสั่งให้มีการแจ้งเตือนโดยเสียงทันทีเพื่อกระตุ้นโดยต่อตัวผู้ขับรถในขณะเวลานั้น อีกทั้งจะส่งข้อมูลเพื่อแจ้งสถานะของผู้ขับผ่านทางแอปพลิเคชันให้บุคคลอื่นที่เกี่ยวข้องทราบสถานะได้อีกทางหนึ่ง



รูปที่ 1 แผนภาพบล็อกและชิ้นงานระบบแจ้งเตือนการหลับในขณะขับรถบนท้องถนน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการตรวจจับวัตถุโดยการประยุกต์ใช้หลักการการประมวลผลภาพ
2. เพื่อนำประยุกต์ใช้งานสำหรับแจ้งเตือนผู้มีอาการหลับในขณะกำลังขับรถบนท้องได้จริงและมีประสิทธิภาพ

ระเบียบวิธีวิจัย

1. การออกแบบฮาร์ดแวร์

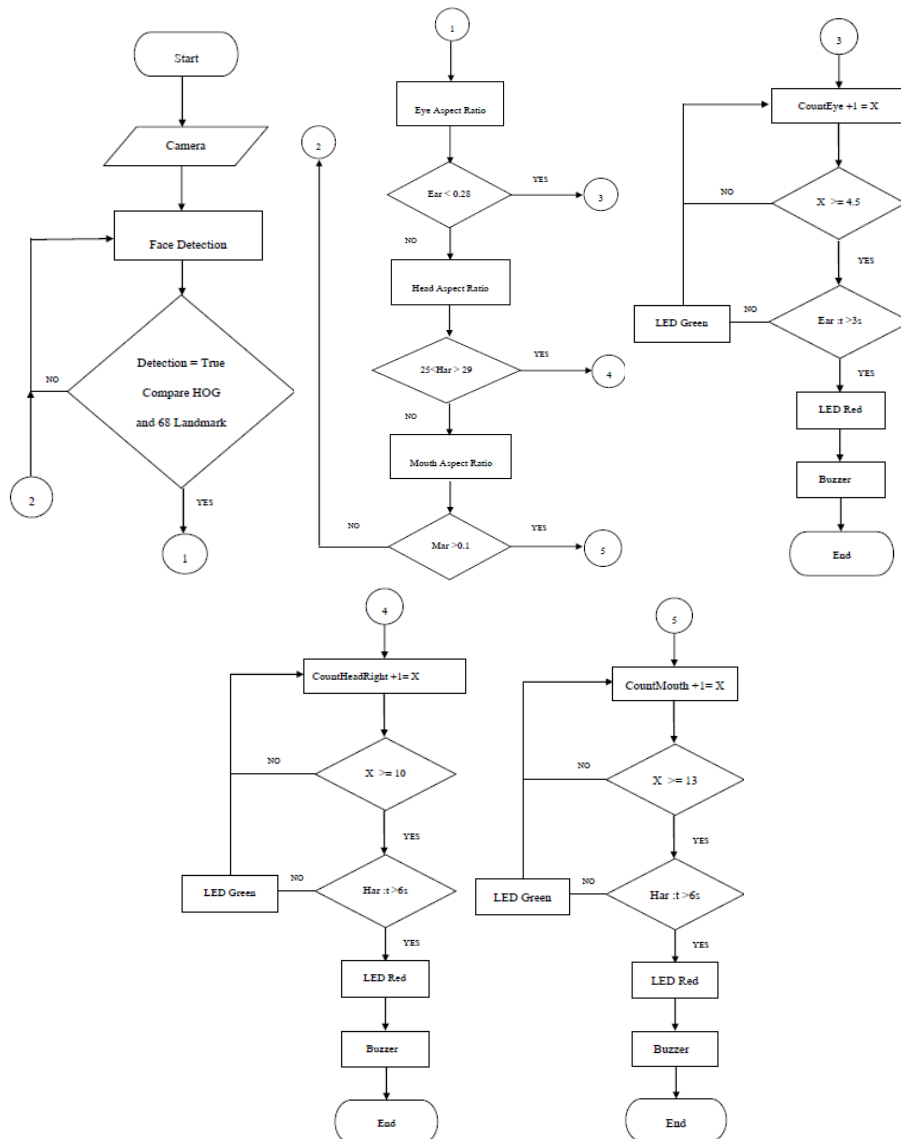
รูปที่ 1 แสดงแผนภาพบล็อกในภาพรวมของระบบแจ้งเตือนการหลับในขณะขับรถบนท้องถนน ซึ่งจะประกอบไปด้วยบอร์ดประมวลผล Raspberry Pi3 B+ ทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลกลางของระบบทั้งหมด โดยจะรับภาพที่ได้จากโมดูลกล้อง Raspberry Pi 5MP Camera Module V2 ที่ทำหน้าที่จับภาพและส่งภาพที่ได้ไปยังตัวประมวลผลเพื่อทำการประมวลผลต่อและแสดงเอาต์พุตออกเป็น 3

ส่วน โดยส่วนที่1 จะแสดงผลแบบ Real Time ผ่าน LCD ส่วนที่ 2 จะแสดงผลโดยหลอดไฟ LED สี

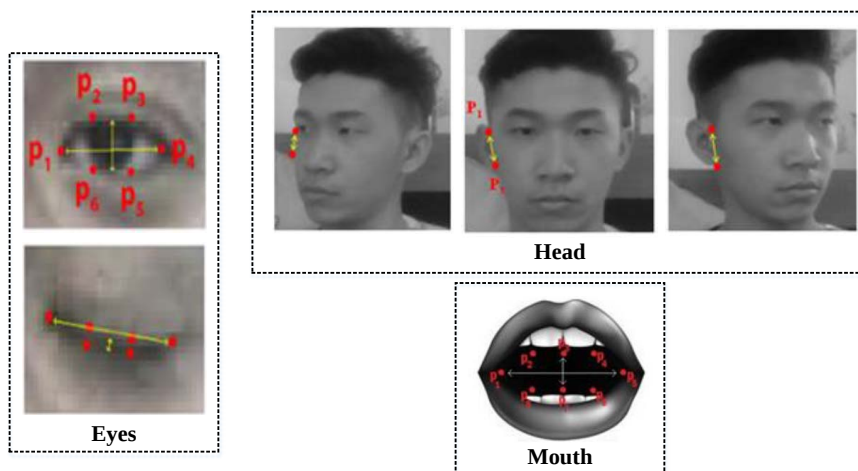
แดงและเขียว และในส่วนที่ 3 จะแสดงผลโดยเสียง Buzzer

2. การพัฒนาซอฟต์แวร์

ในงานวิจัยนี้ พัฒนาโปรแกรมเพื่อสั่งการในส่วนของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ของระบบแจ้งเตือนการหลับในขณะขับรถบนท้องถนนโดยใช้โปรแกรมไพทอน โดยจะออกแบบในลักษณะของฟังก์ชันและเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ขึ้นแรกจะออกแบบตัวตรวจจับภาพเพื่อแยกลักษณะอาการหลับใน โดยเริ่มจากการจับภาพเพื่อตรวจสอบสถานะผู้ใช้งาน ซึ่งประยุกต์ใช้ Histogram of Oriented Gradients (HOG) [5] เพื่อเปรียบเทียบภาพ โดยสามารถแยกลักษณะเฉพาะของวัตถุที่ต้องการออกจากพื้นหลัง จากการเปรียบเทียบ Gradients Point แต่ละพิกเซลของภาพกับ Gradients Point ของ Facial 68 Landmarks ซึ่งถ้าตรวจจับไม่พบใบหน้าในเฟรมก็จะส่งสถานะกลับไปตรวจสอบ



รูปที่ 2 แผนภาพบล็อกการทำงานของระบบ



รูปที่ 3 ตำแหน่งที่ต้องการเปรียบเทียบค่าอัตราการตอบสนองของตา [6-7] ศีรษะ และปาก [8-9]

ใหม่ แต่ในกรณีที่ผู้ใช้งานอยู่ในเฟรมของภาพจะส่งภาพที่ได้ไปประมวลผลต่อ และโดยจะเปรียบเทียบค่าอัตราการตอบสนอง 3 สถานะคือ ตา (Eye Aspect Ratio: EAR) ศีรษะ (Head Aspect Ratio: HAR) และปาก (Mouth Aspect Ratio: MAR) ซึ่งจะคำนวณจาก Euclidean distance เพื่อเปรียบเทียบระหว่างจุดสองจุดของอาร์เรย์ ตามลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปว่าตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้หรือไม่ ดังแผนภาพบล็อกในรูปที่ 2 โดยกรณีที่สถานะปกติจะพิจารณาตามเวลาในส่งค่าออกไปตามลำดับ หรือในสถานะ

ไม่ปกติ จะส่งค่ากลับไปเพื่อทำการตรวจสอบใหม่อีกครั้ง

ค่าตำแหน่งเพื่อหาระยะทางระหว่างพิกเซล $P(x,y)$ ของอาร์เรย์ตา ศีรษะ และปาก ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไป [10-11] ซึ่งจะคำนวณได้ดังสมการ

$$P(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)} \quad (1.1)$$



รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้งชิ้นงานภายในรถ

จาก (1.1) สามารถกำหนดระยะทางระหว่างจุดสองจุดเพื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างได้จากตำแหน่งพิกเซล $P(x,y)$ ที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละอาร์เรย์จากพิกเซลที่กำหนด โดยสามารถกำหนดค่า EAR [6-7] HAR และ MAR [8-9] ได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งหาจากดังสมการ

$$EAR = \frac{|P_2 - P_6| + |P_3 - P_5|}{2|P_1 - P_4|}, HAR = |P_1 - P_3|, \quad (1.2)$$

$$\text{and } MAR = \frac{|P_2 - P_8| + |P_3 - P_7| + |P_4 - P_6|}{2|P_1 - P_5|}$$

ในการแสดงผล จะกำหนดผ่านการทำงาน GPIO เอาต์พุตของ Raspberry Pi 3B+ เพื่อตอบสนองตามเงื่อนไขจากการเปรียบเทียบค่าอัตราการตอบสนองทั้ง 3 ค่า แล้วส่งค่าแสดงผลออกทางเอาต์พุตตามในแต่ละกรณี โดยในการกำหนดสถานะเอาต์พุตจะกำหนดขา GPIO เพื่อส่งเอาต์พุตแจ้งเตือนด้วยเสียง

Buzzer และหลอดไฟ LED เพื่อแสดงสถานะการทำงานได้ตามกรณีดังนี้ **กรณีที่ 1** เมื่อมีการตรวจจับภาพบริเวณตา และเปรียบเทียบ EAR โดยถ้ามีค่าน้อยกว่าค่าปกติของตาจะทำการนับเลข +1 ไปจนถึงเฟรมเอาต์พุตของตา โดยจะแสดงข้อความแจ้งเตือนและส่งค่าผ่านขา GPIO เพื่อให้เกิดเสียงเตือนผ่าน Buzzer และแสดงไฟสถานะ 2 สถานะคือแดงกับเขียวตามลำดับ **กรณีที่ 2** เมื่อมีการตรวจจับภาพบริเวณคิ้ว และเปรียบเทียบ HAR โดยถ้ามีค่าน้อยกว่าค่าปกติของคิ้วจะทำการนับเลข +1 ไปจนถึงเฟรมเอาต์พุตของคิ้ว โดยจะแสดงข้อความแจ้งเตือนและส่งค่าผ่านขา GPIO เพื่อให้เกิดเสียงเตือนผ่าน Buzzer และแสดงไฟสถานะ 2 สถานะ คือแดงกับเขียว ตามลำดับ และ**กรณีที่ 3** เมื่อมีการตรวจจับภาพบริเวณปาก และเปรียบเทียบ MAR โดยถ้ามีค่าน้อยกว่าค่าปกติ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 6 แสดงการทดสอบเงื่อนไขของการตรวจจับบริเวณของตา คิ้ว และปาก

ของตาจะทำการนับเลข +1 ไปจนถึงเฟรมเอาต์พุตของตา โดยจะแสดงข้อความแจ้งเตือน และส่งค่าผ่านขา GPIO เพื่อให้เกิดเสียงเตือนผ่าน Buzzer และแสดงไฟสถานะ 2 สถานะคือแดงกับเขียวตามลำดับ

3. การติดตั้งชิ้นงานภายในรถ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการติดตั้งชิ้นงานระบบแจ้งเตือนการหลับในขณะขับรถบนท้องถนนจริง ณ ตำแหน่งของคอนโซลด้านหน้าฝั่งคนขับภายในรถยนต์กระบะยี่ห้อฮิอุซุ รุ่น Gold Series ดังรูปที่ 4 โดยกำหนดระยะห่างระหว่างกล่องกับผู้ใช้ภายในรถยนต์ไว้ที่ 70 เซนติเมตร

ผลการวิจัย

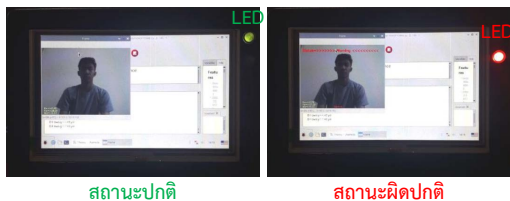
1. การทดสอบเงื่อนไข

การทำงานของระบบแจ้งเตือนการหลับในขณะขับรถบนท้องถนน จะแสดงผลโดยการแจ้งสถานะทางหลอด LED และ Buzzer รวมทั้งแสดงข้อความแจ้งเตือนผ่านหน้าจอ LCD โดยจะกำหนดค่าในสภาวะปกติดังนี้ ค่า EAR = 0.28 ค่า HAR จะอยู่ระหว่าง 25 ถึง 29 และค่า MAR = 0.1 ซึ่งผลแจ้งเตือนจะสามารถแสดงได้เป็น 2 สถานะ ดังต่อไปนี้ **สถานะที่ 1** สภาวะปกติ สถานะหลอด LED จะเป็นสีเขียว และ

ตารางที่ 1 การทดลองหาความคลาดเคลื่อนของระยะเวลาในการตอบสนองของการตรวจจับลักษณะดวงตาสีระ และปาก ซึ่งจะคำนวณหาความคลาดเคลื่อนได้จากสมการ (1.3)

ครั้งที่ ที่	ตรวจจับลักษณะดวงตา			ตรวจจับลักษณะสีระ			ตรวจจับลักษณะปาก		
	เวลา(วินาที)		ความคลาด เคลื่อน (%)	เวลา(วินาที)		ความคลาด เคลื่อน (%)	เวลา(วินาที)		ความคลาด เคลื่อน (%)
	กำหนด	ระบบ		กำหนด	ระบบ		กำหนด	ระบบ	
1	3 วินาที	3.10	3.33	5 วินาที	5.35	7.00	6 วินาที	6.41	6.83
2		3.13	4.33		5.25	5.00		6.13	2.17
3		3.05	1.67		5.30	6.00		6.10	1.67
4		3.15	5.00		5.44	8.80		5.60	6.67
5		3.11	3.67		5.21	4.20		5.33	11.17
6		3.09	3.00		5.28	5.60		6.00	0.00
7		3.14	4.67		5.30	6.00		6.10	1.67
8		3.18	6.00		5.25	5.00		6.11	1.83
9		2.95	1.67		5.18	3.60		6.28	4.67
10		3.20	6.67		5.12	2.40		5.73	4.50
ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย			4.00	5.36			4.12		

Buzzer ไม่มีเสียง สถานะที่ 2 สภาวะไม่ปกติ (มีลักษณะการหลับใน) สถานะหลอด LED จะเป็นสีแดง และ Buzzer มีเสียงดังขึ้น ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ไฟ LED แสดงสถานะการทำงานปกติและผิดปกติ (หลับใน)

รูปที่ 6 แสดงการทดสอบเงื่อนไขของการตรวจจับบริเวณของตา ศีรษะ และปาก โดยเงื่อนไขที่ 1 เมื่อค่า EAR < 0.28 เป็นเวลาต่อเนื่องนานกว่า 3 วินาที เงื่อนไขที่ 2 เมื่อค่า HAR อยู่ในช่วง 25 ถึง 29 เป็นเวลาต่อเนื่องนานกว่า 5 วินาที และเงื่อนไขที่ 3 เมื่อค่า MAR = 0.1 เป็นเวลาต่อเนื่องนานกว่า 6 วินาที ทั้ง 3 เงื่อนไขจะแจ้งเตือนโดยข้อความบน LCD ดังรูปที่ 6(ค) ถึง 6(ง) ตามลำดับ

2. การทดลองหาความคลาดเคลื่อน

สำหรับระบบการแจ้งเตือนประสิทธิภาพมีความจำเป็นอย่างมาก ดังนั้นการหาคุณภาพของระบบแจ้งเตือนการหลับในขณะขับรถบนท้องถนนจะทดสอบผ่านค่าความคลาดเคลื่อน โดยจะทำการทดลองหาความคลาดเคลื่อนของระยะเวลาในการตอบสนองของการตรวจจับ ซึ่งจะคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนได้จากสมการ

$$\%error = \frac{|T-N|}{N} \cdot 100 \quad (1.3)$$

เมื่อ %error หมายถึง ร้อยละของความคลาดเคลื่อน

T หมายถึง ค่าเฉลี่ยในการทดลอง

N หมายถึง ค่าระยะเวลาที่กำหนด

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยในการทดสอบได้ทำการทดลองจำนวน 30 ครั้งต่อ 1 ค่าเฉลี่ย

เมื่อทำการทดสอบระยะเวลาในการแจ้งเตือนตามเงื่อนไขเวลาของตา ศีรษะ และปาก พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 4%, 5.36% และ 4.12% ตามลำดับ

สรุปและอภิปรายผล

การพัฒนาาระบบแจ้งเตือนการหลับในขณะขับรถบนท้องถนน โดยจะแจ้งเตือนลักษณะอาการหลับในตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ 3 ลักษณะ คือ ลักษณะการหลับตา ลักษณะการเคลื่อนไหวของศีรษะ และลักษณะการอ้าปาก โดยจะเปรียบเทียบจากค่าอัตราการตอบสนอง ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงนานเกินเวลาที่กำหนดตามเงื่อนไขระบบจะแสดงไฟแสดงสถานะ และส่งเสียงเตือนผ่าน Buzzer ในทันที จากผลการทดลองระบบสามารถตอบสนองตามเงื่อนไขได้ตรง และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสำหรับผลตอบสนองของตัวตรวจจับตา ศีรษะ และปาก เฉลี่ยประมาณที่ 4%, 5.36% และ 4.12% ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดในการสั่งเอาต์พุต ซึ่งถือว่ามีความแม่นยำ โดยเฉพาะค่าความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตาซึ่งถือเป็นจุดตรวจจับที่สำคัญ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรออกแบบอุปกรณ์โดยแยก Raspberry Pi 3B+ กับ 5MP Camera Module V2 เพื่อให้เหมาะในการติดตั้ง
2. แยกการแสดงผล Buzzer ออกเป็น 3 ตัว เพื่อแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนของ Run Time GPIO
3. ควรเลือกโมดูลกล้องที่มีความไวต่อสภาพความสว่างที่มากกว่านี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับในกรณีความสว่างไม่เพียงพอต่อการตรวจจับ เช่น ช่วงกลางคืน หรือในพื้นที่อับแสงเช่น อุโมงค์ เป็นต้น

References

- [1] K.Murthy et al., “Smart Alert System for Driver Drowsiness Using Eegand Eyelid Movements,” *Mid. E. J. Sci. R.*, vol.14, no.5, pp.610-619, May.2013.
- [2] A. Devi et al., “Image Processing Techniques in Face Recognition,” *Int. J. Com. Trends and Tech.*, vol.4, no. 2, pp.59-62, 2013.
- [3] P. Jaturawat et al., “Development Class Room Record System by Face Detector,” *KMITL J. Inf. Tech.*, vol.5, no.1, pp.1-11, 2017.
- [4] X. Lu, “Image Analysis for Face Recognition,” *Dept. of Computer Science and Engineering Michigan State University, East Lansing, MI, 48824*, May.2003.
- [5] A. Singh et al., “Driver Drowsiness Alert System with Effective Feature Extraction,” *Int. J. R. in Emer. Sci. and Tech.*, vol.5, no. 4, pp.26-31, 2018.
- [6] T. Soukupova et al., “Real-Time Eye Blink Detection using Facial Landmarks,” in *XXI Computer Vision Winter Workshop (CWWW 2016), Rimske Toplice, Slovenia*, 2016, pp. 1-8.
- [7] S. Mehta et al., “Real-Time Driver Drowsiness Detection System Using Eye Aspect Ratio and Eye Closure Ratio,” in *International Conference on Sustainable Computing in Science, Technology and Management (SUSCOM 2019), Jaipur, India, 2019*, pp. 1333-1339.
- [8] <https://towardsdatascience.com/mouse-control-facial-movements-hci-app-c16b0494a971>
- [9] P. Awasekar et al., “Fatigue Detection and Alert System using Non-Intrusive Eye and Yawn Detection,” *Int. J. Com. App.*, vol.180, no.44, pp.1-5, May. 2018.
- [10] J. Feng et al., “Using Eye Aspect Ratio to Enhance Fast and Objective Assessment of Facial Paralysis,” *J. Comp. and math. meth. in med.*, vol. 2020, pp.1-11, Jan. 2020.
- [11] R. Sutthaweekul et al., “Face Detection based-on Haar-like Features,” *SWU Eng. J.*, vol.6, no.2, pp.34-43, 2011.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เป็นวารสารตีพิมพ์ และเผยแพร่บทความวิจัยในด้านเทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี บทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารฉบับนี้จะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องจำนวน 2 ท่านต่อหนึ่งบทความ หากผู้ทรงคุณวุฒิ 2 ท่าน มีความคิดเห็นไม่ตรงกัน ทางวารสารจะส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิ ท่านที่ 3 เป็นผู้พิจารณา และต้องได้รับความเห็นชอบจากบรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา โดยบทความที่พิจารณาตีพิมพ์ในวารสารนี้จะต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของวารสารอื่น กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการแก้ไขต้นฉบับและการพิจารณาตีพิมพ์ตามลำดับก่อนหลัง โดยมีข้อเสนอแนะในการส่งบทความดังนี้

การเตรียมต้นฉบับบทความ

ชื่อเรื่อง (Title)	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษควรสั้น กระชับ ครอบคลุมเนื้อหาสำคัญ และสื่อความหมายของเรื่องที่ใช้อย่างชัดเจน
ชื่อ นามสกุลของผู้เขียน	ระบุชื่อนามสกุลเต็ม ของผู้เขียนให้ครบทุกคน <u>โดยไม่ต้องใส่คำนำหน้านามใดๆ</u> ระบุสถานที่ทำงานหรือหน่วยงานที่สังกัดของผู้เขียน, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (E-mail) ทั้งภาษาไทย และภาษาอังกฤษ
บทคัดย่อ (Abstract)	มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษเป็นเนื้อความสรุปสาระสำคัญของเรื่อง ครอบคลุมวัตถุประสงค์ วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย และผลสรุป มีความยาวไม่เกิน 250 คำ ให้พิมพ์คอลัมน์เดียว
คำสำคัญ (Keyword)	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรเลือกคำสำคัญที่เกี่ยวข้องกับบทความ จำนวน 3-5 คำ
บทนำ	อธิบายถึงความสำคัญหรือที่มาของปัญหาที่ทำการศึกษา วัตถุประสงค์ และอาจรวมไปถึงวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
เนื้อเรื่อง	ใช้ภาษาที่เข้าใจง่าย กระชับรัดกุมและชัดเจน
วิธีการวิจัย	อธิบายขั้นตอนการวิจัย วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล และวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้ภาษาที่เข้าใจง่าย
ผลการวิจัย	อธิบายผลการทดลองที่พบอย่างชัดเจน ครบถ้วน
สรุปและอภิปรายผล	เป็นการประเมิน การตีความ และการวิเคราะห์ในแง่มุมต่าง ๆ ของผลที่ได้ว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ มีความสอดคล้อง หรือขัดแย้ง กับผลงานผู้อื่นอย่างไร โดยต้องมีการอ้างทฤษฎีหรือผลการศึกษาของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบ
กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)	ระบุสั้น ๆ ว่าได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยและความช่วยเหลือจากแหล่งใดบ้าง
เอกสารอ้างอิง (References)	การอ้างอิงในบทความใช้การอ้างอิงแบบตัวเลข ตามมาตรฐานสากล ดังที่แสดงไว้ในส่วนท้ายของประโยคนี้ [1] เอกสารอ้างอิงท้ายบทความทุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงในบทความ ตามรูปแบบของ IEEE

รูปภาพและตาราง

(<http://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf>) โดยแปลเอกสารอ้างอิง (References) จากภาษาไทยให้เป็นภาษาอังกฤษ ต้องมีความคมชัดเป็นภาพขาวดำที่ชัดเจน มีคำอธิบายสั้น ๆ ครบถ้วน และเข้าใจ กรณีที่เป็นตาราง ให้ระบุลำดับที่ของตารางใช้คำว่า “ตารางที่.....” และอธิบายใส่ไว้เหนือตาราง กรณีที่เป็นรูป ให้ระบุลำดับที่ของรูปใช้คำว่า “รูปที่.....” และมีคำอธิบายใส่ไว้ใต้รูป

รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิง

ตัวอย่างการอ้างอิงหนังสือ

- [1] ชื่อผู้แต่ง, *ชื่อหนังสือ(ตัวเอียง)*, (พิมพ์ครั้งที่), เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์หรือโรงพิมพ์, ปีที่พิมพ์.
- [2] สมชาย ประสิทธิ์จุตระกูล, *การออกแบบและวิเคราะห์อัลกอริทึม*, กรุงเทพฯ: เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC), 2001.
- [3] J.R. Quinlan, *C4.5: Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann Publishers, San Meto, California, 1993.

ตัวอย่างการอ้างอิงจากการประชุมวิชาการ

- [4] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อบทความ,” ใน หรือ In, *ชื่อการประชุมวิชาการ, ชื่อย่อการประชุมวิชาการ, ชื่อสถานที่จัดงาน*, วัน เดือน ปี ที่จัดงาน, เลขหน้า.
- [5] วรฤทัย หาญโชติพันธุ์, “การศึกษาแนวทางขวัญและกำลังใจในการปฏิบัติงานของบุคลากรมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา,” ใน *รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ครั้งที่ 8*: 2559, น. 726-735.
- [6] H. Worraruethai, “Staff Morale in Working at Suan Sunandha Rajabhat University,” in *XII International Conference on Human Resource Management and Professional Development (ICHRMPD 2014), Paris, France, 2014*, pp. 27-36.

ตัวอย่างการอ้างอิงจากวารสาร

- [7] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อบทความ,” *ชื่อวารสาร*, ปีที่, ฉบับที่, เลขหน้าบทความที่อ้างอิง, เดือนที่พิมพ์, ปีที่พิมพ์.
- [8] วรฤทัย หาญโชติพันธุ์, “วัสดุทางวิศวกรรม,” *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา*, ปีที่4, ฉบับที่ 2, หน้า 37-42, มกราคม-มิถุนายน, 2559.
- [9] M. Ito et al., “Application of amorphous oxide TFT to electrophoretic display,” *J. Non-Cryst. Solids*, vol.354, no. 19, pp. 2777-2782, Feb. 2008.

การอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์หรือสารนิพนธ์

- [10] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์,” วิทยานิพนธ์หรือสารนิพนธ์ ชื่อย่อปริญญา (สาขา), ชื่อมหาวิทยาลัย, ชื่อเมือง, ชื่อประเทศ, ปีที่พิมพ์.
- [11] วรฤทัย หาญโชติพันธ์, “ปัจจัยที่ส่งผลต่อการศึกษา,” วิทยานิพนธ์ บธ.ม. (การบริหารธุรกิจ), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, 2551.
- [12] J. O.Williams, “Narrow-band analyzer,” Ph.D. dissertation (Electrical Engineering), Harvard University, Cambridge, MA, USA, 1993.

การส่งต้นฉบับบทความ

ส่งบทความผ่านระบบ <http://www.journal.fit.ssru.ac.th> เท่านั้น หากต้องการรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถติดต่อได้ที่ กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เลขที่ 1 ถนนอุทัยนอก แขวงวชิระ เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300 โทรศัพท์ 0 2160 1438 ต่อ 22 โทรสาร 0 2160 1440 Email : fit@ssru.ac.th



แบบฟอร์มส่งบทความวิจัยเพื่อพิจารณาตีพิมพ์
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

(ภาษาอังกฤษ)

ชื่อ-สกุล ผู้เขียนบทความ

ระดับการศึกษาสูงสุด ตำแหน่งทางวิชาการ

หน่วยงาน

สถานที่ติดต่อผู้เขียนบทความ

เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์ โทรศัพท์มือถือ โทรสาร

E-mail.....

ชื่อ-สกุล ผู้ร่วมบทความ (1)

เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์ โทรศัพท์มือถือ โทรสาร

E-mail.....

ชื่อ-สกุล ผู้ร่วมบทความ (2)

เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์ โทรศัพท์มือถือ โทรสาร

E-mail.....

ข้าพเจ้า และผู้เขียนร่วม (ถ้ามี) ขอรับรองบทความที่เสนอตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ดังนี้

1. บทความฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน และไม่ได้อยู่ระหว่างกระบวนการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารใดๆ

2. เนื้อหาของบทความ ทั้งข้อความ รูปภาพ ทั้งหมดที่ปรากฏขอรับรองว่าเป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วม ในกรณีที่มีการอ้างอิงผลงานจากผู้อื่น ข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมได้ดำเนินการตามจรรยาบรรณทางการวิจัยทุกประการ กรณีมีการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมขอรับผิดชอบแต่เพียงผู้เดียว

3. ข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมยอมรับเงื่อนไขการพิจารณาบทความ และยินยอมปรับแก้บทความตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิหรือตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร

4. ข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมขอมอบลิขสิทธิ์บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ให้แก่มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ลงชื่อผู้ส่งบทความ

(.....)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

หมายเหตุ : กองบรรณาธิการไม่รับพิจารณาบทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนด