



RMUTL Engineering Journal

ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2565

ISSN 2465-4248

ISSN(Online) 2697-3839

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

- | | |
|--|----|
| คุณลักษณะทางความร้อนของเตาเผาถ่านชีวภาพแบบแอนิลาและปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ
ชัยพร มณีชัยดี ทิพาพร คำแดง นภาพร ปัญญาใหญ่ ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย และ ประชา ยืนยงกุล | 1 |
| การรับรู้จากระยะไกลเพื่อการศึกษาเกี่ยวกับความชื้นของดิน: เทคนิคการตรวจวัดและแหล่งข้อมูลที่มีให้บริการ
จิรวัฒน์ ละอองมณี สวรรินทร์ ฤกษ์อยู่สุข และ ภาณุ อุทัยศรี | 10 |
| การแผ่รังสีน้ำสูญเสียสำหรับโครงข่ายท่อประธานด้วยวิธีสมมูลน้ำ
แพรวา จาววงศ์สันต์ จิรเมธ ช้างคล่อม อติชัย พรพรหมินทร์ ชัยพร ใจแก้ว และ สุรชัย ลิปิวัฒ | 20 |
| การใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์สำหรับโครงข่ายท่อน้ำประปา:
จังหวัดสมุทรปราการ ประเทศไทย
ณัฏพล จารูวิมลกุล จิรเมธ ช้างคล่อม อติชัย พรพรหมินทร์ และ สุรชัย ลิปิวัฒนาการ | 30 |
| การทอริแฟกซ์ชั้นเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแก๊สไอเสียแห้งและแก๊สไนโตรเจน
สุภาภรณ์ กลิ่นเกษร และ คณิต มานะรุระ | 40 |
| การใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในระบบอบแห้ง
ยุงยุทธ ไต้เงาสน ปริญ คงกระพันธ์ และ หยาตผน ทนงการกิจ | 49 |



วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ได้รับการประเมินให้อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1

F a c u l t y o f E n g i n e e r i n g



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา RMUTL Engineering Journal

วัตถุประสงค์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เป็นวารสารทางวิชาการจัดพิมพ์ฉบับแรกในเดือนมกราคม พ.ศ. 2559 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและองค์ความรู้ทางที่น่าสนใจด้านวิจัยและงานบริการวิชาการ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสร้างความก้าวหน้าทางวิชาการ และมาตรฐานการประกอบวิชาชีพ โดยสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ วิศวกรรมระบบควบคุม วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมโทรคมนาคม วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมแม่พิมพ์ วิศวกรรมโลหการ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เลขที่ : 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

โทรศัพท์ : 0 5392 1444 ต่อ 2641, 1236

เว็บไซต์ : <https://engineering.rmutl.ac.th/journal> และ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ>

อีเมล : EngineeringJournal@rmutl.ac.th

ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและกิจกรรมนักศึกษา

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาระบบอย่างยั่งยืน

รองอธิการบดีฝ่ายแผนนโยบายและยุทธศาสตร์

รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร

ผู้ช่วยอธิการบดี

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณบดีคณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์

คณบดีคณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร

ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา



ผู้อำนวยการสถาบันถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน
ผู้อำนวยการวิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ
ผู้อำนวยการสำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ
รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา ยิ่งขยัน คณะวิศวกรรมศาสตร์

รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์ สิทธิเจริญ คณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการจากหน่วยงานภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ลักกมณ	เทพหัสดิน ณ อยุธยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ดนัย	ต.รุ่งเรือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์	อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประดิษฐ์	เทอดทูล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุณ	รุจิจินากุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์	ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต	สิริสิงห์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณชนม์	ภูมิภิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์	เกิดขึ้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์	ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	เปรมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์	แก้วตาพิพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สันติรัฐ	นันทะอาจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์	เจริญสุวรรณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.อุพงษ์	พงษ์เจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ขจรศักดิ์	โสภากาจารย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย	ฉัตรทินวัฒน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ	โสภางค์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวัติ	เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อนินติ	โชติสังกาศ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์	คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ	รอตอัมพร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐปน	ชื่นบาล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิราภรณ์	ชื่นบาล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์	สากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธิพล	ดำรงชัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวา	แก้วปลั่ง	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ	หาญณรงค์ชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์	แพบัว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิโยรส	พรหมดิเรก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพงษ์	สุวลักษณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กองบรรณาธิการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน	คำน่าน	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา	เย็นยงกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย	เดชธรรมรงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พินิจ	เนื่องภิรมย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	จารุภูมิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต	แก้วดวงตา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	จินะวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพร	พันธุ์ท่าช้าง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวโรดม	ศิริลักษณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณชาติ	มันศิลป์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ภาณุ	อุทัยศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ณัฐชาติ	ชูเกียรติขจร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ปรัชญ์	ปิยะวงศ์วิศาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์

ฝ่ายจัดพิมพ์และเผยแพร่

นางสาวจิราภรณ์	กันทะใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายครรชิต	เงินคำคง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวอุไรวรรณ	สายยะนันท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวจุฑาทิพย์	สุวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาววัลลภา	วงศ์ชายะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์



จดหมายจากบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนกรกฎาคม - ธันวาคม 2565 อยู่ในฐานข้อมูลศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1 บทความวิจัยที่ส่งผ่านระบบได้รับการได้ผ่านการประเมินคุณภาพจากกองบรรณาธิการ และผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) จากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย กองบรรณาธิการจะรักษาคุณภาพของวารสารให้ได้มาตรฐาน เพื่อให้วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J.) เป็นที่ยอมรับและเกิดการแบ่งปันองค์ความรู้ทางวิชาการที่มีคุณภาพและทันสมัยอย่างต่อเนื่อง

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ฉบับนี้ได้รวบรวมบทความทางวิชาการที่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 6 บทความ ประกอบด้วยบทความทางวิชาการในด้านวิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมภูมิสารสนเทศศาสตร์ วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ วิศวกรรมเครื่องกล และวิศวกรรมพลังงานทดแทน โดยผู้อ่านสามารถอ่านบทความฉบับปัจจุบันหรือฉบับย้อนหลังแบบออนไลน์ได้ทางเว็บไซต์ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ>

ในนามของกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ขอขอบพระคุณนักวิจัยทุกท่านเป็นอย่างสูง ที่ส่งบทความมาพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่เสียสละเวลาในการประเมินบทความ และให้คำแนะนำในการปรับปรุงเนื้อหาบทความให้มีคุณภาพ คณะผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ผู้สนับสนุน รวมทั้งคณะทำงานในกองบรรณาธิการวารสาร (RMUTL Eng. J.) และในโอกาสนี้ขอเชิญชวนผู้อ่านที่สนใจ ส่งบทความทางด้านวิชาการหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อตีพิมพ์ในวารสาร (RMUTL Eng. J.) ในฉบับต่อ ๆ ไป

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา ยิ่งขยัน)

บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา



สารบัญ

ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2565

บทความวิชาการ

คุณลักษณะทางความร้อนของเตาเผาถ่านชีวภาพแบบแอนิลาและปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ	1
ชัยพร มณีชัยดี ทิพาพร คำแดง นำพร ปัญญาใหญ่ ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย และ ประชา ยืนยงกุล	
การรับรู้จากระยะไกลเพื่อการศึกษาเกี่ยวกับความชื้นของดิน: เทคนิคการตรวจวัดและแหล่งข้อมูลที่มีให้บริการ	10
วิโรจน์ ละอองมณี สวรรินทร์ ฤกษ์อยู่สุข และ ภาณุ อุทัยศรี	
การแผ่รังสีน้ำสูญเสียสำหรับโครงข่ายท่อประธานด้วยวิธีสมมูลน้ำ	20
แพรวา จาววงศ์สันต์ จิรเมธ ช้างคล่อม อติชัย พรพรหมินทร์ ชัยพร ใจแก้ว และ สุรัชย์ ลิปิวัฒน์	
การใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์สำหรับโครงข่ายท่อน้ำประปา: จังหวัดสมุทรปราการ ประเทศไทย	30
ณัฏพล จารุวิมลกุล จิรเมธ ช้างคล่อม อติชัย พรพรหมินทร์ และ สุรัชย์ ลิปิวัฒน์การ	
การทอริแพคชั้นเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแก๊สไอเสียแห้งและแก๊สไนโตรเจน	40
สุภาภรณ์ กลิ่นเกษร และ คณิต มานะธูระ	
การใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในระบบอบแห้ง	49
ยุยยุทธ ใต้เงาสน ปริญ คงกระพันธ์ และ หยาตผ่น ทนงการกิจ	



คุณลักษณะทางความร้อนของเตาเผาถ่านชีวภาพแบบแอนิลาและปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ

Thermal Characteristics of Anila-type Biochar Kiln and Factors Affecting Biochar Production

ชัยพร มณีชัย¹, ทิพาพร คำแดง^{1*}, นำพร ปัญญาใหญ่¹, ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย¹ และ ประชา ยืนยงกุล²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Chaiyaphorn Maneekhat¹, Tipapon Khamdaeng^{1*}, Numpon Panyoyai¹, Thanasit Wongsiriamnuay¹ and Pracha Yeunyongkul²

¹Division of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

63 Moo 4, Nong Harn, San Sai, Chiang Mai, 50290

²Division of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

128 Huay Kaew Road, Chang Phueak, Mueang, Chiang Mai, 50300

*ผู้รับผิดชอบบทความ: tipapon@mju.ac.th เบอร์มือถือ 08-5039-0883

Received: 29 September 2021, Revised: 18 November 2021, Accepted: 17 March 2022

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือเพื่อศึกษาการจำลองสภาพการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวนขนาด 50 100 และ 200 ลิตร โดยใช้เตาเผาแบบแอนิลา ศึกษาผลของชนิดวัสดุชีวมวล ขนาดเตา และเวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อนที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวน ปริมาณถ่านชีวภาพ และสมบัติของถ่านชีวภาพ และหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งการออกแบบเตาเผาถ่านชีวภาพจะมีขนาดรูเจาะแกนกลาง 3.17 มิลลิเมตร จำนวน 15 24 และ 44 รูเจาะตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร ที่ใช้ชีวมวลเป็นแกลบให้ปริมาณถ่านชีวภาพสูงที่สุดเท่ากับ 51.1 เปอร์เซ็นต์ โดยจากการจำลองสภาพการกระจายอุณหภูมิพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง คือ 459.4 ± 184.9 468.7 ± 100.3 และ 353.1 ± 97.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบให้ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.5 ± 6.2 3.9 ± 4.1 และ 0.9 ± 0.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากสมการสหสัมพันธ์พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยในเตาเผาไม่ได้มีผลต่อปริมาณของถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ แต่กลับเป็นตัวแปรมิติของเตา ได้แก่ A/Ap และ L/D เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน และชนิดของชีวมวล ที่ส่งผลต่อปริมาณของถ่านชีวภาพ นอกจากนี้ยังพบว่า A/Ap L/D และ เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพด้วย จากผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงลักษณะการกระจายอุณหภูมิของเตาเผาที่มีขนาดแตกต่างกันและปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการผลิต

คำสำคัญ: การจำลองทางความร้อน เตาเผาแบบแอนิลา ถ่านชีวภาพ สหสัมพันธ์

**Abstract**

The objectives of this research were to study the temperature distribution simulation in insulated Anila-type biochar kiln with size of 50, 100 and 200 liters and to study the effects of biomass material types, kiln size, and pyrolysis time on temperature distribution in the insulated biochar kiln, biochar yield, and biochar property. The correlations between the variables related to the biochar production were furthermore investigated. The core of the kiln had a puncture diameter of 3.17 mm, number of the puncture of 15, 24 and 44, respectively. The results showed that a 200-liter biochar kiln with biomass as the husk rice had the highest biochar yield of 51.1%. Based on the simulation results, the average temperature distribution at pyrolysis time of 1, 2 and 3 hours was 459.4 ± 184.9 °C, 468.7 ± 100.3 °C and 353.1 ± 97.8 °C, respectively, when compared with the experiment results the error was 6.5 ± 6.2 , 3.9 ± 4.1 and $0.9 \pm 0.9\%$, respectively. From the correlation equation, it was found that average temperature inside the kiln had no significant effect on the biochar yield and acidity-alkalinity. On the other hand, the kiln dimensional parameters, i.e. A/Ap, L/D, pyrolysis time and biomass material type had an effect on the biochar yield. Furthermore, the A/Ap, L/D and pyrolysis time had an effect on the acidity-alkalinity of biochar as well. From the results of this research, the temperature distribution characteristics of different kiln sizes and conditions affecting the biochar yield and acidity-alkalinity obtained from the biochar production were revealed.

Keywords: Thermal Simulation, Anila Stove, Biochar, Correlation

1. บทนำ

ปัจจุบันโลกกำลังประสบปัญหาด้านความมั่นคงทางด้านอาหาร และความต้องการด้านพลังงาน ซึ่งทั้งหมดนี้มีความเกี่ยวข้องกับการจัดการทรัพยากรที่จะนำมาช่วยแก้ไขปัญหาเหล่านี้ ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาดังกล่าวไปพร้อม ๆ กันคือ เทคโนโลยีถ่านชีวภาพ (Biochar) ถ่านชีวภาพเป็นถ่านที่ผลิตจากชีวมวลหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ เช่น เศษวัสดุทางการเกษตร ไม่ว่าจะเป็น ชังข้าวโพด [1] เปลือกกล้วย กะลาจากแพ [2-3] นำมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ และควบคุมอากาศให้เข้าไปเผาไหม้น้อยที่สุดซึ่งกระบวนการเผาไหม้นี้เรียกว่า การแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) [4] มีการดำเนินการอยู่ 2 วิธี คือ การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis) และการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) [5-6] โดยงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่ การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าเนื่องจากจะได้ผลผลิตถ่านชีวภาพมากกว่าการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว ซึ่งเป็นการเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ใช้ระยะเวลาเป็นชั่วโมง และใช้อุณหภูมิระหว่าง 350-600 องศา

เซลเซียส [7] ในสภาวะที่มีอากาศน้อยที่สุด

เตาแบบแอนิลา (Anila Stove) เป็นเตาประเภทหนึ่งที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งถูกออกแบบให้มีแกนกลางที่ใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงอยู่ด้านในและมีพื้นที่สำหรับบรรจุชีวมวลอยู่ภายในที่ถูกแยกออกจากแกนกลาง ด้านล่างของแกนกลางจะมีช่องให้อากาศสามารถผ่านเข้าออกได้ เมื่อให้ความร้อนแก่แกนกลางด้วยเชื้อเพลิงจนแกนกลางร้อนขึ้น [8-9] ส่งผลให้อุณหภูมิในส่วนที่บรรจุชีวมวลมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยกระบวนการดังกล่าวใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 2 – 3 ชั่วโมง [10] ซึ่งเตาแบบแอนิลาได้ถูกนำมาวิจัยเพื่อพัฒนาปรับปรุงและนำไปใช้ในพื้นที่เกษตรกรรม ครุภัณฑ์ที่มีสวน ไร่ นา เป็นการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร แปรสภาพให้เป็นถ่านชีวภาพและนำไปใช้ประโยชน์ได้

Cho et al. [11] ศึกษาถ่านชีวภาพที่ได้จากกากกาแฟมาทดสอบเป็นตัวดูดซับในการกำจัดโลหะหนักและสารอินทรีย์ต่าง ๆ ใช้เตาเผาชีวมวลแบบแก๊สซิไฟเออร์ในการผลิตถ่านชีวภาพมีเป้าหมายเพื่อใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในการปรับปรุงคุณภาพของดินแทนการใช้สารเคมีสามารถปรับค่า pH ของดินจาก 6 เป็น 7 ได้และดินที่



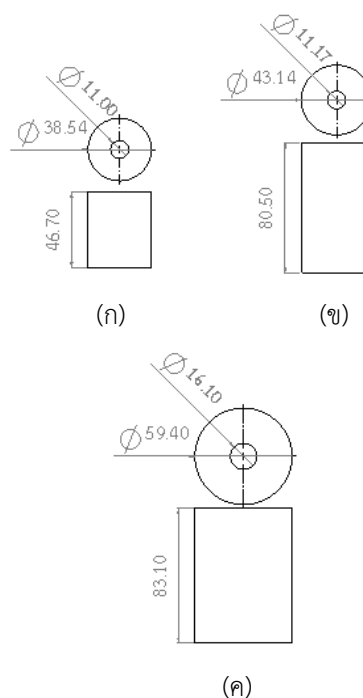
ได้มีความเสถียรมากกว่าการใช้ปูนขาวที่อัตราส่วนเดียวกัน Panyoyai et al. [12] ศึกษาออกแบบเตาเผาถ่านชีวภาพที่มีการเจาะแกนกลางที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ผลผลิตของถ่านชีวภาพในปริมาณสูงสุด ทำการจำลองสภาพการกระจายอุณหภูมิด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และตรวจสอบความถูกต้องของการกระจายอุณหภูมิโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จากผลการจำลองสามารถเผยให้เห็นถึงลักษณะของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่มีผลต่อการผลิตและคุณภาพของถ่านชีวภาพ Panyoyai et al. [13] ศึกษาความแตกต่างของวัสดุแต่ละประเภทที่นำมาผลิตถ่านชีวภาพ คือ ชังข้าวโพด แกลบ และใบลำไย โดยใช้เตาเผาขนาด 50 ลิตร ขนาดรูเจาะ 6.35 มิลลิเมตร ผลการทดลองทำให้ทราบว่า ผลผลิตที่ได้เท่ากับ 15.7 24.3 และ 11.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับ ชังข้าวโพด แกลบ และใบลำไย ตามลำดับ Kanouo et al. [14] ศึกษาเตาเผาแบบ Pilot-Scale Retort Kiln โดยใช้ชีวมวล 2 ชนิด คือ ชังข้าวโพดและเปลือกถั่วลิสง ประสิทธิภาพการผลิตของเตามีความแตกต่างกันอยู่ในช่วงระหว่าง 33-68 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับ 10-20 เปอร์เซ็นต์ที่ได้จากเตาเผาแบบดั้งเดิม และมีคุณสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์ของ European Biochar Certificate (EBC) และ International Biochar Initiative (IBI) Wijitkosum et al. [15] ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพที่ใช้เทคโนโลยีต้นทุนต่ำเพื่อเกษตรกรในท้องถิ่น โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตคือ ลำต้นมันสำปะหลังและชังข้าวโพด พบว่าลำต้นมันสำปะหลังให้พื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer-Emmett-Teller, BET) มากที่สุดและในการผลิตถ่านชีวภาพชังข้าวโพดให้ผลผลิตสูงสุด

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นพบว่าชนิดวัสดุชีวมวล ลักษณะเตา และอุณหภูมิในกระบวนการผลิต ล้วนเป็นปัจจัยในการผลิตถ่านชีวภาพ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านชีวภาพ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพที่มีขนาดแตกต่างกัน และหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพ ชนิดวัสดุชีวมวล เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน ที่มีต่อปริมาณถ่านชีวภาพ และสมบัติของถ่านชีวภาพ

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 รูปแบบเตาเผาถ่านชีวภาพ

เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ที่ใช้ในการทดลองหุ้มฉนวนด้วยเซรามิคไฟเบอร์ โดยทุกขนาดเตาทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน มีความหนา 2 มิลลิเมตร ความสูงและขนาดรูเจาะแกนกลางเตาเพื่อใส่ท่อแกนกลางแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด (ก) 50 ลิตร (ข) 100 ลิตร และ (ค) 200 ลิตร (ขนาดมิติหน่วยเป็นมิลลิเมตร)

2.2 แกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพ

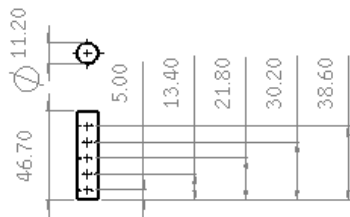
จากรูปที่ 2 แสดงแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ที่ใช้ในการทดลอง ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน มีความหนา 2 มิลลิเมตร และมีขนาดรูเจาะแกนกลาง 3.17 มิลลิเมตร จำนวนรูเจาะเท่ากับ 15 24 และ 44 รูเจาะ ตามลำดับ

2.3 การทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพ

ชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 5 ชนิด คือ ชังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กิ่งไม้ลำไย และกะลาปากแพ เริ่มต้นการทดสอบโดยการนำชีวมวลไปตากแดดเพื่อลดความชื้นให้มีความชื้นต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก นำชีวมวลที่จะใช้ในการทดสอบใส่ลงไปในเตาเผาถ่านชีวภาพ จนเต็ม ใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งจำนวน 3 กิโลกรัม และชังข้าวโพดแห้งอีก 1 กิโลกรัม เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ใส่ลงไปใน

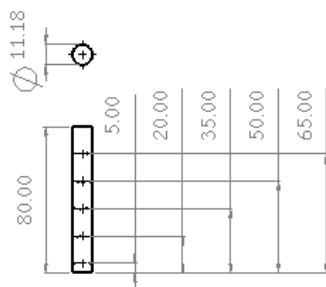


แกนกลางของเตาเผา จุดไฟจากทางด้านบนเตา ใช้เวลาในการเผาไหม้ทั้งหมด 3 ชั่วโมง [6] ชีวมวลภายในเตาจะเกิดการแยกสลายด้วยความร้อนและคายแก๊สออกมาเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อยู่ในแกนกลาง จนการลุกไหม้ที่เกิดจากแก๊สดับลง ปล่อยทิ้งไว้จนเตาเย็นลงจากนั้นจึงเปิดฝาเตาเพื่อนำถ่านชีวภาพออกจากเตาและทำการคัดแยกหาปริมาณของชีวมวลที่เปลี่ยนเป็นถ่าน

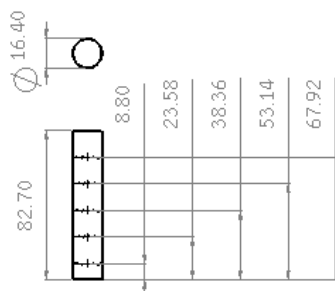


(ก)

รูปที่ 2 (หน้าถัดไป)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2 แกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพที่มีจำนวนรูเจาะ (ก) 15 รูเจาะ (ข) 24 รูเจาะ และ (ค) 44 รูเจาะ (ขนาดมิติหน่วยเป็นมิลลิเมตร)

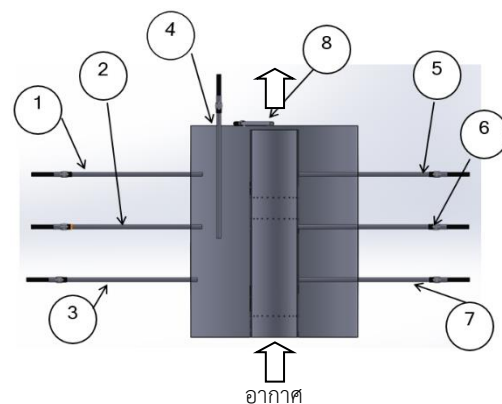
ชีวภาพ นำถ่านชีวภาพที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณถ่านชีวภาพ

จากนั้นนำถ่านชีวภาพที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ตามมาตรฐาน DIN ISO 10390 ใช้อัตราส่วน

1:5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของถ่านชีวภาพต่อสารละลาย CaCl_2 0.01 โมลาร์ โดยนำมาเขย่าเป็นเวลา 60 นาที ที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

2.4 การทดสอบการกระจายอุณหภูมิ

ทำการวัดอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการทดสอบทั้งหมด 8 จุด โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีช่วงการวัดอุณหภูมิ 0-1,000 องศาเซลเซียส และมีค่าความผิดพลาด ± 2.5 องศาเซลเซียส ติดตั้งที่ตำแหน่งตามแนวแกนเตา (ด้านบน ตรงกลาง และด้านล่างเตา) และตามแนวรัศมี (ตำแหน่งแกนกลาง ตรงกลาง และผนังเตาด้านใน) โดยระยะของเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งตามแนวแกนเท่ากับ $1/4$, $2/4$ และ $3/4$ ของความสูงเตาแต่ละขนาด ตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลภายในเตาแสดงในรูปที่ 3 โดยแบ่งเป็นวัดอุณหภูมิภายในเตา 7 จุด (ตำแหน่งที่ 1-7) และอุณหภูมิเปลวไฟ 1 จุด (ตำแหน่งที่ 8) ซึ่งอุณหภูมิภายในเตาตำแหน่งที่ 1-7 จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพและคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยเพื่อใช้ในการสร้างสมการสหสัมพันธ์ต่อไป



รูปที่ 3 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

อุณหภูมิในระหว่างกระบวนการทดสอบจะถูกบันทึกไว้โดยใช้อุปกรณ์ Wisco Online Datalogger OD04 โดยจะเก็บอุณหภูมิทุก ๆ 2 วินาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนกระทั่งจบการทดสอบ และเลือกอุณหภูมิจากตำแหน่งต่าง ๆ ที่วัดค่าได้ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของการกระจายอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลา และนำไปเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพ

2.5 การจำลองสภาพด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

ทำการจำลองสภาพภายใต้เงื่อนไขการถ่ายเทความร้อน



ในสภาวะคงตัว มีการถ่ายเทความร้อนจากเชื้อเพลิงผ่านผนังท่อแกนกลางด้วยการนำความร้อน และมีการส่งถ่ายความร้อนจากผนังท่อแกนกลางด้านในไปสู่ชีวมวลในเตาด้วยการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ส่วนผนังเตาไม่มีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากเตามีการหุ้มฉนวน จำลองสภาพการถ่ายเทความร้อนแบบแกนสมมาตรและแสดงผลการกระจายอุณหภูมิแบบ 2 มิติ ตัวแปรในการจำลองสภาพ ได้แก่ ชนิดวัสดุชีวมวลและขนาดของเตาเผา ที่เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน 1 2 และ 3 ชั่วโมง ขั้นตอนการจำลองสภาพคือใช้แบบจำลองที่เขียนโดยโปรแกรม SolidWorks จากนั้นใช้โปรแกรมทางไฟไนต์ เอลิเมนต์ในการจำลองสภาพ กำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ และวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิ โดยกำหนดให้แบบจำลองมีการส่งถ่ายความร้อนแบบคงตัว มีการนำความร้อนจากผนังแกนกลางด้านในไปสู่ผนังแกนกลางด้านนอก มีการนำและพาความร้อนในเตาเผา และมีการพาความร้อนแบบอิสระออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่วนเงื่อนไขขอบ กำหนดให้อุณหภูมิผนังแกนกลางด้านนอกมีค่าเท่ากับอุณหภูมิภายในเตาเผาตามแนวแกนที่ตำแหน่งแกนกลาง อุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าในเตาเผาลานชีวมวลที่ได้จากการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองสภาพ

2.6 วิธีการหาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ

วิธีการหาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด คือ ช้างข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลาปากแพ โดยการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รู้เจาะของแกนกลาง (A/Ap) ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา (L/D) เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน และค่าความร้อนของชีวมวล ที่มีต่อปริมาณถ่านชีวภาพ และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) วางแผนการทดลองโดยศึกษาปัจจัยที่ระดับต่ำและระดับสูง ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 1 และวิเคราะห์หาแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบการวิเคราะห์แบบถดถอย เพื่อหาปัจจัยที่มีความสำคัญในการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวล ทั้ง 5 ชนิด

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ

Factors	Levels	
	Low	High
Temp, X_1 (°C)	126.85 (12)	690.94 (12)
A/Ap, X_2	274.53	296
L/D, X_3	1.302	1.86
Time, X_4 (hr)	1	3
HHV, X_5 (MJ/kg)	8.37 (6)	28.95 (6)

2.7 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปร

การออกแบบการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด มีปัจจัยสำหรับการศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต (X_1) พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รู้เจาะของแกนกลาง, A/Ap, (X_2) ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา, L/D, (X_3) เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน (X_4) และค่าความร้อนของชีวมวล (X_5) ตามลำดับ

ผลจากการทดลองสามารถนำมาสร้างสมการเชิงเส้น เพื่อใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 5 และการตอบสนอง (Y) สามารถคำนวณปริมาณถ่านชีวภาพ (Y_1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง, pH, (Y_2) ตามสมการที่ (1) คือ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 \quad (1)$$

โดยที่ Y คือ ค่าทำนายการตอบสนอง; β_0 เป็นค่าคงที่; X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 เป็นตัวแปรอิสระ; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นซึ่งประสิทธิภาพของการทำนายผลผลิตสูงสุดโดยสมการเชิงเส้น จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

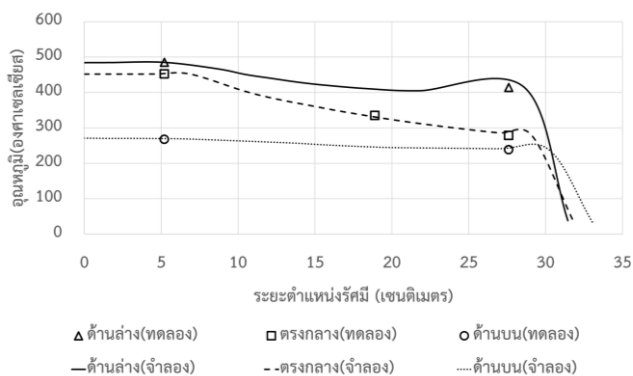
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ทำการทดสอบหาการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาลานชีวมวล และหาปริมาณถ่านชีวภาพและสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งได้แก่ ช้างข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลาปากแพ โดยใช้เตาเผาลานชีวมวลแบบแอนิลาหุ้มฉนวน ขนาดเตา 50 100 และ 200 ลิตร และใช้เวลาในการแยกสลายด้วยความร้อน 1 2 และ 3 ชั่วโมง ผลที่ได้การทดสอบมีดังต่อไปนี้



3.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองสภาพกับผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวนขนาด 50 100 และ 200 ลิตร จากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด คือ ช้างข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลาปากแพ พบว่าแกลบเป็นชีวมวลที่ให้ปริมาณถ่านชีวภาพดีที่สุดคือ 45.6 47.8 และ 51.1 เปอร์เซ็นต์ และกะลาปากแพเป็นชีวมวลที่ให้ปริมาณถ่านชีวภาพน้อยที่สุดคือ 27.6 32.9 และ 34.9 เปอร์เซ็นต์ ที่เตาขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ตามลำดับ



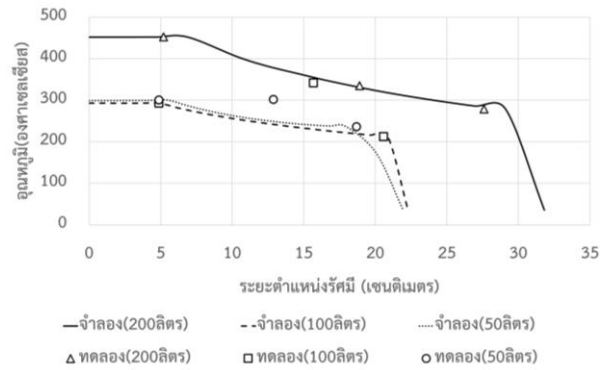
รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งบน กลาง ล่าง ของเตาขนาด 200 ลิตร ที่เวลา 3 ชั่วโมง ชีวมวลเป็นแกลบ

เมื่อเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพกับผลการกระจายอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบ

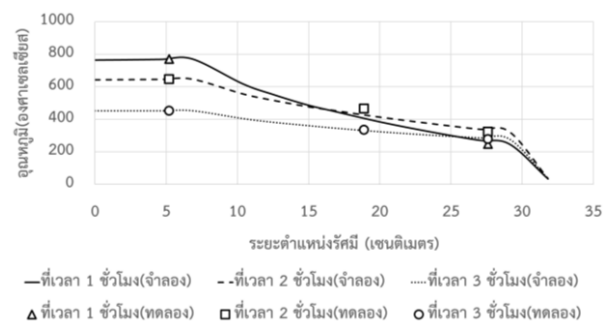
จากรูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิของเตาขนาด 200 ลิตร ที่เวลา 3 ชั่วโมง ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ อุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพที่ตำแหน่งบน กลาง ล่างของเตา มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.9 ± 0.1 0.9 ± 0.9 และ 0.2 ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

รูปที่ 6 แสดงการกระจายอุณหภูมิของเตาที่เวลา 3 ชั่วโมง ที่ตำแหน่งกลางเตา ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ อุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพที่ขนาดเตา 50 100 และ 200 ลิตร มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 4.3 ± 6.7 5.1 ± 12.1 และ 0.7 ± 0.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

รูปที่ 7 แสดงการกระจายอุณหภูมิของเตาขนาดเตา 200 ลิตร ที่ตำแหน่งกลางเตา ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ อุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.5 ± 6.2 3.9 ± 4.1 และ 0.9 ± 0.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และรูปที่ 8 แสดงการกระจายอุณหภูมิของเตาที่เวลา 3 ชั่วโมง ขนาดเตา 200 ลิตร ตำแหน่งกลางเตาอุณหภูมิ



รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิที่ขนาดเตา 50 100 และ 200 ลิตร ที่เวลา 3 ชั่วโมง ตำแหน่งกลางเตา ชีวมวลเป็นแกลบ



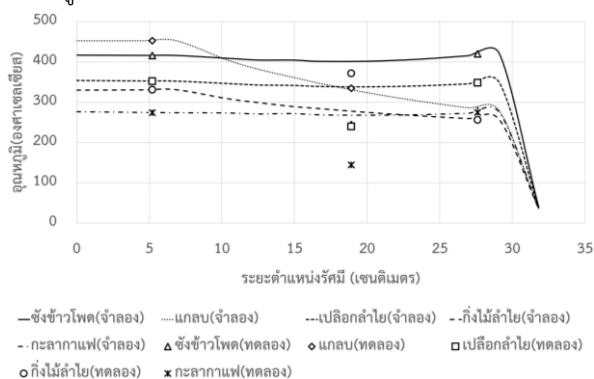
รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ขนาดเตา 200 ลิตร ตำแหน่งกลางเตา ชีวมวลเป็นแกลบ

ที่ได้จากการจำลองสภาพของวัสดุชีวมวล 5 ชนิดคือ ช้างข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลาปากแพ มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 21.6 ± 36.8 0.9 ± 0.9 13.9 ± 23.5 8.7 ± 14.3 และ 28.6 ± 49.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการจำลองสภาพและผลการทดสอบเกิดจากสมมติฐานของแบบจำลองที่กำหนดขึ้น จากทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ อุณหภูมิใกล้แหล่งกำเนิดความร้อน (แกนกลาง) จะสูงสุด แล้วค่อยลดลงตามระยะห่างจากแหล่งกำเนิดความร้อน ซึ่งไม่ซับซ้อนเหมือนปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการทดสอบจริง จากผลการเปรียบเทียบผลการจำลองสภาพและผลการทดสอบทำให้ทราบค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.2 ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้ถ่านชีวภาพจากแกลบที่ผลิตด้วยเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร ที่เวลาในการแยกสลายด้วยความร้อน 3 ชั่วโมง และให้ผลผลิตสูงที่สุดคือ 51.1 เปอร์เซ็นต์

3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์สมการสหสัมพันธ์จากผลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพ (ตารางที่ 2) พบว่าพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง, A/A_p , (X_2) ความสูง



รูปที่ 8 การกระจายอุณหภูมิของวัสดุชีวมวล 5 ชนิดที่เวลา 3 ชั่วโมง ขนาดเตา 200 ลิตร ตำแหน่งกลางเตา

ของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา, L/D , (X_3) เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน (X_4) และค่าความร้อนของชีวมวล (X_5) ให้ค่า p -value น้อยกว่า 0.05 บ่งชี้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพ (Y_1) ที่ได้จากการผลิต อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าความเชื่อมั่นที่ R^2 เท่ากับ 0.835

จากผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] พบว่าปริมาณถ่านชีวภาพขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายใต้กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน โดยที่อุณหภูมิแปรผกผันกับปริมาณถ่านชีวภาพ เป็นการทดสอบในเตาเผาไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำ แต่อุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นค่าเฉลี่ยภายในเตาเผาแบบแอโนลาซึ่งแต่ละจุดมีค่าไม่เท่ากัน การจะควบคุมอุณหภูมิให้แม่นยำเหมือนเตาไฟฟ้าไม่สามารถทำได้ ในส่วนนี้คือข้อจำกัดของงานวิจัย แต่อย่างไรก็ตามเตาที่ทดสอบสามารถผลิตถ่านชีวภาพได้อยู่ในช่วง 27.6 ถึง 51.1 เปอร์เซ็นต์ ตามขนาดของเตาเผาและชนิดวัสดุชีวมวล ซึ่งสามารถผลิตถ่านชีวภาพเพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงดินได้ [13]

ตารางที่ 2 ANOVA สำหรับแบบจำลองเชิงเส้นของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพ

Factors	P-value
Intercept	0.0001
Temp, X_1 ($^{\circ}\text{C}$)	0.1008
A/A_p , X_2	0.0001
L/D , X_3	0.0171
Time, X_4 (hr)	0.0001
HHV, X_5 (MJ/kg)	0.0315

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเชิงเส้น และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบถดถอย สามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายปริมาณถ่านชีวภาพได้ ดังสมการที่ (2)

$$Y_1 = -187.600 - 0.016X_1 + 0.744X_2 - 12.940X_3 + 13.843X_4 - 0.294X_5 \quad (2)$$

ตารางที่ 3 ANOVA สำหรับแบบจำลองเชิงเส้นของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

Factors	P-value
Intercept	0.0001
Temp, X_1 ($^{\circ}\text{C}$)	0.9715
A/A_p , X_2	0.0001
L/D , X_3	0.0001
Time, X_4 (hr)	0.0279
HHV, X_5 (MJ/kg)	0.1177

จากตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์สมการสหสัมพันธ์จากผลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) พบว่าพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง, A/A_p , (X_2) ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา, L/D , (X_3) เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน (X_4) ให้ค่า p -value น้อยกว่า 0.05 บ่งชี้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อค่า pH ของถ่านชีวภาพ (Y_2) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าความเชื่อมั่นที่ R^2 เท่ากับ 0.737 โดยที่จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [7] พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่า pH โดยอุณหภูมิแปรผันตรงกับค่า pH ส่วนค่าความร้อนของชีวมวลหรือ HHV แปรผกผันกับอัตราส่วนของธาตุออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และแปรผัน



ตรงกับค่า pH ซึ่งค่า pH ที่ได้เป็นผลจากหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิภายใต้กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน ซึ่งจากข้อจำกัดของเตาแอนิลาตั้งที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้ผลของอุณหภูมิและค่าความร้อนของชีวมวลไม่ส่งผลต่อค่า pH

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเชิงเส้น และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบถดถอย สามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของถ่านชีวภาพได้ดังสมการที่ (3)

$$Y_2 = -8.925 - (0.018 \times 10^{-3})X_1 + 0.063X_2 - 1.579X_3 + 0.129X_4 - 0.011X_5 \quad (3)$$

4. สรุปผล

จากการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวนที่มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด (50 100 และ 200 ลิตร) เวลาการทดสอบ 3 ค่า (1 2 และ 3 ชั่วโมง) และชนิดชีวมวลแตกต่างกัน 5 ชนิด (ซึ่งข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลาจากแอป) ได้ผลสรุปดังนี้

1) แกลบเป็นวัสดุที่ให้ปริมาณของถ่านชีวภาพมากที่สุดคือ 51.1 เปอร์เซ็นต์ ที่เตาขนาด 200 ลิตร และเวลา 3 ชั่วโมง โดยจากการเปรียบเทียบผลการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งตรงกลางเตาจากการจำลองสภาพกับการทดลอง พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 0.7 ± 0.6 เปอร์เซ็นต์

2) จากการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการสหสัมพันธ์จึงพบว่า พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง (A/Ap) มีผลทั้งต่อปริมาณของถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของถ่านชีวภาพ อย่างมีนัยสำคัญ

โดยผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบเตาเผาถ่านชีวภาพแบบแอนิลาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพให้ได้ปริมาณสูงที่สุดและกำหนดคุณภาพของถ่านชีวภาพให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ ซึ่งขอบเขตสถานะที่สามารถนำสมการสหสัมพันธ์ไปใช้งานได้ กำหนดอยู่ในตารางที่ 1

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกและสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Budai A, Rasse DP, Lagomarsino A, Lerch TZ, Paruch L. Biochar persistence, priming and microbial responses to pyrolysis temperature series. *Biol Fertil Soils*. 2016 Aug;52(6):749–61.
- [2] Mengesha TT, Ramayya AV. Performance evaluation of pyrolysis cookstove using water boiling test. *Am J Mod Phys*. 2017 Sep 12;6(5):108.
- [3] Biochar production using pyrolysis cook stove from coffee husk, Wood working waster and wastes from bedele brewery.
- [4] Wallace C. Microwave pyrolysis biochar characterization and modeling of char reinforced GFRP biocomposites [Internet]. University of New Brunswick.; 2019 [cited 2022 Nov 21]. Available from: <https://unbscholar.lib.unb.ca/islandora/object/unbscholar%3A9802/>
- [5] Petchaihan L, Panyoyai N, Khamdaeng T, Wongsiriamnuay T. Test of a modified small-scale biochar kiln. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2020 Mar 1;463(1):012004.
- [6] Srisophon M, Khamdaeng T, Panyoyai N, Wongsiriamnuay T. Characterization of thermal distribution in 50-Liter biochar kiln at different heating times. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2020 Mar 1;463(1):012079.



- [7] Budai A, Wang L, Gronli M, Strand LT, Michael J. Antal J, Abiven S, et al. Surface properties and chemical composition of corncob and miscanthus biochars: Effects of production temperature and method [Internet]. ACS Publications. American Chemical Society; 2014 [cited 2022 Nov 21]. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/jf501139f>
- [8] Intagun W, Khamdaeng T, Prom-ngarm P, Panyoyai N. Effect of core puncture diameter on Bio-Char kiln efficiency. *Int J Biotechnol Bioeng*. 2018 Oct 1;12(11):435–9.
- [9] Mengesha TT, Ramayya A. Heat transfer validation and comparative evaluation of biochar yield from pyrolysis cook stove. *J of Agricultural Science and Technology: B*. 2015; 5:389-400.
- [10] Daosukho S, Rodprasert S. The development of soil quality using biochar amendment from agricultural waste. *Bull Appl Sci*. 2015 Aug 1;4 (4):95–102.
- [11] Fabrication of magnetic biochar as a treatment medium for As(V) via pyrolysis of FeCl₃-pretreated spent coffee ground. *Environ Pollut*. 2017 Oct 1;229:942–9.
- [12] Panyoyai N, Wongsiriamnuay T, Khamdaeng T. Temperature distribution inside biochar kiln for biochar production. The 10 th International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018). July 11th -13th; Vientiane, LaoVientiane, Lao PDR, 2018. p. 56–60.
- [13] Panyoyai N, Petchaihan L, Wongsiriamnuay T, Hiransatitporn B, Khamdaeng T. Simulation of temperature distribution in biochar kiln with different feedstock types: *J Engineering* . 2019 Dec 28;5(2):59–64. Available from: [doi:10.14456/mijet.2019.9](https://doi.org/10.14456/mijet.2019.9). [Accessed 14th Dec 2022].
- [14] Djousse Kanouo, BM, Allaire SE, Munson AD. quality of biochars made from eucalyptus tree bark and corncob using a pilot-scale retort kiln. *Waste Biomass Valorization*. 2018 Jun 1;9(6): 899–909. Available from: doi.org/10.1007/s12649-017-9884-2 [Accessed 14th Dec 2022].
- [15] Wijitkosum S, Jiwonok P. Elemental composition of biochar obtained from agricultural waste for soil amendment and carbon sequestration. *Appl Sci*. 2019 Jan;9(19):3980.



การรับรู้จากระยะไกลเพื่อการศึกษาเกี่ยวกับความชื้นของดิน: เทคนิคการตรวจวัดและแหล่งข้อมูลที่มีให้บริการ

Remote Sensing for Studying of Soil Moisture: Techniques and Available Data Sources

วิโรจน์ ละอองมณี¹ สวรินทร์ ฤกษ์อยู่สุข^{2,3*} และภาณุ อุทัยศรี⁴

¹ คณะเทคโนโลยีทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

57 หมู่ 1 ถนนชลประทาน ตำบลโขง อำเภอบ้านใหม่ จังหวัดจันทบุรี 22170

² หลักสูตรภูมิสารสนเทศศาสตร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยา

19 หมู่ 2 ตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

³ หน่วยวิจัยเพื่อการพัฒนานวัตกรรมเชิงพื้นที่ (RUSID) คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยา

19 หมู่ 2 ตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Wirote Laongmanee¹, Sawarin Lerk-u-suke^{2,3*} and Phanu Uthaisri⁴

¹ Faculty of Marine Technology, Burapha University, Chanthaburi Campus

57 Moo.1 Chon Pratan Road, Kamong, Tha Mai, Chanthaburi, 22170

² Department of Geographic Information Science, School of Information and Communication Technology, University of Phayao, 19 Moo 2 Maeka, Mueang, Phayao, 56000

³ Research Unit of Spatial Innovation Development (RUSID), School of Information and Communication Technology, University of Phayao, 19 Moo 2 Maeka, Mueang, Phayao, 56000

⁴ Division of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road, Mueang, Chiang Mai, 50300

*ผู้รับผิดชอบบทความ: sawarin.le@up.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-0581-0185

Received: 5 May 2021, Revised: 12 December 2021, Accepted: 18 March 2022

บทคัดย่อ

การศึกษาดังนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ การค้นคว้าเพื่อหาแหล่งข้อมูลความชื้นของดินที่มีการสำรวจตรวจวัดจากเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลและการพัฒนาตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานข้อมูลเพื่อเป็นพื้นฐานให้นักวิจัยและผู้ที่เกี่ยวข้องด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมสำหรับการต่อยอดองค์ความรู้และการประยุกต์ใช้งานในด้านที่เกี่ยวข้อง บทความนี้ได้กล่าวถึงองค์ความรู้พื้นฐานของการรับรู้จากระยะไกล กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจและการตรวจวัดความชื้นของดิน การตรวจวัดความชื้นของดินด้วยเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกล รวมถึงการแสดงผลรายละเอียดโดยสรุปของแหล่งข้อมูลความชื้นของดินที่มีให้บริการผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตพร้อมตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน การศึกษาดังนี้สามารถประยุกต์ใช้งานข้อมูลความชื้นของดินในการประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมและด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม การบริหารจัดการพื้นที่เผาไหม้ ปัญหาหมอกควัน (PM10 และ PM2.5) และการเฝ้าระวังด้านภัยพิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ ความชื้นของดิน การรับรู้จากระยะไกล แหล่งข้อมูลความชื้นของดิน



Abstract

This study aims to explore soil moisture data sources and review various techniques for obtaining soil moisture data from remote sensing technology. Results reveal available data sources that allow users to access, download and manipulate the soil moisture data via the internet. Remote sensing techniques and their related methods for extracting the soil moisture data are also mentioned. According to the demonstrated result, the use of soil moisture data can be applied to the engineering and environmental application, burning area, and air pollution (PM10 and PM2.5) management and disaster monitoring efficiently.

Keywords: Soil Moisture, Remote Sensing, Soil Moisture Data Sources

1. บทนำ

แม้ว่าน้ำจะเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด แต่หากปริมาณของน้ำมีมากเกินไปจนเกิดน้ำท่วมหรือภัยแล้ง เป็นต้น น้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญและแทรกซึมอยู่ในหลายส่วนของสิ่งมีชีวิตทั้งในระบบนิเวศน์ อากาศ ดินไม้ สิ่งมีชีวิตหรือแม้กระทั่งดินที่เป็นแหล่งที่อยู่อาศัย แหล่งเพาะปลูกพืชพรรณที่เป็นแหล่งอาหารสำคัญของสิ่งมีชีวิตทั้งหลายบนโลก จนอาจกล่าวได้ว่าความชื้นของดิน (Soil Moisture) เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญของทุกสรรพสิ่งที่เชื่อมโยงกับชีวิตบนพื้นผิวโลก [1]

ปริมาณความชื้นของดิน หมายถึง ปริมาตรของน้ำที่ผสมอยู่ในดินชั้นบนสุด (Topsoil) หรือชั้นดิน (Soil Surface) ที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำรงชีวิตและเจริญเติบโตของพืชพรรณ การเกิดน้ำท่วม การเกิดภัยแล้งรวมถึงภัยพิบัติอื่น ๆ [2]

โดยปกติแล้วการวัดความชื้นของดินสามารถทำได้โดยการสำรวจจากภาคสนามด้วยอุปกรณ์พิเศษเฉพาะทาง ปัญหาของการได้มาซึ่งข้อมูลความชื้นของดินที่พบอยู่เสมอ คือ กระบวนการดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสูงและใช้ระยะเวลายาวนานในการสำรวจและหากต้องการทำการสำรวจในพื้นที่ขนาดใหญ่จะส่งผลให้ต้นทุนในการสำรวจข้อมูลสูงมากขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือ บุคลากร ระยะเวลาดำเนินการและการเข้าถึงพื้นที่ตามเงื่อนไขเวลาที่กำหนด ทำให้ในประเทศไทยและหลายพื้นที่ทั่วโลกมีข้อมูลความชื้นของดินค่อนข้างจำกัด อย่างไรก็ตาม หากต้องการสำรวจความชื้นของดินของพื้นที่บริเวณกว้างหรือมีงบประมาณที่จำกัด การเลือกใช้งานแหล่งข้อมูลอื่นที่สามารถทดแทนได้

อย่างสมเหตุสมผลอย่างการประยุกต์ใช้ข้อมูลที่สำรวจจากการรับรู้จากระยะไกลด้วยดาวเทียม นับว่าเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากความสามารถในการเข้าถึงข้อมูลได้อย่างเสรี ต้นทุนต่ำหรือแทบไม่มีค่าใช้จ่าย รวมถึงความสามารถประมวลผลข้อมูลได้จากโปรแกรมแบบเปิดเผยแพร่ (Free/Open Source Software - FOSS) ไม่จำเป็นต้องจัดหาโปรแกรมหรือเครื่องมือเฉพาะทางในการประมวลผลข้อมูล

บทความนี้เป็นการศึกษา ค้นคว้าและรวบรวมแหล่งข้อมูลความชื้นของดินที่ได้จากการรับรู้จากระยะไกลด้วยดาวเทียมสำรวจทรัพยากรโลก (Earth Observation Satellite) หลักการสำรวจและการตรวจวัดความชื้นของดินด้วยดาวเทียมเบื้องต้น พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการนำข้อมูลที่มีให้บริการไปประยุกต์ใช้งานเพื่อการศึกษาวิจัยด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับต่อยอดงานประยุกต์ที่เกี่ยวข้องต่อไป

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing)

การรับรู้จากระยะไกล หมายถึง กระบวนการได้มาของข้อมูล สารสนเทศที่เกี่ยวข้องกับวัตถุ พื้นผิวหรือปรากฏการณ์ (Phenomena) ที่สนใจที่ต้องอาศัยองค์ความรู้ในด้านการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) เพื่อนำมาสืบสวนหาข้อมูลหรือสารสนเทศของวัตถุหรือปรากฏการณ์เหล่านั้นโดยปราศจากการสัมผัสทางกายภาพ (Physical Contact) [3] พัฒนาการของการรับรู้จากระยะไกลเพิ่งเริ่มต้นในศตวรรษที่ 20 โดยในยุคก่อนหน้านี้จะอาศัยภาพถ่ายทางอากาศในการสังเกตและรังวัด



คุณลักษณะทางกายภาพหรือปรากฏการณ์ของวัตถุ (Physical Objects) ต่อมาได้มีเทคนิคการได้มาของข้อมูลเชิงภาพ (Imagery) จากอุปกรณ์ตรวจวัดแบบพิเศษที่อาศัยการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation) นอกเหนือจากคลื่นที่สายตามองเห็นได้ (Visual Range) ทำให้เกิดข้อมูลรูปแบบใหม่ (นอกเหนือจากภาพถ่าย) และเทคนิค วิธีการประมวลผล การวิเคราะห์ข้อมูลและการแปลตีความสำหรับข้อมูลรูปแบบใหม่นี้ จนทำให้เกิดศาสตร์ที่เรียกว่า การรับรู้จากระยะไกล ที่ช่วยให้การทำความเข้าใจ การสำรวจข้อมูลมีประสิทธิภาพและสะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น [4]

ข้อดีของการรับรู้จากระยะไกล คือ การไม่กีดขวาง (Unobstructive) เมื่อเครื่องตรวจวัด (Sensor) ที่ใช้งานนั้นได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องจากวัตถุหรือปรากฏการณ์ที่สนใจอย่างต่อเนื่องยาวนานเพียงพอ [5] ทำให้สามารถตรวจวัด (Observation) วัตถุหรือปรากฏการณ์ได้โดยไม่ต้องเข้าถึงหรือสัมผัสกับวัตถุเหล่านั้นโดยตรง อย่างไรก็ตาม การรับรู้จากระยะไกลยังมีข้อจำกัดบางประการ คือ ความบกพร่องจากประสิทธิภาพของมนุษย์ขณะทำงาน ประมวลผลข้อมูล ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง (สำหรับบางงานประยุกต์) และความไม่พร้อมของอุปกรณ์ (หากไม่มีการสอบเทียบ) หรือการเลือกใช้งานข้อมูลและวิธีการทำงานที่ไม่เหมาะสมกับความต้องการหรือลักษณะงาน

โดยทั่วไปแล้วข้อมูลจากการรับรู้จากระยะไกลสามารถจำแนกตามชนิดของเครื่องรับรู้ (Sensors) ที่ใช้ตรวจวัดข้อมูลออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

1) เครื่องรับรู้แบบแอ็กทีฟ (Active Sensor) หมายถึง อุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่มีแหล่งพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถสร้างขึ้นเอง แล้วส่งพลังงานเหล่านั้นไปกระทบกับวัตถุเป้าหมายที่สนใจแล้วสะท้อนพลังงานกับมายังเครื่องรับรู้เพื่อทำการบันทึกและตรวจวัดคุณสมบัติของพลังงานเหล่านั้น [3] ตัวอย่างของเครื่องรับรู้ชนิดนี้ได้แก่ อุปกรณ์วัดความสูงด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Altimeter) ไลดาร์ (Light Detection And Ranging - LIDAR) เรดาร์ (RADAR) หรือ มาตรวัดการกระจัดกระจาย (Scatterometer) เป็นต้น

2) เครื่องรับรู้แบบพาสซีฟ (Passive Sensor) หมายถึง อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สามารถ

สร้างแหล่งพลังงานได้เอง จำเป็นต้องอาศัยแหล่งกำเนิดพลังงานอื่น (เช่น ดวงอาทิตย์) โดยจะทำการบันทึกพลังงานที่ตกกระทบพื้นผิวแล้วสะท้อนมายังเครื่องรับรู้เพื่อทำการบันทึกและตรวจวัดคุณสมบัติของพลังงาน [3]

ข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมสำรวจทรัพยากรโลกที่มีการติดตั้งเครื่องรับรู้แต่ละชนิดดังกล่าวมีการนำไปประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย เช่น ข้อมูลเครื่องรับรู้โมดิส (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - MODIS) บนดาวเทียมเทอร์ราและอควา (Terra & Aqua Satellite) สำหรับการติดตามตรวจสอบจุดความร้อน (Hotspot) เพื่อใช้ในการเฝ้าระวังและติดตามการเกิดไฟป่าและปัญหาหมอกควัน การติดตามการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Cover Type and Extent) การคำนวณหาปริมาณฝุ่นในชั้นบรรยากาศ (Particulate Matter - PM) การประเมินคุณภาพอากาศ (Air Quality) การตรวจสอบและติดตามสภาพความแห้งแล้ง (Drought Monitoring) การตรวจวัดอุณหภูมิพื้นผิว (Surface Temperature) ทั้งบนบกและมหาสมุทร หรือข้อมูลจากดาวเทียมไทยโชต (Thaichote Satellite) ของประเทศไทยที่กำลังกักตุนโดยสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) (Geo-Informatics and Space Technology Development Agency - GISTDA) หรือ สทอภ. ที่มีการประยุกต์ใช้งานด้านการประเมินผลผลิตทางการเกษตร การติดตามการเจริญเติบโตของเมือง (Urban Growth) การติดตามและบริหารจัดการพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วม (Flood Risk Monitoring and Management) การติดตามพื้นที่ชายฝั่ง (Coastal Zone Monitoring) หรือการสร้างแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model - DEM) เป็นต้น

2.2 การตรวจวัดความชื้นของดิน

โดยทั่วไปแล้ว การตรวจวัดค่าความชื้นของดินจะอาศัยการสำรวจจากภาคสนามที่มีการใช้แรงงานและอุปกรณ์อย่างเข้มข้น การทำงานดังกล่าวแม้จะมีต้นทุนค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็ได้ค่าความชื้นของดินที่ถูกต้องแม่นยำ มีความน่าเชื่อถือสูง (เฉพาะพื้นที่ที่สนใจ ครอบคลุมพื้นที่ไม่มากนัก) แต่หากต้องการค่าความชื้นของดินสำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ (ระดับอำเภอ จังหวัดหรือระดับลุ่มน้ำ) จำเป็นต้องอาศัยการประมาณค่าความชื้นของดิน (Soil Moisture Estimation) หรือวิธีการอื่น



ในปัจจุบัน การประมาณค่าความชื้นของดินสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 วิธีการหลัก ประกอบด้วย 1) การสำรวจจากภาคสนาม (In Situ Observation) 2) การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing) และ 3) การใช้แบบจำลองข้อมูลอุทกวิทยาและข้อมูลพื้นผิวดิน (Hydrological and Land Surface Modelling) [6] ซึ่งแต่ละวิธีจะให้ค่าความละเอียดแม่นยำที่แตกต่างกัน เช่น การสำรวจจากภาคสนาม (In Situ Observation) ด้วยเทคนิคกราวิเมตริก ความตึงผิวและนิวเคลียร์ (Gravimetric, Tensiometric, and Nuclear Technique) หรือการวัดความชื้นของดินจากการวัดการสะท้อนโดเมนเวลา (Time Domain Reflectometry - TDR) และการวัดจากการสะท้อนโดเมนความถี่ (Frequency Domain Reflectometry - FDR) นั้นเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางว่า เป็นเทคนิคที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง มีความน่าเชื่อถือแต่เป็นตัวแทนของพื้นที่ได้ไม่กว้างขวางมากนัก (Low Spatial Representativeness) ในขณะที่การตรวจวัดค่าความชื้นของดินจากการรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing) นั้นมีจุดเด่นในเรื่องของการตรวจวัดที่ครอบคลุมมากกว่าทั้งในด้านขนาดพื้นที่และช่วงเวลา (Spatio-Temporal Coverage) นอกจากนี้ยังประหยัดค่าใช้จ่ายในการสำรวจมากกว่าการสำรวจจากภาคสนามอย่างชัดเจน ในขณะที่การใช้แบบจำลองข้อมูลอุทกวิทยาและพื้นผิวดินนั้นข้อจำกัดที่พึงระวังที่สำคัญคือ ความน่าเชื่อถือจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ในรูปแบบจำลอง เนื่องจากตัวแปรต่าง ๆ ที่นำมาใช้จะมีความแตกต่างกันตามมาตราส่วน (Scale) ของข้อมูล ดังนั้นต้องมีการใช้งานอย่างระมัดระวัง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันสุดขีดของการใช้ประโยชน์ที่ดิน เช่น พื้นที่ชลประทาน เชื่อนขนาดใหญ่ พื้นที่กักเก็บน้ำ ทะเลทราย ป่าฝนและพื้นที่ที่มีความสูง เป็นต้น [7]

2.3. การตรวจวัดความชื้นของดินจากการรับรู้จากระยะไกล

จากความต้องการใช้งานค่าความชื้นของดินที่เป็นตัวแปรสำคัญและจำเป็นสำหรับการศึกษาและการประยุกต์ใช้งานด้านอุทกวิทยาและภูมิอากาศ (Hydrological and Climatic Application) [6] ทำให้นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยด้านการรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing) ได้พัฒนาและทดสอบวิธีการเพื่อตรวจวัดค่าความชื้นของดินที่

ถูกต้อง แม่นยำ โดยในระยะแรกได้มีการพิจารณาความชื้นบนพื้นผิวดิน (Surface Soil Moisture) อย่างง่ายโดยอาศัยเครื่องรับรู้แบบเชิงแสง (Optical Sensor) ในการบันทึกข้อมูลบนพื้นผิวโลกจากการตรวจวัดด้วยคลื่นสั้น (Short Wave Measurement) บนหลักการพื้นฐานที่ว่า ดินจะมีสีเข้มขึ้นก็ต่อเมื่อได้รับความชื้น รวมถึงการตรวจวัดความร้อนแฝง (Latent Heat) โดยอาศัยการพิจารณาความเฉื่อยของความร้อน (Thermal Inertia) หรือความสามารถในการนำและการกักเก็บความร้อนของดินซึ่งดินที่มีความชื้นสูง (Wet Soil) จะมีค่าความเฉื่อยของความร้อนสูงตามไปด้วย และจะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า (เย็นกว่า) ดินแห้ง (Dry Soil) วิธีการเหล่านี้มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ผลกระทบจากชั้นบรรยากาศขณะทำการบันทึกข้อมูล การปกคลุมของเมฆ การปกคลุมของพืชพรรณและรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินซึ่งเป็นข้อจำกัดในหลากหลายพื้นที่บนโลก ยังไม่รวมถึงข้อเท็จจริงที่ว่า ความชื้นของดินเปี่ยมนั้นมีการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายจากกระแสลม อุณหภูมิและสภาวะในชั้นบรรยากาศของแต่ละพื้นที่ [8]

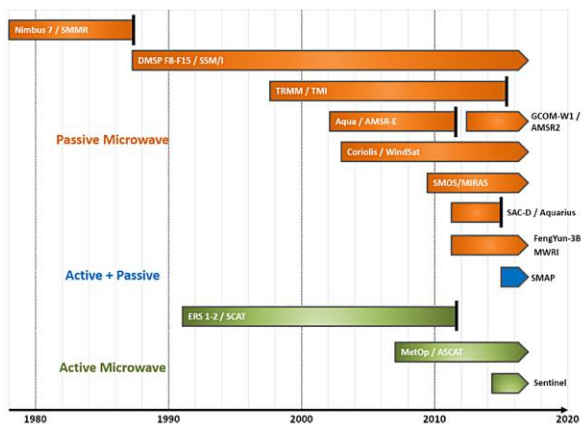
ส่วนการใช้การตรวจวัดด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave System) นั้นจะเป็นการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ในดินซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณน้ำในดิน (Water Content) การตรวจวัดในลักษณะนี้มีการใช้งานเรดาร์ (RADAR) เครื่องวัดการกระเจิงของคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Scatterometer) และเครื่องวัดพลังงานรังสี (Radiometer) แนวทางนี้มีข้อได้เปรียบ คือสามารถทำการตรวจวัดได้ในทุกสภาพอากาศ ผลกระทบของชั้นบรรยากาศและเมฆค่อนข้างน้อย สามารถตรวจวัดได้ในเวลากลางคืน [9]

การตรวจวัดความชื้นของดินจากข้อมูลดาวเทียมหรือการรับรู้จากระยะไกลนั้นมีการประยุกต์ใช้งานคลื่นไมโครเวฟอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เช่น ดาวเทียมซีแซต (SEASAT) ดาวเทียมอีอาร์เอส (European Remote Sensing Satellite - ERS) หรือดาวเทียมเซนติเนล 1 (Sentinel-1) เป็นต้น เทคนิคการประมวลผลเบื้องหลังการตรวจวัดความชื้นของดินจากระบบไมโครเวฟเหล่านี้ คือ การตรวจวัดการกระเจิงของแสง (Scattering) โดยอาศัยหลักการพื้นฐานที่ว่า ดินแห้งนั้นจะมีการกระเจิงเชิงปริมาตร (Volume



Scattering) ในขณะที่ดินเปียกหรือดินที่มีความชื้นจะมีการกระเจิงพื้นผิว (Surface Scattering) จากหลักการของเทคนิคนี้แม้ว่าข้อมูลที่ได้จะมีความละเอียดเชิงตำแหน่งที่ต่ำกว่า (Lower Spatial Resolution) เทคนิคการตรวจวัดแบบอื่น แต่จุดเด่นหลายประการก็สามารถทดแทนและเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน [1]

สำหรับการตรวจวัดความชื้นของดินจากการรับรู้จากระยะไกลด้วยดาวเทียมนั้นสามารถสรุปอุปกรณ์หรือเครื่องรับรู้ที่ใช้การตรวจวัดที่เคยมีการใช้งานด้วยเส้นเวลา (Timeline) เพื่อแสดงช่วงเวลาการตรวจวัดและตำแหน่งสถานีภาคพื้นดินที่มีการใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลความชื้นของดินจากข้อมูลดาวเทียม แสดงได้ดังรูปที่ 1 และ 2 ดังนี้



รูปที่ 1 อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นของดินจากการรับรู้จากระยะไกลด้วยดาวเทียม [2]



รูปที่ 2 สถานีภาคพื้นดินที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการตรวจวัดด้วยดาวเทียม [10]

2.4. แหล่งข้อมูลความชื้นของดินที่มีให้บริการ

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความชื้นของดินที่มีให้บริการ (Available Soil Moisture Data Sources) ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1) ข้อมูลความชื้นของดิน (Soil Moisture Data)

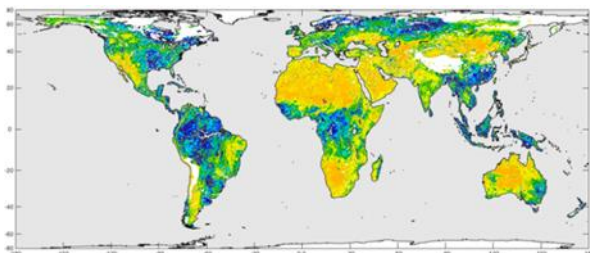
เป็นข้อมูลที่แสดงปริมาณความชื้นของดินเชิงปริมาณโดยตรง โดยข้อมูลที่มีให้บริการที่สำคัญ คือ ข้อมูลแอกทิฟแพสซีฟความชื้นของดิน (Soil Moisture Active Passive - SMAP) ขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (National Aeronautics and Space Administration - NASA) ชุดข้อมูลนี้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบเรดาร์ (RADAR) และเครื่องวัดพลังงานรังสี (Radiometer) [11] ชุดข้อมูลนี้มีให้บริการทั้งสิ้น 4 ระดับ คือ

- ระดับที่ 1 (Level 1) เป็นข้อมูลที่ได้หลักจากตรวจวัดภายใน 12 ชั่วโมง
- ระดับที่ 2 (Level 2) เป็นข้อมูลที่ได้หลักจากตรวจวัดภายใน 24 ชั่วโมง
- ระดับที่ 3 (Level 3) เป็นข้อมูลที่ได้หลักจากตรวจวัดภายใน 50 ชั่วโมง
- ระดับที่ 4 (Level 4) เป็นข้อมูลที่ได้หลักจากตรวจวัดภายใน 7 และ 14 วันสำหรับข้อมูลการแลกเปลี่ยนระบบนิเวศคาร์บอนสุทธิ (Carbon Net Ecosystem Exchange)

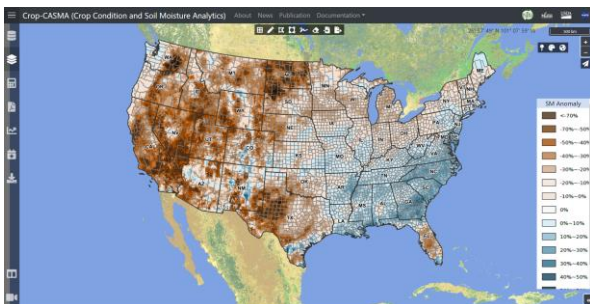
การตรวจสอบชุดข้อมูล (Validation Collection) นั้นจะอาศัยชุดข้อมูลที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม อากาศยาน (Airborne) และอวกาศยาน (Spaceborne) ที่ได้จากโครงการความเค็มของมหาสมุทรและความชื้นของดินของสหภาพยุโรป (European Soil Moisture Ocean Salinity - SMOS) ผู้ที่สนใจสามารถศึกษาและเข้าถึงชุดข้อมูลนี้ได้ที่ <https://smap.jpl.nasa.gov/data/> ตัวอย่างชุดข้อมูลแอกทิฟแพสซีฟความชื้นของดิน (SMAP) [12] แสดงได้ดังรูปที่ 3 ดังนี้

นอกจากนี้กระทรวงเกษตรแห่งสหรัฐอเมริกา (United States Department of Agriculture - USDA) ร่วมกับมหาวิทยาลัยจอร์จเมสัน (George Mason University) และองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (NASA) ยังได้นำข้อมูลแอกทิฟแพสซีฟความชื้นของดิน (SMAP) ระดับ 3 มาทำการประมวลผลร่วมกับแบบจำลองพัลเมอร์ (Palmer Model) เพื่อปรับปรุงให้มีความถูกต้องแม่นยำและความละเอียดทางตำแหน่งในระดับ 10 กิโลเมตรครอบคลุมทั่วทั้งโลก ชุดข้อมูลนี้ ประกอบด้วย 1) ข้อมูลความชื้นของดินและ 2) ข้อมูลความชื้นของชั้นดินย่อย (Surface

and Subsurface Soil Moisture) โปรไฟล์ความชื้นของดิน (Soil Moisture Profile) และ 3) ความผิดปกติของความชื้นของดิน และของชั้นดินย่อย (Surface and Subsurface Soil Moisture Anomalies) โดยข้อมูลชุดนี้จะเรียกว่า ชุดข้อมูลการปรับปรุง โดยนาซา ยูเอสดีเอสำหรับแอคทิฟ - แพลซิฟความชื้นของดิน (NASA-USDA Enhanced SMAP) ผู้ที่สนใจสามารถเข้าถึงได้ที่ <https://cloud.csiss.gmu.edu/Crop-CASMA/> หรือเข้าถึงผ่านทางแพลตฟอร์มกูเกิลเอิร์ธเอนจิน (Google Earth Engine - GEE) ตัวอย่างชุดข้อมูลนี้แสดงดังภาพที่ 4 ดังนี้



รูปที่ 3 ตัวอย่างชุดข้อมูลแอคทิฟ แพลซิฟความชื้นของดิน (SMAP) [12]

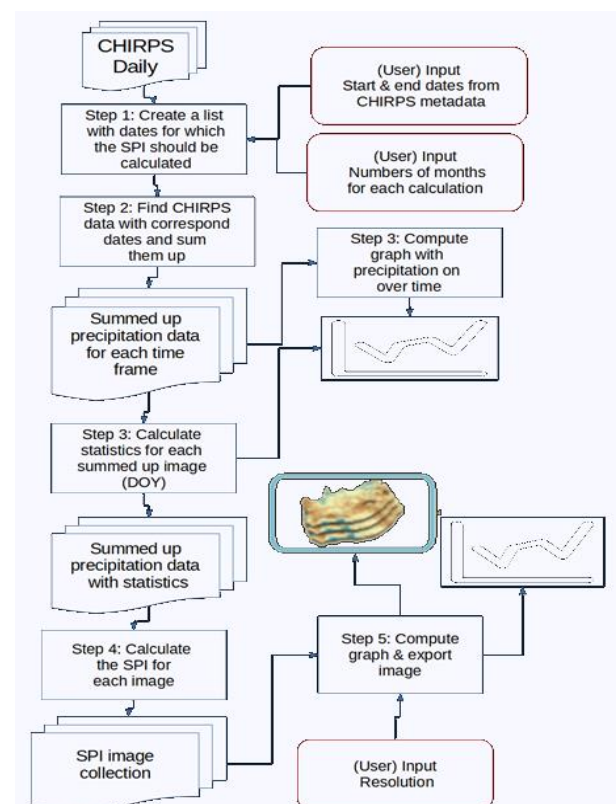


รูปที่ 4 ตัวอย่างข้อมูล การปรับปรุงโดยนาซา ยูเอสดีเอสำหรับแอคทิฟ - แพลซิฟความชื้นของดิน (NASA-USDA Enhanced SMAP) [12]

2) ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับความชื้นของดิน (Related Soil Moisture Data)

ข้อมูลลักษณะนี้มีอยู่หลากหลายประเภทโดยสามารถใช้เป็นตัวแทน (Representation) เพื่อแสดงให้เห็นถึงค่าความชื้นของดินหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการวัดความชื้นของดินแบบทางอ้อม (Indirect Measurement) ข้อมูลที่สำคัญและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิผิวดิน (Surface Temperature - SFT) ค่าความแตกต่างดัชนีพืชพรรณแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI)

และค่าดัชนีน้ำฟ้ามาตรฐาน (Standardized Precipitation Index - SPI) จากเครื่องรับรู้โมดิส (MODIS) ค่าดัชนีน้ำฟ้ามาตรฐาน (SPI) นิยมใช้เป็นเครื่องชี้วัดความแห้งแล้งจากฝนที่ต่างจากเกณฑ์ปกติ (ในกรณีที่ต้องการตรวจวัดความแห้งแล้ง) โดยจะสะท้อนข้อมูลความแห้งแล้งจากการขาดแคลนปริมาณฝน ที่เป็นปัจจัยส่งเสริมให้เกิดความแห้งแล้งในแต่ละช่วงเวลาที่มีความแตกต่างไปจากปกติ (ค่าเฉลี่ย) ซึ่งปกติแล้วจะคำนวณมาจาก ค่าความชื้นของดิน ค่าปริมาณน้ำในดิน ค่าปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำ และค่าน้ำที่ไหลในลำน้ำ รวมถึงการใช้ข้อมูลพื้นฐานประกอบไม่ว่าจะเป็น ข้อมูลปริมาณฝน ณ ตำแหน่งสถานีวัด และข้อมูลตามช่วงเวลาโดยการแปลงค่าอนุกรมเวลาของฝนให้อยู่ในรูปของการแจกแจงแบบปกติ เพื่อคำนวณหาค่าดัชนีน้ำฟ้ามาตรฐาน สำหรับสถานที่และช่วงเวลาที่น่าสนใจ จากการทำให้เป็นมาตรฐานของค่าดัชนีนี้ ทำให้สามารถบ่งบอกสภาพความแห้งแล้งโดยพิจารณาจากค่าดัชนีที่เป็นลบ ส่วนค่าดัชนีที่บวกจะแสดงถึงความชุ่มชื้นของพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำมากกว่าปกติ [12-13] วิธีการคำนวณค่าดัชนีน้ำฟ้ามาตรฐาน (SPI) ด้วยข้อมูลจากเครื่องรับรู้โมดิส (MODIS) [14] แสดงได้ดังรูปที่ 5 ดังนี้



รูปที่ 5 วิธีการคำนวณค่าดัชนีน้ำฟ้ามาตรฐาน (SPI) ด้วยข้อมูลจากเครื่องรับรู้โมดิส (MODIS) [14]



จากการศึกษาและรวบรวมแหล่งข้อมูลเกี่ยวกับความชื้นของดิน สามารถสรุปรายการข้อมูลที่เกี่ยวข้องและมีให้บริการแก่ผู้ที่สนใจ ดังตารางที่ 1 และ 2 ดังนี้

ตารางที่ 1 รายการข้อมูลภาพดาวเทียมที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจหาความชื้นของดิน [2]

การรับรู้	ดาวเทียม/ เครื่องรับรู้	ช่วงเวลาที่ให้บริการและ ความถี่ของการบันทึกซ้ำที่เดิม (วัน)	ความละเอียดเชิงตำแหน่ง (หน่วยเป็นกิโลเมตร)และพื้นที่ครอบคลุม
แพสซีฟ	TRMM/TMI	ธ.ค. 2540 – เม.ย. 2558 (1)	59x36 (ทั่วโลก)
	GCOM-W1/AMSR2	ก.ค. 2555 – ปัจจุบัน (1)	62x35/42x24 (ทั่วโลก)
	SMOS/MIRAS	ม.ค. 2553 – ปัจจุบัน (1-3)	23-350 (ทั่วโลก)
	FengYun-3B/MWRI	ส.ค. 2553 – ปัจจุบัน (1-2)	51x85 (ทั่วโลก)
แอคทีฟ	MetOp(A/B/C)/ASCAT	ม.ค. 2550 – ปัจจุบัน (1-2)	25x25 (ทั่วโลก)
	Sentinel-1 SAR(C band)	เม.ย. 2557 – ปัจจุบัน (6-12)	ขึ้นอยู่กับโหมดการบันทึก (ทั่วโลก)
แบบผสม	SMAP/L band	ม.ค. 2558 – ปัจจุบัน (1-3)	47x39 (~85 N - ~85 S)

ตารางที่ 2 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการการศึกษาและตรวจวัดความชื้นของดิน

ชุดข้อมูล	ดาวเทียม/ เครื่องรับรู้/วิธี คำนวณ	ช่วงเวลาที่ให้บริการและ ความถี่ของการบันทึกซ้ำที่เดิม (วัน)	ความละเอียดเชิงตำแหน่ง (กิโลเมตร)และพื้นที่ ครอบคลุม
SMAP	ข้อมูลจากดาวเทียม	เม.ษ. 2558-ปัจจุบัน (3)	ประมาณ 36 (ขึ้นอยู่กับระดับของข้อมูล)/ (ทั่วโลก)
NASA-USDA Enhanced SMAP)	แบบจำลองและข้อมูลจากดาวเทียม	เม.ษ. 2558-ปัจจุบัน (3)	10 (ทั่วโลก)

ตารางที่ 2 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการการศึกษาและตรวจวัดความชื้นของดิน (ต่อ)

ชุดข้อมูล	ดาวเทียม/ เครื่องรับรู้/วิธี คำนวณ	ช่วงเวลาที่ให้บริการและ ความถี่ของการบันทึกซ้ำที่เดิม (วัน)	ความละเอียดเชิงตำแหน่ง (กิโลเมตร)และพื้นที่ ครอบคลุม
อุณหภูมิพื้นผิว (SFT)	Terra/MODIS/ MOD11A2.00	มี.ค. 2543 - ปัจจุบัน (8)	1 (ทั่วโลก)
ดัชนีน้ำฟ้ามาตรฐาน (SPI)	แบบจำลอง (สถานีตรวจวัด TRMM)/ CHIRPS)	ม.ค. 2524 - ปัจจุบัน (1)	5 (ทั่วโลก)
ดัชนีพืชพรรณ (MODIS NDVI)	Terra/MODIS/ MOD13Q1.00	ก.พ. 2543 - ปัจจุบัน (16)	0.25 (ทั่วโลก)

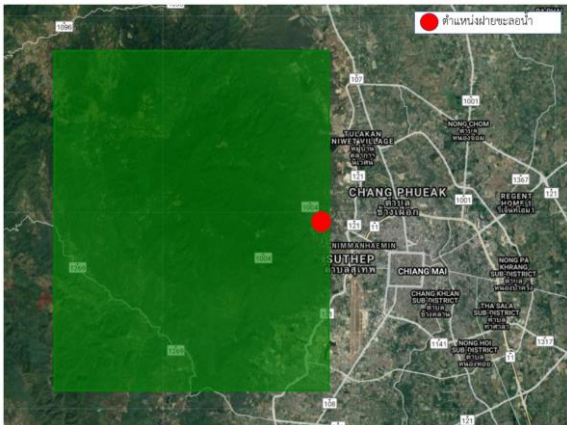
ในประเทศไทยมีการศึกษาเกี่ยวกับข้อมูลความชื้นของดินโดยอาศัยเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลน้อยมาก จากการสืบค้นของคณะผู้วิจัยบนระบบการจัดการวารสารออนไลน์ (ThaiJO) ค้นพบเพียงผลงานเดียว เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบค่าความชื้นของดินที่ได้จากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่จัดทำขึ้นเองกับข้อมูลความชื้นของดินจากภาพถ่ายดาวเทียมเอสเอ็มเอพี (SMAP) ผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยรายเดือนมีความแตกต่างกันเฉลี่ยประมาณร้อยละ 2.5 [15]

ในต่างประเทศได้มีการประยุกต์ใช้งานข้อมูลความชื้นของดินสำหรับงานวิศวกรรมที่หลากหลาย เช่น การปรับปรุงความแม่นยำของการพยากรณ์การเกิดดินถล่มแบบตื้น (Shallow Landslide Forecasting) ด้วยวิธีค่าขีดแบ่งของอุตุนิยมวิทยาอุทก (Hydrometeorological Threshold) [16-17] การประเมินภัยพิบัติดินถล่ม (Landslide Hazard Assessment) โดยอาศัยข้อมูลความชื้นของดินที่ได้จากการสำรวจจากระยะไกล [18]

2.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการประยุกต์ข้อมูลความชื้นของดินที่มีให้บริการผ่านแพลตฟอร์มกูเกิลเอิร์ธเอนจิน (GEE) ในการประเมินหาข้อมูลค่าความชื้นของดินรายวันใน

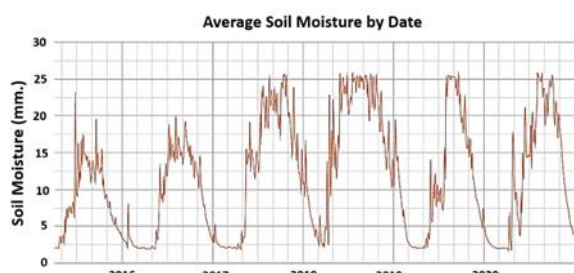
พื้นที่โครงการก่อสร้างฝายชะลอน้ำหรือฝายแม้วเพื่อลดปัญหาหมอกควันบริเวณอุทยานแห่งชาติสุเทพ-ปุย ตามมาตรการสร้างความยั่งยืนในการแก้ไขปัญหาหมอกควัน ไฟป่า และทำให้ป่าไม่มีความชุ่มชื้น อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ (บริเวณเชิงดอยสุเทพ) ที่ทำการก่อสร้างแล้วเสร็จในช่วงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2559 บน 73 เส้นลำน้ำ ก่อสร้างฝายจำนวน 956 ฝาย ดังรูปที่ 6 ดังนี้



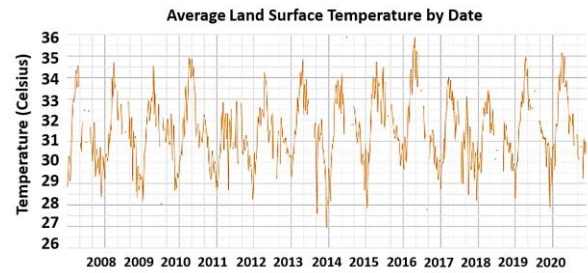
รูปที่ 6 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาและตำแหน่งฝายชะลอน้ำ

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

หลังจากทำการกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาและเลือกใช้งานข้อมูลความชื้นของดินที่จากการรับรู้จากระยะไกลแล้วจึงทำการพล็อตแสดงค่าความชื้นของดินรายวันระหว่างวันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2558 ถึงวันที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2564 (ก่อนและหลังการก่อสร้างฝายชะลอน้ำ) ในรูปของกราฟเชิงเส้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงปริมาณ รูปแบบการเปลี่ยนแปลงและแนวโน้มของความชื้นของดินทั้งในช่วงก่อนและหลังการก่อสร้างฝายชะลอน้ำขนาดเล็กในพื้นที่ศึกษาโดยค่าความชื้นของดินจะผันแปรในช่วงประมาณ 2 – 27 มิลลิเมตร (รูปที่ 7) และอุณหภูมิผิวดิน (SFT) จะผันแปรในช่วงประมาณ 26 - 36 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 8 ดังนี้



รูปที่ 7 ค่าความชื้นของดิน (มิลลิเมตร) รายวันบริเวณพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 8 ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว (องศาเซลเซียส) บริเวณพื้นที่ศึกษา

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลความชื้นของดินและข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับความชื้นของดินเบื้องต้น พบว่าแนวโน้มความชื้นของดินมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น (รูปที่ 7) จากปีพ.ศ. 2558 (ค.ศ. 2015) ก่อนมีการสร้างฝายชะลอน้ำต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน พ.ศ. 2564 (ค.ศ. 2021)

อย่างไรก็ดีหากต้องการหลักฐานทางวิทยาศาสตร์มายืนยันเพื่อเพิ่มความมั่นใจว่า การสร้างฝายชะลอน้ำส่งผลให้ความชื้นของดินเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน อาจพิจารณาเลือกใช้ข้อมูลอื่นที่มีความละเอียดถูกต้องสูงกว่ามาทำการทดลองและวิเคราะห์ร่วมกันเพิ่มเติมอีกครั้ง เนื่องจากข้อมูลความชื้นของดินที่ตรวจวัดและประมาณค่าจากการรับรู้จากระยะไกลนั้นยังมีข้อจำกัดต่อการนำไปใช้งาน ทั้งจากแบบจำลองการส่งผ่านคลื่นรังสี (Radiative Transfer Model - RTM) และอัลกอริทึมที่ใช้ในการประมาณค่าความชื้นของดินโดยเฉพาะพื้นที่ที่มีความหลากหลายของภูมิประเทศและสภาพภูมิอากาศที่สัมพันธ์กับน้ำและความชื้น (Hydroclimate) ที่ซับซ้อน ค่าความชื้นของดินยังอ่อนไหวต่อการประมาณน้ำในพืช (Vegetation Water Content - VWC) ที่ปกคลุมดิน ทำให้ต้องระมัดระวังและพิจารณาถึงข้อจำกัดอย่างละเอียดรอบคอบในการประยุกต์ใช้งานข้อมูลดังกล่าว การสำรวจจากภาคสนามเพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับความชื้นของดินในแต่ละฤดูกาลและสภาพภูมิอากาศอย่างลึกซึ้งยังคงมีความจำเป็นเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่มีความละเอียด ถูกต้อง น่าเชื่อถือและมีความแม่นยำสูง [10]



4. บทสรุป

จากการศึกษาครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้แสดงให้เห็นถึงแหล่งข้อมูลความชื้นของดินที่ได้จากการรับรู้จากระยะไกล พร้อมแสดงรายละเอียดของข้อมูลความชื้นของดินทั้งด้านพื้นที่ครอบคลุม (Coverage) และรอบเวลาในการสำรวจบันทึกข้อมูล (Temporal Resolution) หลักการเบื้องต้นของการสำรวจและตรวจวัดความชื้นของดินจากการรับรู้จากระยะไกล การประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรมในต่างประเทศและตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานจริงที่คณะผู้วิจัยได้นำเสนอประยุกต์ใช้งานข้อมูลที่มีให้บริการผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาวิจัยด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยอาศัยแพลตฟอร์มกูเกิลเอิร์ธเอนจิน (GEE) สำหรับการประมวลผลข้อมูล ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องติดตั้งโปรแกรมเฉพาะทางด้านการรับรู้จากระยะไกลหรือโปรแกรมด้านระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System - GIS) เพิ่มเติมและยังไม่จำเป็นต้องดาวน์โหลดข้อมูลข้อมูลความชื้นของดินที่ได้จากการสำรวจจากระยะไกลมาเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลก่อน เพื่อทำการประมวลผลต่อไป ผู้ใช้งานสามารถทำการประมวลผลข้อมูลดังกล่าวผ่านทางเว็บเบราว์เซอร์ร่วมกับเครื่องมือวิเคราะห์และประมวลผลที่มีให้บริการบนแพลตฟอร์มกูเกิลเอิร์ธเอนจิน (GEE) ด้วยคลาวด์เทคโนโลยี (Cloud Technology) โดยอาศัยการสั่งการประมวลผลผ่านการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาจาวาสคริปต์ (JavaScript) ความถูกต้อง แม่นยำและความน่าเชื่อถือของข้อมูลความชื้นของดินนั้นจะขึ้นอยู่กับแบบจำลองและอัลกอริทึมที่ใช้ในการประมาณค่าความชื้นของดินในแต่ละชุดข้อมูล คณะผู้วิจัยคาดหวังว่า ผลการศึกษา ค้นคว้าในครั้งนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญในการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing) สำหรับผู้ที่ศึกษาและสนใจเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์โลก (Earth Science) การประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมงานด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมหรือการทำงานในด้านที่เกี่ยวข้องอย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

ตารางที่ 3 ค่าย่อและคำเต็มของศัพท์ที่ใช้ในบทความ

อักษรย่อ	คำเต็ม
AMSR	Advanced Microwave Scanning Radiometer 2
ASCAT	Advanced Scatterometer
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
GCOM-W1	Global Change Observation Mission-Water 1
MetOp	Meteorological Operational satellite
MIRAS	Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis
MWRI	Microwave Radiation Imager
TMI	TRMM Microwave Imager
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
SFT	Surface Temperature
SMAP	Soil moisture active passive
SMOS	Soil moisture and ocean salinity
SPI	Standardized Precipitation Index

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kerr YH, Wigneron J- P, Al Bitar A, Mialon A, Srivastava PK. Soil moisture from space. In: Satellite Soil Moisture Retrieval. J Techniques and Applications. Elsevier; 2016. p. 3–27.
- [2] Kim S, Zhang R, Pham H, Sharma A. A review of satellite-derived soil moisture and Its Usage for flood estimation. Remote Sens Earth Syst Sci. 2019 Dec 1;2(4):225–46.
- [3] Lillesand T, Kiefer RW. Remote sensing and image interpretation 4th Edition.2000
- [4] American Society for photogrammetry and Remote Sensing. Manual of Photogrammetry. 5th ed. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS);2004.
- [5] Jensen JR. Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. 2nd ed. Pearson; 2007.



- [6] Brocca L, Ciabatta L, Massari C, Camici S, Tarpanelli A. Soil moisture for hydrological applications: Open questions and new opportunities. *Water*. 2017 Feb;9(2):140.
- [7] Juglea S, Kerr Y, Mialon A, Lopez-Baeza E, Braithwaite D, Hsu K. Soil moisture modelling of a SMOS pixel: interest of using the PERSIANN database over the Valencia Anchor Station. *Hydrol Earth Syst Sci*. 2010 Aug 10;14(8):1509–25.
- [8] Kerr YH. Soil moisture from space: Where are we? *Hydrogeol J*. 2007 Jan 25;15(1):117–20.
- [9] Pellarin T, Louvet S, Gruhier C, Quantin G, Legout C. A simple and effective method for correcting soil moisture and precipitation estimates using AMSR-E measurements. *Remote Sens Environ*. 2013 Sep;136:28–36.
- [10] Mohanty BP, Cosh MH, Lakshmi V, Montzka C. Soil moisture remote sensing: state-of-the-science. *Vadose Zone J*. 2017;16(1):1-9.
- [11] National Aeronautics and Space Administration (NASA). Overview. California Institute of Technology. Available from: <https://smap.jpl.nasa.gov/observatory/overview/> [Accessed 31th March 2021].
- [12] National Aeronautics and Space Administration (NASA). Data Products. California Institute of Technology Available from: <https://smap.jpl.nasa.gov/data/> [Accessed 31th March 2021].
- [13] Geo - Informatics and Space Technology Development Agency (Public Organization) (GISTDA). Available from: <http://droughtv2.gistda.or.th> [Accessed 31th March 2021]
- [14] UN-SPIDER. In Detail: Recommended Practice: Drought monitoring using the Standardized Precipitation Index (SPI). Available from: <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-drought-monitoring-spi/in-detail/> [Accessed 31th March 2021].
- [15] Prommuean S, Waewsak J, Katathikarnkul S, Konruang S. The study of soil moisture using remote sensing data and ground-Based measurement: A case study in Phatthalung Province. *ASEAN J Sci Technol Rep*. 2018 Oct 25;21(3):224–32.
- [16] Marino P, Peres DJ, Cancelliere A, Greco R, Bogaard TA. Soil moisture information can improve shallow landslide forecasting using the hydrometeorological threshold approach. *Landslides*. 2020 Sep 1;17(9):2041–54.
- [17] Brocca L, Ponziani F, Moramarco T, Melone F, Berni N, Wagner W. Improving landslide forecasting using ASCAT-Derived soil moisture data: A case study of the torjovannetto landslide in Central Italy. *Remote Sens*. 2012 May 4;4(5):1232–44.
- [18] Zhuo L, Dai Q, Han D, Chen N, Zhao B, Berti M. Evaluation of remotely sensed soil moisture for landslide hazard assessment. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*. 2019 Jan;12(1):162–73.



การเฝ้าระวังน้ำสูญเสียสำหรับโครงข่ายท่อประธานด้วยวิธีสมดุลน้ำ

Water Loss Monitoring System for Trunk Main System by Water Balance Method

แพรวา จาววงศ์สันต์¹ จิระเมธ ช้างคล่อม^{1*} อติชัย พรพรหมินทร์¹ ชัยพร ใจแก้ว² และสุรชัย ลิปิวัฒนาการ¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10100

² ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10100

Praewa Jowwongsan¹, Jiramate Changklom^{1*}, Adichai Pornprommin¹, Chaiporn Jaikaeo² and Surachai Lipiwattanakarn¹

¹ Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

50 Ngamwongwan Road, Lat yao, Chatuchak, Bangkok, 10900

² Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

50 Ngamwongwan Road, Lat yao, Chatuchak, Bangkok, 10900

*ผู้รับผิดชอบบทความ: jiramate.ch@ku.th เบอร์โทรศัพท์ 06-4814-0542

Received: 14 March 2022, Revised: 8 June 2022, Accepted: 8 July 2022

บทคัดย่อ

น้ำสูญเสียในระบบส่งน้ำเป็นปัญหาสำคัญของหน่วยงานประปาของประเทศไทย โดยระบบส่งน้ำสามารถแบ่งเป็นโครงข่ายท่อประธานและโครงข่ายท่อจ่ายน้ำ การประมาณการหวน (กปน.) คาดว่าโครงข่ายท่อประธานมีน้ำสูญเสีย 60-120 ล้าน ลูกบาศก์เมตรต่อปี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอระบบเฝ้าระวังน้ำสูญเสียท่อประธานด้วยวิธีสมดุลน้ำสำหรับ 4 เส้นทางของสาขาประปาขึ้นของ กปน. ที่มีข้อมูลมาตรวัดค่อนข้างน่าเชื่อถือ การทำสมดุลน้ำที่ใช้มี 2 วิธี คือ 1) สมดุลน้ำระยะยาว โดยคำนวณน้ำสูญเสียต่อเนื่องจากข้อมูลมาตรถาวรในระบบตรวจวัดระยะไกล SCADA และ 2) สมดุลน้ำระยะสั้น ในกรณีมาตรถาวรบางตัวมีปัญหาจะปิดมาตรเพื่อไม่ให้ไหลผ่านจุดนั้นในช่วงกลางคืนทำให้สามารถคำนวณน้ำรั่วได้ชั่วคราวประมาณ 2-3 ชั่วโมง ผลการทำสมดุลน้ำวิธีที่ 1 พบว่า สามารถคำนวณน้ำสูญเสียบนเส้นทางได้ดีหากมาตรทุกตัวทำงานปกติ และวิธีที่ 2 สามารถคำนวณน้ำสูญเสียชั่วคราวได้ดี โดยทั้งสองวิธีมีความคลาดเคลื่อนในหลักสิบ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง แสดงว่าระบบเฝ้าระวังนี้มีประสิทธิภาพในการติดตามน้ำรั่วบนท่อประธานได้

คำสำคัญ ท่อประธาน น้ำประปา น้ำรั่ว น้ำสูญเสีย สมดุลน้ำ

Abstract

Water loss (WL) in water distribution systems (WDS) is a main problem of waterworks in Thailand. A WDS can be divided into a trunk main network (TMN) and a water distribution network. Metropolitan Waterworks Authority (MWA) estimates WL in its TMN about 60-120 million m³/year. Thus, this research presents a monitoring system using the water balance method for 4 routes of the MWA Prachachuen Branch TMN with fairly complete permanent measured flow data from the Remote Monitoring System. Water balance consists of 2 cases: 1) long-term water balance for continuous WL calculation by the data of permanent meters in SCADA systems, and 2) short-term water balance for



the case that some flow meters malfunction. By closing water flowing through those meters temporarily at night, WL can be computed for a short period of 2-3 hours. The results show that 1st method can calculate WL if all flow meters work properly. 2nd method can temporarily estimate WL. And both methods estimate WL with a flow discrepancy of tens digit m^3/hr . Thus, the system is effective in monitoring leakage on TMN.

Keywords: Trunk Mains, Potable Water, Leakage, Water Loss, Water Balance

1. บทนำ

น้ำสูญเสียในระบบสูบน้ำจ่ายน้ำของ กปน. แบ่งตามโครงข่ายท่อได้เป็น 2 ส่วน คือ น้ำสูญเสียบนท่อประธาน และบนท่อจ่ายน้ำท่อบริการ ในรายงานประจำปี กปน. ปี 2562 นั้น พบว่า กปน. มีปริมาณน้ำผลิต 2075.2 ล้าน ลบ.ม./ปี คิดเป็นน้ำสูญเสีย 607.8 ล้านลบ.ม./ปี [1] เป็นน้ำสูญเสียในระบบท่อประธานประมาณ 3-6% [2] คิดเป็นปริมาณน้ำสูญเสียบนท่อประธาน 60-120 ล้าน ลบ.ม./ปี เนื่องจากการติดตามน้ำสูญเสียในระบบท่อประธานนั้นทาง กปน. ยังไม่มีระบบหรือวิธีการที่ชัดเจน ต่างจากน้ำสูญเสียบนท่อจ่ายที่ใช้ระบบเทคโนโลยีระบบตรวจวัดข้อมูลและควบคุมระยะไกล – (Supervisory Control Data and Acquisition SCADA) ซึ่งมีหลักการแบ่งพื้นที่ย่อยเป็นระบบพื้นที่เฝ้าระวัง (District Metering Area, DMA) ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการอยู่แล้ว อีกทั้งการใช้เครื่องมือในการตรวจหาท่อรั่วจำเป็นต้องใช้งบประมาณและบุคลากรในการหาจุดรั่วไหลในแต่ละครั้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการทำสมดุลน้ำในการติดตามหาน้ำสูญเสียในระบบท่อประธาน โดยเลือกทดสอบ 4 เส้นทางของท่อประธานในพื้นที่ประปาประชาชื่น

วัตถุประสงค์

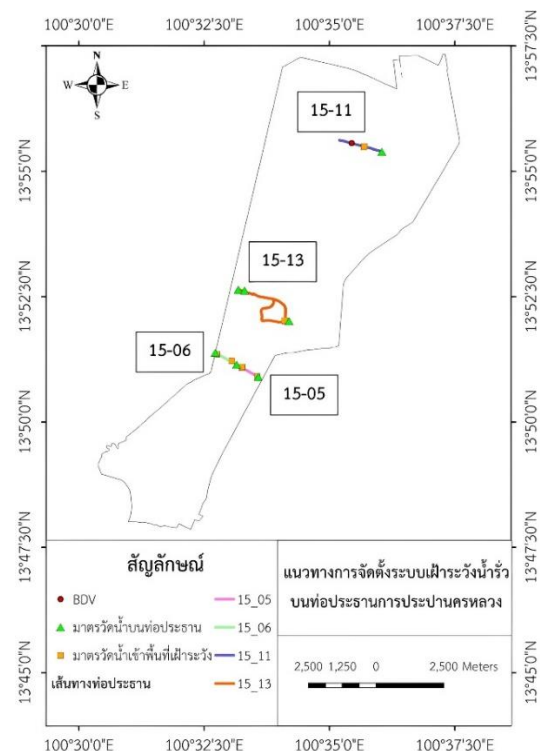
1) วิเคราะห์การเฝ้าระวังน้ำรั่วบนท่อประธานด้วยวิธีการทำสมดุลน้ำของสำนักงานประปาสาขาประชาชื่น

2) เปรียบเทียบการเฝ้าระวังน้ำรั่วบนท่อประธานระหว่างการทำสมดุลน้ำตอนปิดประตูน้ำในตอนกลางคืนกับไม่ปิดประตูน้ำ

พื้นที่ที่ศึกษา

ศึกษาในพื้นที่การประปาประชาชื่น ซึ่งเป็น 1 ใน พื้นที่ประปา 18 สาขา ตั้งอยู่ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร ในพื้นที่ประปาประชาชื่นนั้นได้แบ่งเส้นทางท่อประธานออกเป็นเส้นทางย่อย ในงานวิจัยชิ้นนี้เลือกที่จะศึกษาผลของเส้นทางที่ 15-05, 15-06, 15-11 และ 15-13 ทั้งหมด 4 เส้นทาง ดัง

แสดงในรูปที่ 1 เนื่องจากทั้ง 4 เส้นทางนี้ถือเป็นเส้นทางที่มีจำนวนมาตรน้อยและมาตรหลักบนท่อประธานใช้การได้ โดยทั้ง 4 เส้นทางมีมาตรวัดน้ำ 16 มาตร แบ่งเป็นมาตรวัดน้ำบนท่อประธาน (U/UZ) 7 มาตร และมาตรวัดน้ำบนท่อจ่าย (DM) 9 มาตร ทั้งนี้มาตรวัดน้ำบนท่อประธานมี 2 ประเภท U คือมาตรวัดน้ำที่วัดปริมาณน้ำผ่านเข้าออกพื้นที่ให้บริการของสำนักงานประปาสาขา UZ คือมาตรวัดน้ำที่วัดปริมาณน้ำผ่านพื้นที่แต่ละโซนในพื้นที่ให้บริการ นอกจากนี้สำนักงานประปาสาขาประชาชื่นยังรับน้ำโดยตรงจากสถานีสูบน้ำบางเขนโรงที่ 3 และ 4 (BK03, BK04) ทำให้มีมาตรวัดน้ำที่มีสัญลักษณ์ขึ้นต้นด้วย BK



รูปที่ 1 เส้นทางท่อประธานทั้ง 4 เส้นทาง
มาตรวัดน้ำในงานวิจัยนี้เป็นมาตรหลักติดตั้งถาวร ซึ่ง กปน. มีการตรวจสอบและปรับเทียบค่าในระบบ โดยมาตรวัดน้ำบนท่อประธาน (U/UZ) เป็นมาตรประเภท Ultrasonic Flowmeter ที่มีความคลาดเคลื่อน 1-3% [3] ขึ้นอยู่กับรูป



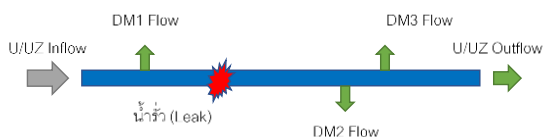
หน้าตัดและความถูกต้องของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ป้อนให้ และมาตรวัดน้ำบนท่อจ่าย (DM) เป็นมาตรประเภท Magnetic Flowmeter ที่มีความคลาดเคลื่อน 0.3 -0.35% [4] เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของมาตร U/UZ พบว่ามีค่าประมาณระหว่าง 500-5,000 ม³/ชม ซึ่งความคลาดเคลื่อนอาจมีค่าระหว่าง 5-150 ม³/ชม ต่อมาตร ขณะที่อัตราการไหลของมาตร DM มีค่าประมาณหลักสิบและหลักร้อยจึงคาดว่ามีความคลาดเคลื่อนต่ำมาก เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของมาตร U/UZ นั้นจึงเป็นไปได้ว่า การทำสมดุลน้ำอาจให้ค่าการรั่วไหลตกอยู่ในระดับหลักสิบถึงหลักร้อยขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและจำนวนมาตร U/UZ ที่ใช้บนเส้นทางที่พิจารณา

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีสมดุลน้ำ (Water Balance) สมดุลน้ำ (Water Balance) เป็นหลักการพื้นฐานของการไหล โดยอาศัยหลักกฎการอนุรักษ์มวล (Conservative Of Mass) คือ มวลของสสารย่อมไม่สูญหายแต่อาจเปลี่ยนรูปได้ ดังนั้นในกรณีของน้ำไหลในเส้นท่อก็สามารถอนุมานได้ว่าอัตราการไหลรวมในเส้นท่อที่พิจารณาต้องมีค่าคงที่ ฉะนั้นหากวัดอัตราการไหลเข้าออกจากเส้นท่อทั้งหมด จะสามารถหาค่าการรั่วไหลที่เกิดขึ้นในเส้นท่อนั้น ๆ ได้จากผลต่างของอัตราการไหลเข้าและอัตราการไหลออก

การจัดทำสมดุลน้ำของท่อประจําในระดับเส้นท่อ โดยอาศัยข้อมูลจากมาตร U/UZ และมาตร DM จะทำให้สามารถแบ่งเส้นท่อประจําเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงสมดุลน้ำว่ามีค่าผิดปกติได้สะดวก และทำให้สามารถระบุบริเวณท่อรั่วบนท่อประจําได้ ลักษณะการทำสมดุลน้ำบนท่อประจําในระดับเส้นท่อแสดงดังรูปที่ 2 และสมการที่ (1)



รูปที่ 2 การจัดทำสมดุลน้ำบนท่อประจําในระดับเส้นท่อ

$$\sum Q_{U,in} - \sum Q_{U,out} - \sum Q_{DM} = Q_{leak} \quad (1)$$

โดย $Q_{U,in}$ และ $Q_{U,out}$ คือ ปริมาณน้ำไหลเข้าและออกของมาตรวัดอัตราการไหลและแรงดันหลักที่อยู่บนท่อประจํา

(U) ตามลำดับ Q_{DM} คือปริมาณน้ำของมาตรวัดอัตราการไหลและแรงดันของท่อจ่าย (DM) และ Q_{leak} คือปริมาณของน้ำรั่วในระบบเส้นทางท่อประจํา

โดยวิธีสมดุลน้ำเป็นเงื่อนไขเบื้องต้นในการลดการสูญเสีย น้ำในระบบประปา เพียงแต่การทำสมดุลน้ำส่วนมากนั้นมักถูกจำกัดด้วยปริมาณของข้อมูลและประสิทธิภาพของเครื่องมือ [5] ตัวอย่างเช่นการทำสมดุลน้ำเพื่อลดการสูญเสียของน้ำที่ไม่ก่อให้เกิดรายได้ในระบบประปาโดยใช้ระบบ DMA ที่เมือง Antalya ประเทศตุรกี และ เมือง Kos ประเทศกรีซที่ไม่มีระบบ SCADA ทำให้ข้อมูลการไหลไม่ได้รับการตรวจสอบเท่าที่ควร [6]

2.2 วิธีการ

- 1) แบ่งท่อประจําพื้นที่ กปน. ประชาชื่นเป็นเส้นทางย่อย
- 2) นำข้อมูลอัตราการไหลและแรงดันของแต่ละมาตรวัดจากทาง กปน. ประชาชื่นมาทำสมดุลน้ำระยะยาวในแต่ละเส้นทางท่อประจํา
- 3) เลือกเส้นทางท่อประจําที่มีจำนวนมาตรวัดไม่มากเพื่อทำการปิดประตูน้ำมาตร DM ชั่วคราวในช่วงกลางคืน
- 4) นำข้อมูลในช่วงที่ปิดประตูน้ำมาตร DM มาทำสมดุลน้ำระยะสั้น
- 5) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการทำสมดุลน้ำ โดยปิดและไม่ปิดประตูน้ำมาตร DM ทั้งนี้เนื่องจากการค่าอัตราการไหลในระบบนั้นมีค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากมาตรวัด จึงมีโอกาสที่ผลลัพธ์สมดุลน้ำจะมีค่าติดลบได้

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ทำการศึกษาจากเส้นทางท่อประจําทั้ง 4 เส้นทาง ได้แก่ เส้นทาง 15-05, 15-06, 15-11 และ 15-13 โดยรายละเอียดมาตรและทิศทางการไหลในแต่ละเส้นทางมีดังตารางที่ 1 และรูปที่ 3 ตามลำดับ

โดย Route 15-05 ทำสมดุลน้ำรายชั่วโมง ช่วง 18-25 ธ.ค. 2563, Route 15-06 ทำช่วง ม.ค. – เม.ย. 2564, Route 15-11 ได้ทำช่วง 13 – 16 ก.ค. 2563 และ Route 15-13 ทำตั้งแต่ช่วง ม.ค. – มิ.ย. 2564 ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่มาตรมีค่าน่าเชื่อถือ กล่าวคือมาตรทุกมาตรมีค่าไม่เป็นศูนย์และไม่มีค่าค้าง และทำสมดุลน้ำระยะสั้นในแต่ละ Route อีกครั้งขณะที่ปิดประตูน้ำมาตร DM เป็นจำนวนเส้นทางละสองคืน



ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งในการทำสมมูลน้ำระยะยาวนั้นได้มีการจัดรูปแบบกราฟเป็นกราฟน้ำรั่ว (Leak, ม3/ชม.) เนื่องจากกราฟสมมูลน้ำที่ได้ยังคงมีค่าแกว่งสูงเพราะอัตราการไหลในเส้นท่อที่วัดไม่คงที่จนทำให้อ่านรูปแบบที่เกิดขึ้นยาก จึงมีการปรับแก้กราฟด้วยการเฉลี่ยค่าในช่วง 24 ชั่วโมงเพื่อให้การแกว่งของกราฟมีความสม่ำเสมอขึ้น โดยมีผลลัพธ์ในแต่ละ Route ดังนี้

ตารางที่ 1 มาตรการที่ใช้ทำสมมูลน้ำรายเส้นทางท่อประธาน

Route	Inflow	Outflow	No. meters
15-05	UZ1501 U105	DM-15-04-04-02 DM-15-04-04-01 DM-15-04-03-01	5
15-06	U209	UZ1501 DM-15-05-02-01 DM-15-05-01-01	4
15-11	U139	DM-15-08-01-01 DM-15-07-05-01 BDV	4
15-13	BK03-Phayathai BK04-Phayathai	U231 DM-15-05-05-01 DM-15-05-04-01	5

ตารางที่ 2 ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละเส้นทาง

Route	สมมูลน้ำระยะยาว	สมมูลน้ำระยะสั้น
15-05	18 – 25 ธันวาคม 2063	(คืนที่ 1) 8 กรกฎาคม 2564 (คืนที่ 2) 12 กรกฎาคม 2564
15-06	มกราคม – เมษายน 2564	(คืนที่ 1) 17 พฤษภาคม 2564 (คืนที่ 2) 24 พฤษภาคม 2564
15-11	13 – 16 กรกฎาคม 2563	(คืนที่ 1) 13 พฤษภาคม 2564 (คืนที่ 2) 18 พฤษภาคม 2564
15-13	มกราคม - มิถุนายน 2564	(คืนที่ 1) 17 มิถุนายน 2564 (คืนที่ 2) 21 มิถุนายน 2564

3.1 Route 15-05

3.1.1 การทำสมมูลน้ำระยะยาวของ Route 15-05

ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4 ใน Route นี้ หากดูเฉพาะช่วงเวลา 18-25 ธันวาคม 2563 ซึ่งเป็นช่วงที่คาดว่าค่าทุกมาตรมีความน่าเชื่อถือ ส่วนกราฟบางส่วนที่มีค่าโดดอย่างเห็นได้ชัดนั้นเป็นเพราะช่วงที่มาตร Outflow ของเส้นทางลดต่ำ

พอดี โดยมีค่าการรั่วอยู่ระหว่าง ± 10 ม³/ชม จึงคาดว่าช่วงเวลาดังกล่าวไม่มีน้ำรั่วในเส้นทางนี้

3.1.2 การทำสมมูลน้ำโดยปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-05

มีการปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-05 สองคืน ได้แก่คืนวันที่ 8 ก.ค. 2564 (08/07/64 23:15 น.-09/07/64 01:15 น.) และ 12 ก.ค. 2564 (12/07/64 23:45 น.-13/07/64 01:45 น.) ตามลำดับ

โดยในคืนที่ 1 ปิด DM-15-04-04-01, DM-15-04-03-01 และ DM-15-04-04-02 คืนที่ 2 ปิด DM-15-04-04-01 และ DM-15-04-04-02

ผลจากการทำสมมูลน้ำราย 15 นาทีคืนที่ 1 และ 2 แสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ พบว่าค่าการรั่วในช่วงปิด DM ติดลบสูงมาก คาดว่ามาจากมาตร U105 เพราะเมื่อเทียบกับค่าการไหลมาตรอื่นในเส้นทางเดียวกันแล้ว พบว่าค่าของมาตร U105 สูงมากผิดปกติ รวมถึงทิศการไหลของน้ำมีการสลับไปมาอย่างมีแบบแผนในหนึ่งวัน โดยช่วงเวลาประมาณ 23:00 น. ถึง 05:00 น. เป็นทิศหนึ่ง และช่วง 04:00 น.- 22:00 น.เป็นอีกทิศหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 7 จึงสันนิษฐานว่ามาตร U105 เก็บค่าผิดพลาด ดังนั้นระบุไม่ได้ว่า Route 15-05 นี้มีการรั่วไหลเกิดขึ้นหรือไม่

3.2 Route 15-06

3.2.1 การทำสมมูลน้ำระยะยาวของ Route 15-06

ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 8 โดยมาตร DM-15-05-02-01 มีข้อมูลถึงแค่ 25 ธ.ค. 2563 เท่านั้น รวมถึง UZ1501 ยังมีค่าค้างดังแสดงในรูปที่ 7 ดังนั้นช่วง ม.ค. – เม.ย. 2564 เป็นช่วงที่คาดว่าค่าทุกมาตรมีความน่าเชื่อถือ ส่วนท้ายกราฟที่มีค่าโดดอย่างเห็นได้ชัดนั้นเป็นเพราะมาตร DM-15-05-02-01 ให้ค่าลดลงใกล้เคียงศูนย์ (ค่าอยู่ในช่วง 0.xx ถึงหลักหน่วย) ซึ่งถือว่าเป็นช่วงที่ข้อมูลตรวจวัดมีความคลาดเคลื่อนตอนเก็บค่า ดังนั้นค่าการรั่วของเส้นทางนี้อยู่ระหว่าง ± 50 ม³/ชม

3.2.2 การทำสมมูลน้ำโดยปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-06

มีการปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-06 สองคืน ได้แก่คืนวันที่ 17พ.ค.2564 (18/05/64 00:00 น.- 01:30 น.) และ 24พ.ค.2564 (24/05/64 23:45 น.-25/05/64 01:15 น.) ตามลำดับ



โดยคืนที่ 1 ปิด DM-15-05-02-01 และ DM-15-05-01-01
ในขณะที่คืนที่ 2 ปิดแค่ DM-15-05-02-01

ผลของสมมูลน้ำราย 15 นาที่คืนที่ 1 แสดงดังรูปที่ 9
พบว่าช่วงที่ปิด DM ค่าการรั่วอยู่ในช่วง -30 ถึง 60 ม³/ชม

ผลของสมมูลน้ำราย 15 นาที่คืนที่ 2 แสดงดังรูปที่ 10
พบว่าช่วงที่ปิด DM ค่าการรั่วอยู่ในช่วง -20 ถึง 11 ม³/ชม ถือ
ว่าเป็นค่าที่น้อยมาก อาจเป็นเพราะเกิดการผิดพลาดของ
มาตรวัด นอกจากนี้ เส้นทางนี้ตัวมาตร DM-15-05-02-01 เสีย
ไม่สามารถดึงค่ามาได้ ทำให้ไม่สามารถทำสมมูลน้ำระยะ
ยาวในช่วงเวลานี้ แต่ด้วยวิธีสมมูลน้ำระยะสั้นที่ทำการปิด
มาตรที่เสีย ทำให้พบว่า Route 15-06 ไม่มีการรั่วไหล

3.3 Route 15-11

3.3.1 การทำสมมูลน้ำระยะยาวของ Route 15-11

รูปที่ 11 พบว่า กราฟน้ำรั่วช่วงก่อนวันที่ 14 ก.ค. 2563
มีค่าใกล้ศูนย์ (ไม่มีน้ำรั่ว) แต่หลังจากวันที่ 14 ก.ค. 2563 เป็น
ต้นไป พบว่า น้ำรั่วสูงขึ้นฉับพลันที่ระดับ 250 ม³/ชม ต่อเนื่อง
สาเหตุเกิดจาก กปน. ได้เปิดประตูน้ำกั้นระหว่างท่อประปา
กับขอบเขต DMA (Boundary Valve, BDV) เพื่อจ่ายน้ำออก
จากท่อประปาเข้า DMA เพิ่มอีกหนึ่งจุดที่ไม่ใช่จุด DM เพราะ
แรงดันใน DMA ไม่เพียงพอ แต่จุดจ่ายน้ำใหม่นี้ไม่มีการ
ตรวจวัดน้ำจึงคาดว่าค่าการรั่วที่เพิ่มขึ้นน่าจะเป็นน้ำจ่ายออก
ผ่าน BDV ดังกล่าว จึงสรุปว่าเส้นทางดังกล่าวไม่มีการรั่วไหล

3.3.2 การทำสมมูลน้ำโดยปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-11

มีการปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-11 สองคืน
ได้แก่คืนวันที่ 13 พ.ค. 2564 (13/05/64 23:45 น.-14/05/
64 01:30 น.) และ 18 พ.ค. 2564 (18/05/64 23:45 น.-
19/05/64 04:15 น.) ตามลำดับ

โดยในคืนที่ 1 ปิด DM-15-08-01-01 ,DM-15- DM-15-
07-05-01 และ BDV ในขณะที่คืนที่ 2 ปิดแค่ BDV

ผลลัพธ์จากการทำสมมูลน้ำราย 15 นาที่คืนที่ 1 ปรากฏ
ดังรูปที่ 12 พบว่าช่วงที่ทำการปิด DM นั้น ค่าการรั่วลดจน
ใกล้เคียงศูนย์

ส่วนการทำสมมูลน้ำราย 15 นาที่คืนที่ 2 ปรากฏดังรูปที่
13 พบว่าช่วงที่ทำการปิด BDV นั้น ค่าการรั่วลดจนใกล้เคียง
ศูนย์ดังนั้นจึงสรุปว่า Route 15-11 ไม่มีการรั่ว

3.4 Route 15-13

3.4.1 การทำสมมูลน้ำระยะยาวของ Route 15-13

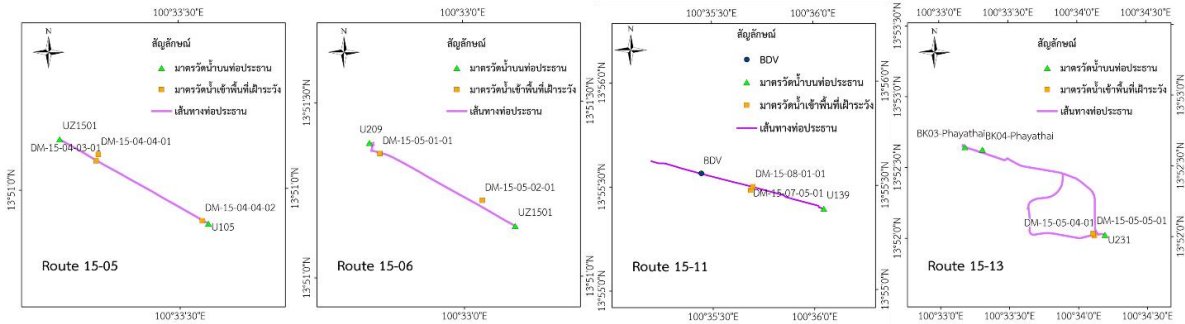
จากกราฟรูปที่ 14 ค่าเกือบทั้งหมดติดลบ เป็นผลมา
จาก Inflow BK03-Phayathai และ BK04-Phayathai จ่าย
น้ำน้อยกว่า U231 ซึ่งเป็นไปไม่ได้เพราะ BK ทั้งคู่เป็นโรงสูบน้ำ
จ่ายน้ำต้นทาง จึงระบุไม่ได้ว่ามีการสูญเสียในเส้นทางนี้
หรือไม่ ส่วนช่วงที่กราฟติดลบผิดปกติอย่างเห็นได้ชัดเป็นช่วง
ที่มาตร BK ทั้งสองไม่มีค่าในระบบ คาดว่าเป็นความผิดพลาด
ของการเก็บค่าการตรวจวัด

3.4.2 การทำสมมูลน้ำโดยปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-13

การปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-13 สองคืน
ได้แก่คืนวันที่ 17 มิ.ย. 2564 (18/06/64 00:00 น. – 02:00 น.)
และ 21 มิ.ย. 2564 (22/06/64 00:00 น. - 01:00 น.) ตามลำดับ

โดยคืนที่ 1 ปิด DM-15-05-04-01 และ DM-15-05-05-
01 คืนที่ 2 ปิดแค่ DM-15-05-05-01

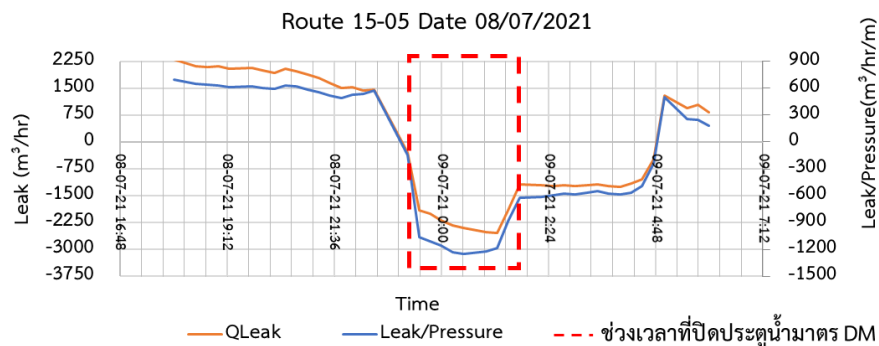
ผลลัพธ์ของสมมูลน้ำรายชั่วโมงคืนที่ 1 และ 2 เป็นดังรูป
ที่ 15 และรูปที่ 16 ตามลำดับ เหตุที่ Route นี้มีการทำสมมูล
น้ำต่างไปเป็นเพราะข้อมูลอัตราการไหลของโรงสูบน้ำจ่ายเป็น
รายชั่วโมง ซึ่งค่าอัตราการรั่วไหลนั้นติดลบสูงมาก เพราะ
BK03-Phayathai และ BK04-Phayathai จ่ายน้ำน้อยกว่า
U231 ที่เป็น outflow ซึ่งไม่ควรเป็นไปไม่ได้ คาดว่ามาตร
U231 อาจเก็บข้อมูลผิดพลาด จึงทดสอบติดตั้งมาตรวัดค่าการ
ไหลของมาตร U231 เทียบกับค่าในระบบ ผลลัพธ์แสดงในรูป
ที่ 17 พบว่าค่าการไหลที่วัดจากการทำงานภาคสนามน้อยกว่า
ค่าในระบบราว 100-300 ม³/ชม ขณะที่ผลจากสมมูลน้ำมีค่า
อยู่ในช่วง 400 ถึง -600 ม³/ชม ดังนั้นนอกจากจะสรุปได้ว่า
มาตร U231 วัดค่าไม่ตรงกับความเป็นจริงแล้ว ยังสรุปได้ว่า
BK03-Phayathai และ BK04-Phayathai มีข้อผิดพลาดใน
การวัดอีกด้วย ทำให้สรุปไม่ได้ว่ามีการรั่วไหลเกิดขึ้นหรือไม่



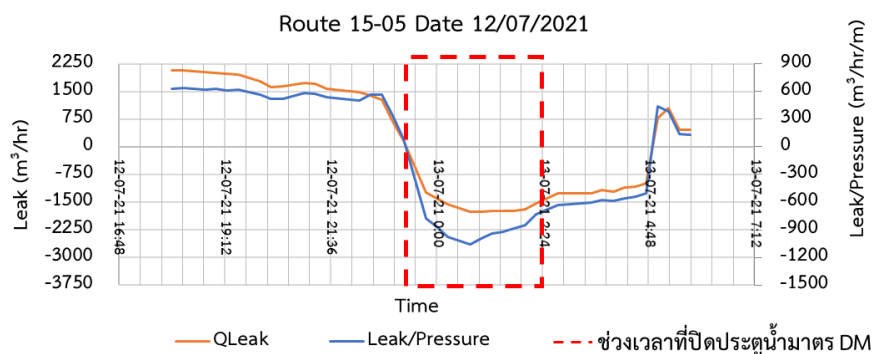
รูปที่ 3 ทิศทางการไหลในแต่ละเส้นทางท่อประปา



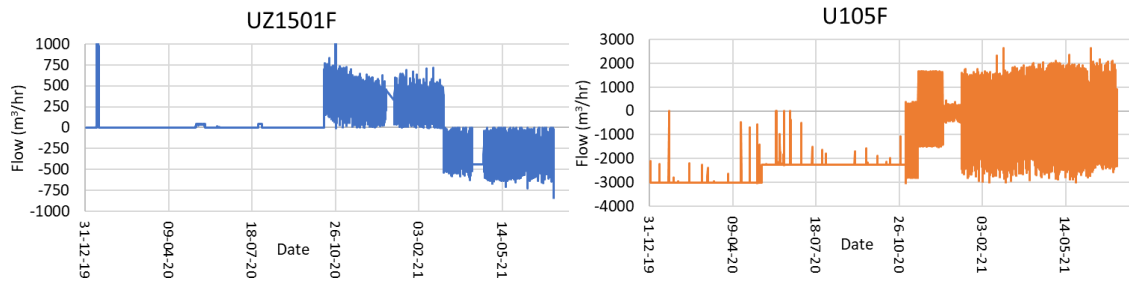
รูปที่ 4 สมดุลน้ำระยะยาว วันที่ 18-25 ธันวาคม 2563 ของเส้นทางท่อประปา 15-05 (บน น้ำรั่ว, ล่าง น้ำรั่วต่อแรงดัน)



รูปที่ 5 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-05 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คืบที่ 1 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



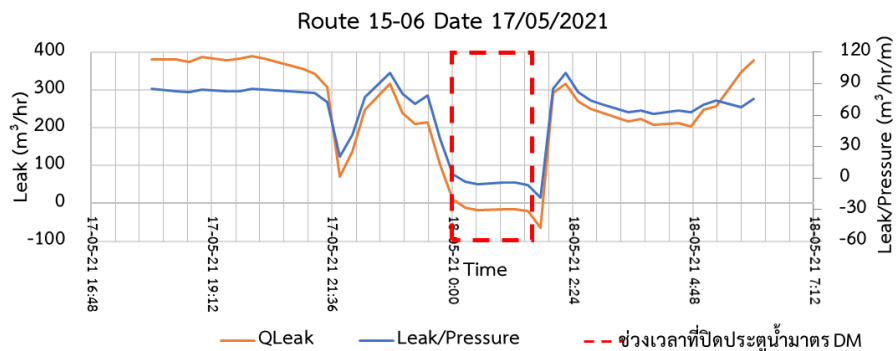
รูปที่ 6 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-05 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คืบที่ 2 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



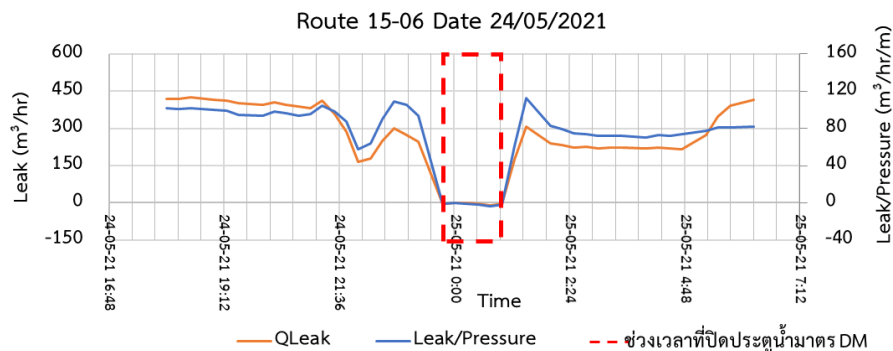
รูปที่ 7 อัตราการไหลของน้ำในมาตร UZ1501 และ U105 1 ม.ค. 2563 ถึง 14 ก.ค. 2564



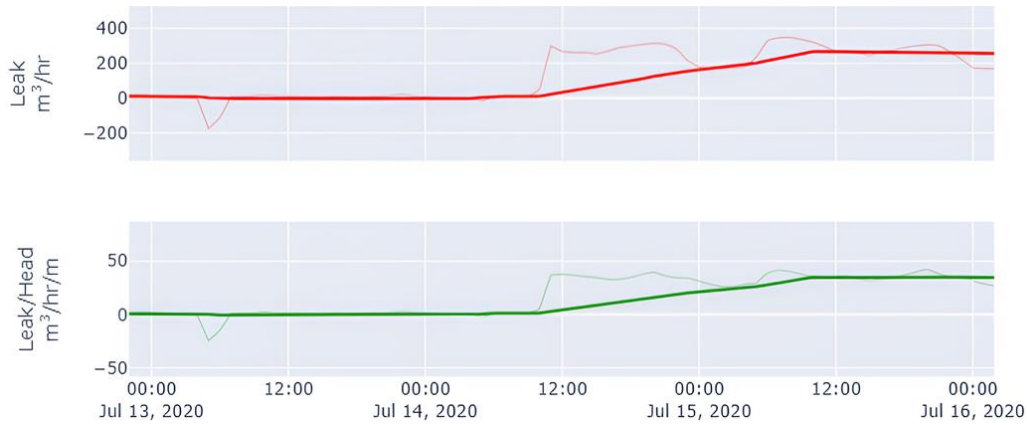
รูปที่ 8 สมดุลน้ำระยะยาว มกราคม ถึง เมษายน 2564 ของเส้นทางท่อประปา 15-06 (บน น้ำรั่ว, ล่าง น้ำรั่วต่อแรงดัน)



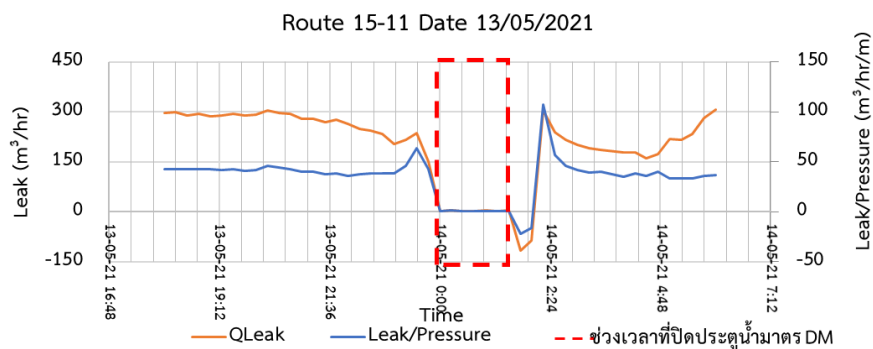
รูปที่ 9 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-06 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คันทันที่ 1 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



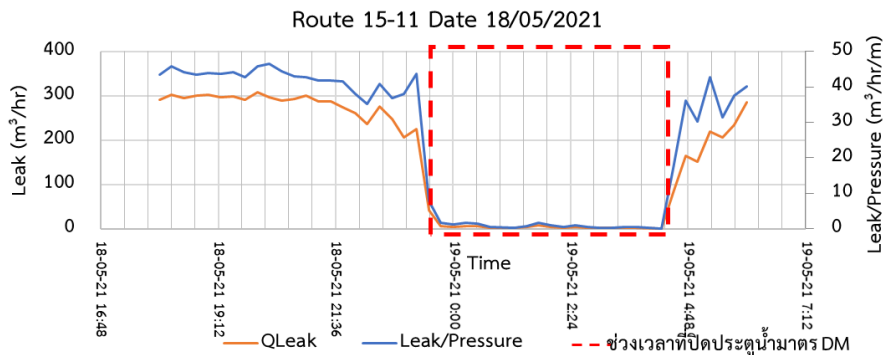
รูปที่ 10 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-06 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คันทันที่ 2 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



รูปที่ 11 สมดุลน้ำระยะยาว วันที่ 13 – 16 กรกฎาคม 2563 ของเส้นทางท่อประปา 15-11 (บน น้ำรั่ว, ล่าง น้ำรั่วต่อแรงดัน)



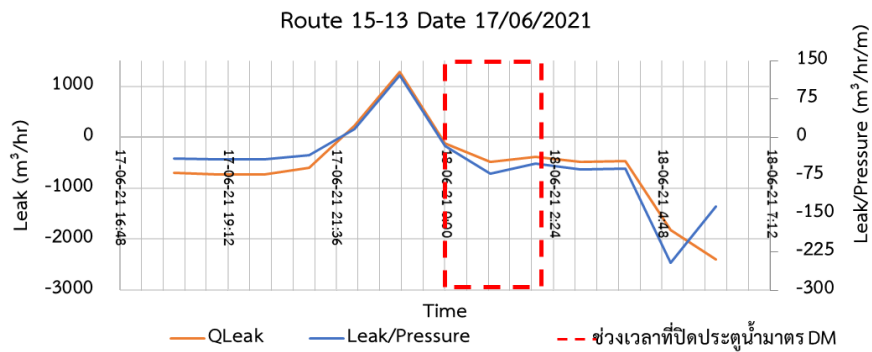
รูปที่ 12 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-11 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คินท์ 1 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



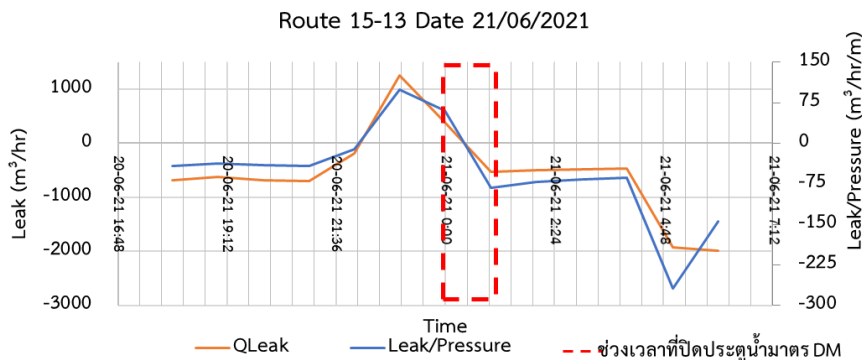
รูปที่ 13 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-11 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คินท์ 2 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



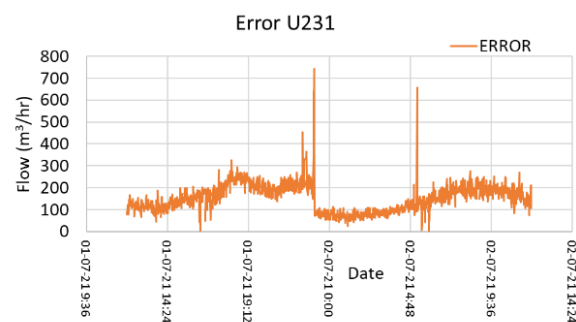
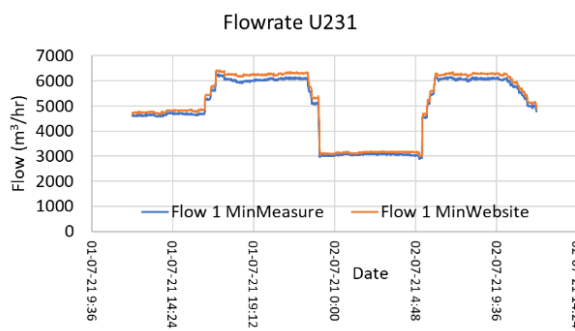
รูปที่ 14 สมดุลน้ำระยะยาว มกราคม ถึง มิถุนายน 2564 ของเส้นทางท่อประปา 15-13 (บน น้ำรั่ว, ล่าง น้ำรั่วต่อแรงดัน)



รูปที่ 15 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-13 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คับที่ 1 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



รูปที่ 16 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-13 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คับที่ 2 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



รูปที่ 17 เปรียบเทียบอัตราการไหลจากการวัดภาคสนามและค่าในระบบของมาตรวัด U231 (ซ้าย เปรียบเทียบค่า ขวา ค่าผิดพลาด)

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการทำสมดุลน้ำทั้งแบบระยะยาวและแบบระยะสั้นโดยปิดประตูน้ำมาตร DM ในตอนกลางคืนของทั้ง 4 Route ได้แก่ Route 15-05, 15-06, 15-11 และ 15-13 โดยสมดุลน้ำระยะยาวนั้นพบว่าการแกว่งของกราฟมากเกินไปเพราะจำนวนของข้อมูล ทำให้ดูแนวโน้มกราฟยาก รวมถึงบางช่วงยังมีความคลาดเคลื่อนในการตรวจวัดค่าดังที่แสดงในกราฟข้างต้น จึงปรับแก้ค่าเพิ่มด้วยวิธีเฉลี่ย 24 ชั่วโมงเพื่อให้กราฟเสถียรยิ่งขึ้น

ผลของสมดุลน้ำระยะยาวนั้น Route 15-05 และ 15-06 ไม่มีการรั่ว ส่วน Route 15-11 เห็นชัดว่ามีการรั่วไหลน้อยมากในช่วงก่อน 14 ก.ค. 2563 และกราฟมีแบบแผนหลังวันดังกล่าว คาดว่าเกิดจากการแบ่งจ่ายน้ำไปยัง BDV และ Route 15-13 ข้อมูลมาตรไม่สมบูรณ์จึงระบุไม่ได้ว่ามีการรั่วไหลหรือไม่

ผลการทำสมดุลน้ำระยะสั้นจากการปิดประตูน้ำมาตร DM Route ละ 2 คับ พบว่า Route 15-05 และ 15-13 ข้อมูลมาตรไม่สมบูรณ์จึงสรุปไม่ได้ว่ามีการรั่วไหลหรือไม่ ส่วน Route 15-06 เมื่อปิดมาตร DM-15-05-02-01 ที่ไม่



สามารถดึงค่ามาได้ นั่นพบว่าไม่มีการรั่ว ส่วน Route 15-11 นั้นให้ค่าใกล้เคียงศูนย์เมื่อมีการปิด BDV

เมื่อนำผลลัพธ์จากสมมูลน้ำทั้งสองแบบในงานวิจัยชิ้นนี้ มาเทียบกัน เห็นได้ว่าเป็นไปตามเงื่อนไข กล่าวคือการทำสมมูลน้ำระยะยาวจำเป็นต้องมีมาตรที่มีค่าสมบูรณ์ทุกมาตร จึงจะสามารถวิเคราะห์การรั่วไหลได้ เช่น Route 15-05, 15-06 และ 15-11 ที่เห็นผล ขณะที่สมมูลน้ำระยะสั้นสามารถใช้ได้แม้ว่ามาตรสมบูรณ์ไม่ครบทุกมาตร เนื่องจากสามารถปิดเฉพาะมาตรที่เสียได้ เช่น Route 15-06 แต่มีข้อเสียคือหากมาตรที่มีปัญหาเป็นมาตรหลักบนท่อประธาน (U) แล้วจะทำสมมูลน้ำระยะสั้นได้ยาก เพราะปิดมาตรไม่ได้ หากมาตร U เสียขึ้นต้องซ่อมเท่านั้นเพื่อให้ทำสมมูลน้ำในระบบได้ โดยจากการทำสมมูลน้ำในกรณีศึกษาทั้งแบบระยะยาวและระยะสั้นพบว่ามีความคลาดเคลื่อนได้ถึง 10^{-3} ลิตร/ชม

สถาบันวิจัยอุตสาหกรรมน้ำของสหราชอาณาจักร (UK Water Industry Research) ได้ออกคู่มือ Best Practice การแบ่งพื้นที่สำหรับเฝ้าระวังการรั่วไหลของท่อประธาน ซึ่งมีกรณีศึกษาที่พบค่าความคลาดเคลื่อนของมาตรเฉลี่ยที่ 3.46% และระบบสามารถตรวจพบน้ำรั่วบนเส้นทางหนึ่งมีค่า $320 \text{ m}^3/\text{ชม}$ [7] ซึ่งงานวิจัยได้ดำเนินงานในลักษณะเดียวกันกับคู่มือดังกล่าว และได้ผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพในการตรวจพบน้ำรั่วใกล้เคียงกัน (ระดับหลักร้อย) แสดงให้เห็นว่า กปน. ควรนำแนวทางการทำสมมูลน้ำไปเป็นแนวทางพิจารณาเรื่อง Trunk Main Monitoring Zone ในการติดตามน้ำสูญเสียในท่อประธานรวมถึงสามารถวิเคราะห์กรณีมาตรวัดให้ค่าผิดปกติบนเส้นทางอื่น ๆ ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากการประปานครหลวง ทุนวิจัยเลขที่ กนว. 23/2563 และทุนวิจัยระดับปริญญาโท จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุนวิจัยเลขที่ 64/01/WE/M.Eng และขอขอบพระคุณ นายจรรุเดช เก่งรักษัสัตว์ และนายกันต์ เชิดชู เจ้าหน้าที่การประปานครหลวง ที่ให้ความช่วยเหลืองานภาคสนามอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] MWA. Annual report 2019 Metropolitan Waterworks Authority. 2019. Thai
- [2] Lapprasert S, Pornprommin A, Lipiwattanakarn S, Chittaladakorn S. Energy balance of a trunk main network in Bangkok, Thailand: J AWWA. - Am Water Works Assoc. 2018 Jul; 110(7):E18–27.
- [3] US300FM UltrasonicFlowmeter (DISCONTINUED) Available from: <https://www.yokogawa.com/th/solutions/products-and-services/measurement/field-instruments-products/flow-meters/magnetic-flowmeters/#Overview> [Accessed 1st October 2021].
- [4] Magnetic Flowmeters Available from: <https://www.yokogawa.com/th/solutions/products-and-services/measurement/field-instruments-products/flow-meters/magnetic-flowmeters/#Resources>. [Accessed 1st October 2021].
- [5] Klingel P, Knobloch A. A review of water balance application in water supply. J. - Am Water Works Assoc. 2015 Jul;107(7):E339–50.
- [6] Kanakoudis V, Muhammetoglu H. Urban water pipe networks management towards non-revenue water reduction: Two case studies from Greece and Turkey: Urban Water Pipe Networks Management Towards NRW Reduction. CLEAN - Soil Air Water. 2014 Jul;42(7):880–92.
- [7] Brammer M, Cartwright K, Collins D, Parker S. Best practice for upstream flow monitoring zones. London: UK Water Industry Research:2020.



การใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์สำหรับโครงข่าย ท่อน้ำประปา: จังหวัดสมุทรปราการ ประเทศไทย

Using an Optimization Approach to Calibrate Hydraulic Models for Water Distribution Networks: Samut Prakan, Thailand

ณัฏพล จารุวิมลกุล¹ จิระเมธ ช้างคล่อม^{1*} อติชัย พรพรหมินทร์¹ และสุรชัย ลิปิวัฒนาการ¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10100

Natchapol Charuwimolkul¹, Jiramate Changklom^{1*}, Adichai Pornprommin¹ and
Surachai Lipiwattanakarn¹

¹Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand
50 Ngamwongwan Road, Lat yao, Chatuchak, Bangkok, 10900

*ผู้รับผิดชอบบทความ: jiramate.ch@ku.th เบอร์โทรศัพท์ 064-814-0542

Received: 14 March 2022, Revised: 7 June 2022, Accepted: 8 July 2022

บทคัดย่อ

แบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปาเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจสำหรับการบริหารจัดการ ซึ่งการใช้แบบจำลองที่เป็นตัวแทนของโครงข่ายท่อน้ำประปาจริงได้ต้องทำการสอบเทียบ งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอกระบวนการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์โดยลดค่าผลรวมผลต่างกำลังสองของอัตราการไหลจากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด และ แรงดันจากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด โดยอาศัยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามวิธีการ Brent's Method ซึ่งมีกระบวนการดังนี้ 1) หาค่าสัมประสิทธิ์จำลองการรั่วที่เหมาะสมที่สุด 2) ปรับค่ารูปแบบการใช้น้ำโดยอ้างอิงกับข้อมูลการใช้น้ำ 3) ปรับแก้ค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดัน และ 4) ปรับค่าความขรุขระของผนังท่อเริ่มจากอายุเส้นท่อ งานวิจัยนี้ได้ทดลองกับ 24 พื้นที่เฝ้าระวังของการประปานครหลวงสาขาสมุทรปราการโดยยกมา 1 พื้นที่เพื่ออภิปรายผล ซึ่งได้ผลรวมผลต่างกำลังสองอัตราการไหลและแรงดันเท่ากับ 4 (ลบ.ม./ชม.)² และ 0.44 (ม.)² ตามลำดับ

คำสำคัญ : การสอบเทียบแบบจำลอง โครงข่ายท่อน้ำประปา พื้นที่เฝ้าระวัง กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

Abstract

The model for water distribution networks (WDNs) is an important tool to support network operations. The model requires an accurate calibration to represent an actual network. The calibration process is to minimize the sum square error (SSE) between the simulated values and the measurements on both flow and pressure. This research proposes a calibration method using the Brent's optimization. The procedure includes: 1) finding an optimal emitter coefficient to represent leaks, 2) adjusting the demand patterns from the consumption data, 3) adjusting the elevation of pressure measurement, and 4) adjusting the roughness of pipe walls starting from pipe age data. The proposed method is demonstrated on 24 District Metered Areas in Samut Prakan's WDNs, Thailand. The discussed area has SSE of flow and pressure equal to 4 (m³/Hr.)² and 0.44 (m)², respectively.

Keywords: Model Calibration, Water Distribution Network, District Metered Areas, Optimization



1. บทนำ

โครงข่ายท่อน้ำประปาเป็นระบบสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐานขนาดใหญ่โดยการบริหารจัดการระบบนั้นมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง และส่งผลกระทบต่อผู้ใช้น้ำ ดังนั้นจึงต้องการกลยุทธ์ในการบริหารจัดการที่ชัดเจนและมีประสิทธิภาพอย่างยิ่งยวดเพื่อลดโอกาสการเกิดความเสียหายอันเกิดจากกลยุทธ์ที่ไม่เหมาะสม ซึ่งตัวช่วยในการตัดสินใจที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพคือการใช้แบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปา [1] โดยมีผู้พัฒนาจำนวนมากได้จัดทำซอฟต์แวร์สำหรับการขึ้นแบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปา ซึ่งมีวัตถุประสงค์คือสร้างแบบจำลองที่มีความใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุด เพื่อที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของระบบจริงและสามารถทดลองกลยุทธ์ต่าง ๆ บนแบบจำลองก่อนตัดสินใจเลือกกลยุทธ์ที่เหมาะสมเพื่อไปดำเนินการบนระบบจริง

การสร้างแบบจำลองที่สามารถเป็นตัวแทนของระบบจริงได้นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์ก่อน โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองให้มีความเหมาะสมที่สุด หากแต่ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จะมีความต่างออกไปตามรูปแบบของข้อมูลที่ระบบนั้นได้ทำการบันทึกไว้ ซึ่งกล่าวได้ว่าการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์ของโครงข่ายท่อน้ำประปา กระบวนการใดกระบวนการหนึ่งนั้นไม่สามารถใช้ได้กับทุกระบบที่มีอยู่จริง

ปัจจุบัน หลายหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในประเทศไทย เลือกใช้กระบวนการสอบเทียบแบบจำลองโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ไปทีละตัวด้วยบุคคล เนื่องจากข้อมูลที่มีอยู่ปัจจุบันมีความไม่สมบูรณ์ค่อนข้างสูงจึงเป็นได้ยากที่จะใช้กระบวนการสอบเทียบแบบจำลองโดยอัตโนมัติ ซึ่งข้อเสียของกระบวนการนี้คือใช้ระยะเวลาในการสอบเทียบอย่างมากและมีความแม่นยำค่อนข้างต่ำ เป็นที่มาให้นักวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับกระบวนการสอบเทียบแบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปาโดยอัตโนมัติสำหรับระบบที่มีความไม่สมบูรณ์ของข้อมูลค่อนข้างสูงโดยอาศัยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามวิธีของ Brent's Method โดยงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดลองใช้กับระบบที่มีอยู่จริง 24 พื้นที่เฝ้าระวังของการประปานครหลวงสาขาสหุธรปราการเพื่อแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องและประสิทธิภาพของกระบวนการที่ได้นำเสนอ

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 แบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปา (WDNs Model)

แบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปา เป็นเครื่องมือที่ช่วยตัดสินใจในการบริหารจัดการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก [1] โดยหนึ่งในแบบจำลองที่ได้รับความนิยมที่สุดได้แก่แบบจำลอง EPANET ซึ่งเป็นแบบจำลองโครงข่ายท่อที่ได้รับการพัฒนาโดยหน่วยงาน Environmental Protection Agency (EPA) ประเทศสหรัฐอเมริกา เนื่องจากไม่มีค่าลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์และสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ทำให้หลายหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในประเทศไทยใช้งานแบบจำลอง EPANET อยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้เสนอกระบวนการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์สำหรับโครงข่ายท่อน้ำประปาโดยอัตโนมัติที่สามารถกระทำได้กับแบบจำลอง EPANET เวอร์ชัน 2.0 เท่านั้น โดยข้อดีของแบบจำลองที่ได้หลังจากกระบวนการคือ สามารถจำลองการรั่วไหลในโครงข่ายและสามารถวิเคราะห์การใช้น้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละช่วงเวลาได้ ซึ่งทำให้แบบจำลองที่ได้นั้นมีความใกล้เคียงกับโครงข่ายท่อน้ำประปาจริงมากยิ่งขึ้น

2.2 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)

กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าของตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ภายใต้ข้อจำกัด (Constraints) ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) เป็นค่าที่มากที่สุดหรือน้อยที่สุด ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายสาขาวิชารวมถึงสาขาวิศวกรรมศาสตร์

2.3 การประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์

เพื่อให้แบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปาสามารถใช้เป็นตัวแทนของโครงข่ายท่อจริงได้นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์เสียก่อน โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองให้มีความเหมาะสมที่สุด ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้ประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ที่ทำให้แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุด โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัด ดังต่อไปนี้

2.3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

กำหนดเป็นการหาค่าที่น้อยที่สุดของ ผลรวมผลต่าง



กำลังสอง (Sum Square of Errors) ของอัตราการไหลที่ได้จากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด และ แรงดันที่จากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด ดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

2.3.2 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจเป็นพารามิเตอร์ (Parameter) ของแบบจำลอง โดยงานวิจัยฉบับนี้ทำการแบ่งพารามิเตอร์ออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ 1) พารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลจากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด และ 2) พารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบแรงดันจากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด สรุปดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปพารามิเตอร์ของแบบจำลองชลศาสตร์

ชนิดพารามิเตอร์	ชื่อพารามิเตอร์	ตัวย่อ
พารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลจากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด	สัมประสิทธิ์จำลองการรั่ว Emitter Coefficient	C
	รูปแบบการใช้น้ำ Demand Patterns	d
พารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบแรงดันจากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด	ระดับจุดตรวจวัดแรงดัน Elevations	z
	ความขรุขระของผนังท่อ Roughness	r

2.3.3 ข้อจำกัด (Constraints)

ข้อจำกัดของกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ 1) ข้อจำกัดภายในโครงข่ายท่อ และ 2) ข้อจำกัดขอบเขตของตัวแปรตัดสินใจ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ก) ข้อจำกัดของระบบ คือ สมดุลของพลังงานและสมดุลมวลในโครงข่ายท่อ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$A_{11}(r,Q) \cdot Q^2 + A_{12}H + A_{10}H_0(z) = 0 \quad (1)$$

$$A_{21}Q - q(d,C) = 0 \quad (2)$$

โดยที่ $A_{11}(r,Q)$ คือ เมทริกซ์ความสัมพันธ์การสูญเสียเฮด
เฮดการไหลซึ่งเกิดจากแรงเสียดทาน
ภายในระบบ

A_{12} คือ เมทริกซ์การเชื่อมต่อของเส้นท่อและจุด
โหนด

A_{21} คือ เมทริกซ์การเชื่อมต่อของจุดโหนดและเส้นท่อ

A_{10} คือ เมทริกซ์เส้นท่อที่รู้ค่าเฮดการไหลที่จุดโหนดปลายเส้นท่อ

Q คือ เวกเตอร์ของอัตราการไหล

H คือ เวกเตอร์เฮดการไหลที่ไม่ทราบค่า

$H_0(z)$ คือ เวกเตอร์เฮดการไหลที่ทราบค่าซึ่งรวมค่าระดับแล้ว

$q(d,C)$ คือ เวกเตอร์ของความต้องการใช้น้ำซึ่งประกอบด้วยความต้องการใช้น้ำและน้ำสูญเสีย

ซึ่งแบบจำลองชลศาสตร์จำเป็นต้องทำการแก้ปัญหาบนข้อจำกัดทั้งสองนี้พร้อมกันยกตัวอย่าง เช่น แบบจำลอง EPANET ซึ่งสามารถเขียนลดรูปได้ดังสมการที่ (5)

ข) ข้อจำกัดขอบเขตของตัวแปรตัดสินใจ คือ ขอบเขตค่าของตัวแปรตัดสินใจที่สามารถเป็นไปได้ โดยต้องอยู่ภายในขอบเขตบน (Upper Bound) และขอบเขตล่าง (Lower Bound) ดังแสดงให้เห็นดังสมการที่ (6) (7) และ (8)

2.4 แบบจำลองการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization Model)

จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์, ตัวแปรตัดสินใจ และ ข้อจำกัดทั้งหมดที่ได้กล่าวข้างต้นทำให้สามารถเขียนเป็นแบบจำลองการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองชลศาสตร์ที่ดีที่สุดได้ดังต่อไปนี้ [2-5]

Objective Function:

$$\min_{c,d(t)} = \sum (Q_c^{in} - Q_m^{in})^2 \quad (3)$$

$$\min_{z,r} = \sum (P_{n,c} - P_{n,m})^2 \quad (4)$$

(คำอธิบายเพิ่มเติม: ตัวห้อย c แทนค่าที่ได้จากแบบจำลอง (Calculation) และ m แทนค่าได้จากการตรวจวัด (Measurement))

$$g(C,d,z,r) = 0 \quad (5)$$

$$0 \leq C \leq 1 \quad (6)$$

$$d_{ij} \geq 0 \quad (7)$$

$$100 \leq r_1 \leq 140 \quad (8)$$



โดยที่

Q_c^{in}, Q_m^{in} คือ อัตราการไหลเข้าสู่ระบบจากแบบจำลอง
ภายหลังการปรับตัวแปรตัดสินใจและค่า
ตรวจวัดตามลำดับ (ลบ.ม.)

$P_{n,c}, P_{n,m}$ คือ แรงดันที่จุดตรวจวัดที่ n จากแบบจำลอง
ภายหลังการปรับตัวแปรตัดสินใจและค่า
ตรวจวัดตามลำดับ (ม.)

$g(C,d,z,r)$ คือ แบบจำลองชลศาสตร์ของ EPANET ซึ่ง
เป็นฟังก์ชันของตัวแปรตัดสินใจ

$d_{t,j}$ คือ รูปแบบการใช้น้ำเงื่อนไขที่เวลา t ณ จุด
ผู้ใช้น้ำที่ j

z คือ ค่าระดับของจุดตรวจวัดแรงดัน (ม.)

r_l คือ ค่าความขรุขระของผนัง (Hazen-Williams)
ท่อที่ l

โดยกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่งานวิจัยนี้เลือกใช้
เป็นวิธีของ Brent's Method ที่มีชื่อเรียกว่า Brent's
Minimization ซึ่งเป็นวิธีที่รวมกระบวนการ Parabolic
Interpolation และ Golden-Section Search ไว้ด้วยกันทำ
ให้มีข้อดีคือ 1) สามารถกำหนดขอบเขตของค่าตัวแปร
ตัดสินใจได้ และ 2) ไม่ต้องการฟังก์ชันอนุพันธ์ในการดำเนิน
กระบวนการ ปัจจุบันเครื่องมือที่มีชื่อว่า SciPy เป็นแพ็คเกจ
เสริมบนภาษาไพทอน (Python) มีการรวมกระบวนการ
Brent's Minimization [6] แล้วในฟังก์ชันย่อยที่ชื่อว่า
Minimize_Scalar

2.5 การปรับค่าพารามิเตอร์ (Parameters Adjustment)

2.5.1 ค่าสัมประสิทธิ์จำลองการรั่ว (Emitter
Coefficient: C) ค่าสัมประสิทธิ์จำลองการรั่วเป็นฟังก์ชันของ
แบบจำลอง EPANET เพื่อจำลองสภาวะการรั่วไหลบน
โครงข่ายท่อโดยแปรผันกับแรงดันสามารถเขียนในรูปสมการ
ได้ดังสมการที่ (9)

$$q_i = C \cdot P_i^{N_1} \quad (9)$$

โดยที่ q_i คือ อัตราการไหลของจุดรั่วที่ i

C คือ Emitter Coefficient

P_i คือ ค่าแรงดัน ณ จุดรั่วที่ i

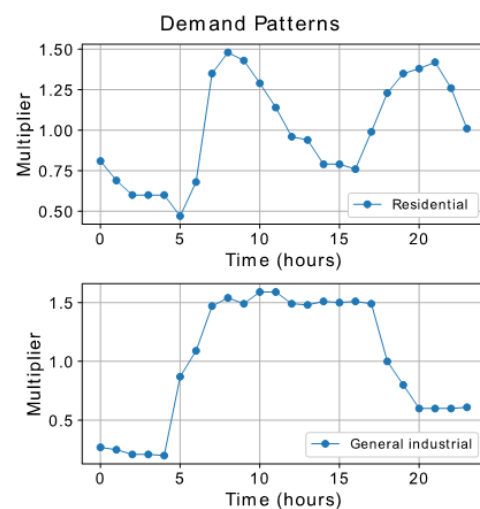
N_1 คือ Emitter Exponent

ซึ่งค่า N_1 เป็นค่าคงที่ โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของท่อ ($N_1=0.5$
เมื่อท่อเป็นเหล็ก, $N_1>1.2$ เมื่อท่อเป็นพลาสติก และ $N_1=1$

เมื่อเป็นวัสดุอื่น ๆ) [7] ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงใช้กระบวนการ
หาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อปรับค่า C ให้ดีที่สุดเพียงค่าเดียว
(กำหนดให้ค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1)

2.5.2 รูปแบบการใช้น้ำ (Demand Patterns: $d(t)$)

พฤติกรรมการใช้น้ำนั้นมีความแตกต่างกันตามประเภท
ของผู้ใช้น้ำและเวลาในระหว่างวัน ซึ่งแบบจำลอง EPANET
สามารถทำการจำลองแบบหลายช่วง เวลา (Time Periods)
ได้โดยการนำเวกเตอร์ของรูปแบบการใช้น้ำที่เปลี่ยนแปลง
ตามเวลาคูณกับความต้องการใช้น้ำพื้นฐาน (Base Demand)
ของโหนดผู้ใช้น้ำ ดังนั้นหลายหน่วยงานในประเทศไทยจึงมี
การบันทึกข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยรูปแบบการใช้น้ำตามประเภท
ผู้ใช้และเวลาในรูปแบบตัวคูณ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างรูปแบบการใช้น้ำของบ้านพักอาศัยกับ
อุตสาหกรรมทั่วไป (การประปานครหลวงสาขาสุทรปราการ)
งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอกระบวนการปรับแก้ค่ารูปแบบการ
ใช้น้ำ โดยอ้างอิงกับข้อมูลการใช้น้ำเฉลี่ยของผู้ใช้แต่ละ
ประเภทตามที่มีการบันทึกไว้เท่านั้น โดยมีกระบวนการหาค่า
ปรับแก้ดังต่อไปนี้

1) ประเมินรูปแบบการจ่ายน้ำเข้าสู่โครงข่ายท่อที่ได้จาก
แบบจำลองและการตรวจวัด ดังสมการที่ (9)และ(10)
ตามลำดับ

$$P_{c,t}^{in} = Q_{c,t}^{in} / \bar{Q}_c^{in} \quad (9)$$

$$P_{m,t}^{in} = Q_{m,t}^{in} / \bar{Q}_m^{in} \quad (10)$$

โดยที่

$P_{c,t}^{in}, P_{m,t}^{in}$ คือ รูปแบบการจ่ายน้ำเข้าสู่ระบบจากแบบ
จำลองและการตรวจวัด ณ เวลาที่ t



$Q_{c,t}^{in}, Q_{m,t}^{in}$ คือ อัตราการไหลเข้าสู่ระบบจากแบบจำลอง และการตรวจวัด ณ เวลาที่ t

$\overline{Q_c^{in}}, \overline{Q_m^{in}}$ คือ ค่าเฉลี่ยอัตราการไหลเข้าสู่ระบบจากแบบจำลองและการตรวจวัด

2) คำนวณค่าปรับแก้รูปแบบการใช้น้ำ ดังสมการที่ (11)

$$K_t = (\Delta Pt - \overline{\Delta Pt}) * R \quad (11)$$

โดยที่

K_t คือ ค่าปรับแก้ ณ เวลาที่ t

ΔPt คือ ผลต่างรูปแบบการจ่ายน้ำเข้าสู่ระบบจาก

การตรวจวัดและแบบจำลอง $P_{m,t}^{in} - P_{c,t}^{in}$

$\overline{\Delta Pt}$ คือ ค่าเฉลี่ยของผลต่างรูปแบบการจ่ายน้ำเข้าสู่ระบบจากการตรวจวัดและแบบจำลอง

$$\frac{P_{m,t}^{in} - P_{c,t}^{in}}{P_{m,t}^{in} - P_{c,t}^{in}}$$

ซึ่งค่า R คือ อัตราส่วนลดความแปรปรวน มีหน้าที่สำคัญในการป้องกันการลู่ออกจากคำตอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่มีทางจ่ายน้ำเข้าหลายทาง เนื่องจากการเปรียบเทียบอัตราการไหลระหว่างค่าตรวจวัดกับแบบจำลองจะกระทำบนทางจ่ายน้ำเข้าหลักเท่านั้น ส่วนทางเข้าที่เป็นการไหลเข้าจากระบบข้างเคียงหรือทางเข้าร่องจะถูกบังคับให้เป็นไปตามค่าตรวจวัด ดังนั้นค่าปรับแก้รูปแบบการใช้น้ำจึงอ้างอิงกับอัตราการไหล ณ ทางเข้าหลักเท่านั้น

จึงต้องมีค่าอัตราส่วนลดความแปรปรวนโดยคำนึงถึงอิทธิพลของทางจ่ายน้ำเข้าที่เหลือเพื่อรับรองการลู่เข้าสู่คำตอบ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (12)

$$R = \frac{\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^{N_{in}} (Q_{m,i}^{in})_t}{2 \cdot \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^{N_{in}} (Q_c^{in,i})_t} \quad (12)$$

โดยที่ N_{in} คือ จำนวนทางน้ำเข้าทั้งหมด

T คือ เวลาทั้งหมดของแบบจำลอง

$(Q_m^{in,i})_t$ คือ ค่าอัตราการไหลจากการตรวจวัด ณ จุดทางเข้าที่ i เวลาที่ t

$(Q_c^{in,i})_t$ คือ ค่าอัตราการไหลจากแบบจำลอง ณ จุดทางเข้าที่ i เวลาที่ t

3) คำนวณค่ารูปแบบการใช้น้ำใหม่สำหรับจุดผู้ใช้น้ำในระบบ ดังสมการที่ (13)

$$(d_{t,j})_i = \frac{(d_{t,j})_{i-1} + K_t}{(d_j)_{i-1}} \quad (13)$$

โดยที่

$(d_{t,j})_i$ คือ รูปแบบการใช้น้ำที่เวลา t ณ จุดผู้ใช้น้ำ j หลังการปรับแก้ครั้งที่ i ($d_{t,j}$ ค่าใหม่)

$(d_{t,j})_{i-1}$ คือ รูปแบบการใช้น้ำที่เวลา t ณ จุดผู้ใช้น้ำ j ก่อนหน้าการปรับแก้ครั้งที่ i ($d_{t,j}$ ค่าเดิม)

$(d_j)_{i-1}$ คือ ค่าเฉลี่ยรูปแบบการใช้น้ำ ณ จุดผู้ใช้น้ำ j ครั้งที่ $i-1$

ซึ่งค่ารูปแบบการใช้น้ำใหม่ที่ได้นั้นต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0 เนื่องจาก ค่าต้องการใช้น้ำที่เป็นลบในแบบจำลอง EPANET มีความหมายว่าเป็นน้ำที่ไหลเข้าสู่ระบบ (คำอธิบายเพิ่มเติม: ในการปรับแก้ค่ารูปแบบการใช้น้ำครั้งแรก i เท่ากับ 1 ค่ารูปแบบการใช้น้ำเดิม $(d_{t,j})_0$ จะหมายถึง ค่ารูปแบบการใช้น้ำที่หน่วยงานได้ทำการบันทึกไว้)

2.5.3 ค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดัน (Elevations: z)

เนื่องจากข้อมูลระดับของจุดตรวจวัดแรงดันของหลายหน่วยงานจะอาศัยข้อมูลจาก Digital Elevation Model (DEM) ซึ่งความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของภาพถ่ายจากดาวเทียม ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้เสนอวิธีการปรับแก้ค่าระดับโดยอ้างอิงกับค่าแรงดันที่ตรวจวัดได้จริง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังสมการที่ (14)

$$(z_n)_i = (z_n)_{i-1} + \overline{(P_{n,c} - P_{n,m})} \quad (14)$$

โดยที่

$(z_n)_i$ คือ ค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดันที่ n หลังการปรับแก้ครั้งที่ i (z_n ค่าใหม่)

$(z_n)_{i-1}$ คือ ค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดันที่ n ก่อนหน้าการปรับครั้งที่ i (z_n ค่าเดิม)

$\overline{(P_{n,c} - P_{n,m})}$ คือ ค่าเฉลี่ยผลต่างแรงดันจากแบบจำลอง กับค่าตรวจวัด ณ จุดตรวจวัดที่ n

(คำอธิบายเพิ่มเติม: ในการปรับแก้ค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดันครั้งแรก i เท่ากับ 1 ค่าระดับเดิม $(z_n)_0$ จะหมายถึง ค่าระดับที่หน่วยงานได้ทำการบันทึกไว้)

2.5.3 ค่าความขรุขระของผนังท่อ (Roughness: r)

งานวิจัยฉบับนี้ใช้ค่าความขรุขระของผนังท่อตามทฤษฎีของ Hazen-Williams ซึ่งจะแบ่งตามชนิดวัสดุท่อโดยค่าที่สูงหมายถึงผนังท่อมีความขรุขระต่ำ แต่ในการใช้งานจริงท่อจะเกิดการกัดกร่อนบริเวณผนังส่งผลให้เมื่อท่อมีอายุการใช้งานที่



นานขึ้นก็จะทำให้ความขรุขระผนังท่อนั้นสูงขึ้นตามไปด้วย โดยในพื้นที่ของการประปานครหลวง (กปน.) สาขาสมุทรปราการ ตามรายงานที่ปรากฏของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ปี พ.ศ.2562 [9] ได้ทำการประเมินการลดลงของค่าความขรุขระผนังท่อ Hazen-Williams ของท่อทุกชนิด พบว่าค่าความขรุขระของผนังท่อจะลดลงเท่ากับอายุท่อซึ่งจะไม่ต่ำกว่าค่าที่ต่ำที่สุดตามวิธีของ Hazen-Williams ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเสนอการปรับแก้ค่าความขรุขระของผนังท่อ ดังสมการที่ (15)

$$r_l = M \cdot (r_{\max,l} - Age_l) \quad (15)$$

โดยที่ M คือ ตัวคูณปรับแก้
 $r_{\max,l}$ คือ ค่าความขรุขระผนังท่อที่สูงที่สุดของเส้นท่อที่ l
 Age_l คือ อายุของเส้นท่อที่ l

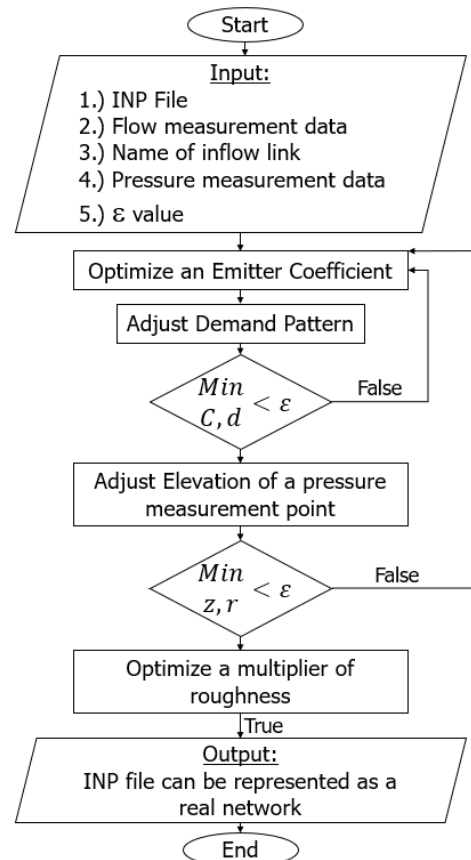
โดยใช้กระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการหาค่า M เพียงค่าเดียวเท่านั้น (กำหนดให้ค่า r_l ที่ได้อยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 140 เนื่องจากท่อส่วนใหญ่ในระบบ DMA เป็นชนิด PVC)

2.6 กระบวนการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์อัตโนมัติ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการพัฒนาชุดคำสั่งสำหรับการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์บนภาษาไพทอน โดยใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า Water Network Tool for Resilience (WNTR) [8] เพื่อดึงผลลัพธ์แบบจำลอง EPANET โดยชุดคำสั่งที่พัฒนามีกระบวนการทำงาน 9 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ยอมรับได้ (ϵ)
- 2) นำเข้าไฟล์แบบจำลอง EPANET (.inp), ไฟล์ตรวจวัดอัตราการไหลและแรงดัน (.dat) และกรอกชื่อจุดจ่ายน้ำเข้าหลัก
- 3) หาค่าเหมาะสมที่สุดของสัมประสิทธิ์จำลองการรั่ว
- 4) ปรับแก้ค่ารูปแบบการใช้น้ำ
- 5) ทำซ้ำกระบวนการที่ 3 และ 4 จนกว่าค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ส่วนอัตราการไหลมีค่าน้อยกว่าค่า ϵ ที่กำหนด
- 6) ปรับแก้ค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดัน
- 7) หาค่าตัวคูณ M ที่ทำให้ความขรุขระผนังท่อเหมาะสมที่สุด
- 8) ตรวจสอบค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ส่วนแรงดันหากค่ามากกว่าค่า ϵ ที่กำหนดให้ดำเนินการต่อตามขั้นตอนที่ 9

9) ทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 3 จนค่า ϵ สองส่วนน้อยกว่าที่กำหนดจากที่กล่าวข้างต้นสรุปกระบวนการทำงานได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังกระบวนการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

โครงข่ายท่อน้ำประปาจังหวัดสมุทรปราการ เป็นหนึ่งในพื้นที่ให้บริการของ กปน. จากข้อมูลรายงานประจำปีพ.ศ. 2561 มีพื้นที่ให้บริการ 274.60 ตร.กม. ผู้ใช้น้ำ 195,872 ราย และ น้ำผลิตจ่ายภายในสาขา 198.49 ล้าน ลบ.ม. โดยมีน้ำจำหน่ายรวม 141.65 ล้าน ลบ.ม. ซึ่งเป็นน้ำสูญเสียเท่ากับ 56.84 ล้าน ลบ.ม. คิดเป็นร้อยละ 28.64 และมีการแบ่งระบบออกเป็นพื้นที่เฝ้าระวัง (District Metered Area: DMA) ทั้งหมด 70 พื้นที่ งานวิจัยฉบับนี้ได้ทดลองใช้กระบวนการสอบเทียบแบบจำลองกับทั้งหมด 24 พื้นที่ ซึ่งจะยกตัวอย่าง 1 พื้นที่ เพื่ออภิปรายผลลัพธ์ที่ได้โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2



ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวอย่างพื้นที่ศึกษา

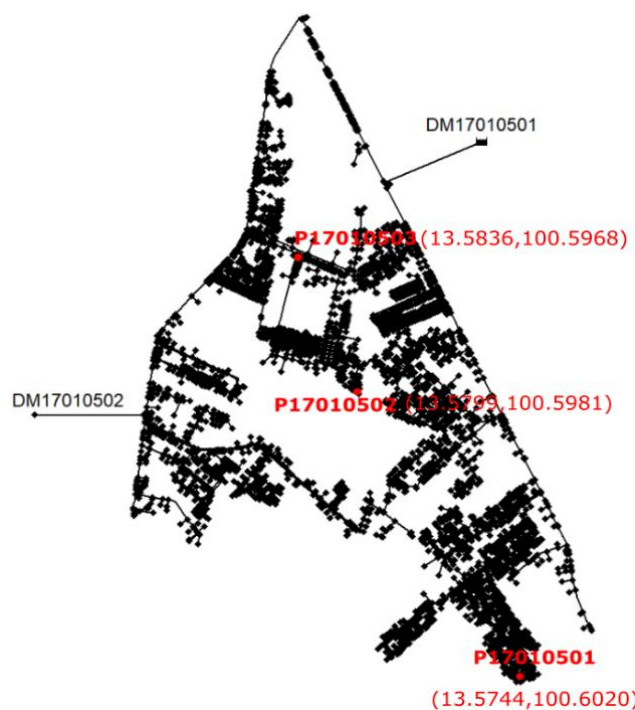
รหัสพื้นที่ (DMA)	จุดจ่ายน้ำเข้า	ความยาวท่อ (กม.)	ผู้ใช้น้ำ (ราย)	น้ำสูญเสีย (%)
170105	2	24.9	2,297	31.9

ตารางที่ 3 ข้อมูลนำเข้าชุดคำสั่งกระบวนการสอบเทียบ

ชื่อจุดทางจ่ายน้ำเข้าหลัก	c ของอัตราการไหล (ลบ.ม./ชม.) ²	c ของแรงดัน (ม.) ²	เวลา (ชม.)
DM17010501	100	10	24

* c เป็นค่าผลรวมผลต่างกำลังสอง

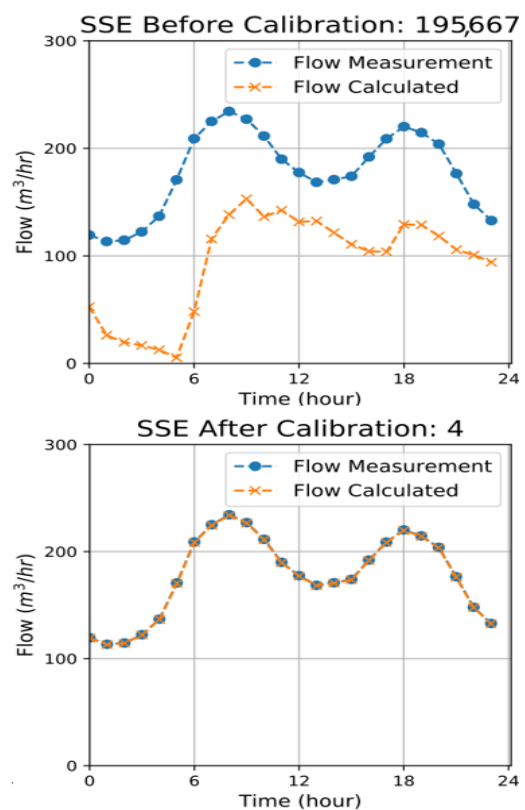
ทำให้ได้ผลลัพธ์ของแบบจำลองเชิงพื้นที่ดังแสดงในตารางที่ 4 และ ผลลัพธ์ของแบบจำลองรายชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5



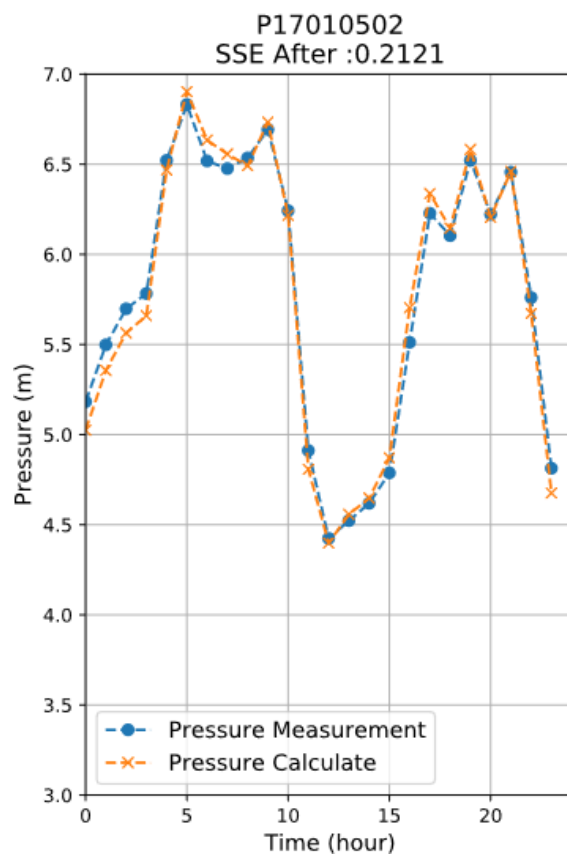
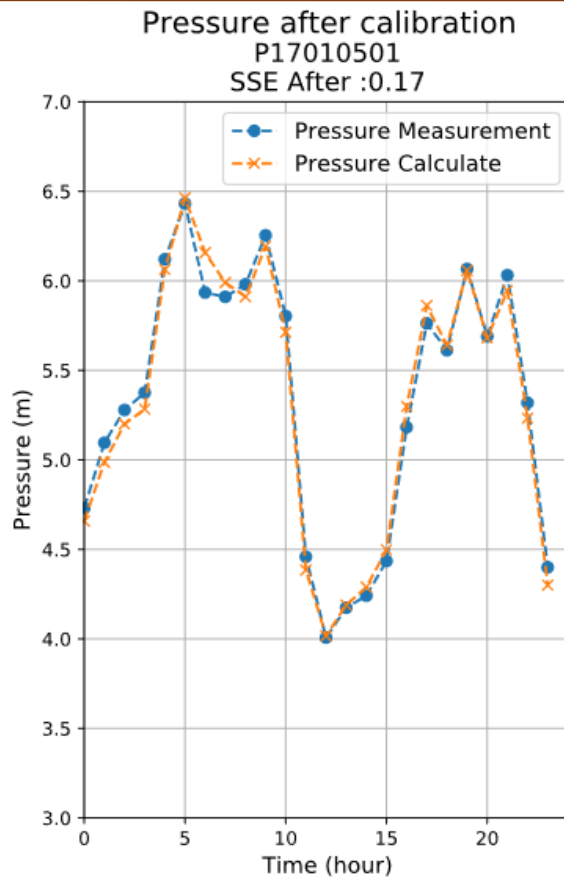
รูปที่ 3 แบบจำลองโครงข่ายท่อบน EPANET ของพื้นที่ศึกษา
ผลลัพธ์ของแบบจำลองชลศาสตร์ที่ได้ภายหลังการใช้ชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้น ซึ่งกำหนดให้ข้อมูลนำเข้าเป็นตามตารางที่ 3

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์แบบจำลองชลศาสตร์เชิงพื้นที่

อัตราการไหลเข้าสู่ระบบทั้งหมดจากการตรวจวัด (ลบ.ม./วัน)	อัตราการไหลเข้าสู่ระบบทั้งหมดจากแบบจำลอง (ลบ.ม./วัน)	ผลต่าง (ลบ.ม./วัน)	ร้อยละผลต่าง (%)
6,319.07	6,306.78	12.29	0.19
การเปรียบเทียบอัตราการไหล ณ จุดจ่ายน้ำเข้า	ค่าความคลาดเคลื่อน	ก่อนการสอบเทียบ	หลังการสอบเทียบ
	SSE (ลบ.ม./ชม.) ²	195,667	4
	RMSE (ลบ.ม./ชม.)	90.29	0.41
การเปรียบเทียบแรงดัน ณ จุดตรวจวัดแรงดัน (3 จุดตรวจวัด)	ค่าความคลาดเคลื่อน	ก่อนการสอบเทียบ	หลังการสอบเทียบ
	Sum Square of Errors: SSE (ม.) ²	83.86	0.17
		54.78	0.21
		56.37	0.06
	Root Mean Square Errors: RMSE (ม.)	1.87	0.08
		1.51	0.09
		1.53	0.05



รูปที่ 4 ค่าอัตราการไหล ณ ทางจ่ายน้ำเข้าหลักที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ก่อนและหลังการสอบเทียบแบบจำลอง

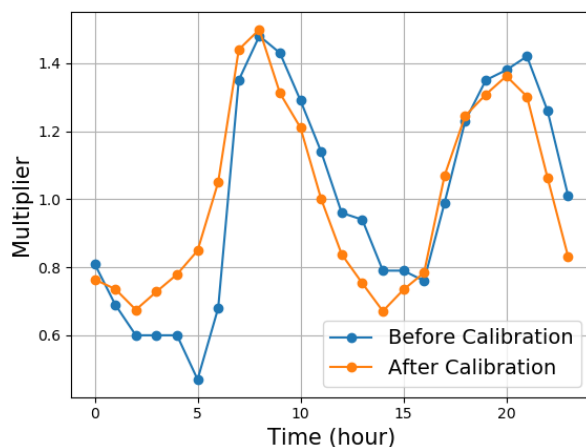


รูปที่ 5 ค่าแรงดัน ณ จุดตรวจวัดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหลังการสอบเทียบแบบจำลอง (จุดตรวจวัดที่ 1 และ 2) โดยค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ได้ภายหลังกระบวนการสอบเทียบมีรายละเอียดดังตารางที่ 5



ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลภายหลังการสอบเทียบแบบจำลอง

Emitter Coefficient		0.002513				
Demand Pattern (ยกตัวอย่าง บ้านพัก อาศัย)	ชม.	0	1	2	3	4
		0.764	0.736	0.675	0.728	0.779
	ชม.	5	6	7	8	9
		0.849	1.050	1.440	1.499	1.312
	ชม.	10	11	12	13	14
		1.210	1.001	0.838	0.753	0.671
	ชม.	15	16	17	18	19
		0.734	0.784	1.070	1.245	1.308
	ชม.	20	21	22	23	
		1.362	1.302	1.063	0.831	



รูปที่ 6 ตัวอย่างรูปแบบการใช้น้ำของบ้านพักอาศัยก่อนและหลังสอบเทียบแบบจำลอง

ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบแรงดันที่ได้ภายหลังกระบวนการสอบเทียบมีรายละเอียดดังตารางที่ 6

4. บทสรุป

จากผลการศึกษาที่กล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากระบวนการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอ สามารถทำงานกับโครงข่ายท่อน้ำประปาจริงได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ โดยผลลัพธ์ของตัวอย่างพื้นที่ศึกษารหัส 170105 ซึ่งเป็นโครงข่ายท่อน้ำประปาภายใต้การบริหารของการประปานครหลวงสาขาสุมทราการ แสดงให้

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบแรงดันภายหลังการสอบเทียบแบบจำลอง

Elevation (ม.)	P17010501	P17010502	P17010503
	1.514	1.302	1.465
ชื่อ	P-170105-1	P-170105-2	P-170105-3
	116.905	130.431	112.074
Roughness (ยกตัวอย่าง 9 ท่อแรก)	P-170105-4	P-170105-5	P-170105-6-1
	114.006	127.533	122.701
ชื่อ	P-170105-7	P-170105-8	P-170105-9-1
	121.736	121.736	114.006

เห็นว่าค่าอัตราการไหลและแรงดันจากแบบจำลองก่อนการสอบเทียบแบบจำลองมีค่าผลรวมผลต่างกำลังสอง (SSE) เท่ากับ 195,667 (ลบ.ม./ชม.)² และ 195.01 เมตร² ตามลำดับ โดยภายหลังกระบวนการสอบเทียบแบบจำลองนำเสนอพบว่าค่าผลรวมผลต่างกำลังสองของอัตราการไหลและแรงดันลดลงเป็น 4 (ลบ.ม./ชม.)² และ 0.44 (เมตร)² ตามลำดับ โดยที่ได้ค่า Emitter Coefficient ภายหลังการสอบเทียบแบบจำลองเท่ากับ 0.002513 และค่าระดับของจุดตรวจวัดแรงดันทั้ง 3 จุดภายหลังการสอบเทียบแบบจำลองเท่ากับ 1.514, 1.302, 1.465 เมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามหากค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดันได้ทำการบันทึกโดยตรงอาจจะส่งผลให้การสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์มีความแม่นยำที่ดีขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนพัฒนานวัตกรรมปริญญาโท ประจำปี 2561 รหัส 61/01/WRE/Innovation คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบพระคุณการประสานครหลวงสำหรับข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lipiwattanakarn S, Kaewsang S, Charuwimolkul N, Changklom J, Pornprommin A. theoretical estimation of energy balance components in water networks for top-down approach. Water. 2021 Jan;13(8):1011.
- [2] Zhang Q, Zheng F, Duan HF, Jia Y, Zhang T, Guo X. Efficient numerical approach for simultaneous calibration of pipe roughness coefficients and nodal demands for water distribution systems. JWater Resour Plan Manag. 2018 Oct 1;144(10):04018063.
- [3] Jadhao RD, Gupta R. Calibration of water distribution network of the Ramnagar zone in Nagpur City using online pressure and flow data. Appl Water Sci. 2018 Mar 1;8(1):1–10.
- [4] Khedr A. Automated Calibration of Real Water Distribution Networks: City X Case Study. Masters thesis. University of Waterloo, Ontario; 2016.
- [5] Ormsbee LE. Implicit network calibration. J Water Resour Plan Manag. 1989 Mar 1;115(2):243–57.
- [6] Brent RP. Algorithms for minimization without derivatives, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall; 1973, p.195.
- [7] Sabbagh K, Safri A, Zabot M. Pre-Localization approach of leaks on a water distribution network by optimization of the hydraulic model using an evolutionary algorithm. MDPI Water. 2018;588:1-9
- [8] Sharp WW, Walski TM. Predicting internal roughness in water mains. J - Am Water Works Assoc. 1988 Nov;80(11):34–40.



การทอริแฟคชันเปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟจากแก๊สไอเสียแห้งและแก๊สไนโตรเจน Torrefaction of Macadamia Shell and Coffee Endocarp with Dry Flue Gas and Nitrogen

สุภาภรณ์ กลิ่นเกสร¹ และ คณิต มานะธูระ^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

¹หมู่ 6 ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Supaporn Klinkeson and Kanit Manatura*

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University

¹Moo.6 Kamphaeng Saen, Ampnur Kamphaeng Saen, Nakhon, Pathom, 73140

*ผู้รับผิดชอบบทความ: kanitmana@gmail.com เบอร์โทรศัพท์ 06-2638-8729

Received: 11 March 2022, Revised: 25 April 2022, Accepted: 10 July 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการทอริแฟคชันของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศแก๊สไอเสียแห้ง (ออกซิเจนร้อยละ 5 โดยปริมาตร) และไนโตรเจนต่อคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีและสมรรถนะทอริแฟคชัน (ผลผลิตเชิงมวล ค่าความร้อน ผลผลิตเชิงพลังงานและการสูญเสียน้ำหนัก) จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิที่สูงและการทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียช่วยเพิ่มปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงสามารถกำจัดความชื้นและสารระเหยบางส่วนได้มากกว่าเมื่อเทียบกับไนโตรเจน ส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอริไฟด์มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟที่ผ่านการทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียและไนโตรเจนมีค่าอยู่ระหว่าง 23.97-30.36 และ 25.64-30.25 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และ 21.48-29.16 และ 24.93-29.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ผลผลิตเชิงมวลและผลผลิตเชิงพลังงานจากแก๊สไอเสียมีค่าลดลงมากกว่าการใช้ไนโตรเจน การใช้แก๊สไอเสียทั้งจากกระบวนการเผาไหม้ร่วมกับการทอริแฟคชันมีความเป็นไปได้ในการลดต้นทุนในการปรับสภาพผลิตเชื้อเพลิงและอาจช่วยประหยัดพลังงานในหม้อไอน้ำ

คำสำคัญ ทอริแฟคชัน แก๊สไอเสีย เปลือกแมคคาเดเมีย กะลากาแฟ การสูญเสียน้ำหนัก

Abstract

The aim of this research is to study torrefaction performance of macadamia shell and coffee endocarp, at 200, 250 and 300 °C for 30 min under simulated dry-flue gases (5% oxygen by volume) and nitrogen on physical and chemical properties and torrefaction performance (mass yield, energy yield and weight loss). The study found that higher torrefaction temperature with flue gas improves oxidation reaction by releasing moisture and partially volatile matter compared to that of nitrogen. These led to raise their heating value. The calorific value of torrefied macadamia shell and coffee endocarp by flue gas and nitrogen are in range of 23.97-30.36 and 25.64-30.25 MJ/kg and 21.48-29.16 and 24.93-29.53 MJ/kg, respectively. However, higher reduction of mass yield and energy yield of the flue gas is found compared with that of nitrogen. Applying flue gas from waste heat in combustion process may reduce costs of pretreatment and potentially save energy in the boiler.

Keywords: Torrefaction, Flue gas, Macadamia shell, Coffee Endocarp, Weight Loss

1. บทนำ

ชีวมวลคือสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก องค์ประกอบหนึ่ง สามารถให้ความร้อนจากการเผาไหม้ได้ดี จึงมักนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินเพื่อผลิตเป็นพลังงานทดแทน [1-2] ปัจจุบันมีการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาแปรรูปให้เกิดมูลค่าสูงขึ้นอย่างกว้างขวาง ยกตัวอย่างเช่น วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแปรรูปแมคคาเดเมียดอยช้างซึ่งมีการแปรรูปเปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟ ข้อมูลจากโครงการพัฒนาดอยช้างอันเนื่องมาจากพระราชดำรินี้ปี 2558 ระบุว่า การผลิตแมคคาเดเมียกว่า 60 ตันต่อปี [3] แมคคาเดเมียเป็นพืชตระกูลถั่วชนิดหนึ่งที่นิยมปลูกในพื้นที่ดังกล่าว ภายในเมล็ดแมคคาเดเมียประกอบด้วยเมล็ดซึ่งนำไปรับประทานได้ และเปลือกแมคคาเดเมียสามารถนำไปทำปุ๋ยและแปลงสภาพเป็นถ่านได้

กาแฟซึ่งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่ผู้คนนิยมการบริโภค จากข้อมูลการบริโภคกาแฟในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา พบว่ามีการบริโภคที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องกว่าร้อยละ 2.1 ต่อปี [4] โดยประเทศไทยมีความต้องการใช้เมล็ดกาแฟภายในประเทศอยู่ราว 95,000 ตันต่อปี [5] อุตสาหกรรมกาแฟในไทยส่วนใหญ่เป็นการแปรรูปกาแฟขั้นต้นที่นำเอาเมล็ดกาแฟดิบมาแปรรูปโดยการแยกเมล็ดกับกะลากาแฟ ออกจากกัน โดยกะลากาแฟ (Coffee Endocarp) มีลักษณะเป็นเปลือกหุ้มเมล็ด เมล็ดกาแฟจะถูกนำไปแปรรูปเพื่อการบริโภค ขณะที่กะลากาแฟส่วนใหญ่จะถูกปล่อยทิ้งเป็นขยะ

เปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟถือว่าเป็นชีวมวลประเภทที่มีความชื้นสูง ทำให้เกิดเชื้อราในระหว่างการเก็บรักษา ค่าความร้อนต่ำ มีลักษณะชอบน้ำ (Hygroscopic) ลักษณะทางกายภาพไม่สม่ำเสมอและยากต่อการบดอัด ไม่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นเชื้อเพลิงแข็ง หากนำมาใช้ร่วมกับถ่านหินเพื่อเป็นเชื้อเพลิงแข็งจำเป็นต้องผ่านการปรับปรุงสภาพ เช่น การอัดขึ้นรูปเป็นแท่ง (Densification) นอกจากนี้ อาจการทอริแฟคชันร่วมด้วยซึ่งสามารถปรับปรุงให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนมากขึ้น

การทอริแฟคชันได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่สามารถปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงแข็งทั่วไปให้มีคุณภาพ (ค่าความร้อน)

ใกล้เคียงกับถ่านหิน [6] ทอริแฟคชันเป็นการปรับปรุงคุณภาพและการเปลี่ยนสภาพชีวมวลโดยกระบวนการทางเคมี-ความร้อนจากการให้ความร้อนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนหรือปริมาณออกซิเจนจำกัดในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ต่อหน้าที่ ระยะเวลาให้ความร้อน 30-120 นาที [7-8]

แก๊สไนโตรเจนมักถูกใช้เพื่อทำให้บรรยากาศในการทอริแฟคชันปราศจากออกซิเจน ทอริแฟคชันโดยแก๊สไนโตรเจนมีการศึกษาอย่างแพร่หลาย เช่น งานวิจัยของ Bridgeman et.al [9] พบว่า ค่าความหนาแน่นของพลังงานและปริมาณคาร์บอนคงที่ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนปริมาณอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและออกซิเจนต่อคาร์บอนลดลง แก๊สผลิตภัณฑ์ เช่น CH_4 และ CO เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณแก๊ส CO_2 ลดลง ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟคชันยังมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ งานวิจัยของนราธร และ ยัวร์ตัน [10] ศึกษาการทอริแฟคชันของของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่อุณหภูมิ 200-350 องศาเซลเซียส เวลา 0.5-2 ชั่วโมง พบว่าที่เวลา 30 นาที ให้ค่าผลผลิตเชิงมวลมากที่สุด

อุตสาหกรรมทางความร้อนโดยทั่วไปมักมีแก๊สไอเสียเหลือทิ้งจากการเผาไหม้ การนำแก๊สไอเสียดังกล่าวมาใช้ร่วมกับการทอริแฟคชันอาจเป็นแนวทางหนึ่งในการลดการปล่อยแก๊สไอเสียทิ้งและช่วยปรับปรุงสภาพของชีวมวลไปในตัวด้วย นอกจากนี้ อาจช่วยลดต้นทุนในการแยกแก๊สไนโตรเจนออกจากอากาศในปริมาณมากได้อีกด้วย การศึกษาการทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียมีพอสมควร เช่น Uemura et.al [11] ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของออกซิเจนในแก๊สไอเสียจำลอง (ร้อยละ 0, 3, 9, 15 โดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่า ความเข้มข้นของออกซิเจนร้อยละ 3 ให้ค่าผลผลิตเชิงมวลใกล้เคียงกับแก๊สไนโตรเจน ขณะที่ผลผลิตเชิงพลังงานลดลงโดยความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้น ปฏิกริยาออกซิเดชันของออกซิเจนในแก๊สไอเสียช่วยลดความชื้นและสารระเหยในปริมาณที่มากกว่า การใช้แก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิเดียวกัน Onsrree et.al [12] ทำการทอริแฟคชันซึ่งข้าวโพดอัดเม็ด โดยจำลองแก๊สไอเสียเปียกซึ่งประกอบด้วย H_2O ร้อยละ 0-21, CO_2 ร้อยละ 12, O_2 ร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลา 10-40



นาที่ พบว่า ปริมาณไอน้ำ (H_2O) ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ผลผลิตเชิงมวลมีค่าลดลง ผลผลิตแก๊สและของเหลวเพิ่ม จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น พบว่ายังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับการทอริแฟกชันชีวมวลเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแพที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้แก๊สไอเสียแห้งจำลองประกอบด้วย ออกซิเจน (O_2) ร้อยละ 5, คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 10 และไนโตรเจน (N_2) ร้อยละ 85 ในการทอริแฟกชันเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแพที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที เพื่อศึกษาสมรรถนะการทอริแฟกชัน ได้แก่ ผลผลิตเชิงมวล ผลผลิตเชิงพลังงาน ค่าความร้อนที่ผ่านการทอริแฟกชัน รวมถึงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี เป็นต้น ผลจากการทดลองสามารถนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาการใช้แก๊สไอเสียร่วมกับการปรับสภาพเชื้อเพลิงแข็งในอุตสาหกรรมทางความร้อน

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมเชื้อเพลิง

เปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแพดิบนำมาจากส่วนที่เหลือทิ้งจากการผลิตในวิสาหกิจชุมชนจังหวัดเชียงราย ชีวมวลทั้ง 2 ชนิด ประมาณ 500 กรัม ถูกนำไปบดเป็นผงโดยเครื่องปั่นละเอียด Ang รุ่น SC-750T ระยะเวลา 5 นาที แล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 300 ไมโครเมตร ก่อนป้อนใส่เครื่องอัดเม็ดผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร แล้วอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดโดยใช้น้ำเป็นตัวประสานที่อัตราส่วนเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแพต่อน้ำ 1:1.5 และ 1:1.2 ตามลำดับ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของเชื้อเพลิงเท่ากับ 10 และ 25 มิลลิเมตร ตามลำดับ ชีวมวลอัดเม็ดถูกทำให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 10 ชั่วโมง ก่อนนำไปทอริแฟกชัน รูปที่ 1 และ 2 แสดงเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแพ ตามลำดับ

2.2 การทอริแฟกชัน

นำตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดประมาณ 100 กรัม ป้อนลงไปในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed Bed Reactor) โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อ นาทีภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนน้อยที่สุด โดยใช้แก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาทีในการไล่

ออกซิเจนในเตาปฏิกรณ์ หลังจากนั้นสร้างบรรยากาศด้วยแก๊สไอเสีย (ออกซิเจนร้อยละ 5 โดยปริมาตร) โดยมีฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นแหล่งให้ความร้อนและมีเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ การศึกษานี้กำหนดอุณหภูมิทอริแฟกชันที่ 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที หลังเสร็จการทดลองทำการเก็บและชั่งน้ำหนัก ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟกชัน ก่อนนำไปไว้ในภาชนะที่ปิดผนึกเพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบเชิงปริมาณและละเอียด การทดลองดังกล่าวทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้ง ก่อนนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้ในการคำนวณสมรรถนะต่อไป



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 1 เปลือกแมคคาเดเมีย (ก) ดิบ (ข) อัดเม็ด (ค) ทอริแฟกชันที่ 200 องศาเซลเซียส



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2 กะลาจากแพ (ก) ดิบ (ข) อัดเม็ด (ค) ทอริแฟกชันที่ 200 องศาเซลเซียส



2.3 สมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

สมบัติทางกายภาพและเคมีของชีวมวลอัดเม็ดถูกวิเคราะห์โดยการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate Analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณเป็นการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหย เถ้า และความชื้นของชีวมวล โดยความชื้นใช้มาตรฐาน EN 15414-3:2011 (European Committee for Standardization, 2011) สารระเหยและปริมาณเถ้าใช้ตัวอย่างที่หาปริมาณความชื้นแล้ววิเคราะห์ตามมาตรฐาน EN 15402:2011, EN 15403:2011 ตามลำดับ จะได้ค่าในฐานมวลแห้ง (Dry basis) ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัว คำนวณได้จาก 100 – ผลรวมร้อยละปริมาณเถ้าและร้อยละปริมาณสารระเหย ค่าความร้อนของชีวมวลทดสอบจากเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter, LECO รุ่น AC-500) ตามมาตรฐาน ASTM D5865

การวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate Analysis) สามารถประยุกต์ใช้สมการของ Nhuchhen, D. R. [13] โดยใช้ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (สารระเหย (VM), คาร์บอนคงตัว (FC) ชีเถ้า (A)) เพื่อหาสัดส่วนของธาตุในตัวอย่าง ได้แก่ ร้อยละคาร์บอน (C) ร้อยละไฮโดรเจน (H) ร้อยละออกซิเจน (O) ดังสมการ (1), (2) และ (3)

$$C = 1.0396FC + 0.0757VM^{1.3773} \quad (1)$$

$$H = 55.3678 - 0.4830VM - 0.5319FC - 0.5600A \quad (2)$$

$$O = -0.0198FC + 0.7244VM^{0.9239} \quad (3)$$

2.4 สมรรถนะการทอริแฟคชั่น

ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟคชั่นแล้วสามารถประเมินสมรรถนะการทอริแฟคชั่นได้ในรูปของ ผลผลิตเชิงมวล ผลผลิตเชิงพลังงาน การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอน การสูญเสียของน้ำหนัก ดังนี้

ผลผลิตเชิงมวล (Mass Yield, MY) คือ อัตราส่วนระหว่างชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟคชั่นต่อชีวมวลดิบ แสดงให้เห็นถึงผลผลิตสุดท้ายที่ได้จากกระบวนการ โดยน้ำหนักของชีวมวลประเมินได้จากการชั่งน้ำหนัก

$$MY (\%) = \frac{m_t}{m_o} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ m_t คือ มวลของเชื้อเพลิงหลังทอริแฟคชั่น (กรัม) และ m_o คือ มวลของเชื้อเพลิงก่อนทอริแฟคชั่น (กรัม)

ความหนาแน่นเชิงพลังงาน (Energy Density, ED) คือ อัตราส่วนของพลังงานระหว่างชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟคชั่นกับชีวมวลดิบ

$$ED (-) = \frac{HHV_t}{HHV_o} \quad (5)$$

HHV_t คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงหลังทอริแฟคชั่น (เมกะจูลต่อกิโลกรัม) และ HHV_o คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก่อนทอริแฟคชั่น (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

ผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy Yield, EY) เป็นตัวบ่งชี้ถึงพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในชีวมวลหลังจากการทอริแฟคชั่น ซึ่งขึ้นอยู่กับ MY และ ED

$$EY (\%) = MY \times ED \quad (6)$$

การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอน (Carbon Enrichment, CE) แสดงปริมาณคาร์บอนหลังจากกระบวนการทอริแฟคชั่นต่อชีวมวลดิบ ซึ่งปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักที่ส่งผลให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น [14]

$$CE = \frac{C_t}{C_o} \quad (7)$$

โดย C คือ ปริมาณของคาร์บอนจากการวิเคราะห์โดยละเอียด (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ตัวห้อย t และ o แสดงถึงการทอริแฟคชั่นและการไม่ทอริแฟคชั่น ตามลำดับ

การสูญเสียของน้ำหนัก (Weight loss, WL) แสดงถึงปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียระหว่างการทอริแฟคชั่น

$$WL (\%) = 100 - MY \quad (8)$$

3. ผลวิจัยและอภิปรายผล

ผลวิเคราะห์ของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแพที่ผ่านการทอริแฟคชั่นภายใต้แก๊สไอเสีย ถูกวิเคราะห์ในรูปของคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ รวมถึงสมรรถนะการทอริแฟคชั่น ดังต่อไปนี้



3.1 คุณสมบัติของชีวมวล

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณ และแยกธาตุ ไฮโดรเจน และค่าความร้อนของเปลือกแมคคาเดเมีย และกะลากาแฟดิบ จากตารางพบว่า ปริมาณสารระเหยของเปลือกแมคคาเดเมียมีปริมาณมากถึงร้อยละ 81 ขณะที่ไม้ซี้เล้าอยู่ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักเท่านั้น นอกจากนั้นเปลือกแมคคาเดเมียมาแปลงสภาพเป็นถ่านทอไรไฟด์แล้ว อาจยังสามารถนำไปทำเป็นน้ำมันชีวภาพได้อีกด้วย ค่าความร้อนของเปลือกแมคคาเดเมียยังสูงกว่าค่าความร้อนของกะลากาแฟเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณลิกนินที่มากกว่า [15]

การทอไรแฟคชันของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟสามารถลดค่าความชื้นและสารระเหยบางส่วนเนื่องจากเกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมักสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส [16] โดยเป็นการทำลายหมู่ -OH ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) [16] และการทอไรแฟคชันโดยแก๊สไอเสียที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ทำให้ได้ความชื้นและสารระเหยได้ต่ำกว่าการใช้ไนโตรเจนเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [17]

ตารางที่ 2 แสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ผ่านการทอไรแฟคชันโดยแก๊สไอเสีย (FG) เทียบกับการทอไรแฟคชันโดยใช้ไนโตรเจน (N_2) พบว่า ปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลงมากกว่าการทอไรแฟคชันโดยไนโตรเจน เนื่องจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและปฏิกิริยาออกซิเดชันในแก๊สไอเสีย นอกจากนี้ ผลจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ปริมาณ C เพิ่มขึ้น ขณะที่ H และ O ลดลง ส่งผลให้ค่าความร้อนของชีวมวลที่ผ่านการทอไรแฟคชันนั้นมีค่าสูงกว่าชีวมวลดิบ [15-17]

3.2 สมรรถนะการทอไรแฟคชัน (Torrefaction Performance)

สมรรถนะการทอไรแฟคชันที่อุณหภูมิ 300 ถึง 200 องศาเซลเซียส สามารถแสดงในรูปของผลผลิตเชิงมวล (Mass Yield) ค่าความร้อนของชีวมวลหลังทอไรแฟคชัน (HHV) และผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy Yield) โดยสมรรถนะการทอไรแฟคชันของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟโดยใช้แก๊สไอเสียและไนโตรเจนแสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ รูปที่ 3 แสดงค่าผลผลิตเชิงมวลจากการทอไรแฟคชันด้วยแก๊สไอเสียและไนโตรเจน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะเกิดการสลายตัว

ของความชื้นและสารระเหยบางส่วนในเฮมิเซลลูโลสทำให้ผลผลิตเชิงมวลมีค่าลดลง [16]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวลดิบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

การวิเคราะห์	เปลือกแมคคาเดเมีย	กะลากาแฟ
การวิเคราะห์เชิงปริมาณ		
สารระเหย	81.04	72.17
คาร์บอนคงตัว	12.24	15.66
ความชื้น	6.5	10.57
ซี้เล้า	0.21	1.60
การวิเคราะห์แยกธาตุ		
คาร์บอน	44.93	42.81
ไฮโดรเจน	9.59	5.29
ไนโตรเจน	0.19	12.79
ออกซิเจน	40.48	39.11
การวิเคราะห์องค์ประกอบ		
เฮมิเซลลูโลส	3	8
เซลลูโลส	37	49
ลิกนิน	46.33	27.36
HHV ($MJ \cdot kg^{-1}$ dry basis)	21.47	20.08

ตารางที่ 2 คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวลที่ผ่านการทอไรแฟคชันที่ 200 องศาเซลเซียส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ชีวมวล	$^1MC-N_2$	MC-FG	$^2CF-N_2$	CF-FG
การวิเคราะห์เชิงปริมาณ				
สารระเหย	74.22	69.22	70.11	62.81
คาร์บอนคงตัว	20.08	27.03	18.08	32.23
ความชื้น	2.20	1.53	2.51	0.85
ซี้เล้า	2.57	2.21	3.29	4.11
การวิเคราะห์แยกธาตุ				
คาร์บอน	49.42	59.44	51.43	56.18
ไฮโดรเจน	4.25	7.34	6.84	5.59
ไนโตรเจน	24.08	8.36	5.44	5.67
ออกซิเจน	28.40	24.84	36.28	32.56
HHV ($MJ \cdot kg^{-1}$ dry basis)	22.48	23.97	24.93	25.64

1MC : เปลือกแมคคาเดเมีย , 2CF : กะลากาแฟ

ผลผลิตเชิงมวลจากการใช้แก๊สไอเสียมีค่าน้อยกว่าไนโตรเจนที่อุณหภูมิเดียวกัน บ่งชี้ถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิ



เดชันจากออกซิเจนในแก๊สไอเสีย ความแตกต่างระหว่างทอริแฟกชันของแก๊สทั้งสองมีค่าค่อนข้างสูงที่ 200 และ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งเท่ากับร้อยละ 13.5 และ 20 ตามลำดับ ขณะที่ 300 องศาเซลเซียส ความแตกต่างดังกล่าวแทบไม่พบ อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยา Boudouard จากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในแก๊สไอเสียที่อุณหภูมิทอริแฟกชันสูงขึ้นส่งผลให้ลักษณะการสลายตัวใกล้เคียงกับแก๊สไนโตรเจน [14]

ผลจากการลดลงของผลผลิตเชิงมวลทำให้ค่า HHV สูงขึ้น ดังรูปที่ 3 (ข) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทอริแฟกชันเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของพลังงานในชีวมวล ค่า HHV จากการทอริแฟกชันของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาปากแพโดยแก๊สไอเสียมีค่ามากกว่าการทอริแฟกชันโดยใช้ไนโตรเจน เนื่องจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสที่มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Zhang et.al [17]

รูปที่ 3 (ค) แสดงผลผลิตเชิงพลังงานมีแนวโน้มเดียวกับผลผลิตเชิงมวลและตรงข้ามกับค่า HHV เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (6) จะสังเกตได้ว่าผลผลิตเชิงพลังงานขึ้นอยู่กับผลผลิตเชิงมวลมากกว่าค่า HHV

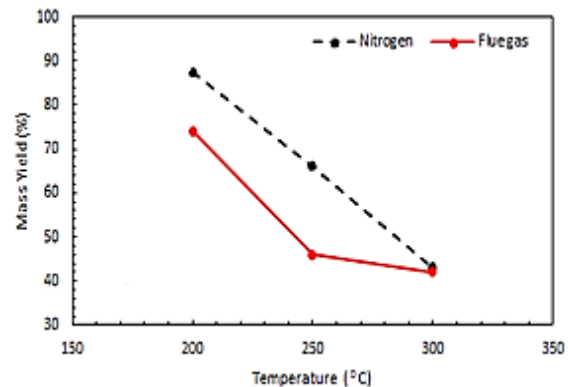
รูปที่ 4 (ก)-(ค) แสดงผลผลิตเชิงมวล ค่า HHV และผลผลิตเชิงพลังงานของกะลาปากแพ สังเกตได้ว่ามีแนวโน้มคล้ายคลึงกับกรณีของเปลือกแมคคาเดเมียดังรูปที่ 3 (ก)-(ค) อย่างไรก็ตาม ผลผลิตเชิงมวลของกะลาปากแพ (รูปที่ 4 (ก)) มีค่าน้อยกว่าผลผลิตเชิงมวลของเปลือกแมคคาเดเมีย อาจเนื่องมาจากปริมาณลิกนินในกะลาปากแพ (ร้อยละ 27.36) ที่น้อยกว่าเปลือกแมคคาเดเมีย (ร้อยละ 46.33)

3.3 การเพิ่มขึ้นของคาร์บอน (CE, Carbon Enhancement)

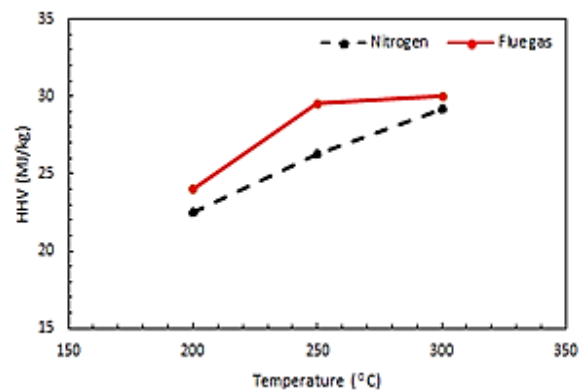
การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอน (CE) ที่ผ่านการทอริแฟกชันแสดงดังสมการที่ (7) ปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิงจะส่งผลถึงค่าความร้อนของเชื้อเพลิง [14] ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3 (ข) และ 4 (ข)

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักที่ (Weight loss, WL) กับ CE มีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ค่าความนำเชื้อถือระหว่าง 0.88 ถึง 0.99 เมื่อ CE มีค่าสูงขึ้น (อุณหภูมิทอริแฟกชันสูงขึ้น) ส่งผลให้ WL มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเกิดจากการสูญเสียสารระเหยและน้ำในเชื้อเพลิง เมื่อพิจารณาผลการทอริแฟกชันภายใต้แก๊สไอเสียและไนโตรเจน

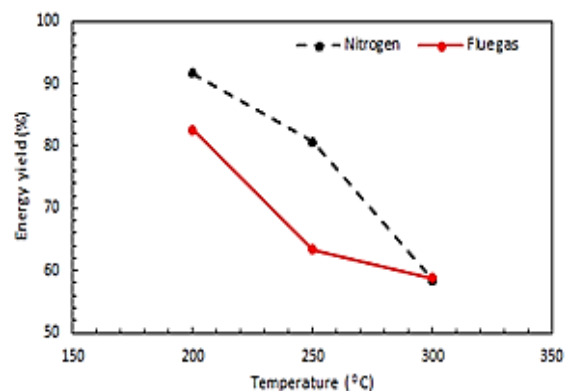
สำหรับชีวมวลทั้งสอง พบว่า การทอริแฟกชันของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาปากแพโดยใช้แก๊สไนโตรเจนจะมีค่า CE น้อยกว่าการใช้แก๊สไอเสียและค่าความชื้นของทอริแฟกชันด้วยแก๊สไอเสียมีค่าน้อยกว่าของไนโตรเจน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ CE มีผลต่อ WL ภายใต้แก๊สไนโตรเจนมากกว่าแก๊สไอเสีย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Uemura et.al [14]



(ก)

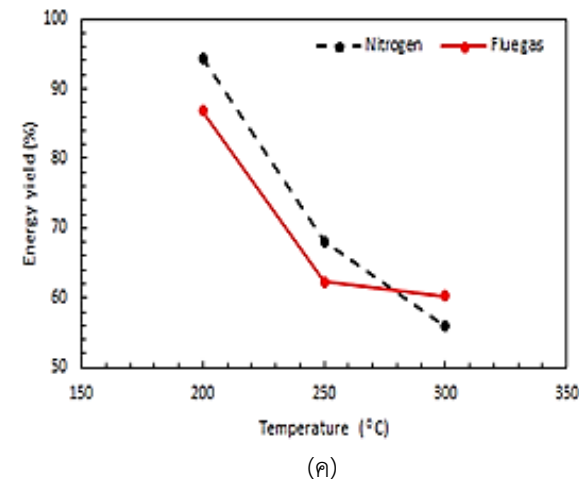
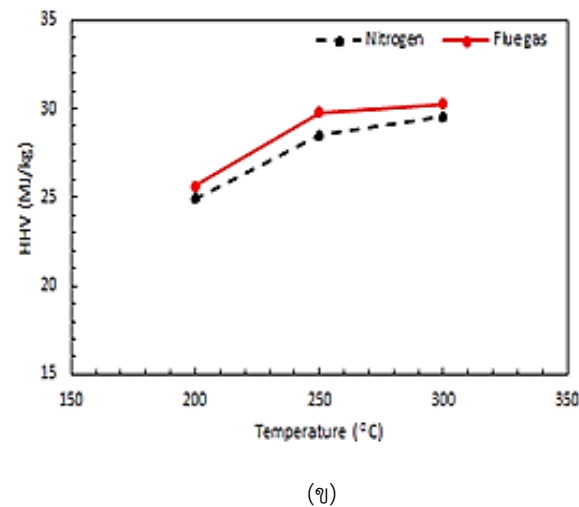
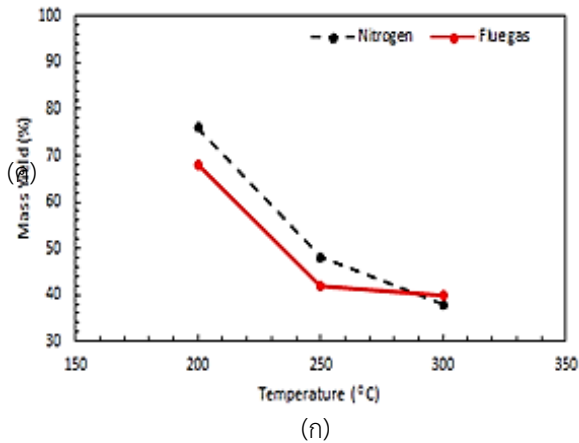


(ข)



(ค)

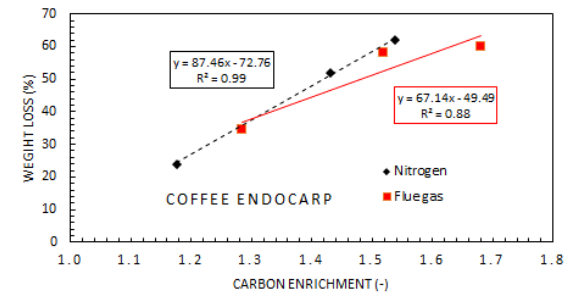
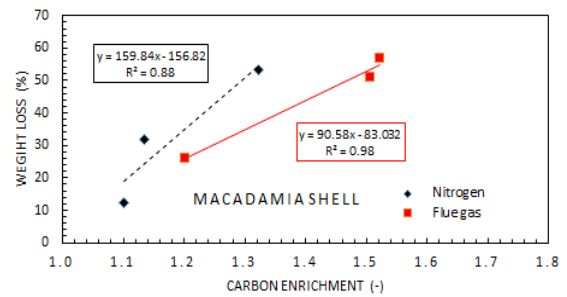
รูปที่ 3 (ก) ผลผลิตเชิงมวล (ข) ค่าความร้อน และ (ค) ผลผลิตเชิงพลังงานของเปลือกแมคคาเดเมีย



รูปที่ 4 (ก) ผลผลิตเชิงมวล (ข) ค่าความร้อน และ (ค) ผลผลิตเชิงพลังงานของกะลาปากแพ

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการทอริแฟกชันเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาปากแพภายใต้สภาวะแก๊สไอเสียแห้งที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที จากผลการทดลอง พบว่า



รูปที่ 5 ผลของการเพิ่มของคาร์บอนต่อการสูญเสียน้ำหนักสำหรับเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาปากแพ

1. อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลต่อผลผลิตเชิงมวล สารระเหย และความชื้นที่ลดลง ส่งผลต่อค่าความร้อนและปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น

2. ผลผลิตเชิงมวลและผลผลิตเชิงพลังงานภายใต้การทอริแฟกชันโดยแก๊สไอเสียมีค่าน้อยกว่าการทอริแฟกชันโดยแก๊สไนโตรเจน เนื่องจากออกซิเจนในแก๊สไอเสียทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และส่งผลให้ค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้น

3. เปลือกแมคคาเดเมียหลังจากทอริแฟกชันโดยแก๊สไอเสียมีค่าความร้อนมากกว่ากะลาปากแพเนื่องจากมีปริมาณลิกนินมากกว่า

4. ปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นแปรผันโดยตรงกับการสูญเสียน้ำหนักในการทอริแฟกชันด้วยแก๊สทั้ง 2 ชนิด โดยส่งผลกระทบที่การทอริแฟกชันโดยใช้ไนโตรเจนมากกว่าแก๊สไอเสีย การทอริแฟกชันโดยแก๊สไอเสียอาจเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยปรับปรุงสภาพชีวมวลก่อนกระบวนการทางความร้อน เช่น การเผาไหม้หรือแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ดัง ตารางที่ 3 พบว่า กะลาปากแพและเปลือกแมคคาเดเมียที่ทอริแฟกชันโดยแก๊สไอเสีย สามารถผลิตเป็นเม็ดเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเทียบเท่ากับวัสดุชีวมวลประเภทไม้ ดังนั้น การนำเปลือกแมคคาเดเมียมาอัดเม็ดแล้วทำการทอริแฟกชัน โดย



แก๊สไอเสียเป็นการเพิ่มมูลค่าของชีวมวล, เพิ่มค่าความร้อน และเป็นการใช้แก๊สไอเสียให้เกิดประโยชน์อีกด้วย คุณภาพของแก๊สไอเสียและการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ควรถูกพิจารณาประกอบในการประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์

ตารางที่ 3 ค่าความร้อนเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ

ตัวอย่าง	ค่าความร้อน (MJ/kg)	อ้างอิง
เปลือกแมคคาเดเมียทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสีย	23.97	งานวิจัยนี้
กะลาจากแพทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสีย	25.64	งานวิจัยนี้
ซังข้าวโพดอัดเม็ด (H ₂ O ร้อยละ 0-21, CO ₂ ร้อยละ 12, O ₂ ร้อยละ 5)	17-23	Zhang et. al (2019) [17]
ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมทอริแฟคชันไดโนไนโตรเจน	16.55-25.79	นราธร และ ยวรัตน์ (2020) [10]
ไม้การบูรทอริแฟคชันโดยไดโนไนโตรเจน	18.9 - 22.4	Cao et.al (2015) [18]

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ได้สนับสนุนงบประมาณทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยเรื่อง “การทอริแฟคชันภายใต้แก๊สไอเสียของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแพ”

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Rokni E, Ren X, Panahi A, Levendis YA. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels. *Fuel*. 2018 Jan;211:363–74.
- [2] Dudley B. BP statistical review of world energy. BP Statistical Review, London, UK, 2018. Available from: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/news-and-insights/speeches/bp-statistical-review-of-world-energy-2018.pdf> Accessed 6th August 2018].
- [3] Kaewpad K, Suktakjan K, Pipatnapipop C, Munnasak S. Angular Rotary Macadamia Nut Cracker Machine. *RMUTP Research Journal*, 2016;10(2). Thai.
- [4] Bates RH. "Five. The International Coffee Organization: An International Institution". *Analytic Narratives*, Princeton: Princeton University Press, 1999;194-230.
- [5] Coffee production business. Department of Business Development. Available from: https://www.dbd.go.th/download/document_file/Statistic/2562/T26/T26_201901.pdf [Accessed 19th September 2021].
- [6] Onsree T, Tippayawong N, Williams T, McCullough K, Barrow E, Pogaku R, Torrefaction of pelletized corn residues with wet flue gas. *Bioresour Technol*. 2019;285:121330.
- [7] Bach QV, Skreiberg Ø. Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction. *Renew Sustain Energy Rev*. 2016 Feb;54:665–77.
- [8] Sukiran MA, Abnisa F, Wan Daud WMA, Abu Bakar N, Loh SK. A review of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production. *Energy Convers Manag*. 2017 Oct;149:101–20.
- [9] Bridgeman TG, Jones JM, Shield I, Williams PT. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. *Fuel*. 2008 May;87 (6): 844–56.
- [10] Mahantadsanapong N, Ngernyen Y. Torrefaction of Pelletizing Fuel from Solid Waste of Sugar Industry. *KKU Research Journal (Graduate Studies)*. 2020;20(1):65-75. Thai.
- [11] Uemura Y, Omar W, Othman NA, Yusup S, Tsutsui T. Torrefaction of oil palm EFB in the presence of oxygen. *Fuel*. 2013 Jan;103:156–60.



- [12] Onsree T, Tippayawong N, Williams T, McCullough K, Barrow E, Pogaku R, Lauterbach J. Torrefaction of pelletized corn residues with wet flue gas. *Bioresource technology*. 2019;285: 121330.
- [13] Nhuchhen DR. Prediction of carbon, hydrogen, and oxygen compositions of raw and torrefied biomass using proximate analysis. *Fuel*. 2016 Sep;180:348–56.
- [14] Uemura Y, Saadon S, Osman N, Mansor N, Tanoue K ichiro. Torrefaction of oil palm kernel shell in the presence of oxygen and carbon dioxide. *Fuel*. 2015 Mar;144:171–9.
- [15] Sharma S Meena R, Sharma A, Goyal P kumar. Biomass Conversion Technologies for Renewable Energy and Fuels: A Review Note. *IOSR J. Mech Civ Eng*. 2014;11(2):28–35.
- [16] Bergman PC, Kiel JH. Torrefaction for biomass upgrading. In *Proc. 14th European Biomass Conference*, Paris, France 2005 Oct 17; 2005. p. 17-21.
- [17] Zhang C, Ho SH, Chen WH, Fu Y, Chang JS, Bi X. Oxidative torrefaction of biomass nutshells: Evaluations of energy efficiency as well as biochar transportation and storage. *Appl Energy*. 2019 Feb;235:428–41.
- [18] Cao L, Yuan X, Li H, Li C, Xiao Z, Jiang L, et al. Complementary effects of torrefaction and co-pelletization: Energy consumption and characteristics of pellets. *Bioresour Technol*. 2015 Jun;185:254–62.



การใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในระบบอบแห้ง Use of a Heat Exchanger for Waste Heat Recovery in Drying System

ยุกยุธ ใต้เงาสุน¹ ปริญ คงกระพัน^{1*} และ หยาดฝน ทนงการกิจ²

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

63 หมู่ 4 อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

²คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

63 หมู่ 4 อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

Yongyoot Taingaoson¹, Parin Khongkrapan^{1*} and Yardfon Tanongkankit²

¹School of Renewable Energy, Maejo University

63 Moo 4, San Sai District, Chiang Mai, 50290

²Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University

63 Moo 4, San Sai District, Chiang Mai, 50290

*ผู้รับผิดชอบบทความ: parin.khongkrapan@gmail.com เบอร์โทรศัพท์ 08-1972-3859

Received: 28 April 2022, Revised: 4 August 2022, Accepted: 15 August 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง (Cross Flow Heat Exchanger) สำหรับนำความร้อนทิ้งจากกระบวนการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนติดตั้งท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร จำนวน 12 ท่อ วางเยื้องแนวสลับกัน ทั้งสิ้น 5 แถว ทำหน้าที่เป็นทางเดินของอากาศขึ้น (ของไหลร้อน) คิดเป็นพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนรวม 1.13 ตารางเมตร ความร้อนจากอากาศขึ้นจะถ่ายเทสู่อากาศแห้ง (ของไหลเย็น) ที่ไหลผ่านกลุ่มท่อดังกล่าว ทำให้อากาศแห้งมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนประกอบทุกชิ้นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสร้างจากวัสดุโลหะปลอดสนิมมาตรฐานอุตสาหกรรมอาหาร (Stainless Steel; SUS304) ภายนอกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน จากผลการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ อุณหภูมิอากาศขึ้นและอากาศแห้งขาเข้าเฉลี่ย 55 และ 36 องศาเซลเซียส โดยควบคุมให้ของไหลทั้งสองมีอัตราการไหลเชิงมวล เท่ากันเท่ากับ 0.017 กิโลกรัมต่อวินาที พบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพในการทำงานร้อยละ 31.58 และ 64.81 ตามลำดับ อุปกรณ์นี้สามารถอุ่นอากาศแห้งให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดและเฉลี่ย 6.00 และ 4.42 องศาเซลเซียส และลดอุณหภูมิอากาศขึ้นได้สูงสุดและเฉลี่ย 10.71 และ 6.82 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นพลังงานที่นำกลับมาใช้ใหม่ เท่ากับ 272.40 กิโลจูล หรือคิดเป็นร้อยละ 9.16 ของความร้อนที่ปล่อยทิ้ง จากผลการทดลองอบแห้งใบมะกรูดพบว่าการติดตั้ง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการอบแห้ง แต่สามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ร้อยละ 9.81 และเพิ่มอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) ร้อยละ 10.89 ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่ได้รับการปรับปรุงสูงกว่า เครื่องเดิมร้อยละ 10.88 ส่งผลให้ต้นทุนด้านพลังงานในการผลิตใบมะกรูดอบแห้งลดลงร้อยละ 9.39

คำสำคัญ การอบแห้ง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ ประหยัดพลังงาน ภาวะโลกร้อน



Abstract

The objective of this research is to design, construct, and test a cross-flow heat exchanger to recover waste heat from the drying process in order to increase the dryer efficiency. Inside the heat exchanger, there are 12 pipes with a diameter of 5 cm and a length of 60 cm placed alternately in 5 rows as a channel for the humid air (hot fluid) to be evacuated. The total heat exchange area is 1.13 m^2 . The heat from humid air is transferred to dry air (cold fluid) that flows through the stacks of pipes, causing the dry air to increase in temperature. The heat exchanger is composed primarily of food-grade stainless steel (SUS304). It is covered by an insulating layer on the outside in order to reduce energy loss. From the heat exchanger test results at the average inlet humid and dry air temperatures of 55 and 36 °C, where both fluids were controlled to have the same mass flow rate of 0.017 kg/s, it was found that the heat exchanger effectiveness and efficiency was 31.58% and 64.81%, respectively. The device warmed dry air to a maximum and average temperature rise of 6.00 and 4.42 °C and reduced humid air to a maximum and average temperature of 10.71 and 6.82 °C, respectively. That equates to 272.40 kJ of recovered energy or 9.16% of the waste heat released. From the results of the kaffir lime leaf drying experiment, it was found that the installation of a heat exchanger did not affect the drying rate. From the results of the kaffir lime leaf drying experiment, it was found that the installation of a heat exchanger did not affect the drying rate, but it reduced the specific energy consumption (SEC) by 9.81% and increased the specific moisture extraction rate (SMER) by 10.88%. That makes the efficiency of the improved dryer higher than the original one of 10.88%. As a result, the energy costs of producing dried kaffir lime leaf were reduced by 9.39%.

Keywords: Drying, Heat Exchanger, Waste Heat Recovery, Energy Saving, Global Warming

1. บทนำ

กระบวนการผลิตอาหารอบแห้งนั้นเป็นกระบวนการที่ทำกันอย่างแพร่หลายทั้งในระดับครัวเรือน วิสาหกิจขนาดเล็ก ขนาดกลาง รวมถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยกระบวนการนี้ต้องใช้พลังงานปริมาณมากในขั้นตอนการผลิตลมร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุอบ [1] โดยเมื่อลมร้อนดังกล่าวระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์แล้วจะมีความชื้นสูงขึ้นจึงจำเป็นต้องระบายออกจากเครื่องอบแห้งบางส่วนหรือทั้งหมดในขณะเดียวกันนั้นอากาศแห้งจากภายนอกซึ่งมีความชื้นต่ำกว่าจะถูกเพิ่มอุณหภูมิและเติมเข้าสู่ระบบอบแห้งเพื่อทำการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการสมดุลพลังงานที่ถ่ายเทเข้าและออกจากระบบจะพบว่าอากาศชื้นที่ระบายออกจากระบบอบแห้งยังคงมีความร้อนหลงเหลืออยู่และมีศักยภาพเพียงพอในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้เป็นอย่างดี [2-4] งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำความร้อนทิ้งจากเครื่องอบแห้งกลับมาใช้ใหม่สำหรับอุ่นอากาศแห้งก่อนที่จะปล่อย

ออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่งโดยที่ของไหลทั้งสองนั้นไม่จำเป็นต้องสัมผัสกันโดยตรง [5] ลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำแนกตามการไหลได้ 3 แบบ ได้แก่ 1) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Concentric Tube or Double Pipe) 2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบของไหลไหลขวางหรือตั้งฉากกัน (Cross Flow) และ 3) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube) โดยแต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียต่างกัน แต่เมื่อกำหนดขนาดหรือมิติให้เท่ากันจะพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางมีข้อดีกว่าแบบอื่นหลายด้าน เช่น 1) มีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนมากกว่าแบบอื่น 2) ของไหลสามารถไหลได้นานทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดี และ 3) มีความดันตกคร่อมภายในระบบ (Pressure Drop) ต่ำกว่าแบบอื่น เป็นต้น [6-7] จากข้อได้เปรียบดังกล่าว

ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดไหลขวางเพื่อติดตั้งกับเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนระดับกึ่งอุตสาหกรรมที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 10 กิโลวัตต์ ในการผลิตลมร้อน โดยเครื่องอบแห้งดังกล่าวมีการปล่อยอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิในช่วง 50 ถึง 100 องศาเซลเซียส ทั้งสู่สิ่งแวดล้อมด้วยอัตราการไหลในช่วง 0.017 ถึง 0.020 กิโลกรัมต่อวินาที หรือคิดเป็นความร้อนทั้งประมาณ 700 ถึง 1,700 วัตต์ ซึ่งมีศักยภาพพอที่จะนำกลับมาใช้ในการอุ่นอากาศแห้งที่ต้องเติมเข้าสู่ระบบเพื่อชดเชยอากาศร้อนที่ปล่อยทิ้งไป สำหรับการออกแบบผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานในการออกแบบโดยกำหนดให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อนปล่อยทิ้งมีค่าเท่ากับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งที่เติมเข้าสู่ระบบ และกำหนดให้ความดันตกคร่อม เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านของไหลร้อนและด้านของไหลเย็นมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก การกำหนดมิติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะได้รับการสำรวจขนาดและองค์ประกอบของเครื่องอบแห้งที่จะทำการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนรวมถึงพื้นที่โดยรอบเพื่อทราบถึงข้อจำกัดในการออกแบบ เช่น ขนาดท่อต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้ง มิติของห้อง ความสูงของเพดาน และทิศทางระบายอากาศ เป็นต้น เพื่อสะดวกต่อการจัดวางตำแหน่งภายในโรงงาน และเพื่อให้ได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพสูงในการใช้งานต่อไป

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

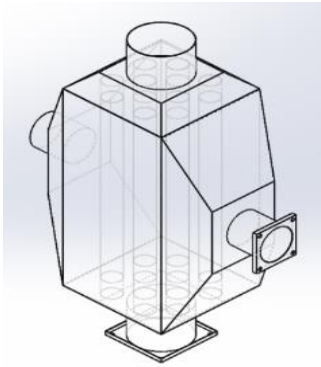
2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในงานวิจัยนี้เป็นแบบไหลขวาง (Cross Flow Heat Exchanger) ติดตั้งท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร จำนวน 12 ท่อ วางเยื้องแนว (Staggered Tube Banks) ทั้งสิ้น 5 แถว ดังรูปที่ 1 (ก) กลุ่มท่อนี้ทำหน้าที่เป็นทางเดินของอากาศร้อนปล่อยทิ้ง การออกแบบจะกำหนดระยะห่างตามแนวขวาง (Transverse Pitch; S_T) และตามแนวยาว (Longitudinal Pitch; S_L) ดังรูปที่ 1 (ข) ให้มีค่าเท่ากันเท่ากับ 10 เซนติเมตร ทำให้ระยะห่างตามแนวทแยง (Diagonal Pitch; S_D) มีค่าเท่ากับ 11.18 เซนติเมตร เมื่อกำหนดตำแหน่งการจัดวางท่อแล้วเสร็จจะทำการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนการก่อสร้าง ทั้งนี้

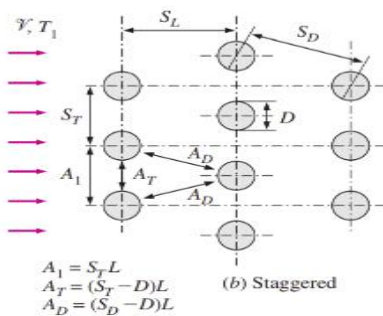
เนื่องจากข้อจำกัดด้านขนาดของเครื่องอบแห้งและสถานที่ติดตั้งทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จะสร้างต้องมีความสูงและความกว้างรวมท่ออากาศเย็นและอากาศร้อนไม่เกิน 150 เซนติเมตร ผู้วิจัยจึงทำการปรับเปลี่ยนขนาดของแบบจำลองโดยกำหนดความยาวของกลุ่มท่อ 3 ค่า ได้แก่ 30 60 และ 90 เซนติเมตร แล้วทำการสร้างเงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) โดยกำหนดวัสดุเป็นโลหะสแตนเลส (Stainless Steel) ชนิด 304 (SUS 304) มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Thermal Conductivity; k) คงที่เท่ากับ 14 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ที่ผนังด้านนอกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหุ้มด้วยฉนวน (ไม่คิดการสูญเสียพลังงานออกจากผนัง) อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลร้อน (อากาศร้อนขึ้นระบายทิ้ง) และของไหลเย็น (อากาศแห้งจากภายนอกที่ต้องการเติมเข้าสู่ระบบ) มีค่าคงที่เท่ากับ 0.017 กิโลกรัมต่อวินาที (เท่ากับค่าสูงสุดที่เครื่องอบแห้งในงานวิจัยนี้จะระบายอากาศร้อนออกจากระบบได้) ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของไหลร้อนที่เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในช่วง 50 ถึง 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และกำหนดให้อุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าคงที่เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส เมื่อได้ผลจากแบบจำลองจะพิจารณาจากค่าผลต่างของอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของอากาศเย็นเป็นหลัก หากแบบจำลองใดให้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสูงสุดจะทำการปรับแบบเพื่อการสร้างต่อไป

2.2 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำได้โดยการเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความเร็วลม ณ จุดต่าง ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในขณะที่ทำการทดลองอบแห้ง (รูปที่ 2) โดยที่ $T_{c,i}$ และ $T_{c,o}$ คือ จุดที่ทำการวัดค่าอุณหภูมิอากาศแห้งที่เติมเข้าสู่ระบบซึ่งไหลเข้าและออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน $T_{h,i}$ และ $T_{h,o}$ คือ จุดที่ทำการวัดค่าอุณหภูมิของอากาศร้อนปล่อยทิ้งซึ่งไหลเข้าและออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน V_i และ V_o คือ จุดที่ทำการวัดค่าความเร็วลมที่ไหลเข้าและออกจากระบบอบแห้ง ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้จะนำมาคำนวณเพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

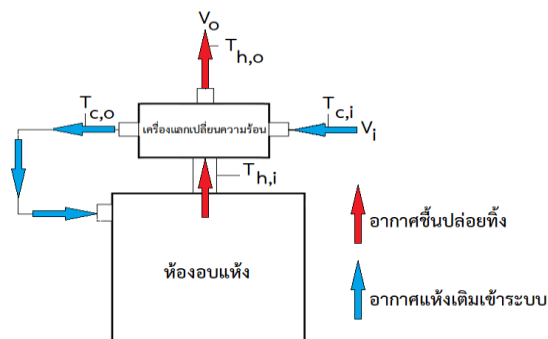


(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) การติดตั้งกลุ่มแบบวางเยื้องแนว (ข) การกำหนดระยะห่างของท่อในแนวต่าง ๆ [8]



รูปที่ 2 การเก็บข้อมูลอุณหภูมิ (T) และความเร็วลม (V)

- อัตราการถ่ายเทความร้อนจริง ($\dot{Q}$)

การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมักรวมค่าอัตราการไหลเชิงมวลและค่าความร้อนจำเพาะของของไหลเข้าด้วยกันเป็นค่าอัตราความจุความร้อน (Heat Capacity Rate) ของของไหลร้อน $C_h = \dot{m}_h c_{ph}$ และอัตราความจุความร้อนของของไหลเย็น $C_c = \dot{m}_c c_{pc}$ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงที่เกิดขึ้นภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอันได้แก่พลังงานที่สูญเสียไปของของไหลร้อนในที่นี้มีค่าเท่ากับพลังงานที่ของไหลเย็นได้รับซึ่งเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation Of Energy) สามารถคำนวณได้ดัง

สมการที่ 1 [8] โดยตัวห้อย h และ c สำหรับของไหลร้อนและของไหลเย็น และตัวห้อย in และ out สำหรับทางเข้าและทางออก ตามลำดับ

$$\dot{Q} = C_h (T_{h,in} - T_{h,out}) = C_c (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (1)$$

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล (กิโลกรัมต่อวินาที)

c_p คือ ความร้อนจำเพาะ (จุลต่อกรัม องศาเซลเซียส)

T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ($\dot{Q}_{max}$)

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จะเกิดขึ้นได้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ($\dot{Q}_{max} = C \cdot \Delta T_{max}$) จะเกิดขึ้นได้เมื่ออุณหภูมิของของไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด โดยเมื่อพิจารณาจากของไหลร้อนจะพบว่ามีค่าสูงสุดคือ $\Delta T_{max} = (T_{h,in} - T_{h,out})$ โดยอุณหภูมิต่ำที่สุดของของไหลร้อน ณ ทางออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ($T_{h,out}$) ที่เกิดขึ้นได้จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับอุณหภูมิของของไหลเย็น ณ ทางเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ($T_{c,in}$) นั่นเอง ดังนั้น ΔT_{max} สูงสุดที่เกิดขึ้นได้จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ $\Delta T_{max} = (T_{h,in} - T_{c,in})$ ส่วนการพิจารณาเลือกใช้ค่าอัตราความจุความร้อนของของไหลระหว่าง C_c และ C_h ให้เลือกตัวที่มีค่าน้อยกว่าแล้วกำหนดให้เป็น C_{min} เพื่อใช้ในการคำนวณ $\dot{Q}_{max}$ เนื่องจาก C_c หรือ C_h ที่มีค่ามากกว่าจะส่งผลให้ $T_{h,out}$ ที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า $T_{c,in}$ ซึ่งไม่ไปตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ โดยในงานวิจัยนี้ของไหลที่แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอากาศที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันแต่มีอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากัน ทั้งนี้ค่าความร้อนจำเพาะหรือ c_p ของอากาศจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิ ดังนั้นค่า C_{min} จึงสามารถคำนวณได้จากข้อมูลของกระแสเย็น โดย $\dot{Q}_{max}$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) [8]

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (2)$$

ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ϵ_{HEX}) คือ การเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงที่เกิดขึ้นภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) [8]

$$\varepsilon_{\text{HEX}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{max}}} \times 100\% \quad (3)$$

ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (η_{HEX}) คือ การเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่กระแสน้ำได้รับต่อพลังงานความร้อนที่กระแสน้ำสูญเสียไป สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) [8]

$$\eta_{\text{HEX}} = \frac{C_c(T_{c,\text{out}} - T_{c,\text{in}})}{C_h(T_{h,\text{in}} - T_{h,\text{out}})} \times 100\% \quad (4)$$

2.3 การทดลองอบแห้ง

จากผลการวิจัยก่อนหน้าของคณะผู้วิจัยที่ทำการทดลองอบแห้งใบมะกรูดสดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 60 ฐานเปียก ให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดอบแห้งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนด้านผักและผลไม้แห้ง [9] ที่กำหนดให้ค่าความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 12 ฐานเปียก ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนเครื่องเดียวกันนี้พบว่าอุณหภูมิความร้อนที่เหมาะสมในการผลิตใบมะกรูดอบแห้งให้มีสีใกล้เคียงกับใบมะกรูดสดมากที่สุดควรมีค่าไม่เกิน 55 องศาเซลเซียส ที่อัตราการปล่อยอากาศขึ้นทิ้งและอัตราการเติมอากาศแห้งเข้าระบบคงที่เท่ากันเท่ากับ 0.017 กิโลกรัมต่อวินาที ดังนั้นการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่ได้รับการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางในงานวิจัยนี้ (รูปที่ 3) จึงทำได้ด้วยการทดลองอบแห้งใบมะกรูดสดน้ำหนัก 15 กิโลกรัม ด้วยเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้น โดยจะทำการเก็บข้อมูลด้านอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค (Thermocouple Type K) ร่วมกับ Data Logger ยี่ห้อ Lutron รุ่น TM-1947SD สำหรับการบันทึกข้อมูลทุก 1 นาที ตลอดกระบวนการอบแห้ง และเก็บข้อมูลด้านการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งด้วยเครื่องวัดพลังงานยี่ห้อ Easton รุ่น SDM630MCT ซึ่งจะแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) กระแสไฟฟ้า (แอมป์) กำลังไฟฟ้า (วัตต์) ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง) เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งก่อนและหลังการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งนี้ในผู้วิจัยจะทำการเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทุก ๆ 30 นาที เพื่อวิเคราะห์ค่าความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นมาตรฐานยี่ห้อ Ohaus รุ่น MB25 ตลอดกระบวนการทดลอง จนกว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ใบ

มะกรูดอบแห้งที่มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 ฐานเปียก ซึ่งดีกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนด้านผักและผลไม้แห้ง [9] เนื่องจากผู้วิจัยต้องการเพื่อสภาวะการดูดความชื้นกลับ (Hygroscopicity) ของผลิตภัณฑ์อบแห้งขณะทำการเก็บรักษาหรือรอการจำหน่าย จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองใช้เครื่องอบแห้งทั้ง 2 กรณี มาคำนวณค่าพารามิเตอร์ด้านสมรรถนะของเครื่องอบแห้งดังต่อไปนี้

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) คือ ค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ต่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) [10]

$$\text{SMER} = \frac{W_i - W_f}{P_E} \quad (5)$$

SMER คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)

W_i คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบแห้ง (กิโลกรัม)

W_f คือ น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

P_E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (กิโลวัตต์ชั่วโมง)

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) คือ ค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุซึ่งค่านี้เป็นค่าส่วนกลับของ SMER สามารถคำนวณจากสมการที่ (6) [11]

$$\text{SEC} = \frac{3600 P_E}{W_i - W_f} \quad (6)$$

ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบอบแห้ง คือ ค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ ต่อพลังงานทั้งหมดที่ระบบใช้ตลอดกระบวนการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) [12]

$$\eta_{\text{dryer}} = \frac{m_w \cdot h_{fg}}{E_{\text{total}}} \times 100\% \quad (7)$$

η_{dryer} คือ ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง (ร้อยละ)

m_w คือ มวลน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (กิโลกรัม)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำ ณ อุณหภูมิอบแห้ง (จุลต่อกิโลกรัม)

E_{total} คือ พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง (จุล)

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 การออกแบบและติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ผลจากแบบจำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางทั้ง 3 ขนาดข้างต้นพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความยาวกลุ่มท่อเท่ากับ 60 เซนติเมตร สามารถสร้างผลต่างของอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของอากาศเย็นได้สูงที่สุด กล่าวคือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการอุ่นอากาศสูงกว่าอีกสองขนาด ทำให้ผู้วิจัยเลือกที่จะสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางต้นแบบ (HEX) ด้วยขนาดดังกล่าวแล้วทำการติดตั้งกับเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนขนาดกึ่งอุตสาหกรรมดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางกับเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนระดับกึ่งอุตสาหกรรม

3.2 สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (HEX)

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของอากาศแห้งขาออก HEX ($T_{c,o}$) ซึ่งใช้เดิมเข้าสู่ห้องอบแห้งจะเริ่มสูงกว่าอากาศแวดล้อมที่ไหลเข้า HEX ($T_{c,i}$) เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 นาที โดยอุปกรณ์นี้สามารถอุ่นอากาศแห้งให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 6.00 องศาเซลเซียส และมีค่าเฉลี่ยตลอดกระบวนการอบแห้งเท่ากับ 4.42 องศาเซลเซียส ในขณะเดียวกันจากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของอากาศชื้นที่ปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมมีค่าลดลง โดยมีผลต่างของอุณหภูมิของอากาศชื้นขาเข้า ($T_{h,i}$) และขาออก ($T_{h,o}$) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 10.71 ในช่วงเริ่มต้นและมีค่าเฉลี่ยตลอดกระบวนการอบแห้งเท่ากับ 6.82 องศาเซลเซียส

งานวิจัยนี้ทำการควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศชื้นและอากาศแห้งให้คงที่เท่ากับ 0.017 กิโลกรัมต่อวินาที ทั้งนี้เมื่อคำนวณจากผลต่างของอุณหภูมิกระแสน้ำ (อากาศชื้น) และกระแสน้ำเย็น (อากาศแห้ง) ที่ไหลเข้าออก HEX ดังกล่าวข้างต้นตามสมการที่ (3) และ (4) พบว่า HEX มีค่าประสิทธิภาพและประสิทธิภาพในการทำงานร้อยละ 31.58 และ 64.81 ตามลำดับ โดยผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังตารางที่ 1

3.3 สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

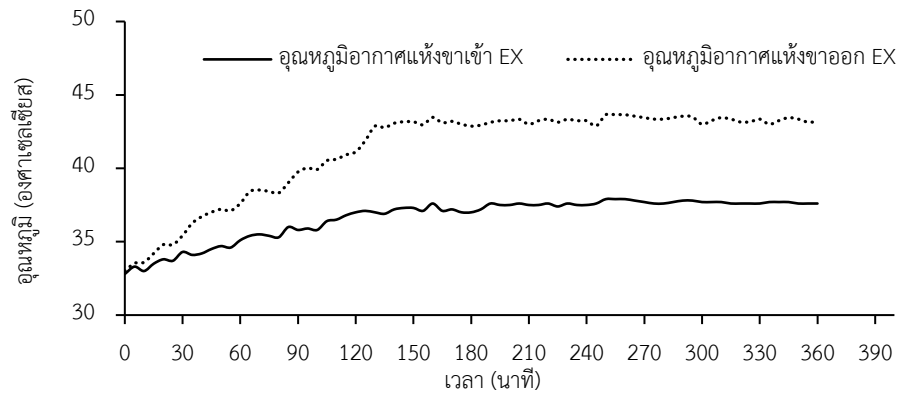
อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งในงานวิจัยนี้ใช้ควบคุมความร้อนไฟฟ้ในการผลิตลมร้อน ควบคุมการทำงานด้วยระบบ PID control ที่มีค่าความไว (Sensitivity) ± 2 องศาเซลเซียส กล่าวคือเมื่อกำหนดอุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส ระบบควบคุมจะตัดการทำงานของขดลวดเมื่ออุณหภูมิของห้องอบแห้งมีค่าประมาณ 57 องศาเซลเซียส และจะสั่งงานให้ขดลวดกลับมาทำงานอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิของห้องอบแห้งลดลงจนมีค่าประมาณ 53 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิให้มีค่าประมาณ 55 องศาเซลเซียส ตามที่กำหนดไว้ตลอดกระบวนการอบแห้ง

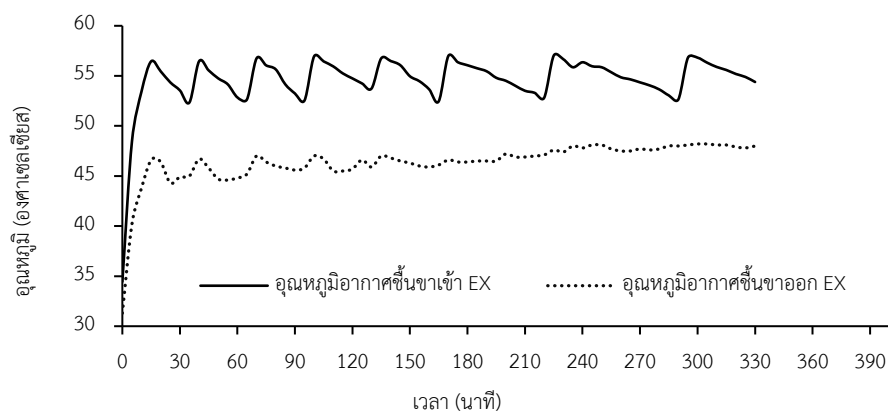
จากรูปที่ 6 จะเห็นว่าเครื่องอบแห้งเดิม (ก่อนติดตั้ง HEX) และเครื่องอบแห้งที่ได้รับการปรับปรุง (ติดตั้ง HEX) สามารถสร้างอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งให้ถึงค่าที่กำหนดโดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที ทำให้เครื่องอบแห้งทั้งสองแบบมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating Rate) ไม่แตกต่างกัน โดยเครื่องอบแห้งเดิมและเครื่องที่ติดตั้ง EX มีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งตลอดกระบวนการเท่ากับ 54.6 และ 54.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

อัตราการอบแห้ง

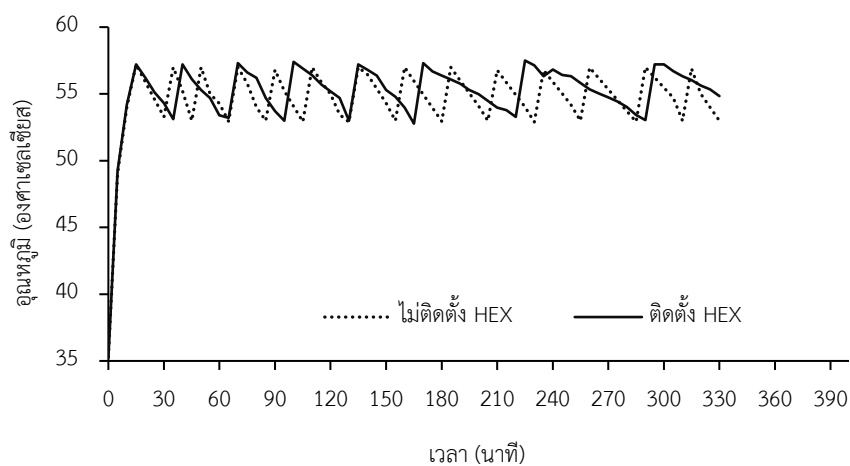
จากการทดลองอบแห้งใบมะกรูดสดที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 61.20 และ 61.40 ฐานเปียก ด้วยเครื่องอบแห้งเดิมและเครื่องที่ได้รับการปรับปรุง ตามลำดับ พบว่าเครื่องอบแห้งเดิมใช้เวลาในการอบแห้ง 360 นาที ได้ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ร้อยละ 9.20 ฐานเปียก คิดเป็นน้ำหนักน้ำที่ระเหยออกจากวัตถุดิบเท่ากับ 8.59 กิโลกรัม ในขณะที่เครื่องอบแห้งที่ติดตั้ง HEX ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 9.11 ฐานเปียก มีน้ำหนักน้ำที่ระเหยออกจากวัตถุดิบเท่ากับ 8.63 กิโลกรัม ใช้เวลาในการอบ 360 นาที เท่ากัน



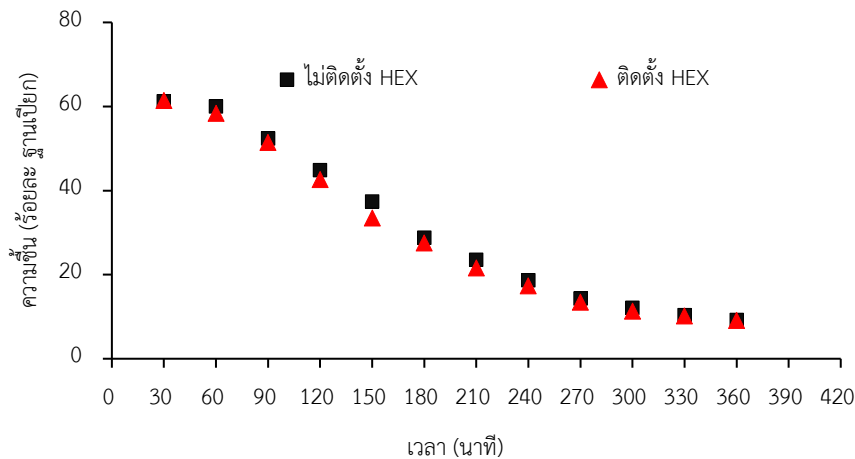
รูปที่ 4 อุณหภูมิอากาศแห้งขาเข้า ($T_{c,i}$) และขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ($T_{c,o}$)



รูปที่ 5 อุณหภูมิอากาศชื้นขาเข้า ($T_{h,i}$) และขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ($T_{h,o}$)



รูปที่ 6 อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง



รูปที่ 7 อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบมะกรูด

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	
การเพิ่มอุณหภูมิอากาศแห้งที่เดิมเข้าสู่ระบบอบแห้ง (สูงสุด/เฉลี่ย) (องศาเซลเซียส)	6.00/4.42
การลดอุณหภูมิอากาศชื้นที่ปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม (สูงสุด/เฉลี่ย) (องศาเซลเซียส)	10.71/6.82
ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ร้อยละ)	31.58
ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ร้อยละ)	64.81

เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่อระยะเวลาในการอบแห้ง พบว่าเครื่องอบแห้งเดิมและเครื่องที่ได้รับการปรับปรุงมีอัตราการอบแห้ง (Drying Rate) เท่ากับ 1.43 และ 1.44 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง ตามลำดับ ทั้งนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบมะกรูดต่อระยะเวลาในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบแสดงดังรูปที่ 7

สมดุลพลังงาน

ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องอบแห้งจะเปลี่ยนสภาพเป็นความร้อนที่ขจัดไฟฟ้า จากการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งเดิมและเครื่องที่ติดตั้ง HEX ใช้ไฟฟ้าในการอบแห้งใบมะกรูดเท่ากับ 8.52 และ 7.72 กิโลวัตต์ชั่วโมง หรือคิดเป็นพลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องอบแห้ง (Input) เท่ากับ 30,672 และ 27,792 กิโลจูล ตามลำดับ ทั้งนี้พลังงานดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ (Output) สามารถคำนวณได้จากผลคูณของมวลน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์กับความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำ ณ อุณหภูมิอบแห้ง จากการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งเดิมใช้พลังงาน 20,357 กิโลจูล ในการระเหยน้ำ

8.59 กิโลกรัม ออกจากใบมะกรูด ในขณะที่เครื่องอบแห้งซึ่งติดตั้ง EX ใช้พลังงาน 20,451 กิโลจูล ในการระเหยน้ำ 8.63 กิโลกรัม ออกจากใบมะกรูด จะสังเกตได้ว่าเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบใช้พลังงานในส่วนนี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากใช้วัตถุดิบและอุณหภูมิในการอบแห้งไม่แตกต่างกัน

ส่วนที่ 2 ความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม (Waste Heat) เกิดจากการระบายอากาศร้อนขึ้นออกจากห้องอบแห้ง โดยเครื่องอบแห้งเดิมและเครื่องที่ได้รับการปรับปรุงสูญเสียพลังงานในส่วนนี้เท่ากับ 3,390 และ 2,969 กิโลจูล ตามลำดับ

ส่วนที่ 3 ความร้อนทิ้งที่สามารถนำกลับมาใช้ (Waste Heat Recovered) พลังงานส่วนนี้จะเกิดขึ้นเมื่อเครื่องอบแห้งเดิมได้รับการปรับปรุงด้วยการติดตั้ง HEX เท่านั้น จากการทดลองพบว่า HEX ต้นแบบในงานวิจัยนี้สามารถนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในการอุ่นอากาศแห้งได้ประมาณ 272 กิโลจูล หรือคิดเป็นร้อยละ 9.16 ของความร้อนที่ปล่อยทิ้ง

ส่วนที่ 4 พลังงานสูญเสียในระบบ (Energy Loss) เกิดจากความร้อนที่ถ่ายเทไปสู่ส่วนประกอบของระบบอบแห้งรวมถึง HEX และสิ่งแวดล้อม แทนที่จะถ่ายเทสู่ผลิตภัณฑ์ พลังงานส่วนนี้สามารถคำนวณได้จากพลังงานที่จ่ายให้กับ



เครื่องอบแห้ง (Input) ลดด้วยพลังงานสามส่วนดังกล่าวข้างต้น โดยเครื่องอบแห้งเดิมและเครื่องที่ได้รับการปรับปรุงมีการสูญเสียพลังงานในส่วนนี้เท่ากับ 6,926 และ 4,099 กิโลจูล ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลจากการสมดุลพลังงานมาคำนวณพบว่าเครื่องอบแห้งเดิมและเครื่องที่ติดตั้ง EX มีค่าประสิทธิภาพในการทำงานร้อยละ 66.37 และ 73.59 ตามลำดับ เนื่องจากประสิทธิภาพที่สูงกว่าทำให้เครื่องอบแห้งที่ได้รับการปรับปรุงมีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) เพิ่มขึ้น 0.11 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ในการอบแห้งใบมะกรูดลดลงประมาณ 350 กิโลจูลต่อกิโลกรัมน้ำ โดยผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแสดงดังตารางที่ 2

3.4 อภิปรายผลการวิจัย

เนื่องจากขดลวดความร้อนที่ติดตั้งในเครื่องอบแห้งมีกำลังมากพอที่สร้างอุณหภูมิภายในห้องอบให้ถึงกำหนดก่อนที่ HEX จะเริ่มอุ่นอากาศได้ ทำให้การติดตั้ง HEX ไม่ส่งผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องอบแห้ง ดังนั้นการใช้เครื่องอบแห้งทั้งสองแบบในการอบใบมะกรูดที่มีขนาดและความชื้นเริ่มต้นใกล้เคียงกัน ด้วยอุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ยที่เท่ากัน จึงมีอัตราการอบแห้งที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เทคนิคการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ทำให้เครื่องอบแห้งที่ติดตั้ง HEX มีอุณหภูมิของอากาศแห้งที่เดิมเข้าสู่ระบบสูงกว่าเครื่องเดิม จึงทำให้ขดลวดความร้อนซึ่งมีหน้าที่ผลิตลมร้อนทำงานน้อยลงส่งผลให้เครื่องอบแห้งที่ได้รับการปรับปรุงสามารถประหยัดพลังงานในการอบแห้งและมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องเดิม

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

ค่าพารามิเตอร์	ไม่ติดตั้ง HEX	ติดตั้ง HEX	การเปลี่ยนแปลง
ความชื้นใบมะกรูดเริ่มต้น (ร้อยละ ฐานเปียก)	61.20	61.40	ไม่แตกต่าง
น้ำหนักใบมะกรูดเริ่มต้น (น.น./น.น.ของแห้ง) (กิโลกรัม)	15.00 (9.18/5.82)	15.00 (9.21/5.79)	
ความชื้นใบมะกรูดสุดท้าย (ร้อยละ ฐานเปียก)	9.20	9.11	ไม่แตกต่าง
น้ำหนักใบมะกรูดสุดท้าย (น.น./น.น.ของแห้ง) (กิโลกรัม)	6.41 (0.59/5.82)	6.37 (0.58/5.79)	
น้ำหนักน้ำระเหย (กิโลกรัม)	8.59	8.63	ไม่แตกต่าง
ระยะเวลาในการอบแห้ง (นาที)	360	360	ไม่แตกต่าง
อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง)	1.43	1.44	ไม่แตกต่าง
ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องอบแห้ง (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	8.52	7.72	ลดลง ร้อยละ 9.39
พลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องอบแห้ง (input) (กิโลจูล)	30,672	27,792	ลดลง ร้อยละ 9.39
พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ (output) (กิโลจูล)	20,357	20,451	ไม่แตกต่าง
ความร้อนทิ้งที่สามารถนำกลับมาใช้ (waste heat recovered) (กิโลจูล)	0.00	272	
ความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม (waste heat) (กิโลจูล)	3,390	2,969	ลดลง ร้อยละ 12.40
พลังงานสูญเสียในระบบ (energy loss) (กิโลจูล)	6,926	4,099	ลดลง ร้อยละ 40.81
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ SEC (กิโลจูลต่อกิโลกรัมน้ำ)	3,571	3,220	ลดลง ร้อยละ 9.81
อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ SMER (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)	1.01	1.12	เพิ่มขึ้น ร้อยละ 10.89
ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง (ร้อยละ)	66.37	73.59	เพิ่มขึ้น ร้อยละ 10.88



4. บทสรุป

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง (HEX) ในงานวิจัยนี้ ออกแบบเพื่อการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในการอุ่นอากาศแห้งที่เดิมเข้าสู่ระบบ ภายในส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนของ HEX ติดตั้งกลุ่มท่อที่มีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนรวม 1.13 ตารางเมตร จากผลการทดลองอบแห้งใบมะกรูดด้วยอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส พบว่าการติดตั้ง HEX ต้นแบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศแห้งก่อนเดิมเข้าสู่ห้องอบแห้งให้สูงขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 12.28 และลดอุณหภูมิของอากาศชื้นก่อนปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมได้เฉลี่ยร้อยละ 12.40 ซึ่งเกิดจากการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ส่งผลให้เครื่องอบแห้งที่ได้รับการปรับปรุงใช้พลังงานในการอบแห้ง (Input) ลดลงร้อยละ 9.39 ในขณะที่ความสามารถในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ (Output) ไม่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องอบแห้งที่ได้รับการปรับปรุงด้วยการติดตั้ง HEX เพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 10.88

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ในโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา จากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัย แม่โจ้ ทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาในโครงการทุนศิษย์ ก้นกุฏิ ประจำปี 2562 จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ทุนวิจัยบัณฑิตศึกษาด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ประจำปี 2563 จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) และทุนสนับสนุนงานพื้นฐาน (Fundamental Fund) จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุนส่งเสริม ววน.) ประจำปี 2562 และ 2563 ผ่านมหาวิทยาลัยแม่โจ้มา ณ ที่นี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Energy statistics of Thailand. Energy Policy and Planning Office. Ministry of Energy. Thailand;2019. Thai.

- [2] Energy conservation in thermal system, Bureau of Energy Human Resource Development. Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Ministry of Energy.Thai.
- [3] Dussadee N. Agricultural products Drying with renewable energy. Basics and Applications. Maejo University Press. Chiang Mai Thailand; 2016. Thai.
- [4] Piamdee J. Design and Construction of Heat HEXchanger for Waste Heat Recovery in a Snack Drying Process. MEng thesis. Chiang Mai University Chiang Mai Thailand; 2002. Thai.
- [5] Akbari A, Kouravand S, Chegini G. Experimental analysis of a rotary heat exchanger for waste heat recovery from the exhaust gas of dryer. Appl Therm Eng. 2018 Jun;138:668–74.
- [6] Kunlawaniteewat J. Heat HEXchanger Network Control Structure Design. MEng thesis. Chulalongkorn University Bangkok Thailand; 2001. Thai.
- [7] Kraitonga K, Nuntaphan A. Application of Cross Flow Heat Exchanger Modified from Automobile Air conditioning Condenser: A Case Study of Waste Heat Recovery from Hot Water for Air Preheating. 2005; 13(1):(1):13–23.
- [8] Cengel YA. Heat Transfer. A Practical Approach. 2nd ed Singapore: McGraw - Hill International Edition; 2003.
- [9] Thai Community Product Standard. TCPS 136/ 2015.Dried Fruits and Vegetables.Thai Industrial Standards Institute. Ministry of Industry Thailand. 2015. Thai.
- [10] Sarkar J,Bhattacharyya S,Gopal MR.Transcritical CO₂ Heat Pump Dryer: Part 2. Validation and Simulation Results. Dry Technol. 2006 Dec; 24 (12):1593–600.



- [11] Charoenvai SC, Yingyuen W, Jewyee A, Rattanadecho P, Vongpradubchai S. Analysis of Energy Consumption in a Drying Process of Particleboard Using a Combined Multi-Feed Microwave-Convective Air and Continuous Belt System (CMCB).Sci Technol Asia. 2013;1-15.
- [12] Syahrul S, Dincer I, Hamdullahpur F. Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles. Int J Therm Sci. 2003 Jul;42(7):691–701.

RMUTL Engineering Journal

Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Lanna



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา