

ISSN 1685-408X



วารสาร สวทท. TSAE JOURNAL

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
Thai Society of Agricultural Engineering Journal

ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2559

Volume 22 No. 2 July-December 2016



วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

Thai Society of Agricultural Engineering Journal

ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2559 (Volume 22 No. 1 January - June 2016)

ISSN 1685-408X

เจ้าของ: สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

สำนักงาน: อาคาร 5 ชั้น 5 กองส่งเสริมวิศวกรรมเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร แขวงลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทร 0 2940 6183 โทรสาร 0 2940 6185 www.tsae.asia

บรรณาธิการ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ. ดร. วชิรพล ชัยประเสริฐ

กองบรรณาธิการ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ. ดร. อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล

รศ. ดร. ประเทือง อุษาบริสุทธิ์

ผศ. ดร. ศิวลักษณ์ ปฐวิรัตน์

ดร. วันรัฐ อับดุลลาหิม

ดร. ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล

ดร. อาทิตย์ พวงสมบัติ

ดร. สิริญา น้อยพิทักษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผศ. ดร. สุนัน ปานสาคร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผศ. ดร. เทวรัตน์ ตรีอำนาจ

ดร. กระวี ตรีอำนาจ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผศ. ดร. ประสันต์ ชุ่มใจหาญ

รศ. ดร. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ดร. ชัยยันต์ จันทร์ศิริ

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ผศ. ดร. ฤทธิชัย อัศวราชันย์

กองส่งเสริมวิศวกรรมเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร

นางดาเรศร์ กิตติโยภาส

นางสาวณมล ลดาวัลย์ ณ อยุธยา

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ. พันิช ทองสวัสดิ์วงศ์

กองบรรณาธิการวิชาการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศ. ดร. สุรินทร์ พงศ์สุภสมิทธิ์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศ. ดร. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ศ. ดร. สมชาติ ฉันทศิริวรรณ

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

ศ. ดร. อรรถพล นุ่มหอม

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ. ดร. ธัญญา นิยมภา

รศ. วิชา หมั่นทำการ

ผศ. ภรต กุญชร ณ อยุธยา

ดร. ประภาภรณ์ แสงวิจิตร

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รศ. ดร. สัมพันธ์ ไชยเทพ

ผศ. ดร. ศิวะ อัจฉริยวิริยะ

ดร. วิบูลย์ ช่างเรือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผศ. ดร. วีรชัย อาจหาญ

ผศ. ชาณชัย โรจนโสโร

ผศ. ดร. พงศ์ศักดิ์ จุลยุเสนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศ. ดร. สมชาติ โสภณธนฤทัย

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

รศ. เสนอขวัญ ดันติกุล

ผศ. ดร. สุนทร สืบคำ

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รศ. ดร. ธวัชชัย ทิววรรณวงศ์

รศ. ดร. วินิต ชินสุวรรณ

ผศ. ดร. เสรี วงศ์พิเชษฐ

ผศ. ดร. สมโกชน์ สุตาจันทร์

ผศ. ดร. สมชาย ขวณอุดม

ผศ. ดร. วิเชียร ปลื้มมงคล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ. ดร. รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์

รศ. ดร. จตุรงค์ ลังกาพินธุ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์

รศ. จิราภรณ์ เบลองประกายรัตน์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

รศ. ดร. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์

รศ. สาทิป รัตนภาสกร

สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร

ดร. ชุติศักดิ์ ขวประดิษฐ์

ดร. อนุชิต ย่ำสิงห์

กองส่งเสริมวิศวกรรมเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร

นางดาเรศร์ กิตติโยภาส

นายณรงค์ ปัญญา

นายธีรวัชร มั่นกิจ

นางสาวสุจิตกานต์ กลัมพสุต

University of California, Davis

Pictaw Chen, Ph.D., Professor Emeritus

David C. Slaughter, Ph.D., Professor

University of Tsukuba

Masayuki Koike, D.Agr., Professor Emeritus

Tomohiro Takigawa, Ph.D., Professor

Mie University

Nobutaka Ito, D.Agr., Professor Emeritus

Iowa State University

Dirk E. Maier, Ph.D., Professor

Purdue University

Klein E. Ililji, Ph.D., Associate Professor

คณะกรรมการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

ประจำปี พ.ศ. 2558 – 2559

ที่ปรึกษา

ฯพณฯ นายอำพล เสนาณรงค์	Prof. Dr. Vilas M Salokhe	นางพรรณพิมล ชัญญานุวัตร
ฯพณฯ พลเอกสุรยุทธ์ จุลานนท์	Prof. Dr. Gajendra Singh	นายวิกรม วัชรคุปต์
ศ. ดร. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์	Prof. Dr. Chin Chen Hsieh	นายสมชัย ไกรครุฑรี
ศ. ดร. อรรถพล นุ่มหอม	ดร. สุภาพ เอื้อวงศ์กุล	นายปราโมทย์ คล้ายเนตร
ศ. ดร. สุรินทร์ พงศ์สุสมิทธิ์	นายทรงศักดิ์ วงศ์ภูมิวัฒน์	นายสุวิทย์ เทิดเทพพิทักษ์
รศ. ดร. ธวัชชัย ทิวาวรรณวงศ์	นายสุรเวทย์ กฤษณะเศรณี	นายชนะชัย หยกอุบล
รศ. ดร. วินิต ชินสุวรรณ		

กรรมการบริหาร

นายกสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย	นางดาเรศร์ กิตติโยภาส
อุปนายก	ผศ. ดร. วีรชัย อาจหาญ
ประธานฝ่ายวิชาการ	ศ. ดร. สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา
ผู้ช่วยประธานฝ่ายวิชาการ	รศ. ดร. ปานมนัส ศิริสมบุรณ์
ผู้ช่วยประธานฝ่ายวิชาการ	ผศ. ดร. สุนทร สืบคำ
ผู้ช่วยประธานฝ่ายวิชาการ	ผศ. ดร. ชัยยันต์ จันทศิริ
เลขาธิการ	นายณรงค์ ปัญญา
เหรัญญิก	นายบุญส่ง หนองนา
ผู้ช่วยเหรัญญิก	นางสาวชญานุช ปานเอี่ยม
นายทะเบียน	นายชีรวัตร มั่นกิจ
สาราณียากร	ผศ. ดร. วัชรพล ชยประเสริฐ
ผู้ช่วยสาราณียากร	รศ. ดร. สมชาย ขวนอุดม
ปฏิคม	นายนเรศน์ รังสิมันตศิริ
ประชาสัมพันธ์	นางสาวนฤมล ลดาวัลย์ ณ อยุธยา
ผู้ประสานงานกลาง	นายอนุรักษ เรือนหล้า

กรรมการกลางและวิชาการ

รศ. ดร. สมยศ เชื้ออักษร	ดร. สมเกียรติ เสงนิรันดร์	นางดาเรศร์ กิตติโยภาส	นางสาวพนิดา บุษปฤกษ์
รศ. ดร. ธัญญา นิยมภา	รศ. ผดุงศักดิ์ วานิชขัง	รศ. ใจทิพย์ วานิชขัง	นายมลพล แสงประไพพิทย
รศ. ดร. ธัญญา เกียรติวัฒน์	รศ. จิราภรณ์ เบญจประกายรัตน์	นายชนะชัย หยกอุบล	นางสาวระพี พรหมภู
รศ. ดร. ปานมนัส ศิริสมบุรณ์	รศ. ดร. รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์	นายจรรวดี มงคลธนรรค	นายพัฒนศักดิ์ อุนตระกูล
รศ. สาทิป รัตนภาสกร	ผศ. ดร. ศิวลักษณ์ ปฐวิรัตน์	ดร. ไมตรี แนวพนิช	นายมรกต กลัปดี
ผศ. ดร. สมโภชน์ สุตาจันทร์	ดร. วันรัฐ อับดุลลาฮาซิม	นายอัศพล เสนาณรงค์	นายเรศวรรค์ ชื่นอินทร์มนู
ผศ. ดร. เสรี วงษ์พิเชษฐ์	รศ. ดร. รังสิณี ไสธวิทย์	นายวิบูลย์ เทเพนทร์	นายสุรสิทธิ์ บุญรักษาดี
ดร. ชัยพล แก้วประกายแสงกุล	รศ. ดร. ประเทือง อุษาบริสุทธิ์	นายสุภาวิช เสี่ยมพงศ์	นายบุญส่ง หนองนา
รศ. ดร. สัมพันธ์ ไชยเทพ	รศ. มานพ ตันตระกูล	ดร. อนุชิต ฉ่ำสิงห์	นางสาวศิรษา เจ็ญสุขสวัสดิ์
รศ. ดร. วิชัย ศรีบุญเหลือ	ผศ. ดร. สุนทร สืบคำ	นายวีระชัย เขาวัวขุย	นางสาววิไลวรรณ สอนพูล
ผศ. เขียวชัย สันตสุข	ผศ. ภรต กุญชร ณ อยุธยา	นายรเชษฐ์ ฉัตรมนตรี	นางสาวนฤมล ลดาวัลย์ ณ อยุธยา
นายไพศาล พันพิง	ดร. วสันต์ จอมภักดี	นายไมตรี ปรีชา	หัวหน้าภาควิชาและสาขาวิศวกรรม
ผศ. ฉัตรชัย ศุภจารีรักษ์	ดร. ชูศักดิ์ ขวประดิษฐ์	รศ. ดร. สมชาย ขวนอุดม	เกษตรของสถาบันการศึกษาทุกแห่งของ
รศ. กิตติพงษ์ วุฒิจำนง	รศ. ดร. อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล	นายสมศักดิ์ อังกูรวัฒนากุล	ประเทศ

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

1. หลักเกณฑ์ทั่วไป

1.1 คำนำ

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย เป็นวารสารวิชาการที่จัดพิมพ์โดยสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยทั้งที่เป็นองค์ความรู้ใหม่ นวัตกรรม และเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมเกษตรและระบบชีวภาพ ในรูปของบทความวิจัย บทวิจยย่อ และบทความปริทัศน์ เนื้อหาของบทความที่เผยแพร่ในวารสารสะท้อนถึงขอบเขตที่กว้างขวางของศาสตร์วิศวกรรมเกษตร ซึ่งบูรณาการวิศวกรรมศาสตร์หลากหลายสาขามาประยุกต์เพื่อเพิ่มผลิตภาพทางการเกษตรและระบบชีวภาพ อาทิ เครื่องจักรกลเกษตร วิศวกรรมดินและน้ำ เทคโนโลยีหลังเก็บเกี่ยว วิศวกรรมอาหาร โครงสร้างอาคารเกษตร การจัดการระบบเกษตร พลังงานและสิ่งแวดล้อมทางการเกษตร เป็นต้น เนื้อหาของบทความอาจเป็นการรายงานผลการทดลองของเรื่องที่ศึกษาที่ให้องค์ความรู้ใหม่ การวิเคราะห์ทางทฤษฎี การออกแบบและประดิษฐ์นวัตกรรม หรือการนำเสนอเทคนิควิธีการทดลองใหม่

1.2 ขอบข่ายวารสาร

- | | |
|--|--|
| 1) ดันกำลังและเครื่องจักรกลเกษตร | • การวางแผนฟาร์มการออกแบบโรงงานอุตสาหกรรมเกษตร |
| • เครื่องยนต์และกำลัง | 5) ระบบเกษตร |
| • การออกแบบและทดสอบเครื่องจักรกลเกษตร | • โลจิสติกส์และโซ่อุปทานผลิตผลและสินค้าเกษตร |
| • กระบวนการผลิตเครื่องจักรกลเกษตร | • ระบบตรวจสอบย้อนกลับและความปลอดภัยอาหาร |
| • เทคนิคปฏิบัติและการใช้เครื่องจักรกลเกษตร | • การจัดการระบบเกษตร และการจำลองสถานการณ์ |
| 2) วิศวกรรมดินและน้ำ | • อุตสาหกรรมเกษตร |
| • การอัดแน่น การชะล้าง และการปรับปรุงดิน | 6) คอมพิวเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ |
| • พื้นที่แห้งแล้ง และการเก็บกักน้ำ | • การเกษตรแม่นยำ การตรวจวัดระยะไกล ระบบภูมิสารสนเทศ ระบบผู้เชี่ยวชาญ |
| • อุทกวิทยาและการจัดการน้ำ | • เซ็นเซอร์ หุ่นยนต์ และระบบอัตโนมัติ |
| • ชลศาสตร์และระบบชลประทาน | • ชีวสารสนเทศ |
| • การให้น้ำพืชระดับไร่นา | • การประยุกต์คอมพิวเตอร์ การพัฒนาซอฟต์แวร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ |
| 3) กระบวนการหลังเก็บเกี่ยวและวิศวกรรมอาหาร | 7) พลังงานและสิ่งแวดล้อม |
| • กระบวนการหลังเก็บเกี่ยวและการเก็บรักษา | • พลังงานทดแทน ชีวมวลและพลังงานชีวมวล |
| • การบรรจุ | • การจัดการพลังงาน |
| • เทคนิคแบบไม่ทำลาย | • การจัดการของเสียการเกษตรรีไซเคิลและเทคโนโลยีไร้ของเสีย |
| • กระบวนการและเครื่องจักรกลอาหาร | • วิศวกรรมระบบนิเวศเกษตร |
| • วิศวกรรมชีวภาพ | |
| 4) โครงสร้างอาคารเกษตร | |
| • การออกแบบอาคารเกษตร | |
| • ไซโล โรงเรือน และโรงงานผลิตพืช | |

1.3 ประเภทบทความ

บทความที่เผยแพร่ในวารสารมี 3 ประเภทคือ

- บทความวิจัย (research paper) คือ รายงานผลการศึกษาทดลองที่ทำให้ได้มาซึ่งองค์ความรู้ใหม่ หรือนวัตกรรมใหม่ ที่ได้ดำเนินการจนสำเร็จและมีการเรียบเรียงอย่างครบถ้วนสมบูรณ์ตามระเบียบวิธีวิจัย
- บทวิจยย่อ (research note) คือ รายงานผลการศึกษาทดลองเฉพาะในบางประเด็นที่ผู้วิจัยค้นพบ แต่ยังไม่เสร็จสมบูรณ์
- บทความปริทัศน์ (review paper) คือ รายงานที่ได้จากการรวบรวม ทบทวน และสังเคราะห์งานวิจัยที่ผ่านมาในเรื่องใดเรื่องหนึ่ง โดยสอดแทรกทัศนคติ ประสพการณ์ หรือความคิดเห็นของผู้เขียนที่มีต่อเรื่องนั้นๆ

1.4 ความยาวบทความ

- บทความวิจัย ความยาวไม่ควรเกิน 10 หน้าเรียงพิมพ์
- บทความวิจัยย่อ ความยาวไม่ควรเกิน 5 หน้าเรียงพิมพ์
- บทความปริทัศน์ ความยาวไม่ควรเกิน 10 หน้าเรียงพิมพ์

1.5 ค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์

ผู้เขียนบทความที่ผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ในวารสารฯ จะต้องชำระค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์ในอัตราหน้าละ 300 บาท โดยกองบรรณาธิการจะแจ้งรายละเอียดวิธีการชำระค่าธรรมเนียมให้ทราบเมื่อบทความได้รับการยอมรับต้นฉบับให้ตีพิมพ์ในวารสารฯ

1.6 กระบวนการประเมินบทความ

ต้นฉบับบทความทุกประเภทจะถูกประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิไม่ต่ำกว่า 2 ท่าน กองบรรณาธิการจะแจ้งผลการประเมินของผู้ทรงคุณวุฒิไปยังผู้รับผิดชอบบทความ (corresponding author) ตามข้อมูลการติดต่อในต้นฉบับ ผู้เขียนบทความต้องปรับปรุงแก้ไขต้นฉบับตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ พร้อมทั้งตอบข้อซักถามของผู้ทรงคุณวุฒิให้ชัดเจน แล้วส่งเอกสารทั้งหมดกลับมายังกองบรรณาธิการภายในระยะเวลาที่กำหนด กองบรรณาธิการจะพิจารณาตัดสินยอมรับต้นฉบับให้ตีพิมพ์ในวารสารฯ โดยใช้ผลการประเมินของผู้ทรงคุณวุฒิเป็นเกณฑ์ ทั้งนี้คำตัดสินของกองบรรณาธิการถือเป็นอันสิ้นสุด

2. รายละเอียดการเตรียมต้นฉบับ*

*กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ไม่รับพิจารณาต้นฉบับบทความจนกว่าต้นฉบับนั้นๆ จะมีการจัดเรียงหน้าตามรายละเอียดที่แจ้งไว้ในเอกสารนี้

2.1 แบบฟอร์มต้นฉบับ (template)

ผู้เขียนควรทำความเข้าใจแบบฟอร์มต้นฉบับ (template) และตัวอย่างต้นฉบับ (manuscript example) ที่กองบรรณาธิการจัดทำไว้อย่างละเอียด ลักษณะ (styles) ของเนื้อหาทุกส่วนของแบบฟอร์มต้นฉบับได้ถูกปรับตั้งให้เป็นไปตามข้อกำหนดการจัดเรียงหน้าในเอกสารฉบับนี้แล้ว ผู้เขียนควรจัดเตรียมต้นฉบับโดยใช้แบบฟอร์มต้นฉบับและกำหนดลักษณะ ให้กับทุกส่วนในต้นฉบับให้สอดคล้องกับแบบฟอร์มต้นฉบับ แบบฟอร์มต้นฉบับและตัวอย่างต้นฉบับสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์สมาคมฯ (www.tsae.asia)

2.2 การจัดหน้าและแบบอักษร

ต้นฉบับใช้กระดาษขนาด A4 ตั้งขอบกระดาษแบบ Mirror margins (ระยะขอบเพื่อการเย็บเล่มหนังสือ) ตั้งระยะขอบบนและขอบล่างอย่างละ 2.0 cm, ขอบนอก 1.5 cm และขอบใน 2.5 cm การพิมพ์ใช้อักษรแบบ TH SarabunPSK ตลอดทั้งต้นฉบับ

2.3 การระบุประเภทบทความ

ผู้เขียนจะต้องระบุประเภทของบทความที่มอบหมายในหน้าแรกของบทความว่าเป็นบทความวิจัย บทความวิจัยย่อ หรือบทความปริทัศน์ (ดูแบบฟอร์มต้นฉบับ)

2.4 หัวเรื่อง

ส่วนหัวเรื่องจะมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ประกอบด้วย

- ชื่อบทความ ใช้อักษรขนาด 16 pt ตัวหนา จัดกระจายแบบไทย (Thai distributed) ชื่อบทความควรสั้นกระชับ ได้ใจความ และมีความจำเพาะเจาะจงกับเนื้อหาของงาน
- ชื่อ นามสกุล ผู้เขียน ใช้อักษรขนาด 14 pt ตัวหนา จัดกระจายแบบไทย ไม่ใช้คำนำหน้าชื่อ ระหว่างชื่อผู้เขียนแต่ละคนให้ใช้เครื่องหมายจุลภาคคั่น หลังชื่อผู้เขียนให้แสดงกำกับต้นสังกัดด้วยตัวเลขแบบอักษรยก (superscript) และให้กำกับผู้รับผิดชอบบทความด้วยเครื่องหมายดอกจัน กองบรรณาธิการจะถือว่าผู้เขียนทุกคนที่มีชื่อปรากฏในต้นฉบับได้รับทราบและเห็นพ้องกับเนื้อหาในต้นฉบับนั้น
- ต้นสังกัดและที่อยู่ ใช้อักษรขนาด 12 pt ตัวธรรมดา จัดกระจายแบบไทย กำกับแสดงต้นสังกัดด้วยตัวเลขแบบอักษรยก แล้วตามด้วยชื่อต้นสังกัดและที่อยู่ (จังหวัดและรหัสไปรษณีย์)
- ให้ระบุหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และอีเมล ของผู้รับผิดชอบบทความ

2.5 บทคัดย่อ

บทความภาษาไทยจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยให้ลำดับบทคัดย่อภาษาไทยมาก่อนภาษาอังกฤษ การพิมพ์บทคัดย่อจะจัดเป็น 1 คอลัมน์ จัดกระจายแบบไทย ใช้อักษรขนาด 14 pt บรรทัดแรกให้ย่อหน้า (indentation) 1.0 cm บทคัดย่อควรสั้นกระชับ (ไม่ควรเกิน 250 คำ) เนื้อความครอบคลุมถึงวัตถุประสงค์ วิธีการ ผล การค้นพบที่สำคัญ และสรุป

2.6 คำสำคัญ

ท้ายบทคัดย่อให้ระบุคำสำคัญ 3-5 คำ ใช้อักษรขนาด 14 pt คำสำคัญทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้เครื่องหมายจุลภาคคั่นระหว่างคำ สำหรับภาษาอังกฤษใช้อักษรตัวพิมพ์ใหญ่กับอักษรตัวแรกของทุกคำ

2.7 เนื้อความ

ส่วนเนื้อความใช้การจัดหน้าเป็น 2 คอลัมน์ ความกว้างของแต่ละคอลัมน์ 8.25 cm ระยะระหว่างคอลัมน์ 0.5 cm จัดกระจายแบบไทย หัวเรื่องย่อให้ใช้หมายเลขกำกับ และพิมพ์ตัวหนา เช่น “1 บทนำ” (ตามด้วย 1.1 พิมพ์ตัวเอียง, 1.1.1 พิมพ์ตัวหนาและเอียง, ...) และจัดกระจายแบบไทย บรรทัดแรกของทุกย่อหน้าให้ย่อหน้า 0.5 cm และให้ใช้อักษรขนาด 14 pt ตลอดทั้งเนื้อความ ยกเว้นรายการเอกสารอ้างอิง ในรายการเอกสารอ้างอิง ให้ย่อหน้า 0.5 cm แบบ Hanging

เนื้อความควรประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- บทนำ (introduction) ควรมีการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องตรงประเด็น กล่าวถึงที่มาของปัญหาและความสำคัญของผลงานที่ผู้เขียนต้องการนำเสนอ ตอนท้ายบทนำควรระบุวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานอย่างชัดเจน
- อุปกรณ์และวิธีการ (materials and methods) การเขียนส่วนอุปกรณ์และวิธีการให้บรรยายร้อยเรียงกันไป ไม่เขียนในลักษณะนำรายการอุปกรณ์มาเรียงลำดับ (list) ควรอธิบายอย่างเป็นขั้นตอนและมีรายละเอียดเพียงพอให้ผู้อ่านที่สนใจสามารถทำการทดลองซ้ำได้ วิธีการที่เป็นที่ทราบดีในสาขาวิชานั้น หรือเป็นมาตรฐาน หรือถูกเผยแพร่โดยผู้อื่นมาก่อน ควรใช้อ้างอิงโดยไม่ต้องอธิบายรายละเอียดซ้ำ การกล่าวถึงชื่อทางการค้าของอุปกรณ์เพื่อความสมบูรณ์ของข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์สามารถทำได้ แต่ทั้งนี้ต้องไม่มีนัยที่แสดงถึงการรับรองหรือสนับสนุนผู้ผลิตรายใดรายหนึ่ง
- ผลและวิจารณ์ (results and discussion) ผลที่นำเสนอควรเป็นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สังเคราะห์ ไม่ใช่ข้อมูลดิบ โดยนำเสนอเป็นลำดับสอดคล้องกับที่อธิบายไว้ในส่วนอุปกรณ์และวิธีการ ควรมีการแปลและวิจารณ์ผลอย่างมีหลักการและมีข้อมูลสนับสนุนชัดเจน อาจมีการเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยในทำนองเดียวกันที่เผยแพร่มาก่อน รวมทั้งอาจให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยที่เกี่ยวข้องกันในอนาคต
- สรุป (conclusions) เป็นการลงความเห็นหรือสรุปการค้นพบที่สำคัญที่ได้จากงานวิจัย ควรสั้นกระชับ และไม่อธิบายซ้ำซ้อนกับเนื้อความในส่วนก่อนหน้า
- กิตติกรรมประกาศ (acknowledgement) เป็นส่วนที่ผู้เขียนแสดงคำขอบคุณแก่บุคคล หรือหน่วยงานที่มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้ ไม่จำเป็นต้องแสดงคำขอบคุณแก่ผู้ร่วมเขียนบทความซึ่งมีชื่อปรากฏในส่วนหัวเรื่องแล้ว ส่วนกิตติกรรมประกาศอาจมีหรือไม่ก็ได้
- เอกสารอ้างอิง (references) การอ้างอิงใช้ระบบชื่อผู้แต่ง-ปีที่ตีพิมพ์ (name-year system) ควรอ้างอิงเฉพาะแหล่งข้อมูลที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับงานวิจัยของผู้เขียน เอกสารอ้างอิงที่ใช้ต้องได้รับการยอมรับทางวิชาการ ไม่ควรอ้างอิงแหล่งข้อมูลที่เข้าถึงได้ยาก เช่น รายงานผลการวิจัยที่เผยแพร่ในกลุ่มแคบๆ ข้อมูลที่ไม่ถูกตีพิมพ์ หรือการติดต่อสื่อสารระหว่างบุคคล เอกสารอ้างอิงทุกชิ้นที่ถูกอ้างถึงในเนื้อความต้องปรากฏอยู่ในรายการเอกสารอ้างอิง และในทำนองเดียวกันเอกสารอ้างอิงทุกชิ้นที่ปรากฏอยู่ในรายการเอกสารอ้างอิงต้องถูกอ้างถึงในเนื้อความ การอ้างถึงเอกสารอ้างอิงภาษาไทยในเนื้อความให้ใช้รูปแบบ “ชื่อผู้แต่ง (ปีที่ตีพิมพ์)” เช่น “มงคล (2545) แสดงให้เห็นว่า ...” หรือ “ความเร็วการหมุนลูกมะพร้าวและความเร็วของมีดปอกมีผลต่อความเรียบของผิวลูกมะพร้าว (บัณฑิต, 2550)” หรือ “อนุพันธ์ และศิวลักษณ์ (2555) พบว่า ...” แต่หากเอกสารอ้างอิงเป็นภาษาอังกฤษให้ใช้รูปแบบ “นามสกุลผู้แต่ง (ปีที่ตีพิมพ์)” เช่น “Mettam (1994) แสดงให้เห็นว่า ...” การอ้างถึงเอกสารอ้างอิงภาษาไทยซึ่งมีผู้แต่งตั้งแต่ 3 คนขึ้นไปใช้คำว่า “และคณะ” หลังชื่อผู้แต่งคนแรก เช่น “สมชาติ และคณะ (2551)” สำหรับเอกสารอ้างอิงภาษาอังกฤษให้ใช้คำว่า “et al.” เช่น “Perez-Mendoza et al. (1999)” การจัดเรียงรายการเอกสารอ้างอิง ให้จัดเรียงเอกสารอ้างอิงภาษาไทยก่อน แล้ว

ตามด้วยเอกสารอ้างอิงภาษาอังกฤษ สำหรับเอกสารอ้างอิงภาษาไทย ให้จัดเรียงเอกสารอ้างอิงตามลำดับอักษรของชื่อผู้แต่ง ซึ่งถ้าผู้แต่งคนแรกเป็นคนเดียวกัน ให้เรียงลำดับตามอักษรของชื่อผู้แต่งคนถัดไป ถ้าชื่อผู้แต่งเหมือนกันทั้งหมดให้เรียงลำดับตามปีที่พิมพ์ ถ้าปีที่พิมพ์เป็นปีเดียวกันให้ระบุความแตกต่างด้วยอักษร “ก”, “ข”, “ค” ต่อท้ายปีที่ตีพิมพ์ สำหรับเอกสารอ้างอิงภาษาอังกฤษ ให้จัดเรียงเอกสารอ้างอิงตามลำดับอักษรของนามสกุลผู้แต่ง ซึ่งถ้าผู้แต่งคนแรกเป็นคนเดียวกัน ให้เรียงลำดับตามอักษรของนามสกุลผู้แต่งคนถัดไป หากผู้แต่งเป็นคนเดียวกันทั้งหมด ให้เรียงลำดับตามปีที่ตีพิมพ์ ในกรณีที่ผู้แต่งเป็นคนเดียวกันทั้งหมดและตีพิมพ์ในปีเดียวกัน ให้ระบุความแตกต่างด้วยตัวอักษร “a”, “b”, “c” ต่อท้ายปีที่ตีพิมพ์ ชื่อวารสารวิชาการที่นำมาอ้างอิงให้ใช้ชื่อเต็ม

2.8 ตัวอย่างการพิมพ์รายการเอกสารอ้างอิง

บทความวารสารวิชาการ

จักรมาส เลหาวิช, พรหมมี แพงสีชา, สุเมธี คำวันสา. 2552. การหาค่าความขาวขาวสารโดยวิธีการวัดค่าสี. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 15(1), 26-30.

Perez-Mendoza, J., Hagstrum, D.W., Dover, B.A., Hopkins, T.L., Baker, J.E. 1999. Flight response, body weight, and lipid content of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae) as influenced by strain, season and phenotype. *Journal of Stored Products Research* 38, 183-195.

หนังสือที่มีผู้แต่งแต่ละบท (Edited book)

Mettam, G.R., Adams, L.B. 1994. How to prepare an electronic version of your article. In: Jones, B.S., Smith, R.Z. (Eds.), *Introduction to the Electronic Age* (pp. 281–304). New York: E-Publishing Inc.

ตำรา

ประดิษฐ์ หม่อมเมืองสอง, สุขญาณ หรรษสุข. 2550. การวิเคราะห์การสันสะเทือน. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

Strunk, W., Jr., White, E.B. 1979. *The Elements of Style*. (3rd ed.). Brooklyn, New York: Macmillan.

รายงานการประชุมวิชาการ

วัฒนชัย ภัทรเจียรสกุล, วารุณี เตีย, สมชาติ โสภณธณฤทธิ์. 2553. ศักยภาพการผลิตเอทานอลจากลิกโนเซลลูโลสในประเทศไทย. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11 ประจำปี 2553, 299-304. นครปฐม: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. 6-7 พฤษภาคม 2553, กำแพงแสน, นครปฐม.

Winks, R.G., Hyne, E.A. 1994. Measurement of resistance to grain fumigants with particular reference to phosphine. In: Highley, E., Wright, E.J., Banks, H.J., Champ, B.R. (Eds). *Proceedings of the Sixth International Working Conference on Stored-product Protection*, 244–249. Oxford, UK: CAB International. 17-23 April 1994, Canberra, Australia.

วิทยานิพนธ์

สยาม ตุ่มแสงทอง. 2546. การปรับปรุงเครื่องคัดขนาดผลมังคุดแบบจานหมุน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Chayaprasert, W. 2007. Development of CFD models and an automatic monitoring and decision support system for precision structural fumigation. PhD dissertation. West Lafayette, Indiana: Department of Agricultural and Biological Engineering, Purdue University.

แหล่งข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์

ศูนย์ข้อมูลกรุงเทพมหานคร. 2550. สถิติรายปี กรุงเทพมหานคร. แหล่งข้อมูล: http://203.155.220.230/stat_search/frame.asp. เข้าถึงเมื่อ 14 มิถุนายน 2550.

United Nations Environment Programme. 2000. The Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. Available at: <http://ozone.unep.org/pdfs/Montreal-Protocol2000.pdf>. Accessed on 7 August 2008.

2.9 หน่วย

ใช้ระบบหน่วย International Systems (SI) ให้ถือว่าหน่วยเป็นสัญลักษณ์ ดังนั้นแม้ในบทความจะมีเนื้อความเป็นภาษาไทย หน่วยที่ใช้จะเป็นหน่วยภาษาอังกฤษเสมอ เช่น “มวล 15 kg” ไม่ใช่ “มวล 15 กิโลกรัม” หรือ “มวล 15 กก.” เป็นต้น ให้เขียนหน่วยที่มีลักษณะเป็นเศษส่วนในรูปตัวเลขยกกำลัง เช่น “ m s^{-1} ” ไม่ใช่ “m/s” เป็นต้น

2.10 สมการ

สมการที่ไม่ซับซ้อนอาจพิมพ์แทรกระหว่างข้อความภายในบรรทัดได้ สมการที่มีความซับซ้อนให้พิมพ์แยกบรรทัดด้วย Equation editor ควรกำหนดหมายเลขให้กับทุกสมการตามลำดับการปรากฏในต้นฉบับของสมการ และควรอ้างถึงสมการในเนื้อความตามหมายเลขที่กำหนดไว้ ควรนิยามตัวแปรทุกตัวในสมการเมื่อถูกอ้างอิงถึงครั้งแรก ตัวแปรควรพิมพ์ด้วยตัวอักษรเอียง และใช้อักษรหรือสัญลักษณ์ที่เป็นที่นิยมในสาขานั้นๆ หากจำเป็นต้องมีการกำหนดสัญลักษณ์หรือตัวแปรขึ้นใหม่เป็นจำนวนมาก ควรทำตารางสัญลักษณ์เฉพาะ (nomenclature)

2.11 ภาพและตาราง

ให้แทรกภาพและตารางลงในเนื้อความ โดยรายละเอียดของภาพจะต้องสามารถมองเห็นได้ชัดเจนเมื่อเรียงพิมพ์ ภาพถ่ายควรมีความละเอียดอย่างน้อย 300 dpi ภาพที่เป็นกราฟจะต้องมีคำอธิบายแกน คำอธิบายสัญลักษณ์ในกราฟ พร้อมระบุหน่วยให้ชัดเจน เนื่องจากวารสารฯ จะถูกจัดพิมพ์แบบขาว-ดำ ดังนั้น ผู้เขียนควรคำนึงถึงการสูญเสียความชัดเจนของภาพสีเมื่อต้องจัดพิมพ์เป็นภาพขาว-ดำ ตารางควรจัดรูปแบบให้เรียบร้อย เส้นตารางใช้เฉพาะเส้นแนวนอน ไม่ใช่เส้นแนวตั้ง

ชื่อภาพและตาราง ตลอดจนข้อความทั้งหมดในภาพและตารางให้ใช้ภาษาอังกฤษ ให้เขียนชื่อภาพไว้ด้านใต้ภาพ โดยใช้รูปแบบดังตัวอย่างเช่น “Figure 1 Relationship between ...” ส่วนชื่อตารางให้เขียนไว้ด้านบนตาราง โดยใช้รูปแบบดังตัวอย่างเช่น “Table 1 Results of ...” ให้จัดขอบซ้ายขวาของชื่อภาพและตารางเป็นแบบจัดกระจายแบบไทย ใช้อักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 pt ชื่อภาพและตารางควรสื่อให้ผู้อ่านสามารถทำความเข้าใจสาระสำคัญของภาพหรือตารางนั้นๆ ได้ แม้ไม่อ่านเนื้อความ การกำหนดหมายเลขภาพและตารางให้เป็นไปตามลำดับการปรากฏในต้นฉบับ ให้ใช้รูปแบบการอ้างอิงถึงภาพและตารางในเนื้อความดังตัวอย่างเช่น “... ดังผลการทดลองใน Figure 1” หรือ “Table 1 เป็นค่าเฉลี่ยของ ...” ควรแทรกภาพหรือตารางเมื่อจบย่อหน้าที่มีการอ้างอิงถึงภาพหรือตารางนั้นๆ ทันที

2.12 หมายเลขบรรทัด (line number)

เพื่อความสะดวกในการประเมินบทความของผู้ทรงคุณวุฒิ ให้กำหนดหมายเลขบรรทัดด้วยอักษร TH SarabunPSK ขนาด 8 pt เยื้องจากข้อความ 1 mm นับที่ละ 1 บรรทัด โดยกำหนดให้บรรทัดแรกของคอลัมน์ซ้ายเป็นบรรทัดหมายเลข 1 และเริ่มนับลำดับเลขใหม่ในแต่ละหน้าตลอดทั้งต้นฉบับ

3. การส่งต้นฉบับ

ผู้เขียนสามารถส่งไฟล์ต้นฉบับทางระบบ online submission ได้ที่ <http://tsae.asia/journals/index.php/tsaej2014/>

สารบัญ

1 การผลิตปุ๋ยจากกากหม้อกรองโดยใช้เครื่องอัดแบบหัวอัดแนวราบโดยใช้น้ำเป็นตัวประสาน

ชินฉันทย์ อารีประเสริฐ^{1*}, แสนรัก แก้วมรกต², วรดา สุวรรณวัฒนะ², นกนต รุ่งเรืองวัฒนโชติ², จิรัฐติกุล กล้าหาญ^{1,3}, ชูตระกูล ศิริไพบูลย์^{1,4}, กริธา สมเกียรติกุล^{1,5}, ธัญญะ เกียรติวัฒน์¹

7 การศึกษากลศาสตร์เมื่อน้ำในแม่น้ำป่าสักตอนล่างด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์

วิษุวัตม์กั แต่สมบัติ^{1*}

17 อิทธิพลของการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดต่อสมบัติของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการผลิตเตกซ์ทริน

พิรภัทร อุไรเวศ¹, ประสันต์ ชุ่มใจหาญ^{1*}

24 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงช่วงล่างเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดสอบแรง

คงเดช พะสีนาม¹, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน^{1*}, คธา วาทกิจ¹, จริญญาศักดิ์ สมพงษ์¹

30 จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อปลาโดยการใช้พลังงานความร้อนแบบชั้นเดียวและอุณหภูมิแบบหลายชั้น

ฤทธิชัย อัครวราชันย์^{1,2,*}, อุมพร อุประ^{1,2}, เสมอขวัญ ตันติกุล^{1,2}, พัทธมน อุดมพิพัฒพงศ์^{1,2}

41 ผลของการใช้ความดันสูงในการทำลายจุลินทรีย์และสปอร์ของจุลินทรีย์ในอาหาร

ฤทธิชัย อัครวราชันย์^{1*}

49 การประเมินสมรรถนะของระบบอบแห้งแบบพาหะลมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล

ธนธัช มุขพันธ์¹, วีรชัย อาจหาญ¹, พรรษา ลิบลับ^{1*}

56 การออกแบบและสร้างเรือเก็บขยะแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกลสำหรับแหล่งน้ำเพื่อการเกษตร

เกรียงไกร แซมสีม่วง^{1*}, จุลพงศ์ พฤกษ์ศรี¹, พงศพิชญ์ ต่วนภูษา¹, วีรศักดิ์ หมูเจริญ¹



การผลิตปุ๋ยจากกากหม้อกรองโดยใช้เครื่องอัดแบบหัวอัดแนวราบโดยใช้น้ำเป็นตัวประสาน

Fertilizer Pellet Production from Filter Cake and Water as a Binder Employing a Flat-die Pelletizer

ชินธันย์ อารีประเสริฐ^{1,*}, แสนรัก แก้วมรกต², วรดา สุวรรณวัฒน์², นภนต์ รุ่งเรืองวัฒนโชติ², จีรฐติกุล กล้าหาญ^{1,3}, ชูตระกูล ศิริไพบูลย์^{1,4}, กริธา สมเกียรติกุล^{1,5}, ธัญญะ เกียรติวัฒน์¹

Chinnathan Areeprasert^{1,*}, Saenruk Kaewmorakot², Worada Suwanwattana², Napon Rungrueangwattanachot², Jeerattikul Klahan^{1,3}, Chootrakul Siripaiboon^{1,4}, Kreetha Somkeattikul^{1,5}, Thanya Kiatiwat¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

²ภาควิชาไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ 10900

²Department of Electromechanic Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

³ภาควิชาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi Suphanburi Campus, Suphanburi 72130

⁴ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสยาม, กรุงเทพมหานคร 10160

⁴Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Siam University, Bangkok 10160

⁵ภาควิชาวิศวกรรมการผลิตยานยนต์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์, นนทบุรี 11120

⁵Department of Automotive Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Panyapiwat Institute of Management, Nonthaburi 11120

*Corresponding author: Tel: +66-2797-0999, Fax: +66-2579-2775, E-mail: achinatun@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ผสมกับกากหม้อกรองสำหรับการผลิตปุ๋ยอัดแท่งโดยใช้เครื่องอัดแบบหัวอัดแนวราบต่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Product yield) และความแข็งแรงของแท่งปุ๋ย เพื่อให้ได้ปุ๋ยแท่งที่มีคุณภาพสามารถขนย้ายและใช้งานได้อย่างสะดวก จึงได้หาอัตราส่วนผสมของน้ำที่เหมาะสมคือ 10%, 20% และ 30% โดยมวล และอัดแท่งปุ๋ยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาดคือ 4 และ 6 mm หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบความแข็งแรงของปุ๋ยแท่งด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) โดยทดสอบผลิตภัณฑ์ปุ๋ยที่ได้ด้วยความยาวที่ต่างกันคือ 23, 25 และ 30 mm สำหรับอัตราส่วนผสมน้ำที่ 10% โดยมวล 18 25 และ 30 mm สำหรับอัตราส่วนผสมน้ำที่ 20% โดยมวล และ 19, 23 และ 27 mm สำหรับอัตราส่วนผสมน้ำที่ 30% โดยมวล ผลการทดลองพบว่า จากกระบวนการอัดแท่งปุ๋ย อัตราส่วนของน้ำที่เหมาะสมคือ 10% ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งปุ๋ย 6 mm และความยาว 23 mm เนื่องจากให้ผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ในสัดส่วนที่สูงสุดถึง 30% และเมื่อนำมาทดสอบความแข็งแรงพบว่าสามารถรับแรงได้สูง (21.5 kg) โดยมีความหนาแน่นของเม็ดปุ๋ยอยู่ที่ 1351 kg m⁻³

คำสำคัญ: กากหม้อกรอง, ปุ๋ยแท่ง, เครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัดแนวราบ

Abstract

This research aimed to study the effect of amount of water mixing in fertilizer pellet production from filter cake using flat-die pelletizer on product yield and mechanical strength of the fertilizer pellet. To achieve good physical quality and improve transportability of fertilizer, different amount of water were added during pellet making process, including 10%, 20% and 30% of total weight. Two types of die, i.e., two and six mm diameter, have been tested. After pellet production, the product distribution was calculated. After the products were naturally dried, they were subjected to a hardness test by a universal testing machine (UTM) at the different lengths (23, 25 and 30 mm for water mixing of 10 wt.%, 18 25 and 30 mm for water mixing of 20 wt.%, and 19,

23 and 27 mm for water mixing of 30 wt.%). Results showed that additional water of 10% at the diameter of 6 mm was a proper ratio to give the highest yield (30% of perfect pieces) and highest strength (21.5 kg force) and density (1351 kg m^{-3}) at the pellet length of 23 mm.

Keywords: Filter cake, Fertilizer pellet, Flat die machine

1 บทนำ

ปัจจุบันสิ่งที่สำคัญที่สุดในการทำเกษตรกรรมคือวิธีที่ทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ และปริมาณมากที่สุด ซึ่งการทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพดีนั้น มีหลากหลายวิธีด้วยกัน โดยหนึ่งในนั้นคือการเลือกใช้ปุ๋ยที่มีคุณภาพและมีสารอาหารที่เหมาะสมกับพืชแต่ละชนิด ในประเทศไทยนั้น มีโรงงานน้ำตาลอยู่หลายแห่ง เนื่องจากประเทศไทย เป็นประเทศที่ส่งออกน้ำตาล เป็นลำดับต้นๆ ของโลก (Chetthamrongchai et al., 2001) ในการผลิตน้ำตาลนั้น โรงงานจะใช้อ้อยเป็นวัตถุดิบหลัก และจะได้ของเสียออกมา ระหว่างกระบวนการผลิตหลากหลายชนิด เช่น กากน้ำตาล กากอ้อย และกากหม้อกรอง เป็นต้น ในการวิจัยนี้กากหม้อกรองถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง เนื่องจากกากหม้อกรองจำนวนมากที่ได้ออกมาจากกระบวนการผลิตน้ำตาลเป็นวัตถุดิบที่ติดไฟง่าย จึงทำให้โรงงานส่วนใหญ่ต้องการกำจัด อย่างไรก็ตามกากหม้อกรองมีสารอาหารที่พืชต้องการเพียงพอ แต่ไม่สามารถขนย้ายและใช้งานได้อย่างสะดวกเนื่องจากมีลักษณะเป็นผง ด้วยเหตุผลทั้งหมดนี้จึงมีการวิจัยเพื่อหาส่วนผสมของน้ำซึ่งใช้เป็นตัวประสานในการผลิตปุ๋ยแท่งจากกากหม้อกรอง ด้วยเครื่องอัดแบบหัวอัดแนวราบ

ข้อดีของเครื่องอัดแนวราบคือ มีรูปทรงเรียบง่ายน้ำหนักเบา และขนาดเล็ก ทำให้ง่ายต่อการถอดชิ้นส่วนทำความสะอาด การเปลี่ยนแม่พิมพ์ที่มีขนาดต่างกันสามารถทำได้ง่ายจึงทำให้ประหยัดเวลา นอกจากนั้นยังสามารถหาอะไหล่และชิ้นส่วนต่างๆ ได้ง่าย และมีราคาถูกถ้าเทียบกับเครื่องอัดประเภทอื่น ในขณะที่ดำเนินการสามารถมองเห็นกระบวนการอัดแท่งได้จึงสามารถตรวจสอบการทำงานได้ง่ายและรวดเร็ว

งานวิจัยนี้ทำการทดลองผลิตปุ๋ยแท่งโดยนำกากหม้อกรองผสมกับน้ำในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้เครื่องอัดแบบหัวอัดแนวราบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน และศึกษาผลกระทบต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ปุ๋ยแท่งที่ได้ หลังจากนั้นทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในเชิงความแข็งแรงด้วย Universal Testing Machine (UTM) กับผลิตภัณฑ์ที่มีความยาวแตกต่างกัน

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการอัดเม็ด

กากหม้อกรอง (Filter cake) ที่นำมาใช้ ได้มาจากโรงงานน้ำตาลเอราวัณ จังหวัดหนองบัวลำภู ซึ่งเป็นผลพลอยได้ ที่ได้จากกระบวนการทำใส่น้ำอ้อย เมื่อสิ่งสกปรกที่ปนมากับน้ำอ้อยผสมกับสารเร่งตกตะกอนจะเกิดเป็นตะกอนตกลงมา หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการกรองตะกอนออกจากน้ำอ้อย ตะกอนที่ผ่าน

การแยกนี้จะถูกนำไปทิ้งไว้เพื่อหาทางนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป องค์ประกอบทางเคมีทั่วไปของกากหม้อกรองเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของปุ๋ยอินทรีย์มาตรฐานแสดงใน Table 1

Table 1 Chemical properties of filter cake.

Chemical properties	Filter cake**	Standard of organic fertilizer***
pH	7.7	5.5-8.5
C/N ratio	24:1	20:1
OM* (%)	22.3	≥ 30
N (%)	2.0	≥ 1
P (%)	1.1	≥ 0.5 (P_2O_5)
K (%)	0.3	≥ 0.5 (K_2O)

* Organic matter

** (Prado et al., 2013)

*** (Land Development Department, 2005)

2.2 เครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัดแนวราบ

เครื่องอัดแบบหัวอัดแนวราบ (Flat die) เป็นเครื่องอัดที่ใช้โดยทั่วไปในการอัดวัสดุที่มีลักษณะเป็นผงหรือมีขนาดเล็ก และวัตถุดิบที่มีลักษณะอ่อนนุ่มให้เป็นแท่ง โดยมีส่วนประกอบหลักคือ หัวอัดและลูกกลิ้ง โดยลูกกลิ้งจะหมุนอยู่ด้านบนหัวอัด สามารถปรับความเร็วได้ (Stelte et al., 2012) เครื่องอัดแท่งที่ใช้ (Figure 1) ซึ่งมีกำลัง 5.5 kW โดยหัวอัดและลูกกลิ้งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 และ 90 mm ตามลำดับ



Figure 1 Flat die machine used in this study.

2.3 การผลิตปุ๋ยอัดแท่ง

การทดลองนี้เลือกใช้หัวอัดแนวราบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 และ 6 mm โดยจะบรรจุวัตถุดิบครั้งละ 1.5 kg จากขนาดรู (ลักษณะเป็นทรงกระบอก) ของหัวอัด สามารถหาค่าอัตราส่วนแรงกด ($\text{Compression ratio} = L/d$, เมื่อ L คือความยาวของรูอัด และ d คือเส้นผ่านศูนย์กลาง) (Yancey et al., 2013) ได้ 5.5 และ 3.5 สำหรับรูอัดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 และ 6 mm ตามลำดับ

วัตถุดิบตั้งต้นหรือกากหม้อกรองนั้นมีความเป็นเนื้อเดียวกัน สูงดังนั้นความชื้นตั้งต้นของวัตถุดิบจึงไม่มีความแตกต่างกัน การทดลองผสมวัตถุดิบกับน้ำ (Figure 2) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยใช้อัตราส่วนของน้ำ 10% 20% และ 30% (โดยมวล) ของน้ำหนักของวัตถุดิบทั้งหมด เช่น การทดลองผสมน้ำ 30% โดยมวล จะใช้กากหม้อกรอง 1050 g (70%) ผสมกับน้ำ 450 g (30%) ผสมให้เข้ากัน และนำไปผ่านกระบวนการอัด หลังจากนั้น นำผลผลิตที่ได้ไปทำให้แห้งโดยการฟุ้งแดด เพื่อให้ผลผลิตที่ได้มีความชื้นที่เหมาะสมต่อการใช้งานซึ่งควรมีค่าต่ำกว่า 30% (Nikiema et al., 2013) จากการตรวจวัดความชื้นหลังจากการฟุ้งแดดพบว่า ผลผลิตที่ได้มีความชื้นสุดท้ายอยู่ระหว่าง 3 ถึง 3.5% โดยน้ำหนัก



Figure 2 Mixture of filter cake and water.

2.4 การทดสอบด้วย Universal testing machine (UTM)

การทดสอบด้วยเครื่อง UTM ดำเนินการโดยใส่ปุ๋ยแท่งที่มีขนาดใกล้เคียงกันในแต่ละเงื่อนไข (ผสมน้ำ 10% 20% และ 30% และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 และ 6 mm) โดยทดสอบทั้งหมด 3 ขนาด ดังนี้ 23 25 และ 30 mm สำหรับอัตราส่วนผสมน้ำที่ 10% โดยมวล 18 25 และ 30 mm สำหรับอัตราส่วนผสมน้ำที่ 20% โดยมวล และ 19 23 และ 27 mm สำหรับอัตราส่วนผสมน้ำที่ 30% โดยมวล (ความยาวที่ได้เป็นความยาวของแท่งปุ๋ยที่ออกจากเครื่องอัดโดยไม่มีการตัดแปลง จึงทำให้ความยาวของปุ๋ยที่นำมาทดสอบในแต่ละเงื่อนไขต่างกัน) ขนาด

ละ 10 แท่ง ทดสอบครั้งละ 1 แท่ง หลังจากใส่ปุ๋ยแท่งเข้าไปในเครื่องแล้ว ทำการเพิ่มแรงอัดไปเรื่อยๆ อย่างช้าๆ จนปุ๋ยแท่งเริ่มแตกหัก (Figure 3) จึงหยุดและบันทึกค่าที่ได้

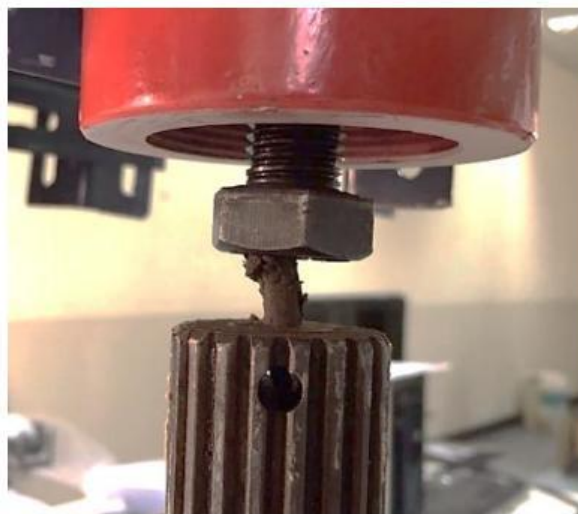


Figure 3 Breakage of fertilizer pellet during UTM testing.

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ลักษณะของผลิตภัณฑ์

ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละส่วนผสม (Figure 4) มีความแตกต่างกันเนื่องจากอัตราส่วนของน้ำที่ผสมต่างกัน โดยพบว่าการเพิ่มสัดส่วนของน้ำทำให้ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยแท่งที่ได้มีความนุ่มและอาจเกิดการแตกหักได้ในขณะที่อัดแท่งได้ง่าย การเคลื่อนย้ายอาจทำให้ปุ๋ยแท่งที่มีลักษณะนุ่มเกินไปเกิดการปัญหาได้เช่นกัน อาทิเช่น ขณะขนส่งไปในกระบวนการตากแห้ง ปริมาณน้ำที่มากเกินไปส่งผลให้วัตถุดิบมีลักษณะเป็นโคลน เกาะติดอยู่ภายในเครื่องอัด ซึ่งอาจส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์น้อยลง อย่างไรก็ตามในขณะดำเนินการอัดแท่งปุ๋ยพบว่า หากไม่มีการผสมน้ำหรือผสมน้ำน้อยเกินไปอาจทำให้เกิดความร้อนในกระบวนการอัดได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสมน้ำมีความจำเป็นต่อกระบวนการผลิตปุ๋ยแท่งอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้แต่ควรอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม

3.2 สมดุลมวลของกระบวนการผลิต

หลังจากดำเนินการอัดแท่งปุ๋ยจากกากหม้อกรองแล้ว ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ได้จะถูกเก็บและชั่งน้ำหนักก่อนการนำไปตากแห้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกแบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ ผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ (Perfect pieces) ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้รูป (Broken pieces) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นฝุ่นเหลือจากกระบวนการ (Dust) และวัสดุที่เสียจากกระบวนการ (Loss) เช่น ตกหล่นและหลงเหลืออยู่ภายในเครื่องจักรหลังเสร็จสิ้นกระบวนการทดลอง

จากการทดลองจะได้ สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้รูป (Broken pieces) ฝุ่นที่เหลือจากกระบวนการ (Dust) และวัสดุที่เสียจากกระบวนการ (Loss) มีค่าสูงมากในทุกๆ การทดลอง (Table 2)

ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทดลองเป็นกะ (Batch) คือทำการทดลองทีละครั้งและไม่ต่อเนื่องทำให้เกิดวัสดุเหลือภายในเครื่องอัดในปริมาณมาก



Figure 4 Appearance of the products (from top to bottom: 30%, 20%, and 10% water mixing by mass).

จากการพิจารณาสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ (Perfect pieces) พบว่า อัตราส่วนการผสมน้ำที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สมบูรณ์มากที่สุดคือ 10% และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm (Table 2) โดยมีสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้รูป (Broken pieces) ต่ำที่สุด

สำหรับการผสมน้ำ 10% และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm พบว่า ให้ผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ต่ำ (Perfect pieces) (Table

2) ซึ่งแตกต่างกับผลิตภัณฑ์ในส่วนผสมเดียวกันที่ 6 mm โดยสิ้นเชิง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่น้อยและขนาดรูอัดที่เล็ก ทำให้ไม่สามารถผลิตปุ๋ยแท่งที่ดีได้ดังสังเกตได้จากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้รูป (Broken pieces) สูงกว่าเกือบเท่าตัว (13%, Table 2) และมีความเป็นไปได้ว่าสัดส่วนน้ำที่น้อย (10%) และรูอัดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก (4 mm) ทำให้ไม่สามารถอัดปุ๋ยเป็นแท่งได้ดังสังเกตได้จากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นฝุ่น (Dust) มีสูงถึง 30% (Table 2)

Table 2 Mass balance of the pellet making process.

Water mixing (wt. %)	Type of products	Product distribution (wt. %)	
		4 mm	6 mm
10	Perfect pieces	10	30
	Broken pieces	13	7
	Dust	30	18
	Loss	47	45
20	Perfect pieces	20	25.3
	Broken pieces	22	8.7
	Dust	12	18
	Loss	46	48
30	Perfect pieces	5	10
	Broken pieces	31	12
	Dust	22	48
	Loss	42	30

อัตราส่วนการผสมน้ำที่ให้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์สูงลำดับต่อมาคือ 20% โดยพบความแตกต่างกันระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งปุ๋ยคือ แท่งปุ๋ยที่มีขนาดใหญ่ (6 mm) จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสมบูรณ์มากกว่าการอัดปุ๋ยที่มีขนาดเล็ก (4 mm) ซึ่งสอดคล้องกับส่วนผสมน้ำที่ 10% และ 30% นั่นเป็นเพราะผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่แตกหักได้ยากกว่าขนาดเล็กโดยสามารถสังเกตได้จากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้รูป (Broken pieces) มีค่าน้อยมากที่สุดที่ 8.7% เทียบกับ 22% และ 12% เทียบกับ 31% (Table 2) สำหรับอัตราส่วนการผสมน้ำที่ 20% และ 30% ตามลำดับ ในส่วนของการผสมน้ำที่ 30% ให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจ คือได้ผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ (Perfect pieces) ต่ำ

3.3 Universal Testing Machine (UTM)

จากผลการทดสอบความแข็งแรงของแท่งปุ๋ยด้วยเครื่อง UTM ค่าที่ได้จากตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละเงื่อนไขแสดงเป็นค่าแรงเฉลี่ย (Average force, kg) (Figure 5) จะเห็นได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งปุ๋ยมีความสำคัญอย่างมากกับการทนต่อแรงกดของปุ๋ยแท่ง เส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดใหญ่กว่าย่อมมีความแข็งแรงมากกว่าดังแสดงในผลการทดลองคือ ปุ๋ยแท่งขนาด 6 mm สามารถรับแรงได้ในช่วง 14 ถึง 22 kg มากกว่าปุ๋ยแท่งขนาด 4

mm ซึ่งรับแรงได้ 3 ถึง 10 kg ในทุกเงื่อนไข (Figure 5) สำหรับแท่งปุ๋ยที่ 4 mm เมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมน้ำจาก 10% เป็น 30% พบว่าสามารถรับแรงได้น้อยลงตามลำดับ

การผสมน้ำที่ 10% ทำให้แท่งปุ๋ยสามารถรับแรงเฉลี่ยได้สูงสุด (21.5 kg) ที่ความยาว 23 mm และพบว่าผลการผสมน้ำที่ 10% และ 30% ให้ผลในลักษณะเดียวกันคือ เมื่อทดสอบที่ความยาวมากขึ้นจะทำให้ทนต่อแรงกดน้อยลง เช่น สำหรับการผสมน้ำ 10% ที่ขนาด 4 mm พบว่าความสามารถรับแรงกดได้น้อยลงถึง 34% เมื่อเพิ่มความยาวจาก 23 เป็น 30 mm จากการทดลองยังพบว่าปุ๋ยที่ผลิตที่อัตราส่วนการผสมน้ำ 20% สามารถรับแรงใกล้เคียงกัน (ระหว่าง 20 ถึง 20.8 kg) โดยไม่ขึ้นกับความยาวของผลิตภัณฑ์ซึ่งแตกต่างกับการผสมน้ำที่อัตราส่วนอื่น

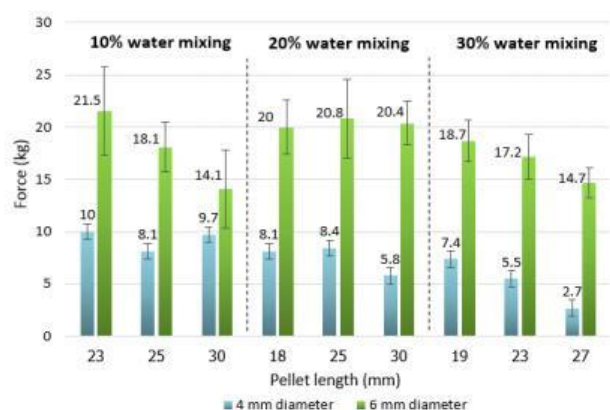


Figure 5 Average force tested on the various sizes and conditions of fertilizer pellet before breaking.

3.4 ความหนาแน่นของปุ๋ยอัดแท่ง

การคำนวณหาความหนาแน่นของปุ๋ยอัดแท่ง (Single particle density) สามารถหาได้จากอัตราส่วนของน้ำหนักของปุ๋ยหนึ่งชิ้นต่อปริมาตร (ทรงกระบอก) ของปุ๋ยชิ้นนั้น จาก Figure 6 ความหนาแน่นของปุ๋ยอัดแท่งมีค่าสูงสุดที่ส่วนผสมน้ำ 10% และขนาด 4 mm ที่ความยาว 23 mm อยู่ที่ประมาณ 1600 kg m⁻³ โดยความหนาแน่นของปุ๋ยแท่งมีค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างชัดเจนเมื่อเทียบกับขนาด 6 mm เมื่อแท่งปุ๋ยมีขนาดยาวขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง ซึ่งสามารถพบได้ในส่วนผสมของน้ำที่ 10% และ 20% และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสองแบบ โดยภาพรวมของความหนาแน่นของปุ๋ยที่ผลิตจากการผสมน้ำ 10% ของน้ำหนักทั้งหมดของวัตถุดิบตั้งต้นจะอยู่ที่ 1200 ถึง 1600 kg m⁻³

เมื่อพิจารณาจากการผสมน้ำ 20% พบว่าแท่งปุ๋ยที่ได้มีค่าความหนาแน่นที่ต่ำกว่าแท่งปุ๋ยที่ผลิตโดยใช้ส่วนผสมน้ำ 10% แต่มากกว่าปุ๋ยที่ผลิตจากส่วนผสมน้ำ 30% อย่างไรก็ตามสำหรับการผสมน้ำที่ 20% และ 30% พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปุ๋ยแท่ง (4 mm และ 6 mm) มีผลกระทบต่อความหนาแน่นน้อย จึงให้ค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นความยาวที่แตกต่างกันของปุ๋ยที่ผลิตโดยการผสมน้ำในสัดส่วน 20% นี้มีผลต่อความ

หนาแน่นน้อยมาก โดยในภาพรวมปุ๋ยในเงื่อนไขนี้มีความหนาแน่นอยู่ที่ 1200 ถึง 1400 kg m⁻³

สำหรับการผสมน้ำที่ 30% ค่าความหนาแน่นของปุ๋ยไม่มีความแตกต่างกันมากซึ่งหมายความว่าปริมาณน้ำที่ผสมเข้าไปมีผลกระทบต่อความหนาแน่นของปุ๋ยมากกว่าเงื่อนไขในด้านขนาดของปุ๋ย หากผสมน้ำในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ความหนาแน่นของปุ๋ยลดลง ความหนาแน่นของปุ๋ยที่ผลิตโดยการผสมน้ำ 30% จะอยู่ที่ประมาณ 1000 ถึง 1100 kg m⁻³

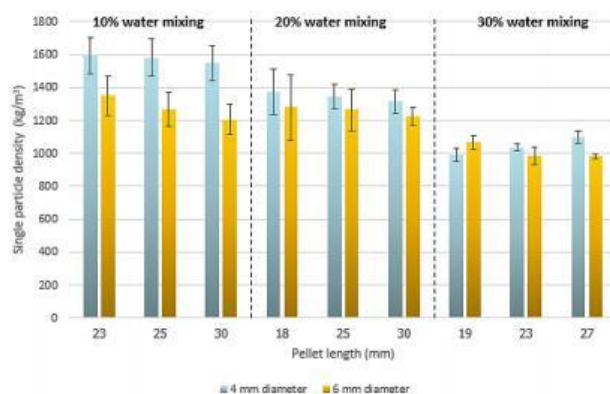


Figure 6 Single particle density of fertilizer pellet at various size and conditions.

ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของแท่งปุ๋ย ผลการคำนวณค่าความหนาแน่นสอดคล้องกับการทดสอบ UTM ในผลิตภัณฑ์ปุ๋ยที่ผสมน้ำ 10% และมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวที่ 6 และ 23 mm ตามลำดับคือ เมื่อเทียบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกัน มีความหนาแน่นสูงสุด (1351 kg m⁻³) และสามารถรับแรงได้สูงสุด (21.5 kg) เช่นเดียวกัน ในกรณีที่มีส่วนผสมน้ำ 10% ผลิตภัณฑ์จะมีความหนาแน่นลดลงเมื่อเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ในส่วนของปุ๋ยที่ผสมน้ำที่ 20% และ 30% เมื่อความยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้สามารถรับแรงได้น้อยลงถึงแม้ว่าจะมีความหนาแน่นใกล้เคียงเดิมนอกจากนั้นยังพบว่าค่าความหนาแน่นของปุ๋ยที่มีส่วนผสมของน้ำ 20% มีค่าค่อนข้างคงที่เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับแรงเฉลี่ยที่ปุ๋ยชนิดนี้สามารถรับได้ในความยาวที่ต่างกัน

4 สรุป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะนำวัตถุดิบที่ไม่เป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลมาให้เกิดประโยชน์สูงสุดคือการนำกากหม้อกรองมาผลิตเป็นปุ๋ยแท่งเพื่อให้เกษตรกรเคลื่อนย้ายและการใช้งานต่อไป การทดลองหาส่วนผสมที่เหมาะสมด้วยการผสมน้ำที่ 10%, 20% และ 30% ของวัตถุดิบโดยมวล และทำการอัดแท่งปุ๋ยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาดคือ 4 และ 6 mm และทดสอบความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ปุ๋ย พบว่า ปุ๋ยที่ผลิตที่ส่วนผสมของน้ำ 10% ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ให้ผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์มากที่สุดถึง 30% สามารถรับแรงได้สูงที่

ประมาณ 21.5 kg สำหรับความยาวของปุ๋ยแท่งที่ 23 mm โดยมี
ความหนาแน่นอยู่ที่ 1351 kg m^{-3} ตามลำดับ

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงงานน้ำตาลเอราวัณที่ได้อนุญาตให้ใช้กากหม้อ
กรองเพื่อใช้ในการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ ดร. มะลิวัลย์ หฤทัย
นาสันดี สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและ
อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้อนุญาตให้
ใช้อัดแท่งปุ๋ยแบบหัวอัดแนวราบสำหรับดำเนินการทดลอง

6 เอกสารอ้างอิง

- Chetthamrongchai, P., Auansakul, A., Supawan, D. 2001.
Assessing the transportation problems of the sugar
cane industry in Thailand. Transport and
Communications Bulletin for Asia and the Pacific
70, 31-39.
- Nikiema, J., Cofie, O., Impraim, R., Adamtey, N. 2013.
Processing of fecal sludge to fertilizer pellets using
a low-cost technology in Ghana. Environment and
Pollution 2, 70-87.
- Prado, R.d.M., Caione, G., Campos, C.N.S. 2013. Filter
cake and vinasse as fertilizers contributing to
conservation agriculture. Applied and
Environmental Soil Science 2013, 1-8.
- Stelte, W., Sanadi, A.R., Shang, L., Holm, J.K.,
Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B. 2012. Recent
developments in biomass pelletization—A review.
BioResources 7, 4451-4490.
- Yancey, N.A., Tumuluru, J.S., Wright, C.T. 2013. Drying,
grinding and pelletization studies on raw and
formulated biomass feedstock's for bioenergy
applications. Journal of Biobased Materials and
Bioenergy 7, 549-558.



การศึกษากลศาสตร์แม่น้ำในแม่น้ำป่าสักตอนล่างด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์

A Study of River Mechanics in Lower Pasak River by Mathematical Model

วิษุวัต แท้สมบัติ^{1*}Wisuwat Taesombat^{1*}

¹ห้องปฏิบัติการวิจัยการจำลองระบบทรัพยากรน้ำด้วยคอมพิวเตอร์และระบบสารสนเทศ, ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

¹Research Laboratory of Water Resources Computer Modeling and Information System, Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

*Corresponding author: Tel: +66-86-383-3289, E-mail: fengwwt@ku.ac.th

บทคัดย่อ

แม่น้ำป่าสักตอนล่างตั้งแต่ช่วงท้ายเขื่อนพระรามหกจนถึงจุดบรรจบแม่น้ำเจ้าพระยาได้ถูกคัดเลือกมาใช้ในการศึกษากลศาสตร์แม่น้ำร่วมกับการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE11 ข้อมูลรูปตัดขวางของแม่น้ำป่าสักและเจ้าพระยาได้ถูกสำรวจในระหว่างปี พ.ศ. 2556-2558 ในช่วงระยะห่างทุกๆ 50 m การเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง MIKE11 ได้ดำเนินการโดยใช้ข้อมูลในช่วงปี พ.ศ. 2555-2556 ผลที่ได้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระในแม่น้ำป่าสักอยู่ในช่วง 0.023 – 0.026 ซึ่งทำให้ค่าดัชนีทางสถิติ R^2 และค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.85 และ 0.62 m ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หลังจากนั้นจึงนำแบบจำลอง MIKE11 ที่ผ่านการเปรียบเทียบไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งในช่วงน้ำน้อยจากวิเคราะห์ความลึกน้ำต่ำสุดในช่วงปี พ.ศ. 2550 - 2556 พบว่า มีความลึกที่ต่ำกว่า 4.9 m อยู่มากบริเวณช่วงต้นน้ำตั้งแต่ ช่วงกม.ที่ 30+000 ขึ้นไปจนถึง กม.ที่ 51+900 ส่วนการไหลเต็มหลังจากการวิเคราะห์ความจุลำนํ้ากลับพบว่า บริเวณช่วงท้ายน้ำของแม่น้ำป่าสัก ตั้งแต่ ช่วงกม. ที่ 10+000 ถึง กม. ที่ 30+000 มีความจุลำนํ้าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 517.64 - 630.17 $m^3 s^{-1}$ ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั้งแม่น้ำป่าสักตอนล่างที่มีค่าเท่ากับ 811.19 $m^3 s^{-1}$ อยู่มาก ดังนั้น การประเมินประสิทธิภาพการไหลทั้งช่วงน้ำต่ำและช่วงน้ำสูง จึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยทางด้านกลศาสตร์แม่น้ำที่เกี่ยวข้องอันได้แก่ ความลึกของน้ำ ความกว้างของลำน้ำ และความจุลำนํ้า เพื่อใช้เป็นแนวทางประกอบในการบริหารจัดการน้ำของหน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้อง

คำสำคัญ: กลศาสตร์แม่น้ำ, แม่น้ำป่าสักตอนล่าง, แบบจำลองคณิตศาสตร์

Abstract

Lower Pasak River between downstream portion of Rama VI Dam and ChaoPhraya junction was selected for river mechanics study in conjugate with an application of MIKE11 model. Both of Pasak and ChaoPhraya river cross section data were surveyed in the period of 2013 - 2015 in form of 50 m spacing. The model calibration and verification of MIKE11 was carried out with the data in the period of 2012 - 2013. It found that roughness coefficient along Pasak river has a range between 0.023 – 0.026 which was acceptable with the statistical index of R^2 and RMSE equal to 0.85 and 0.62 m respectively. The calibrated MIKE11 was then applied to analyst the low flow period by calculating the lowest depths in the period of 2007-2013. The result showed that there were almost water depths below 4.9 m were located nearby upstream portion of lower Pasak River from KM. 30+000 to KM. 51+900. However, the full river bank analyzed from the river capacity illustrated that downstream portion of lower Pasak River from KM. 10+000 to KM. 30+000 has an average capacity in the range of 517.64 - 630.17 $m^3 s^{-1}$ and was much lower than the overall average with 811.19 $m^3 s^{-1}$. Consequently, the determination of flow efficiency in both of low flow and high flow periods should consider the factors related to the river mechanics including water depth, river width, and river capacity in order to guideline as a basis for water management of government agencies involved.

Keywords: River Mechanics, Lower Pasak River, Mathematical Model

1 บทนำ

แม่น้ำป่าสักตั้งอยู่ในเขตภาคกลางของประเทศไทยมีต้นกำเนิดมาจากเทือกเขาเพชรบูรณ์ไหลจากทิศเหนือลงทิศใต้ผ่านจังหวัดเพชรบูรณ์ ลพบุรี และสระบุรี จนมาบรรจบกับแม่น้ำเจ้าพระยาที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ปัญหาการตัดไม้ทำลายป่าและการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในลุ่มน้ำ เมื่อเกิดฝนตกหนักมักจะก่อให้เกิดการพัดพาตะกอนดินจากพื้นที่ตอนบนของลุ่มน้ำลงมายังพื้นที่ตอนล่างในปริมาณที่มาก เนื่องจากดินขาดสิ่งปกคลุมทำให้ลำน้ำตอนล่างเกิดการตื้นเขินและมีความจุลำนํ้าลดลง อย่างไรก็ตามสภาพปัญหาอุทกภัยตามแนวริมแม่น้ำป่าสักลดลงเป็นอย่างมาก ภายหลังจากมีเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ในปี พ.ศ. 2541 ยกเว้นบริเวณด้านท้ายน้ำของเขื่อนฯ จนถึงจุดบรรจบระหว่างแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำป่าสัก บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยาซึ่งสภาพของแม่น้ำป่าสักในช่วงค่อนข้างแคบ และคดเคี้ยวทำให้มีความสามารถในการระบายน้ำต่ำ ซึ่งจะเกิดปัญหาน้ำเอ่อท่วม และการตกสะสมของตะกอนภายในลำน้ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้และเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้พื้นที่หน้าตัดลำน้ำลดลง เป็นผลให้การระบายน้ำลดลงอีกด้วย

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเตรียมการเพื่อรับมือกับปัญหาดังกล่าว ซึ่งต้องใช้ความรู้ความเข้าใจทางด้านอุทกนิเวศวิทยา อุทกวิทยา อุทกพลศาสตร์ และกลศาสตร์แม่น้ำ ตลอดจนสภาพทางกายภาพของแม่น้ำร่วมกับเทคนิควิธีวิจัยด้วยเครื่องมือที่ทันสมัย ซึ่งได้แก่ แบบจำลองคณิตศาสตร์ และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการจำลองการไหลของน้ำเพื่อให้เข้าใจถึงสภาพลำน้ำในปัจจุบันและหาแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป สำหรับบทความนี้จะเน้นไปในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษากลศาสตร์แม่น้ำโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งยังมีการศึกษาไม่มากนัก

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองการไหลหนึ่งมิติของการไหลของน้ำและตะกอนในทางน้ำเปิดจะตั้งอยู่บนพื้นฐานของการได้รับอิทธิพลทั้งจากการไหลของน้ำและการเคลื่อนตัวของตะกอนซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณด้านล่างของรูปตัดลำน้ำ สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของน้ำและตะกอนจะมีความคล้ายคลึงกล่าวคือสมการความต่อเนื่องของการไหลของน้ำและความเร็วในการเคลื่อนตัวของอนุภาคในลำน้ำ และสมการทรงมวลระหว่างพลังงานจลศาสตร์และการเคลื่อนตัวของอนุภาค ซึ่งต้องใช้การคำนวณร่วมกันของคุณลักษณะเฉพาะทางชลศาสตร์ของลำน้ำและอัตราการเคลื่อนตัวของตะกอน (Shmakova and Kondrat'ev, 2008) นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการศึกษากระบวนการก่อตัวของการไหลในลำน้ำซึ่งสามารถใช้แบบจำลองดังกล่าววิเคราะห์ได้ทั้งการเปลี่ยนแปลงตามสถานที่และเวลาทั้งในกรณีการไหลของน้ำและตะกอนในระบบแม่น้ำซึ่งมีความซับซ้อนโดยข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ประกอบไปด้วยข้อมูลลักษณะทางกายภาพของลำ

น้ำ การเก็บกักในทุ่งน้ำท่วม และสิ่งปกคลุมลำน้ำ เป็นต้น (Shlychkov, 2009)

โดยจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า Yu et al. (2013) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสภาพการไหลของน้ำและตะกอนในแม่น้ำ Yellow ตอนล่าง ภายหลังจากการสร้างเขื่อน Xiaolangdi ในปี ค.ศ. 2001 ได้ดำเนินการเก็บข้อมูลภาคสนามของปริมาณการไหลและปริมาณตะกอนที่สถานีวัดน้ำและการสำรวจรูปตัดลำน้ำในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 2001 – 2010 ผลที่ได้พบว่า แม่น้ำอยู่ในสถานะเกิดการกัดเซาะเล็กน้อย และผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองสองมิติพบว่า แม่น้ำมีปริมาตรน้ำรายปีประมาณ $19,600 \times 10^6 \text{ m}^3$ และมีปริมาตรตะกอนรายปีเท่ากับ $140-170 \times 10^6 \text{ ton}$ และมีความเข้มข้นของตะกอนหยาบประมาณ 3 kg m^{-3} และการศึกษาของ Han et al. (2013) ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองการไหลและตะกอนหนึ่งมิติในแม่น้ำ Jingjiang และทะเลสาบ Dongting ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ Three Gorges ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้จริง โดยเฉพาะค่าของปริมาณของตะกอนแขวนลอย อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองฯ นั้นจะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้แบบจำลองย่อยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ปริมาณแขวนลอยด้วย โดยถ้าใช้ต่างกันจะให้ได้ความแตกต่างกันไป

โดยในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ได้คัดเลือกพื้นที่ศึกษาเป็นแม่น้ำป่าสักตอนล่างตั้งแต่ช่วงท้ายเขื่อนพระราม 6 จนถึงจุดบรรจบแม่น้ำเจ้าพระยา รวมระยะทางประมาณ 51.9 km ดังแสดงพื้นที่ศึกษาใน Figure 1 และคัดเลือกแบบจำลอง MIKE11-HD มาใช้ในการศึกษาค้นคว้าเพื่อศึกษาวิเคราะห์กลศาสตร์แม่น้ำด้วยการจัดสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE11 ทั้งการไหลระดับต่ำ (Low flow) จากการวิเคราะห์ความลึกน้ำต่ำสุดในแต่ละจุดในแม่น้ำป่าสัก และการไหลเต็มตลิ่งซึ่งวิเคราะห์ได้จากความจุลำนํ้าของแม่น้ำป่าสักตั้งแต่ด้านท้ายน้ำของเขื่อนพระรามหกจนถึงจุดบรรจบแม่น้ำเจ้าพระยา

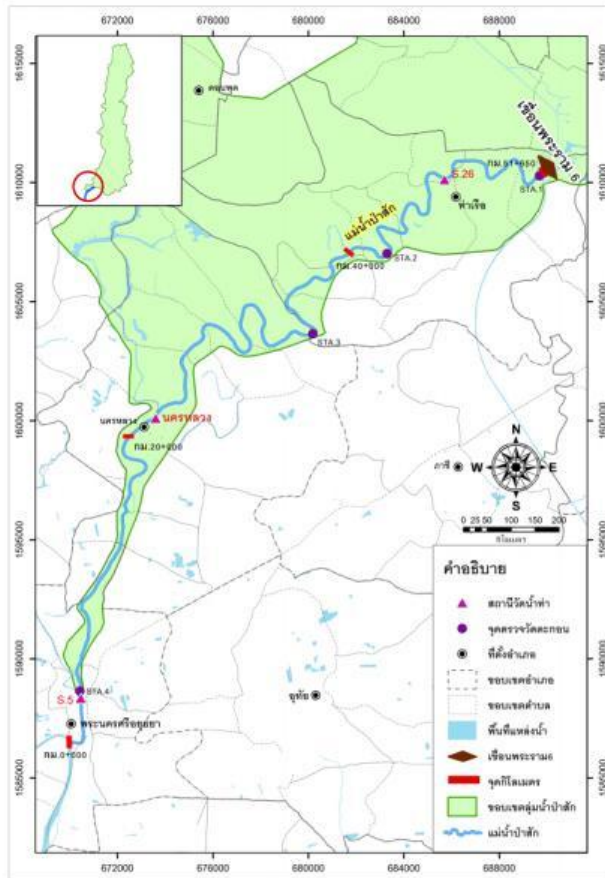


Figure 1 Study area in lower Pasak River.

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

2.1.1 หลักการของกลศาสตร์การทำงานของแม่น้ำ

ลักษณะการวางตัวของแม่น้ำจะแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ แม่น้ำแบบตรง (Straight river) แม่น้ำแบบโค้งตัว (Meander river) และแม่น้ำแบบธารประสานสาย (Braided river) แม่น้ำในธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีความโค้ง โดยค่าที่ใช้บอกความโค้งของแม่น้ำคือ ดัชนีความคดเคี้ยว (Sinuosity index) ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนระหว่างความยาวจริงของแม่น้ำ (L_m) ต่อระยะทางตรงที่แม่น้ำจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดสิ้นสุดไหลผ่าน (S) ซึ่งแม่น้ำที่จัดเป็นแม่น้ำแบบตรงจะมีดัชนีความคดเคี้ยวเท่ากับ 1.0 ส่วนแม่น้ำแบบคดเคี้ยวไม่มาก จะมีค่าดัชนีอยู่ระหว่าง 1.0 - 1.5 และแม่น้ำแบบโค้งตัว จะมีค่าดัชนีมากกว่า 1.5 ดังแสดงใน Figure 2

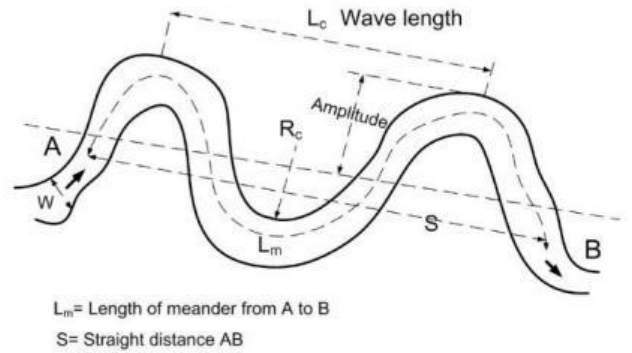


Figure 2 Required variables used in analyzing the sinuosity index (Khatsuria, 2010).

โดยธรรมชาติแล้ว ความเร็วและอัตราการไหลของน้ำในแม่น้ำจะสัมพันธ์กับความลึก โดยร่องน้ำที่ลึกมากที่สุดจะมีความเร็วการไหลมากที่สุด ในทางทฤษฎีแม่น้ำสายตรงที่มีรูปร่างท้องน้ำแบบสมมาตร (Symmetry) บริเวณที่มีค่าความเร็วของการไหลของน้ำมากที่สุดจะอยู่ตรงกลางร่องน้ำหรือกลางแม่น้ำ และความเร็วนี้จะลดลงไปทางตลิ่งทั้งสองข้าง แต่โดยธรรมชาติแล้วการย้ายตำแหน่งร่องน้ำลึกเกิดขึ้นได้เป็นปกติ ซึ่งการย้ายตำแหน่งมักถูกควบคุมโดยสภาพธรณีวิทยาที่แม่น้ำหรือร่องน้ำไหลผ่าน แม่น้ำสายเดียวกันอาจไหลผ่านชั้นหินซึ่งมีหรือไม่มีชั้นตะกอนบาง ๆ แต่บางตอนก็ไหลผ่านชั้นตะกอน โดยพบว่าแม่น้ำที่ไหลผ่านชั้นตะกอนจะราบเรียบกว่าช่วงที่ผ่านชั้นหิน ในกรณีที่มีการย้ายตำแหน่งร่องน้ำลึกความเร็วและอัตราการไหลจะย้ายตามไปด้วย โดยเมื่อลากเส้นเชื่อมต่องร่องน้ำลึก (Thalweg) ก็จะไม่อยู่ที่กึ่งกลางความกว้างของแม่น้ำตลอดเวลา แต่จะเคลื่อนย้ายตำแหน่งจากฝั่งหนึ่งของแม่น้ำไปอีกฝั่งหนึ่งตลอดเวลาทำให้เกิดการโค้งตัวดังแสดงใน Figure 3

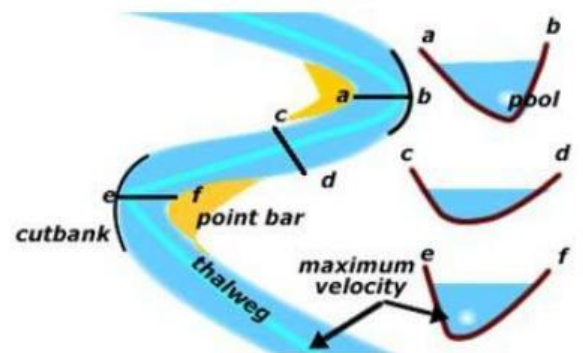


Figure 3 The relationship between the discharge velocity and the thalweg (USGS, 2015).

2.1.2 ทฤษฎีของแบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE11-HD

หลักการสำคัญในการคำนวณทางชลศาสตร์ของการไหลในลำน้ำมีทฤษฎีที่สำคัญ คือ 1) กฎทรงมวล โดยยึดหลักว่าด้วยการไม่สูญเสียหรือหายไปของมวลน้ำ และ 2) กฎของแรงกระทำ โดยหากมีแรงกระทำที่ไม่สมดุลจะก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \left(g \frac{A}{B} - \frac{Q^2}{A^2} \right) \frac{\partial A}{\partial x} + gA (S_f - S_0) = 0 \quad (2)$$

เมื่อ

- Q = ปริมาณการไหล ($m^3 s^{-1}$)
- A = พื้นที่หน้าตัดลำน้ำของจุดที่คำนวณการไหล (m^2)
- t = เวลา (s)
- x = ระยะทาง (m)
- B = ความกว้างของลำน้ำ (m)
- g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ($m s^{-2}$)
- S_f = ความเสียดทานลำน้ำ
- S_0 = ความลาดเอียงของท้องน้ำ

สมการทั้ง 2 ข้างต้นเป็นแบบ Non-linear Second Order Partial Differential Equation ที่ไม่สามารถแก้สมการได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical analysis) และ Finite Difference Method ในการพิสูจน์สมการนี้แทนโดยเลือกค่า Time step ในการคำนวณที่เหมาะสมเพื่อให้แบบจำลองมีเสถียรภาพ (Stability) พบว่า การตั้งค่า Time step ขนาดเล็กมากเท่าใด ยิ่งส่งผลให้แบบจำลองมีเสถียรภาพมากขึ้นเท่านั้น แต่จะใช้เวลาในการคำนวณนานมากขึ้นด้วยเช่นกัน

2.2 ขั้นตอนการศึกษา

วิธีการศึกษาในการสร้างแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ MIKE11 (Figure 4) ประกอบด้วย การรวบรวมข้อมูลพื้นฐานทางชลศาสตร์ การจัดทำแบบจำลอง การปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ก่อนจะนำแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์กลศาสตร์แม่น้ำทั้งการไหลระดับต่ำจากการวิเคราะห์ความลึกน้ำต่ำสุดในแต่ละจุดในแม่น้ำป่าสักตลอดจนการไหลเต็มตลิ่งซึ่งวิเคราะห์ได้จากความจุลำน้ำของแม่น้ำป่าสักตั้งแต่ด้านท้ายน้ำของเขื่อนพระรามหกจนถึงจุดบรรจบแม่น้ำเจ้าพระยา

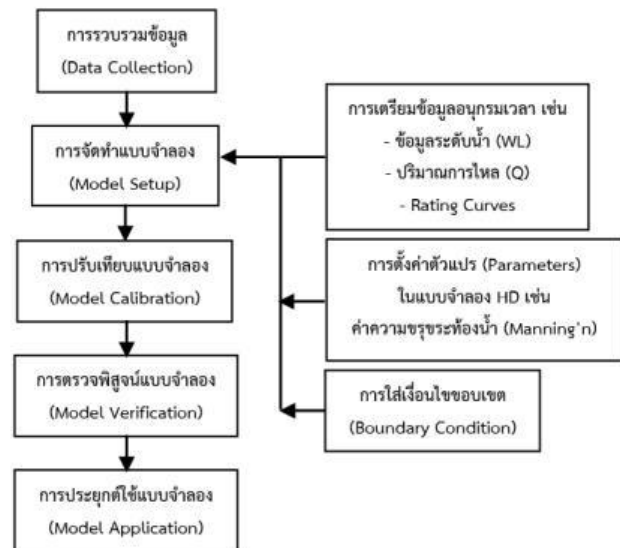


Figure 4 The methodology of MIKE11-hydrodynamic model application.

แต่ละขั้นตอนสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1) การจัดทำแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ MIKE11

เริ่มจากการสำรวจข้อมูลร่องน้ำและแนวตลิ่งของแม่น้ำป่าสักและแม่น้ำเจ้าพระยาในพื้นที่ศึกษาช่วงระหว่างเดือนธันวาคม 2556 จนถึงเดือนมกราคม 2558 โดยแม่น้ำป่าสักเริ่มตั้งแต่ท้ายเขื่อนพระรามหกถึงจุดบรรจบแม่น้ำเจ้าพระยา จำนวน 1,039 รูปตัด เป็นระยะทางรวมทั้งสิ้น 51.9 km และแม่น้ำเจ้าพระยาเริ่มจากท้ายสถานี C.35 ถึงจุดบรรจบแม่น้ำป่าสัก จำนวน 177 รูปตัด เป็นระยะทางรวมทั้งสิ้น 8.8 km โดยทั้งสองแม่น้ำมีระยะห่างระหว่างรูปตัดประมาณทุกๆ 50 m ต่อมาได้นำเข้าข้อมูลรูปตัดลำน้ำเข้าสู่ฐานข้อมูลของแบบจำลอง MIKE11 พร้อมทั้งได้แสดงแผนที่ระบบแม่น้ำที่สร้างในแบบจำลองฯ ใน Figure 5

2) การปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ MIKE11

การปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ MIKE11 นั้นมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับเทียบฯ เพียงตัวเดียวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระลำน้ำ หรือ Manning's n ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ Manning'n จะแสดงถึงความเสียดทานต่อการไหลของน้ำในทางน้ำเปิด โดยค่า Manning'n ในทางน้ำเปิดของทางน้ำธรรมชาติโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 - 0.05 และค่า Manning'n ในคลองส่งน้ำลาดคอนกรีตจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.013 - 0.015 สำหรับการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองฯ ในแม่น้ำป่าสักตอนล่างแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) การปรับเทียบฯ โดยใช้การไหลแบบ Steady state และ 2) การปรับเทียบฯ โดยใช้ข้อมูลเหตุการณ์ในอดีต (Historical event)

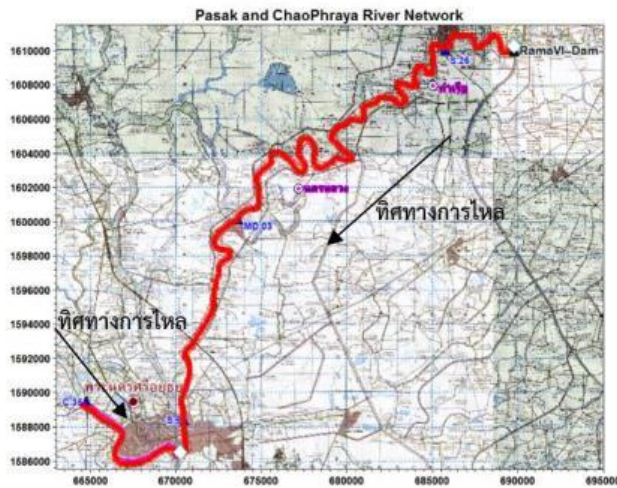


Figure 5 The positions of river cross section in MIKE11 model database.

2.1) การปรับเทียบแบบจำลองฯโดยใช้การไหลแบบ Steady state

การปรับเทียบแบบจำลอง MIKE11โดยใช้การไหลแบบ Steady state จะดำเนินการโดยพิจารณาที่สถานีวัดน้ำท่าที่ตั้งอยู่ในลำน้ำสายหลัก และมีรูปตัดตรงกับรูปตัดที่อยู่ในแบบจำลอง MIKE11 ซึ่งจากการพิจารณาพบว่าสถานีวัดน้ำท่าในแม่น้ำป่าสัก จำนวน 2 สถานี คือ สถานีวัดน้ำท่า S.26 และ S.5 ของกรมชลประทาน และในแม่น้ำเจ้าพระยา จำนวน 1 สถานี คือ สถานีวัดน้ำท่า C.35 ของกรมชลประทาน โดยกำหนดให้รูปตัดแรกอยู่ที่บริเวณด้านท้ายน้ำของเขื่อนพระรามหก เป็นขอบเขตด้านเหนือของแบบจำลองในแม่น้ำป่าสัก และรูปตัดบริเวณสถานี C.35 เป็นขอบเขตด้านเหนือของแบบจำลองในแม่น้ำเจ้าพระยา ส่วนขอบเขตด้านท้ายน้ำของแบบจำลองใช้ข้อมูลโค้งความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับปริมาณการไหล (Rating curves) ที่สถานี C.29A โดยข้อมูลที่ใช้และขั้นตอนในการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง MIKE11มีดังนี้

(1) ทำการวิเคราะห์หา Rating curves ตัวแทนของสถานีวัดน้ำท่าทั้งสามสถานี (S.26, S.5 และ C.29A) ซึ่งได้จากการรวบรวมข้อมูลผลการสำรวจโค้งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลและระดับน้ำ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2550 ถึงปี พ.ศ. 2556

(2) สมมติค่าปริมาณการไหลที่ขอบเขตด้านเหนือ (Upper boundary) ให้มีค่าคงที่ (Steady state) ซึ่งมีขนาดเท่ากับปริมาณการไหลสูงสุดเท่ากับปริมาณน้ำนองสูงสุดของลำน้ำ ในแม่น้ำป่าสัก ใช้ช่วงระหว่าง $5-2,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ และในแม่น้ำเจ้าพระยา ใช้ช่วงระหว่าง $5-3,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

(3) นำค่าระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองฯ และปริมาณการไหลที่สัมพันธ์กันไปพล็อตลงใน Rating curves เพื่อเปรียบเทียบกับ Rating curves ที่ได้จากการสำรวจฯ โดยจะปรับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning number) ทั้งในลำน้ำ (Channel) และทุ่งน้ำท่วม (Flood plain) โดยทดลองแบบ

Trial and Error เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ Manning's n ที่เหมาะสม จนกว่าจะทำให้ค่าระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองฯ เข้ากันได้ดีกับ Rating curves ที่ตรวจวัดจริง จึงจะเป็นผลที่ยอมรับได้

2.2) การปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองฯโดยใช้ข้อมูลเหตุการณ์ในอดีต (Historical event)

หลังจากได้ทำการปรับเทียบแบบจำลอง MIKE11โดยใช้การไหลแบบ Steady state ไปแล้ว จึงได้นำแบบจำลองดังกล่าวมาใช้ปรับเทียบกับเหตุการณ์ในอดีต (Historical event) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระลำน้ำที่ปรับเทียบมาได้ โดยพิจารณาในช่วงที่มีข้อมูลค่อนข้างใกล้เคียงกับข้อมูลรูปตัดลำน้ำที่สำรวจมาซึ่งได้แก่ เหตุการณ์ช่วงระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2555 ถึงวันที่ 31 มีนาคม 2556 เป็นช่วงการปรับเทียบแบบจำลองฯ และเหตุการณ์ช่วงระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2556 ถึงวันที่ 31 มีนาคม 2557 เป็นช่วงการตรวจพิสูจน์แบบจำลองฯ โดยแม่น้ำป่าสักกำหนดขอบเขตด้านเหนือน้ำเป็นปริมาณการไหลรายวันที่สถานี S.26 ที่อำเภอท่าเรือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยาและแม่น้ำเจ้าพระยากำหนดขอบเขตด้านเหนือน้ำเป็นปริมาณการไหลรายวันที่สถานี C.35 และขอบเขตด้านท้ายน้ำ คือ Rating curves ที่สถานี C.29A ส่วนการไหลเข้าด้านข้าง (Lateral flow) จะได้จากการคำนวณย้อนกลับของข้อมูลการตรวจวัดที่สถานี S.26 และสถานี S.5

การพิจารณาผลการปรับเทียบฯ จะใช้ค่าระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองฯ มาเปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ตรวจวัดได้จริงที่สถานีนครหลวงของกรมเจ้าท่า ซึ่งตั้งอยู่ที่ กม.16+650 จากปากแม่น้ำป่าสัก โดยกำหนดค่าดัชนีทางสถิติในการพิจารณา 2 ดัชนี ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า Root Mean Square Error (RMSE) โดยค่า R^2 ต้องมีค่ามากกว่า 0.6 และค่า RMSE ต้องมีค่าน้อยที่สุด จึงจะเป็นที่ยอมรับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระลำน้ำที่ได้

3) การวิเคราะห์ความลึกน้ำต่ำสุดในแต่ละจุดในแม่น้ำป่าสัก

หลังจากได้แบบจำลองที่ผ่านการปรับเทียบฯแล้ว จะถูกนำมาใช้ในการหาความลึกน้ำต่ำสุดในแต่ละจุดในแม่น้ำป่าสักด้วยการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์แม่น้ำเพื่อประสิทธิภาพการไหลในช่วงน้ำต่ำในแต่ละช่วงลำน้ำของแม่น้ำป่าสัก โดยค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองฯ จะเป็นความลึกน้ำต่ำสุดในแต่ละรูปตัดในทุกๆ 50 m จำนวนทั้งสิ้น 1,039 รูปตัด สำหรับแบบจำลองฯ ได้ถูกจัดเตรียมโดยเลือกใช้ข้อมูลนำเข้าย้อนหลัง 7 ปีหลังสุดตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2550 จนถึงวันที่ 31 มีนาคม 2557 เพื่อวิเคราะห์หาค่าความลึกน้ำต่ำสุดเพียงค่าเดียวในแต่ละรูปตัดในรอบ 7 ปีหลังสุด

4) การวิเคราะห์ความจุลำน้ำของแม่น้ำป่าสัก

การวิเคราะห์ความจุของแม่น้ำป่าสักโดยได้นำแบบจำลองดังกล่าวมาประยุกต์ใช้โดยพิจารณาแบ่งช่วงลำน้ำออกเป็น 6 ช่วงๆ ละ 10 km โดยกำหนดให้แบบจำลองทำการวิเคราะห์

อัตราการไหลในแต่ละรูปตัดขวางลำน้ำเมื่อมีระดับน้ำสูงเท่ากับค่าระดับตลิ่งตัวแทนที่ต่ำกว่าระหว่างค่าระดับของตลิ่งฝั่งซ้ายหรือตลิ่งฝั่งขวา เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการไหลแบบน้ำเต็มตลิ่ง

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองฯ จากการสมมุติให้มีการไหลแบบ Steady state

ได้แสดงผลในรูป Rating curves สำหรับสถานีวัดน้ำท่าทั้งสองแห่งในแม่น้ำป่าสักใน Figure 6 ถึง Figure 7 ตามลำดับ ซึ่ง

Table 1 Calibrated Manning'n roughness by MIKE11 model.

River Name	River Portion	Manning'n
River channel of Pasak	Start from the downstream portion of Rama VI Dam to the confluence of Chao Phraya river	0.023 – 0.026
Flood plain of Pasak		0.053
River channel of Chao Phraya	Start from C.35 Runoff Station to the confluence of Pasak river	0.033
Flood plain of Chao Phraya		0.067

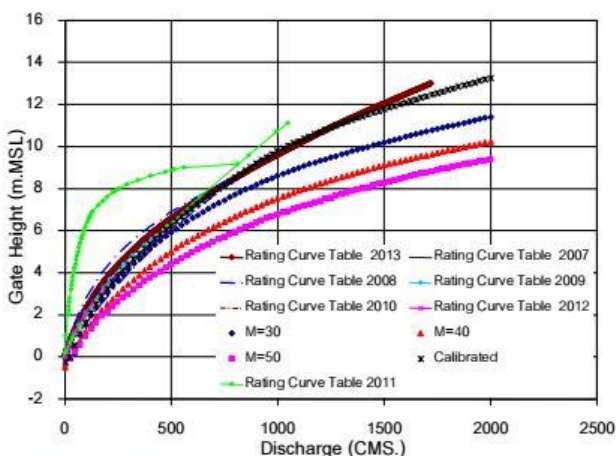


Figure 6 The result of calibration of MIKE11 model in Pasak River by rating curves at S.26.

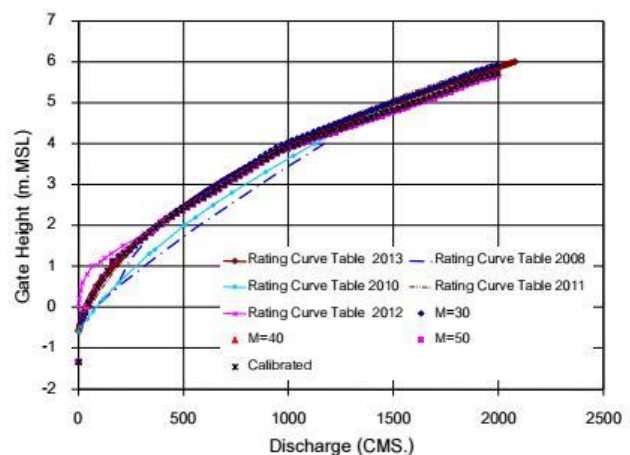


Figure 7 The result of calibration of MIKE11 model in Pasak River by rating curves at S.5.

3.2 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองฯ โดยใช้ข้อมูลเหตุการณ์ในอดีต (Historical event)

ผลการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองฯ ของเหตุการณ์ช่วงระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2555 ถึงวันที่ 31 มีนาคม 2556 และช่วงระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2556 ถึงวันที่ 31 มีนาคม 2557 พบว่า ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.85 และ 0.89

ตามลำดับส่วนค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.62 และ 0.41m ซึ่งผ่านเกณฑ์การเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองฯ และสามารถนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้งานได้ต่อไป โดยแสดง

กราฟเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์ระดับน้ำที่สถานีนครหลวงแสดงได้ดัง Figure 8 และ Figure 9 ตามลำดับ

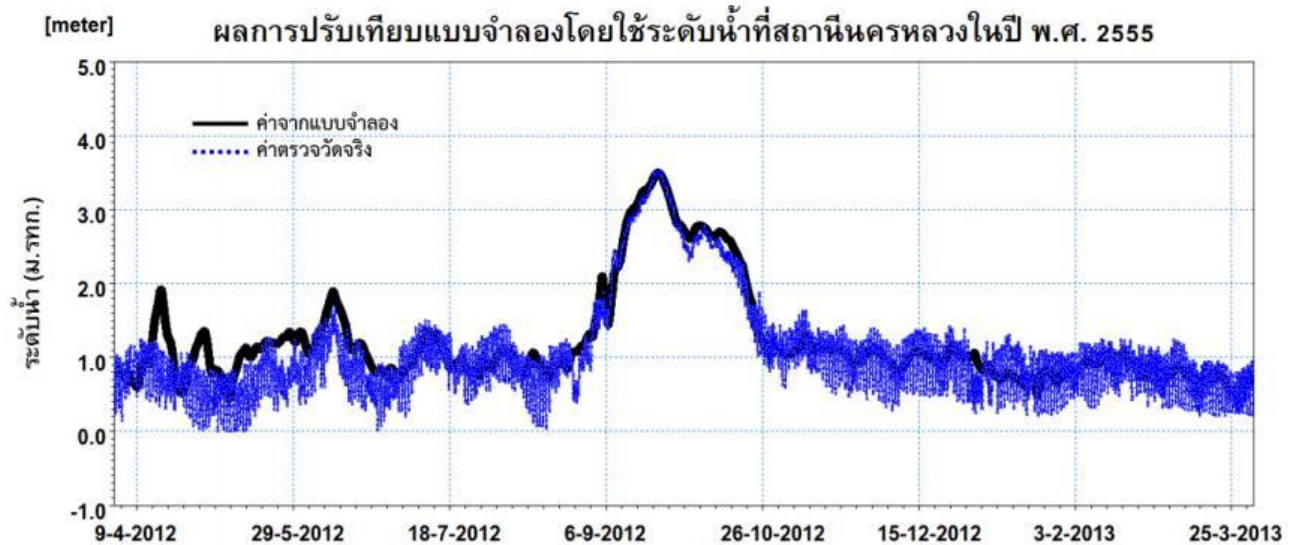


Figure 8 The model calibration result at Nakhon Luang Station in the period of year 2012.

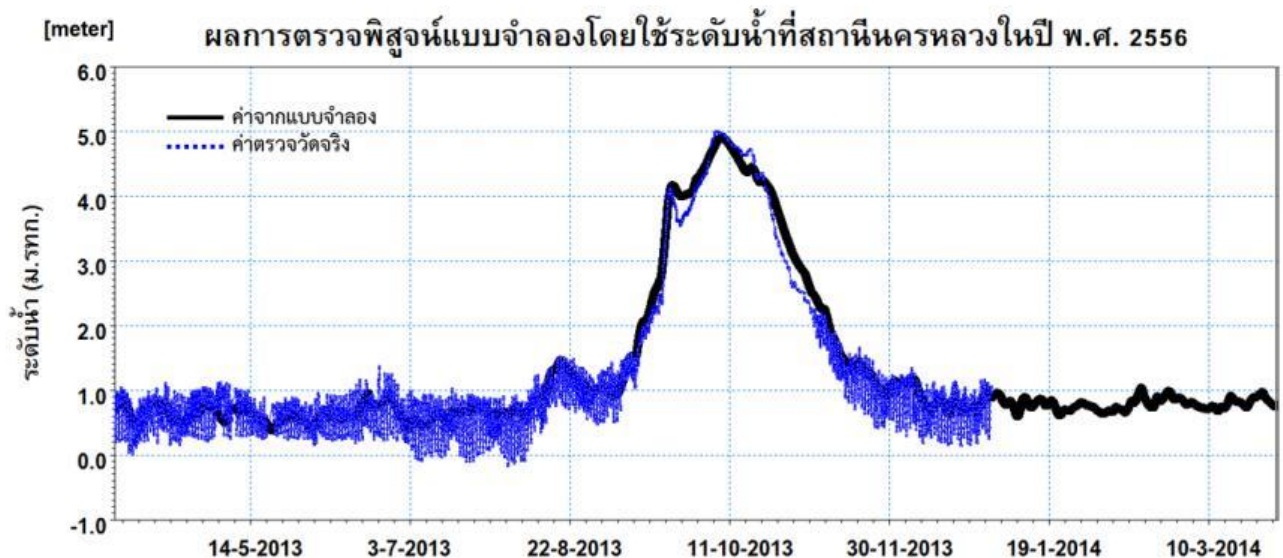


Figure 9 The model verification result at Nakhon Luang Station in the period of year 2013.

3.3 ผลการวิเคราะห์ความลึกน้ำต่ำสุดในแต่ละจุดในแม่น้ำป่าสัก

ผลการวิเคราะห์ระดับน้ำต่ำสุด รวมทั้งระดับน้ำสูงสุดในรอบเจ็ดปีน้ำหลังสุด (2550-2556) จากแบบจำลองฯ สามารถแสดงเป็นรูปตัดตามแนวยาวลำน้ำของแม่น้ำป่าสัก Figure 10 โดยแสดงค่าของระดับตลิ่งฝั่งซ้าย (Left bank) ระดับตลิ่งฝั่งขวา (Right bank) และระดับท้องน้ำ (River bed) ตลอดความยาวของลำน้ำ และเมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าระดับความลึกน้ำต่ำสุดในแต่ละรูปตัด หรือเรียกว่าความลึกร่องน้ำ โดยพิจารณาจากผลต่างระหว่างระดับท้องน้ำกับระดับน้ำต่ำสุดที่คำนวณได้จากแบบจำลองฯ ในแต่ละหน้าตัด พบว่า ระดับความลึกน้ำต่ำสุดใน

รอบห้าปีหลังสุดในแต่ละจุดในแม่น้ำป่าสักจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2.0-16.0 m และสามารถสรุปค่าระดับความลึกน้ำต่ำสุดได้ Table 2 และแสดงเป็นแผนที่ตำแหน่งของจุดที่มีระดับความลึกน้ำต่ำสุดต่างกันได้ Figure 11 ซึ่งพบว่า แม่น้ำป่าสักช่วงตั้งแต่ด้านท้ายน้ำเขื่อนพระรามหกลงมาถึงจุดบรรจบแม่น้ำเจ้าพระยาที่มีระดับความลึกน้ำต่ำสุดที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4.9 m โดยมากจะอยู่บริเวณตั้งแต่ กม.ที่ 30+000 ขึ้นไปจนถึง กม.ที่ 51+900 บริเวณเขื่อนพระรามหก โดยคิดเป็นระยะทางสะสมประมาณ 26.65 km อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องพิจารณา ร่วมกับปัจจัยด้านอื่นที่จะเป็นอุปสรรคในการไหลระดับต่ำซึ่ง

ได้แก่ความกว้างของลำน้ำด้วย โดยถึงแม้จะมีความลึกน้ำต่ำสุดที่ ยังจะเป็นอุปสรรคต่อการไหลเช่นกัน
มีค่ามากกว่า 4.9 m แต่ถ้าพบว่าความกว้างของลำน้ำไม่มากพอก็

Table 2 The lowest depth values analyzed by MIKE11 Model from 2007 to 2013.

ค่าระดับความลึกน้ำต่ำสุด	จำนวน (รูปตัด)	ระยะทางสะสมโดยประมาณ (km)
ช่วงความลึกน้ำ 2.0-2.9 m	7	0.35
ช่วงความลึกน้ำ 3.0-3.9 m	103	5.15
ช่วงความลึกน้ำ 4.0-4.9 m	423	21.15
ช่วงความลึกน้ำ 5.0-5.9 m	292	14.60
ช่วงความลึกน้ำ 6.0-6.9 m	120	6.00
ช่วงความลึกน้ำ 7.0-7.9 m	44	2.20
ช่วงความลึกน้ำมากกว่า 8.0 m	50	2.50

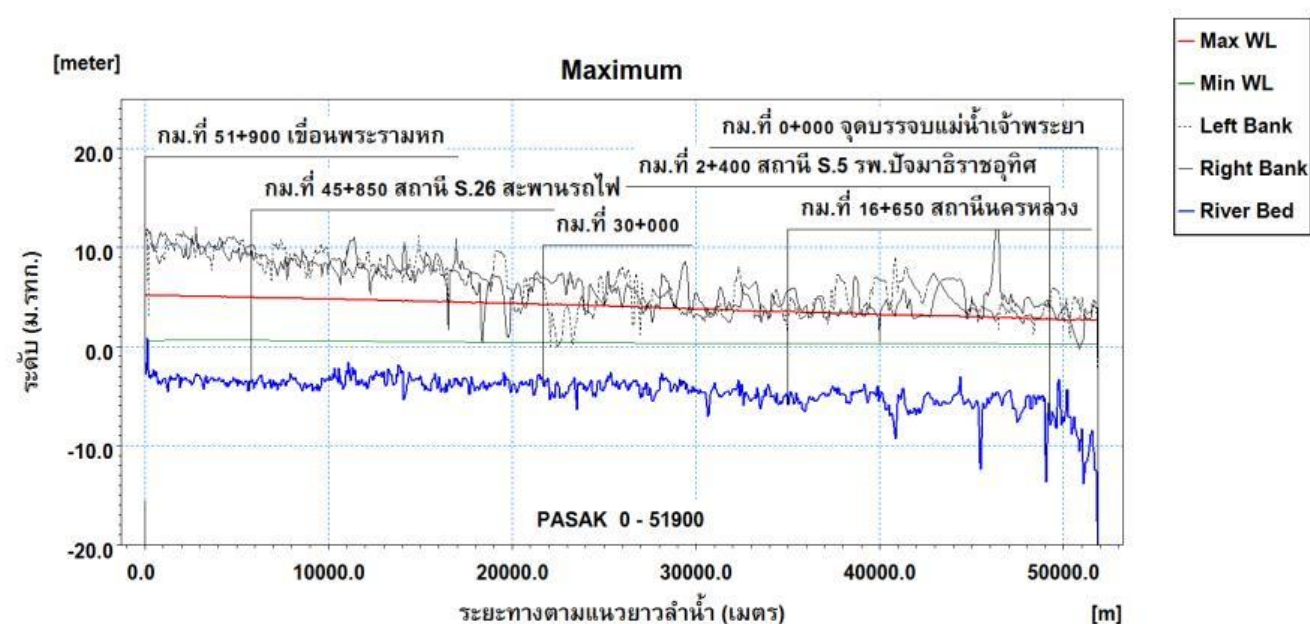


Figure 10 The lowest and the highest water level of Pasak River longitudinal section from 2007 to 2013.

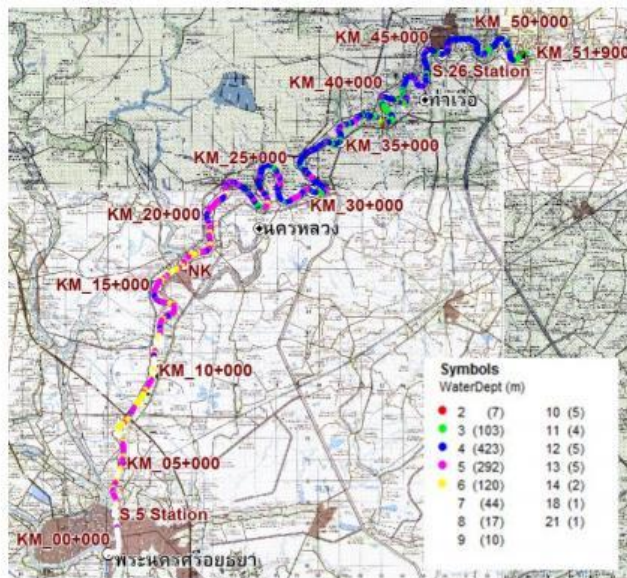


Figure 11 Map of the lowest depth points in Pasak River from KM. 0+000 to KM. 51+900.

Table 3 The capacity of Pasak River analyzed by MIKE11 model.

Pasak River	Average River Capacity (m ³ s ⁻¹)
- KM. 0+000 (Confluence of Chao Phraya river) to KM. 10+000	816.46
- KM. 10+000 to KM. 20+000	630.17
- KM. 20+000 to KM. 30+000	517.64
- KM. 30+000 to KM. 40+000	865.85
- KM. 40+000 to KM. 50+000	1,029.31
- KM. 50+000 to KM. 51+900 (downstream portion of Rama VI Dam)	1,007.69
Average River Capacity of Overall Pasak River	811.19

4 สรุป

แม่น้ำป่าสักตอนล่างที่ผ่านการศึกษาวเคราะห์กลศาสตร์แม่น้ำด้วยแบบจำลอง MIKE11 โดยการพิจารณาทั้งในช่วงน้ำน้อยจากวิเคราะห์ความลึกน้ำต่ำสุดในรอบ 7 ปี พบว่า มีความลึกที่ต่ำกว่า 4.9 m อยู่มากบริเวณช่วงต้นน้ำตั้งแต่ ช่วงกม.ที่ 30+000 ขึ้นไปจนถึง กม. ที่ 51+900 ส่วนการไหลเต็มตลิ่งจากการวิเคราะห์ความจุลำนํ้ากลับพบว่า บริเวณช่วงท้ายน้ำของแม่น้ำป่าสัก ตั้งแต่ ช่วงกม. ที่ 10+000 ถึง กม. ที่ 30+000 มีความจุลำนํ้าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 517.64 - 630.17 m³ s⁻¹ ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั้งแม่น้ำป่าสักตอนล่างที่มีค่าเท่ากับ 811.19 m³ s⁻¹ อยู่มาก ดังนั้น การประเมินประสิทธิภาพการไหลทั้งช่วงน้ำต่ำและช่วงน้ำสูง จึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยทางด้านกลศาสตร์แม่น้ำที่เกี่ยวข้องให้รอบด้าน อันได้แก่ ความลึกของน้ำ ความกว้างของลำน้ำ และความจุลำนํ้า เป็นต้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการบริหารจัดการน้ำของหน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้องต่อไป และการสำรวจแม่น้ำที่ระยะห่างทุกๆ 50 m นั้นช่วยทำให้การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์แม่น้ำมีความละเอียดและแม่นยำสูง แต่อย่างไรก็

3.4 ผลการวิเคราะห์ความจุลำนํ้าของแม่น้ำป่าสัก

ผลการศึกษาวเคราะห์ความจุลำนํ้าของแม่น้ำป่าสักทั้ง 6 ช่วงลำน้ำแสดงได้ Table 3 ซึ่งพบว่า แม่น้ำป่าสักตอนล่างจะมีความจุลำนํ้าอยู่ในช่วง 517.64 - 1,029.31 m³ s⁻¹ และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 811.19 m³ s⁻¹ โดยช่วงลำน้ำของแม่น้ำป่าสักที่มีความจุลำนํ้าต่ำที่สุด คือ ช่วงกม.ที่ 20+000 ถึง กม.ที่ 30+000 คิดเป็น 517.64 m³ s⁻¹ รองลงมาได้แก่ ช่วงกม.ที่ 10+000 ถึง กม.ที่ 20+000 และ กม.ที่ 30+000 ถึง กม.ที่ 40+000 ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษาความจุลำนํ้าในหัวข้อนี้มีความแตกต่างจากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการไหลแบบต่ำในแต่ละจุดในแม่น้ำป่าสัก ซึ่งจะอยู่บริเวณตั้งแต่ กม.ที่ 30+000 ขึ้นไปจนถึง กม.ที่ 51+900

ตามจำเป็นต้องใช้งบประมาณในการสำรวจค่อนข้างสูง จึงควรพิจารณาให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของงานนั้นๆ และแบบจำลอง MIKE11 นั้นจะมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ความเร็วไหลได้เพียงค่าเดียวซึ่งเป็นความเร็วเฉลี่ยต่อหน้ารูปตัดเนื่องจากเป็นแบบจำลองการไหลแบบหนึ่งมิติ ดังนั้น ถ้าต้องการศึกษาในรายละเอียดของความเร็วการไหลที่ผันแปรไปในแต่ละรูปตัดขวาง จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองสองมิติมาใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

5 กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยการจำลองระบบทรัพยากรน้ำด้วยคอมพิวเตอร์และระบบสารสนเทศ (WRCMIS Lab) ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่และซอฟต์แวร์แบบจำลองต่างๆ และขอขอบคุณหน่วยงานกรมชลประทาน และกรมเจ้าท่าที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลประกอบการศึกษาวิจัย

6 เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรน้ำ. 2546. โครงการจัดทำแผนรวมการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ในลุ่มน้ำป่าสัก; รายงานฉบับสุดท้าย (รายงานหลัก). กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.
- กรมชลประทาน. 2553. โครงการจัดทำแผนพัฒนาการชลประทานระดับลุ่มน้ำอย่างเป็นระบบ, ลุ่มน้ำป่าสัก (12). กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- ศูนย์วิจัยวิศวกรรมและการจัดการน้ำ (วาริ) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. 2557. โครงการศึกษาสำรวจ ออกแบบป้องกันตลิ่งและการขุดลอกเพื่อการเดินเรือในแม่น้ำป่าสัก. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- ชัยยุทธ ชินณะราศรี. 2550. กลศาสตร์แม่น้ำและกระบวนการธารน้ำ. หน่วยงานส่งเสริมการสร้างตำรา กองบริการการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- อรรถพร พวงผิว และ วิษุวัตต์ แต่สมบัติ. 2558. การศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนดินในแม่น้ำป่าสักด้วยแบบจำลอง MIKE21. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 21(1), 45-55.
- DHI Water Environment and Health. 2007. MIKE11-A Modelling System for Rivers and Channels, Reference Manual. DHI, Denmark.
- Han, D., Fang, H., Chen, M.c., He, G., Bai, J. 2011. A study of sediment transport modele in one-dimensional numerical channel network model Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics 43(3), 476-481.
- Khatsuria, R. 2010. How and Why rivers meander. Source: <http://hydrotopics.wordpress.com>, November 19, 2015.
- Shlychkov, V.A. 2009. Numerical modeling of the stream dynamics for river channels with complex spatial configuration. Mathematical Modelling of Natural Phenomena 4(5), 89-99
- Shmakova, M.V., Kondrat'ev, A.N. 2008. A mathematical model of water and sediment flow in open river channels. Russian Meteorology and Hydrology 33(6), 394-399
- USGS. 2015. Stream II: Classification. Source: http://w3.salemstate.edu/~lhanson/gls210/gls210_streams2.htm, November 19, 2015.
- Yu, S.B., Wang, K.R., Wang, W.Z. 2013. Flow and sediment conditions for the Yellow River Estuary balance. 2nd International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering, ICCAHE 2013; Zhuhai; China; July, 27-28, 2013. Volume 405-408, pp. 2226-2230.



อิทธิพลของการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดต่อสมบัติของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการผลิตเดกซ์ทริน Effect of Infrared Heat Treatment on Properties of Tapioca Starch during Dextrin Production

พีรภัทร อุไรเวศ¹, ประสันต์ ชุ่มใจหาญ^{1*}

Peerapat Uraives¹, Prasan Choomjaihan^{1*}

¹ หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 10520

¹ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

*Corresponding author: Tel: +66-2-329-8337, E-mail: prasan.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

เดกซ์ทรินเป็นแป้งดัดแปรชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้านทั้งการผลิตอาหาร สิ่งทอ กระดาษ กาว เป็นต้น ซึ่งการผลิตเดกซ์ทรินทำได้โดยการไฮโดรไลซ์แป้งด้วยเอนไซม์ กรด หรือการให้ความร้อนแบ่งที่อุณหภูมิสูงโดยการได้ประยุกต์ใช้ความร้อนจากการนำและพาความร้อนเป็นหลัก แต่ยังไม่พบงานวิจัยใดที่มีการประยุกต์ใช้หลักการให้ความร้อนกับแป้งมันสำปะหลังเพื่อผลิตเดกซ์ทรินโดยวิธีการแผ่รังสี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของแป้งมันสำปะหลังที่ได้รับความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดระหว่างการผลิตเดกซ์ทริน โดยสมบัติที่มุ่งเน้นการศึกษาได้แก่ความหนืด ค่าการละลาย ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และโครงสร้างทางกายภาพของเม็ดแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนโดยรังสีอินฟราเรดที่ระดับอุณหภูมิ 170, 190 และ 210°C เป็นเวลา 20 h เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเดกซ์ทริน โดยแป้งมันสำปะหลังมีความชื้นเริ่มต้น 12.17%db จากการศึกษาการลักษณะทางกายภาพของเม็ดแป้งโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแป้งเล็กลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ความหนืดของแป้งลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน ในขณะที่ค่าการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแบ่ง จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนต่างกันที่เวลาเดียวกันความหนืดและค่าการละลายมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดและค่าการละลายมากที่สุด ผลการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในสารละลายแป้งพบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะสามารถวัดค่าได้เมื่อทำการให้ความร้อนแบ่งด้วยอุณหภูมิ 210°C เป็นเวลานานกว่า 8 h และมีค่าเพิ่มสูงสุดเมื่อผ่านไป 18 h

คำสำคัญ: อินฟราเรด, แป้งมันสำปะหลัง, เดกซ์ทริน

Abstract

Dextrin is one type of modified starch. Dextrin has been widely used in various processes, such as, food, textile, paper, glue and so on. Dextrin was produced from hydrolyzed starch by enzymes, acid or heating at high temperature. However, there have been not many researches work on the heating by radiation heat transfer. Therefore, the aim of this research was to monitor the properties of Tapioca starch during Dextrin production by infrared radiation including viscosity, solubility, total soluble solid and structure of starch granules. Tapioca starch samples were heated by infrared heater at 170, 190 and 210°C for 20 h and were monitored the change of their properties. The initial moisture of Tapioca starch was 12.17%db. The results showed that, increasing of the heating temperature and time decreased the viscosity and average diameter of starch granules, while increased the solubility of starch. The viscosity, solubility and average diameter of starch granules of different heating temperature were significantly different ($p < 0.05$). Total soluble solid was able to be measured when the heating time was longer than 8 h with heating temperature of 210°C and the its maximum value was about 18 h.

Keywords: Infrared, Tapioca starch, Dextrin

1 บทนำ

มันสำปะหลัง (Tapioca) จัดเป็นพืชอยู่ในตระกูล Euphorbiaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz. (William et al., 2009) มันสำปะหลังสามารถนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้อย่างหลากหลายโดยส่วนมากมันสำปะหลังถูกนำไปผลิตเป็นแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้ในการอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อาหาร สิ่งทอ กระดาษ และกาเป็นต้น (William et al., 2009) ประเทศไทยส่งออกแป้งมันสำปะหลังสูงเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยมีมูลค่าการส่งออกกว่า 63,000 ล้านบาท แบ่งเป็นการส่งออกแปรรูป 21,000 ล้านบาท (สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย, 2558)

เดกซ์ทริน (dextrin) ถือว่าเป็นแป้งดัดแปรชนิดหนึ่งที่ได้จากการไฮโดรไลซ์แป้งบางส่วนด้วยเอนไซม์ กรด ความร้อน หรือกรดร่วมกับความร้อน โดยมีลักษณะเป็นผงละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 30 μm (นิธิยา, 2557) โดยทั่วไปเดกซ์ทรินแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ เดกซ์ทรินขาว (white dextrin), เดกซ์ทรินเหลือง (yellow dextrin) และบริติชกัม (British gums) ซึ่งการผลิตเดกซ์ทรินแต่ละประเภทยังขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน โดยพื้นฐานแล้วการผลิตเดกซ์ทรินทำได้โดยการให้ความร้อนแก่แป้ง (heat treatment) เป็นเวลา 10 ถึง 20 h โดยวิธีการคั่วหรือผ่านตัวกลางในการนำความร้อนเช่น เกลียว (extrusion) และถึงแก่เปลี่ยนแปลงความร้อนในลักษณะการกวน (vat dryer) ที่อุณหภูมิ 100 ถึง 200°C ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เช่น โซดาไฟ (caustic soda) และบอแรกซ์ (borax) โดยที่การผลิตเดกซ์ทรินขาวใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา การผลิตเดกซ์ทรินเหลืองใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าแต่ตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่าเดกซ์ทรินขาว สำหรับการผลิตบริติชกัมใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในระหว่างกระบวนการ สีของเดกซ์ทรินที่ได้รับหลังการให้ความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน โดยเมื่อเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อนกับแป้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สีของเดกซ์ทรินมีความเป็นสีเหลืองจนถึงน้ำตาลเข้มมากขึ้น (Radley, 1976)

สมบัติทั่วไปของเดกซ์ทรินคือ มีความหนืดน้อยกว่าแป้งละลายได้ดีในน้ำเย็น มีความสามารถในการจับตัวเป็นก้อน คุณสมบัติที่ละลายน้ำได้ดี และมีความข้นหนืด (Radley, 1976) ทำให้เดกซ์ทรินถูกนำไปใช้ในการผลิตเป็นส่วนประกอบของอาหารและผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ เช่น เพื่อผสมเป็นส่วนประกอบของยาเม็ดเพื่อให้เกิดการยึดเกาะกันดีขึ้นของส่วนผสมต่างๆ เพื่อการผลิตบรรจุภัณฑ์จากกระดาษ เพื่อการผลิตกาวยึดติดเพื่อการผลิตสิ่งทอ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เพื่อผลิตสีน้ำ และเพื่อผลิตดอกไม้ไฟ เป็นต้น

รังสีอินฟราเรดเป็นการเหนี่ยวนำความร้อนรูปแบบหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถสร้างความร้อนที่ความยาวคลื่นประมาณ 0.76 μm – 1 mm ในลักษณะการแผ่รังสีสู่

วัตถุชีวภาพและวัตถุทางการเกษตร (ฤทธิชัย, 2554) รังสีอินฟราเรดถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการแปรรูปและเป็นกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหารและการเกษตรอย่างแพร่หลาย (Hanamaka et al., 2006) ที่มีการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มกลิ่น รส ที่ดีขึ้น เช่นในอุตสาหกรรมเบเกอรี่ และการอบแห้งวัตถุทางการเกษตร และพืชสมุนไพร เพื่อช่วยเร่งสารสำคัญในการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดกับการให้ความร้อนโดยการนำและการพาความร้อน พบว่าการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการให้ความร้อนการนำและการพาความร้อน (Nowak and Leweciki, 2004) นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนสั้นกว่า การให้ความร้อนมีความสม่ำเสมอ มีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนสูง อุปกรณ์ที่ใช้ทำงานมีความเรียบง่ายและประหยัดพลังงานมากกว่า (Krishnamurthy et al., 2009) ซึ่งโดยทั่วไปการให้ความร้อนในการผลิตเดกซ์ทรินจะใช้อุปกรณ์การถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน เช่น หม้อหรือเกลียวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ใช้น้ำหรือไอน้ำเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน (Radley, 1976)

ในปัจจุบันการผลิตเดกซ์ทรินโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดยังไม่เป็นที่แพร่หลาย งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อที่จะทำการทดสอบสมบัติของเดกซ์ทรินที่ผ่านการให้ความร้อนโดยรังสีอินฟราเรดกับแป้งมันสำปะหลังได้แก่ โครงสร้างของเม็ดแป้ง ความหนืด ค่าการละลาย และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ เนื่องจากสมบัติเหล่านี้เป็นตัวชี้วัดในการนำเดกซ์ทรินไปใช้ในงานที่แตกต่างกัน การศึกษาดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตเดกซ์ทรินและออกแบบการผลิตในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังจากโรงงานแป้งมันไทยทำ จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย ดำเนินวิเคราะห์หาความชื้นเริ่มต้นมาตรฐาน (AOAC, 2010) จำนวน 50 ตัวอย่าง พบว่ามีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $12.17 \pm 0.15\%$

2.2 การให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังด้วยรังสีอินฟราเรด

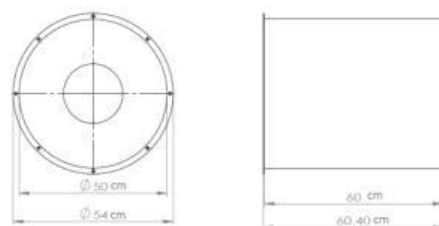


Figure 1 Cylindrical chamber for starch heat treatment.

อุปกรณ์ในการให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังสำหรับในการทดลองครั้งนี้ แสดงใน Figure 1 ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเฉพาะเพื่อใช้ในการทดลอง มีลักษณะเป็นถังสเตนเลสทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 m ความยาว 0.6 m วางในแนวขนาดก้นพื้น หมุนโดยใช้มอเตอร์ขนาด 24 V ให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลัง ปริมาณ 5 kg ด้วยหลอดรังสีอินฟราเรดกำลังไฟ 850 W จำนวน 2 หลอด สามารถปรับความเร็วรอบในการหมุนได้โดยตัวต้านทาน (Potentiometer) และปรับกำลังไฟในการแผ่รังสีอินฟราเรดด้วยกล่องควบคุมกระแสไฟ ความหนาของแป้งมันสำปะหลัง 5 kg ประมาณ 8 cm ในถังทรงกระบอก ทำการพลิกกลับ 1 รอบทุกๆ 5 min ที่อุณหภูมิ 170, 190 และ 210°C ตามลำดับ และทำการสุ่มตัวอย่างเพื่อนำมาหาสมบัติของแป้งมันสำปะหลังทุกๆ 2 h โดยให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังเป็นเวลาทั้งหมด 20 h

2.3 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดแป้ง

การศึกษาโครงสร้างและความเสียหายของเม็ดแป้งศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) โดยการสุ่มตัวอย่างจากนั้นนำไปฉาบเคลือบทองเพื่อให้มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าด้วยเครื่อง Polaron Emitech (Quorum Technologies Ltd., SC7640, Laughton, UK) จากนั้นนำตัวอย่างไปตรวจสอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (Carl Zeiss Co., EVO MA10, Oberkochen, Germany) ระดับกำลังขยาย 1,000 เท่า ค่าความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) 20 kV

2.4 การหาค่าความหนืด

วิธีการหาความหนืดได้ดัดแปลงวิธีการของ Bello-Perez et al. (2000) โดยทำละลายสตาร์ช 25 g ในน้ำกลั่น 500 ml นำไปให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเจลาตไนเซชันในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 min โดยมีการคนอย่างต่อเนื่อง จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึง 25°C วัดความหนืดโดยใช้เครื่องวัดความหนืด Rotational Viscometer (Brookfield, DV-E, Middleboro, USA) ที่ความเร็ว 100 rpm โดยใช้หัววัดหมายเลข s61 ถึง s64

2.5 การหาค่าการละลาย

วิธีการหาค่าการละลายทำโดยอ้างอิงวิธีการของ Dubois et al. (1956) โดยเตรียมแป้งประมาณ 0.02 g (w_1) ทำเป็นสารละลายแป้ง 1% (w/v) นำไปแช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 min จากนั้นปล่อยให้สารละลายเย็นตัวลงและนำสารละลายเทลงในหลอดเหวี่ยงขนาด 2 ml ที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่อง Microcentrifuge (Labnet, Spectrafuge 7M, Mayfield, USA) ที่ระดับ 5000×g เป็นเวลา 30 min จากนั้นดูดของเหลวตอนบนใส่ภาชนะที่ทราบน้ำหนักแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 4 h แล้วนำไปชั่งน้ำหนักได้เป็นส่วนของแป้งที่ละลายน้ำ

ได้ (w_2) จากนั้นนำน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณค่าการละลายดังที่แสดงในสมการที่ 1

$$\text{ค่าการละลาย (\%)} = \frac{w_2}{w_1} \times 100 \quad (1)$$

2.6 การหาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

วิธีการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำทำการทดสอบโดยอ้างอิงวิธีการของ Sarifudin and Assiry (2014) โดยใช้สารละลายแป้ง 10% (w/v) จากนั้นทดสอบโดยใช้ Pocket Refractometer (Atago, Model PAL-1, Tokyo, Japan) โดยค่าที่ได้มีหน่วยเป็น %Brix

2.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การทดลองนี้ใช้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Designs (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว One-Way ANOVA (analysis of variance) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของเม็ดแป้ง

ภาพขยายแสดงรูปร่างและความเสียหายของเม็ดแป้งธรรมชาติและแป้งที่ได้รับความร้อนแสดงใน Figure 2 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแป้งธรรมชาติมีค่าเท่ากับ $11.39 \pm 3.22 \mu\text{m}$ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Defloor et al. (1998) ที่รายงานว่าขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 9.5 ถึง $13.6 \mu\text{m}$ โดยมีรูปร่างเป็นทรงรีและทรงกลมขนาดเล็ก จากการตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy) พบว่าแป้งมีพื้นผิวเรียบและมีรอยแยกเล็กน้อย เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนพื้นผิวของแป้งมีพื้นผิวหยาบขึ้นและเกิดรอยแยกจากความร้อน โดยที่รอยแตกและการแยกกันของเม็ดแป้งมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อน อาจเป็นเพราะแป้งสูญเสียความชื้นภายในเม็ดแป้งจึงทำให้เกิดการหดตัวและเกิดรอยแตกบริเวณพื้นผิวดังนั้นเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อน แป้งจึงมีลักษณะการหดตัวและมีรอยแตกเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Katz (1934) รายงานว่าการให้ความร้อนแป้งสาธิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120°C ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้ง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนที่แป้งมันสำปะหลังสามารถดูดซับพลังงานความร้อนมากกว่า 210°C จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดความเสียหายในลักษณะที่ทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากสลายตัวของพันธะเม็ดแป้ง (Thermal reaction) และผลของการได้รับอุณหภูมิสูงมากเกินไปส่งผลให้คาร์โบไฮเดรตในเม็ดแป้งเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

(Caramelization) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางเคมี-กายภาพของเม็ดแป้ง เมื่อได้รับคลื่นความร้อนจากรังสีอินฟราเรดมากกว่าเกินไปส่งผลให้เม็ดแป้งมีขนาดลดลง เนื่องจากความร้อนส่วนเกินที่มากกว่าจะทำให้เกิดทำลายพันธะของโซ่ยาวของเม็ดแป้งให้สั้นลง โดยค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลแป้งลดลงเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อนดังที่แสดงใน Table 1

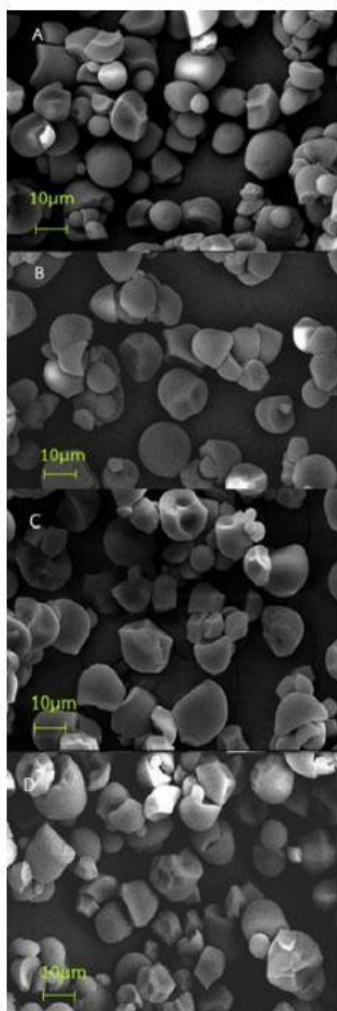


Figure 2 (A) Natural starch, (B) Heated starch at 170°C for 20 h, (C) Heated starch at 190°C for 20 h และ (D) Heated starch at 210°C for 20 h.

3.2 ผลการศึกษาความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแป้ง เมื่อแป้งได้รับความร้อน เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลถูกทำลาย โดยที่การพองตัวนั้นจะทำให้ น้ำบริเวณรอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งจึงเคลื่อนที่ได้ยากทำให้เกิดความหนืดขึ้น (Zobel and Stephen, 1995)

Table 1 Average diameter of tapioca starch under IR heated for 10 and 20 h.

	Heating time (h)	Average diameter (µm)
Natural Starch*	-	11.39±3.22 ^a
170°C	10	9.56±3.40 ^{ab}
	20	9.42±4.40 ^{ab}
190°C	10	8.77±3.77 ^b
	20	8.41±4.03 ^b
210°C	10	8.37±3.65 ^b
	20	7.64 ±4.22 ^b

Superscripts indicate the statistically non-significant ($p<0.05$) for each column.

*Natural starch is defined as tapioca starch that is not heat-treated.

การศึกษาความหนืดของสารละลายแป้งได้ทำการวัดค่าความหนืดของแป้งที่ได้รับความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรด ทุกๆ 2 h เป็นเวลา 20 h ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยที่ความหนืดเริ่มต้นของแป้งมีค่าเท่ากับ $3,079.6 \pm 93.5$ cP ผลการทดลองแสดงดัง Figure 3 และ Table 2

Table 2 Viscosity value of heated tapioca starch under IR heating.

Heating time (h)	170°C	190°C	210°C
0	^a 3079.6±93.5 ^a	^a 3079.6±93.5 ^a	^a 3079.6±93.5 ^a
2	^a 2864.0±27.8 ^b	^b 2731.2±2.40 ^b	^c 2274.6±157 ^b
4	^a 2335.3±37.4 ^c	^b 1765.2±131 ^c	^c 1293.0±46.6 ^c
6	^a 1560.6±100 ^d	^b 3311.0±24.6 ^d	^c 113.7±3.20 ^d
8	^a 711.8±6.60 ^e	^b 102.6±5.00 ^e	^c 31.3±0.20 ^e
10	^a 590.9±17.0 ^f	^b 87.8±0.80 ^e	^c 15.3±0.10 ^e
12	^a 417.4±6.60 ^g	^b 70.2±0.70 ^{ef}	^c 11.7±0.10 ^e
14	^a 325.7±24.1 ^g	^b 36.8±1.10 ^f	^c 10.2±0.10 ^e
16	^a 287.3±27.1 ^{gh}	^b 28.1±0.10 ^f	^c 8.9±0.10 ^e
18	^a 249.0±3.40 ^h	^b 21.0±1.20 ^f	^c 7.5±0.10 ^e
20	^a 147.9±0.70 ⁱ	^b 20.5±0.10 ^f	^b 7.1±0.10 ^e

Superscripts and subscripts indicate the statistically non-significant ($p<0.05$) for each column and row, respectively.

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อนแป้งส่งผลให้ความหนืดมีค่าลดลงที่ทุกอุณหภูมิ การให้ความร้อน โดยการลดลงของความหนืดของแป้งที่อุณหภูมิสูงมีค่าสูงกว่ามีค่าที่เร็วกว่าในช่วงแรก หลังจากนั้นค่าความหนืดเริ่มมีค่าคงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อให้ความร้อนกับแป้งที่

ระดับอุณหภูมิ 190 และ 210°C หลังจากผ่าน 6 h เป็นต้นไป สำหรับที่อุณหภูมิ 170°C ค่าความหนืดมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามเวลาการให้ความร้อนเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 190 และ 210°C แต่เมื่อผ่าน 8 h ไปแล้วนั้นอัตราการการลดลงของความหนืดมีค่าลดลงตามเวลาการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น

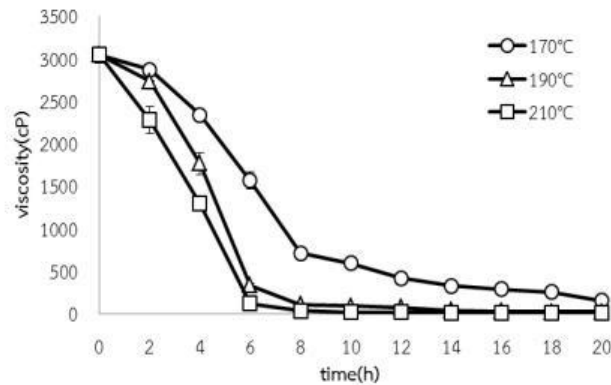


Figure 3 Changing of viscosity of heated tapioca starch under IR heating versus heating time.

ความหนืดที่ลดลงเกิดจากโมเลกุลของแป้งมีขนาดเล็กลงเมื่อแป้งได้รับความร้อน ทำให้เมื่อแป้งพองตัวจะดูดซับน้ำบริเวณรอบๆ เม็ดแป้งได้น้อยส่งผลให้ความหนืดมีค่าลดลง (Zobel and Stephen, 1995) นอกจากนี้ยังมีรายงานของ อโนชา และคณะ (2555) ที่ได้ทำการตัดแปรรูปข้าวเหนียวด้วยรังสีไมโครเวฟในการให้ความร้อนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งดีขึ้น โดยแปรรูปข้าวเหนียวตัดแปรรูปด้วยไมโครเวฟมีคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูป โดยมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิด เจลาติไนเซชัน และค่าความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น แต่ค่าพารามิเตอร์ด้านความหนืดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเหนียวปกติ

3.3 ผลการศึกษาการละลาย

Figure 4 แสดงผลการศึกษาการละลายของสารละลายแป้ง ได้ทำการทดสอบค่าการละลายของแป้งที่ได้รับความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรดทุกๆ 2 h เป็นเวลา 20 h ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยที่ค่าการละลายเริ่มต้นของแป้งมีค่าเท่ากับ $0.56 \pm 0.63\%$ ผลการศึกษาการละลายของแป้งที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 170, 190 และ 210°C เป็นเวลา 20 h พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแก่แป้ง ส่งผลให้ค่าการละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนส่งผลให้พันธะของแป้งถูกทำลาย ส่งผลให้ความยาวของพันธะสั้นลง ทำให้แป้งละลายน้ำได้ดีขึ้น (Harper, 1992) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Noranizan et al. (2010) ได้ทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแป้งสาลี, แป้งสาธู, แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง ที่อุณหภูมิ 100, 110 และ 120°C เป็นเวลา 1 และ 2 h พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน

ส่งผลให้ค่าการพองตัวและค่าการละลายเพิ่มขึ้น โดยผลการทดสอบค่าการละลายและความแตกต่างทางสถิติได้แสดงใน Table 3

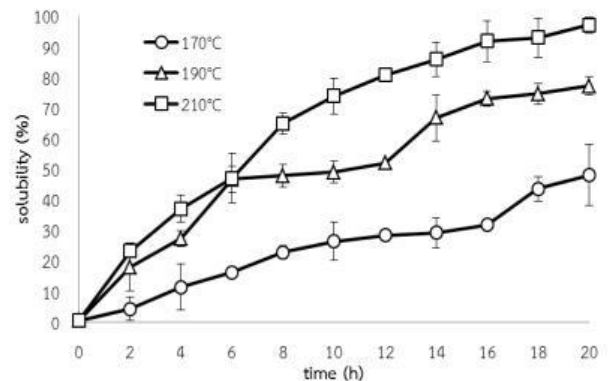


Figure 4 Changing of solubility of heated tapioca starch under IR heating versus heating time.

Table 3 Solubility value of heated tapioca starch under IR heating.

Heating time (h)	Solubility (%)		
	170°C	190°C	210°C
0	0.56 ± 0.63^e	0.56 ± 0.63^f	0.56 ± 0.63^g
2	4.40 ± 3.92^e	17.97 ± 7.82^e	23.30 ± 1.84^f
4	11.47 ± 7.56^{de}	27.34 ± 2.68^d	37.08 ± 4.45^e
6	16.30 ± 1.73^{cd}	46.68 ± 4.27^c	47.01 ± 8.13^e
8	22.80 ± 2.16^{bc}	47.88 ± 3.75^c	64.92 ± 3.52^d
10	26.41 ± 6.19^b	48.98 ± 3.52^c	73.90 ± 5.86^{cd}
12	28.37 ± 0.96^b	51.96 ± 0.12^c	80.72 ± 0.58^{bc}
14	29.22 ± 5.01^b	66.77 ± 7.49^b	85.84 ± 5.49^{abc}
16	31.73 ± 1.87^b	73.00 ± 2.46^{ab}	91.81 ± 12.75^{ab}
18	43.60 ± 3.97^a	74.63 ± 3.48^{ab}	92.96 ± 7.32^{ab}
20	48.08 ± 9.98^a	77.26 ± 2.92^a	97.13 ± 2.62^a

Superscripts and subscripts indicate the statistically non-significant ($p < 0.05$) for each column and row, respectively.

3.4 ผลการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

Figure 5 และ Table 4 เป็นผลการศึกษาหาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ โดยเมื่อแป้งที่ได้รับความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรดทุกๆ 2 h เป็นเวลา 20 h ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 0 %Brix ผลการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 170, 190 และ 210°C เป็นเวลา 20 h พบว่าการให้ความร้อนที่ 210°C เป็นเวลามากกว่า 8 h จึงจะส่งผลให้แป้งเกิดของแข็งที่ละลายน้ำได้และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อน เนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไม่สามารถไฮโดรไลซ์โมเลกุลของพันธะไฮโดรเจนของแป้งได้ (Harper, 1992) ปริมาณของแข็งที่

ละลายน้ำได้ของแป้งจึงแสดงผลเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน

Table 4 Total soluble solids value of heated tapioca starch under IR heating.

Heating time (h)	Total soluble solids (%) 210°C
8	-
10	1.20 ± 0.08 ^f
12	3.53 ± 0.05 ^e
14	4.87 ± 0.05 ^d
16	5.00 ± 0.14 ^c
18	5.47 ± 0.05 ^b
20	5.60 ± 0.00 ^a

Superscripts indicate the statistically non-significant ($p < 0.05$) for each column.

ผลการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้แตกต่างจากผลการศึกษาค่าการละลายเนื่องจากการทดสอบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เป็นการทดสอบโดยใช้แป้งอุณหภูมิปกติในขณะที่การทดสอบค่าการละลายเป็นการทดสอบโดยใช้แป้งที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตในเซชันของแป้ง ดังนั้นผลการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จึงเป็นการบ่งบอกปริมาณของแข็งหรือองค์ประกอบของแป้งที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Katz (1934) ที่ได้ทำการให้ความร้อนแป้งสาลีที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่อให้ความร้อนแป้งสาลีที่อุณหภูมิสูงกว่า 180°C ส่งผลให้ความสามารถในการละลายในน้ำเย็นเพิ่มขึ้น ในขณะที่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายในน้ำเย็น

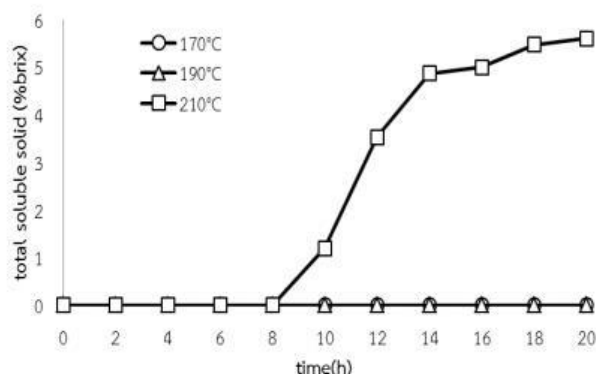


Figure 5 Changing of total soluble solids of heated tapioca starch under IR heating versus heating time.

4 สรุป

จากการทดลองให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 210°C ส่งผลให้ความหนืดลดลงมากที่สุด

สอดคล้องกับผลการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเม็ดแป้งที่มีขนาดเล็กที่สุด ในขณะที่ค่าการละลายเพิ่มขึ้นมากที่สุดเช่นกัน ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้สามารถวัดค่าได้เมื่อทำการให้ความร้อนแป้งที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลามากกว่า 10 h ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C ส่งผลให้แป้งมันสำปะหลังมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเดกซ์ทรินมากที่สุดที่เวลามากกว่า 10 h โดยผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นศักยภาพของการใช้รังสีอินฟราเรดในการให้ความร้อนเพื่อผลิตเดกซ์ทรินจากแป้งมันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้รับไปต่อยอดในการผลิตเดกซ์ทรินจากแป้งมันสำปะหลังในระดับอุตสาหกรรม

5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อวัสดุ อุปกรณ์และสถานที่สำหรับการทดลอง

6 เอกสารอ้างอิง

- นิธิยา รัตนพานนท์. 2557. เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 5: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ กรุงเทพฯ.
- สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย. 2558. สถิติส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย กรุงเทพฯ. แหล่งข้อมูล: <http://www.thaitaplocastarch.org>. เข้าถึงเมื่อ 4 เมษายน 2558.
- อนิชา สุขสมบูรณ์, พัลลภ ไพพงษ์, กรกช หล่อโลหการ, กิตติคุณ เชี่ยวเชิงคำ, มนต์ราม อินทศิริ, อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. การใช้ประโยชน์จากข้าว. นิตยสารการงานวิจัยบนเส้นทางงานวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ปี 2550 งานเกษตรแฟร์ ประจำปี 2550. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ฤทธิชัย อัครวราชย์. 2554. เทคโนโลยีการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17(1), 41-52.
- Bello-Pérez, L.A., Romero-Manilla, R., Paredes-López, O. 2000. Preparation and Properties of Physically Modified Banana Starch Prepared by Alcoholic Alkaline Treatment. Starch 52(5), 154-159.
- Defloor, I., Dehing, I., Delcour, J.A. 1998. Physico-chemical properties of cassava starch. Starch 50, 58-64.
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., Smith, F. 1956. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. Analytical Chemistry 28(3), 350-356.

- Hanamaka, D., Furuse, T., Han, W., Tanaka, S. 2006. Effect of the wavelength of infrared heaters on inactivation of bacterial spores at various water activities. *International Journal of Food Microbiology* 108(2), 281–285.
- Harper, J. 1992. Extrusion processing of starch. In: Alexander, R.J., Zobel, H.F. (Eds.), *Developments in Carbohydrate Chemistry*. American Association of Cereal Chemists, USA.
- ICUMSA 2009. International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis - The Determination of Refractometric Dry Substance (RDS%) of Molasses Accepted and Very Pure Syrups (Liquid Sugars), Thick Juice and Run-off Syrups-Methods Book GS4/3/8-13. Peterborough-UK.
- Katz, J.R. 1934. Dextrin (British gum) formed by heating dry starch. *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas* 53, 555-560.
- Krishnamurthy, K., Khurana, H.K., Jun, S., Irudayaraj J., Demicri, A. 2009. Food Processing Operations Modeling: Design and Analysis. In Jun, S. and Irudayaraj, J.M. (Eds.), *Food Science and Technology Series*, (2nd ed.) Boca Raton, FL: CRC Press, 13-142.
- AOAC. 2010. Official Methods of Analysis. (18th ed.). Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C.: USA.
- Noranizan, M.A., Dzulkifly, M.H., Russly, A.R. 2010. Effect of heat treatment on the physico-chemical properties of starch from different botanical sources. *International Food Research Journal* 17, 127–135.
- Radley, J.A. 1976. *Industrial Uses of Starch and its Derivatives*. Springer Science & Business Media.
- Sarifudin, A., Assiry A. 2014. Some physicochemical properties of dextrin produced by extrusion process. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 13, 100–106.
- William, F.B., Kuakoon, P., Klanarong, S. 2009. *Tapioca/Cassava Starch: Production and Use*. Starch. Chemistry and Technology. (3rd ed.).
- Zobel, F.Z., Stephen, A.M. 1995. Starch: structure, analysis and application. In: A. M., Stephen (Eds.), *Food polysaccharides and their application* (pp. 19–66). New York: Taylor & Francis.



การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงช่วงล่างเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดสอบแรง

Strength Analysis of the Track Frame of a Thai-Made Rice Combine Harvester Using the Finite Element Method and the Loading Tests

คงเดช พะสินาม¹, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน^{1*}, คธา วาทกิจ¹, จริญญาศักดิ์ สมพงษ์¹

Khongdet Phasinam¹, Payungsak Junyusen^{1*}, Kata Vatakit¹, Charoonsak Somphong¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา, 30000

¹School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author: Tel: +66-44-224-580, Fax: +66-44-224-610, E-mail: payungs@sut.ac.th

บทคัดย่อ

เครื่องเกี่ยวนวดข้าวมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิตข้าวในประเทศไทยและได้รับความนิยมจากเกษตรกรมากขึ้น ส่วนใหญ่เครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก เนื่องจากโครงช่วงล่างเป็นส่วนประกอบหลักที่ส่งผลต่อขนาดและน้ำหนักของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของโครงช่วงล่างของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยโดยใช้ทั้งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดสอบแรงกับแบบจำลองการทดลอง การจำลองรูปถูกนำมาใช้หาขนาดที่เหมาะสมของแบบจำลองการทดลอง สภาวะการทำงานถูกกำหนดเป็น 2 แบบ คือ หัวเกี่ยวขนานกับพื้นและหัวเกี่ยวยกสูงสุด ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงช่วงล่างแสดงให้เห็นว่า ความเค้นสูงสุดในกรณีหัวเกี่ยวขนานกับพื้นและกรณีหัวเกี่ยวยกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 91.1 MPa และ 91.7 MPa ตามลำดับ ส่วนการโก่งตัวสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.313 mm และ 2.355 mm ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยวิธีทดสอบแรงยืนยันว่า การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงช่วงล่างเครื่องเกี่ยวนวดข้าวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานได้จริง

คำสำคัญ: เครื่องเกี่ยวนวดข้าว, โครงช่วงล่าง, การวิเคราะห์ความแข็งแรง, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

A rice combine harvester has an important role in Thai rice production and has been popular in Thai farmer. Almost Thai-made rice combine harvester is too heavy and large in size. Because the track frame of Thai-made rice combine harvester is a main component that affects the harvester's size and weight, the objective of this research, therefore, was to investigate the track frame strength using both the finite element method (FEM) and the loading test with experimental frame. Similitude analysis was employed for determining the proper scale of experimental frame. Two field work conditions of the harvester's header were selected namely horizontal position and maximum lift position. The FEM results showed that the maximum stresses of those conditions were 91.1 MPa and 91.7 MPa, respectively, while the maximum deflection 2.313 mm and 2.355 mm, respectively. The experimental results from the loading tests confirmed that the strength analysis of track frame using FEM had a high accuracy and could be applied in practical use.

Keywords: Rice combine harvester, Track frame, Strength analysis, Finite element method

1 บทนำ

เครื่องเกี่ยวนวดข้าวมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิตข้าวในประเทศไทย จากการสำรวจพบว่าปัจจุบันมีเครื่องเกี่ยวนวดข้าวใช้งานในประเทศไทยมากกว่า 10,000 เครื่อง (วินิต, 2553) ซึ่งเป็นเครื่องเกี่ยวนวดข้าวที่ผลิตจากโรงงานผู้ผลิตในประเทศไทย

โดยไม่รวมถึงเครื่องเกี่ยวนวดข้าวที่นำเข้าจากต่างประเทศและมีแนวโน้มได้รับความนิยมสูงขึ้นเรื่อยๆ

ระบบกลไกหลักของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ระบบ คือ ระบบเกี่ยวตัดและลำเลียง ระบบนวด คัดทำความสะอาด ระบบช่วงล่างและขับเคลื่อน และระบบเครื่องยนต์ต้นกำลัง (สาทิสม และคณะ, 2548) แนวทางการพัฒนา

ของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยมักจะมุ่งเน้นให้มีสมรรถนะการทำงานสูง และสามารถทำงานได้ทุกสภาพพื้นที่ จึงส่งผลให้เครื่องเกี่ยวนวดข้าวมีขนาดหน้ากว้างการทำงานและขนาดตัวค่อนข้างใหญ่และมีน้ำหนักมาก การพัฒนาเครื่องเกี่ยวนวดข้าวในทิศทางนี้ส่งผลเสียต่อการปลูกข้าว เช่น ก่อให้เกิดปัญหาโครงสร้างของดินถูกทำลาย (สาทิส และคณะ, 2548) นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มต้นทุนและราคาของเครื่องเกี่ยวนวดให้สูงขึ้นอีกด้วย (สันธาร และคณะ, 2544) เมื่อเปรียบเทียบเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยกับเครื่องเกี่ยวนวดข้าวจากต่างประเทศพบว่า เครื่องเกี่ยวนวดจากต่างประเทศมีขนาดค่อนข้างเล็ก น้ำหนักเบา และราคาถูก ปัจจัยเหล่านี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เครื่องเกี่ยวนวดข้าวจากต่างประเทศได้รับความนิยมจากเกษตรกรเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แม้ว่าเครื่องเกี่ยวนวดข้าวต่างประเทศจะทำงานในสภาพนาหล่มได้อย่างจำกัด ดังนั้นเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยจำเป็นต้องถูกพัฒนาให้มีขนาดที่เหมาะสม เพื่อลดผลกระทบต่อน้ำนา ลดต้นทุนการผลิต ตลอดจนเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันทั้งในประเทศและการส่งออก

จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยพบว่า การสร้างระบบช่วงล่าง (Undercarriage) เป็นเพียงการนำเอาระบบขับเคลื่อนแบบตีนตะขาของรถแทรกเตอร์ขนาดใหญ่มาปรับใช้ ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมาก ขนาดค่อนข้างใหญ่ และน้ำหนักมาก โดยทั่วไปเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยมีน้ำหนักประมาณ 7-10 ตัน ระบบช่วงล่างของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวมีน้ำหนักมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเครื่อง และต้องใช้กำลังในการขับเคลื่อนสูงประมาณ 35-40 เปอร์เซ็นต์ของระบบเครื่องยนต์ต้นกำลัง (R. Kalsirisilp and G. Singh, 2001) ระบบช่วงล่างของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยประกอบด้วย โครงช่วงล่าง โซ่ขับ เฟืองโซ่ โรลเลอร์ และใบตีนตะขา โดยโครงช่วงล่างมีน้ำหนักประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ของระบบช่วงล่าง (บริษัท ทะเลทอง แพลคตอรี่ จำกัด, 2555) ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของโครงช่วงล่างเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยโดยใช้ทั้งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดสอบแรงกับแบบจำลองการทดลองของโครงช่วงล่าง ซึ่งจะเป็นการช่วยพัฒนาเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยให้มีความแข็งแรงเหมาะสมกับสภาพการเพาะปลูกข้าวของประเทศไทย

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การวัดภาระที่กระทำบนโครงช่วงล่างของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทย

โครงช่วงล่างของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยยังไม่มีรูปแบบและมาตรฐานที่ชัดเจน ดังนั้นการทำการวิจัยครั้งนี้จึงใช้ข้อมูลของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวยี่ห้อทะเลทอง จาก บริษัท ทะเลทองแพลคตอรี่ จำกัด (บริษัท ทะเลทอง แพลคตอรี่ จำกัด, 2555) น้ำหนักจากส่วนประกอบของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวกระทำบนโครงช่วงล่าง 10 ตำแหน่ง ดังแสดงใน Figure 1 (คงเดช และคณะ, 2557) ค่าการ

กระจายตัวของน้ำหนักเมื่อรถจอดนิ่งบนพื้นระดับถูกวัดตามลักษณะการทำงาน 2 แบบ ดังนี้ 1) หัวเกี่ยวขนานกับพื้น คือเครื่องเกี่ยวนวดข้าวกำลังทำการเก็บเกี่ยว และ 2) หัวเกี่ยวถูกยกสูงสุด คือเครื่องเกี่ยวนวดข้าวกำลังกลับรถหัวแปลงและเปลี่ยนพื้นที่การทำงาน

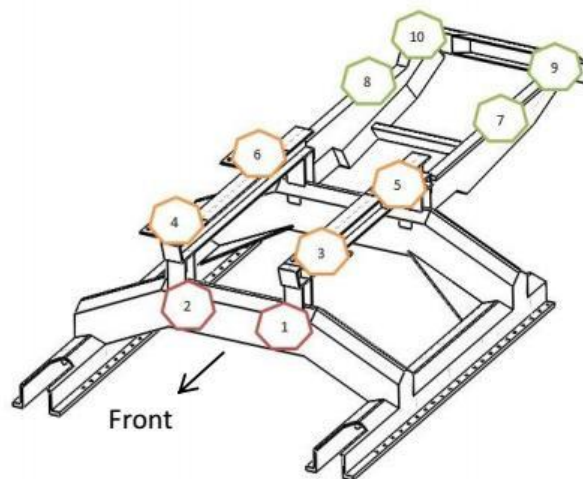


Figure 1 Location of weight measurement.

2.2 การวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ 1) การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element model) ด้วยโปรแกรม SolidWorks ตามสัดส่วนจริง 2) การกำหนดเงื่อนไข คุณสมบัติวัสดุของแบบจำลอง และแรงกระทำบนโครงช่วงล่างตามลักษณะการทำงาน และ 3) การวิเคราะห์ความเค้นและการโก่งตัวของแบบจำลอง

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงช่วงล่างเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยถูกสร้างให้ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นแบบสามเหลี่ยมสี่หน้าสี่จุดต่อ (10-node tetrahedral) และมีขนาดไม่เท่ากัน เพราะโครงสร้างมีความซับซ้อน (ธรรมบุญ และสำราจ, 2550) ดังนั้นแบบจำลองมีขนาด Mesh ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 150-19 mm ซึ่งทำให้มีไฟไนต์เอลิเมนต์จำนวน 45,360 elements และโหนดจำนวน 89,887 nodes ดัง Figure 2

การวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตย์ (Static structural analysis) ถูกนำมากำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงช่วงล่าง และคุณสมบัติวัสดุถูกกำหนดดัง Table 1 ทฤษฎีความเสียหายวอนมิส (von Mises failure theory) ถูกนำมาวิเคราะห์ความแข็งแรงของแบบจำลอง

Table 1 Material property for FEM analysis.

Property	Mild Steel
Young's modulus (GPa)	200
Shear modulus (GPa)	79.3
Yield stress (MPa)	250
Tensile strength (MPa)	400
Poisson ratio	0.26
Density (Mgm-3)	7.85



Figure 2 Mesh of the track frame model.

2.3 การวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์

วิธีการจำลองรูปสำหรับโครงสร้างยึดหยุ่นถูกนำมาปรับใช้กับโครงช่วงล่างของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทย ความเค้น (σ) และการโก่ง (δ) ขึ้นอยู่กับแรง (F) ความยาว (L) และสมบัติของวัสดุตามสมการดังนี้ (Langhaar, 1951)

$$\sigma = \frac{F}{L^2} f_1\left(\frac{F}{EL^2}, \frac{M}{FL}, \nu\right) \quad (1)$$

$$\delta = \frac{F}{EL} f_2\left(\frac{F}{EL^2}, \frac{M}{FL}, \nu\right) \quad (2)$$

โดยที่ E คือ โมดูลัสของความยืดหยุ่น M คือ โมเมนต์ และ V คือ อัตราส่วนปัวซอง

จากสมการ 1 และ 2 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองต้นแบบกับแบบจำลองย่อส่วนเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$K_v = 1, K_F = K_E K_L^2, K_M = K_F K_L, K_\sigma = \frac{K_F}{K_L^2}, K_\delta = K_L \quad (3)$$

โดยที่ K_v , K_F , K_E , K_L , K_M , K_σ , K_δ คือ สัดส่วนของอัตราส่วนปัวซอง, แรง, โมดูลัสของความยืดหยุ่น, ความยาว, โมเมนต์, ความเค้น และการโก่งตัว ตามลำดับ

จากสมการที่ 3 เมื่อกำหนดให้สัดส่วนของโมดูลัสของความยืดหยุ่นและสัดส่วนของอัตราส่วนปัวซองมีค่าเท่ากับ 1 (วัสดุเดิม) และสัดส่วนของความยาวมีค่าเท่ากับ 3 จะได้สัดส่วนของแรง,

ความเค้น และการโก่งตัวมีค่าเท่ากับ 1:9, 1:1 และ 1:3 ตามลำดับ

แบบจำลองโครงช่วงล่างย่อส่วนมีขนาด Mesh ที่เหมาะสมในช่วง 50-7.2 mm ซึ่งทำให้มีเอลิเมนต์จำนวน 44,553 elements และโหนดจำนวน 88,217 nodes

2.4 แบบจำลองการทดลองของโครงช่วงล่างเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทย และการทดสอบแรง

แบบจำลองการทดลอง (Experimental model) ของโครงช่วงล่างเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยถูกสร้างเพื่อยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การตรวจสอบความถูกต้องทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าความเค้นและค่าการโก่งตัวระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) กับการทดสอบแรง (Loading test) ภายใต้โหลดที่กำหนด แบบจำลองการทดลองถูกสร้างจากเหล็ก SS400 (Mild steel) มีคุณสมบัติดัง Table 1 และถูกเชื่อมประสานให้เป็นโครงสร้างเดียวกันด้วยการเชื่อมไฟฟ้า (Arc welding)

ความเครียดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองการทดลองถูกวัดโดยใช้สเตรนเกจ ยี่ห้อ TML แบบ 45° 3-element Rosette, Stacked type รุ่น FRA-1-11-1L และถูกขยายสัญญาณด้วยชุดขยายสัญญาณยี่ห้อ Yokogawa รุ่น MW100 ไดอัลเกจยี่ห้อ Kennedy รุ่น 300-7520K ซึ่งมีค่าความละเอียด 0.01 mm ถูกใช้วัดค่าการโก่งตัวของแบบจำลองนี้

เนื่องจากข้อจำกัดในการกำหนดโหลดให้กับแบบจำลองการทดลองของโครงช่วงล่าง ดังนั้นการทดสอบแรงจึงถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้ การทดสอบแรงแบบที่ 1 เป็นการทดสอบแรงอย่างง่าย โดยการแขวนก้อนน้ำหนักที่มีขนาด 97 N, 194 N, 349 N, 502 N, 726 N, 852 N, 1,007 N และ 1,257 N กระทำในแนวตั้งตรงตำแหน่งศูนย์กลางมวล (CG) ของแบบจำลอง เพื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นและค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง FEM กับ แบบจำลองการทดลอง โดยวัดค่าความเครียดและค่าการโก่งตัวบนตำแหน่ง C ส่วนการทดสอบแรงแบบที่ 2 ถูกทำเพื่อจำลองสถานการณ์การรับภาระของโครงช่วงล่าง โดยการกำหนดโหลดขนาด 500 N กระทำในแนวตั้งตรงตำแหน่ง A, B, E และ F และโหลดขนาด 225 N กระทำในแนวตั้งตรงตำแหน่ง C, D, G และ H เพื่อวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนตำแหน่ง A, B, C และ D พร้อมกับวัดค่าการโก่งตัวของแบบจำลองการทดลองที่ตำแหน่ง I ดังแสดงใน Figure 3

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการวัดภาระที่กระทำบนโครงช่วงล่างและการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทย

จากการวัดภาระที่กระทำบนโครงช่วงล่างของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวพบว่า ตำแหน่งที่ 3 รับภาระสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17,214 N และ 19,732 N สำหรับกรณีหัวเกี่ยวขนานกับพื้นและกรณีหัว

เกี่ยวถูกยกสูงสุด ตามลำดับ โดยภาระเหล่านี้มาจากระบบนวด คัดทำความสะอาด และระบบเกี่ยวตัดและลำเลียง ใน ขณะเดียวกัน ตำแหน่งที่ 10 รับภาระน้อยสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,737 N ทั้งสองกรณี โดยภาระเหล่านี้มาจากระบบเครื่องยนต์ ต้นกำลัง ดังแสดงใน Figure 4

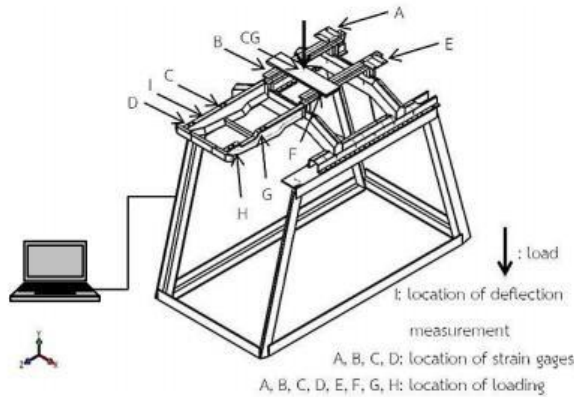
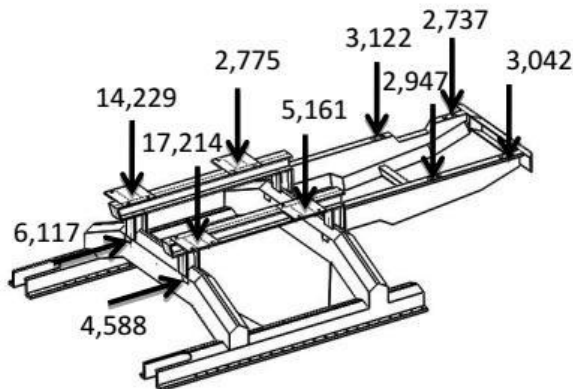
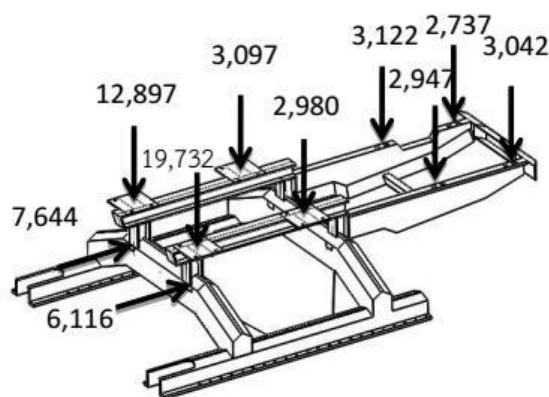


Figure 3 Loading test set-up.



(a) Horizontal header position.



(b) Maximum lift header position.

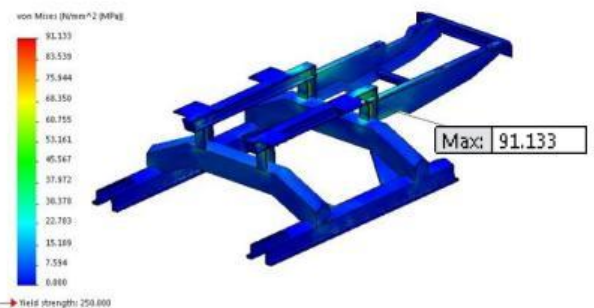
Figure 4 Direction and magnitude of external forces on the track frame model under two field work conditions (digits denote forces in Newton).

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีหัวเกี่ยวขนานกับพื้นและกรณีหัวเกี่ยวถูกยกสูงสุดมีค่า

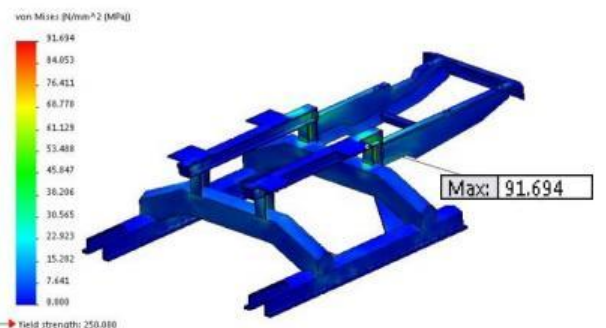
เท่ากับ 91.1 MPa และ 91.7 MPa ตามลำดับ ส่งผลให้มีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 2.7 ทั้งสองกรณี ความเค้นสูงสุดเหล่านี้เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง X=-325, Y=616.78, Z=1,717 ซึ่งอยู่ตรงกลางรอยต่อระหว่างคานด้านซ้ายกับเสาหลังด้านซ้ายได้ระบบนวดคัดทำความสะอาดดังแสดงใน Figure 5 การโก่งตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีหัวเกี่ยวขนานกับพื้นและกรณีหัวเกี่ยวถูกยกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.313 mm และ 2.355 mm ตามลำดับ ณ ตำแหน่ง X=-430, Y=619.78, Z=3270 ซึ่งอยู่ตรงบริเวณด้านซ้ายของคานหลังที่รับน้ำหนักจากระบบเครื่องยนต์ต้นกำลังดังแสดงใน Figure 6

3.2 ผลการวิเคราะห์ทางการจำลองรูป

Figure 7 แสดงแรงกระทำบนแบบจำลองย่อยส่วนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งมีขนาดลดลง 9 เท่า จากแบบจำลองต้นแบบ ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงแสดงให้เห็นว่า ความเค้นสูงสุด ความปลอดภัย และการโก่งตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีหัวเกี่ยวขนานกับพื้นมีค่าเท่ากับ 91.0 MPa, 2.7 และ 0.773 mm ตามลำดับ ดัง Figure 8 ส่วนในกรณีหัวเกี่ยวถูกยกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 92.2 MPa, 2.7 และ 0.787 mm ตามลำดับ ซึ่งเกิดขึ้นตรงตำแหน่งเดิมใน Figure 5 และ Figure 6 ค่าความเค้นและค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองต้นแบบกับแบบจำลองย่อยส่วนมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ 3 จึงทำให้การกระจายตัวของความเค้นบนแบบจำลองทั้งสองคล้ายคลึงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลการจำลองรูปของโครงช่วงล่างเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยมีความถูกต้อง

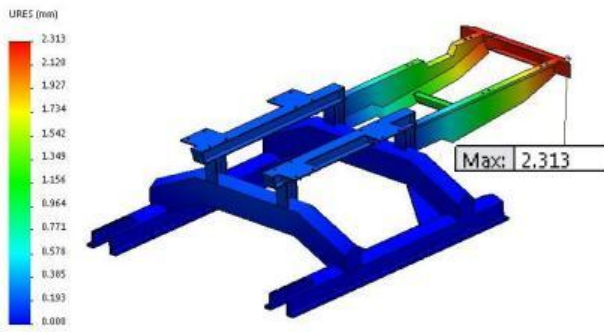


(a) Horizontal header position.

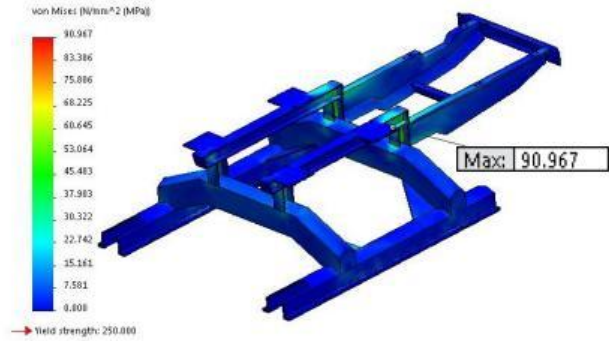


(b) Maximum lift header position.

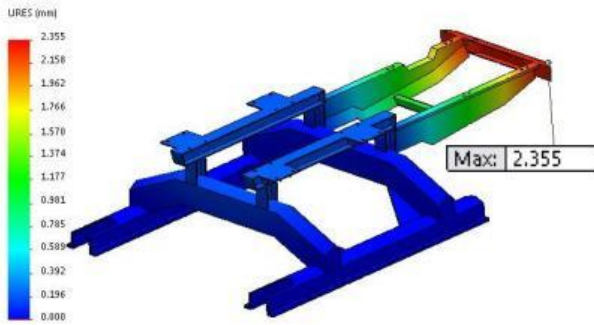
Figure 5 Stress distributions on the track frame model under two field work conditions.



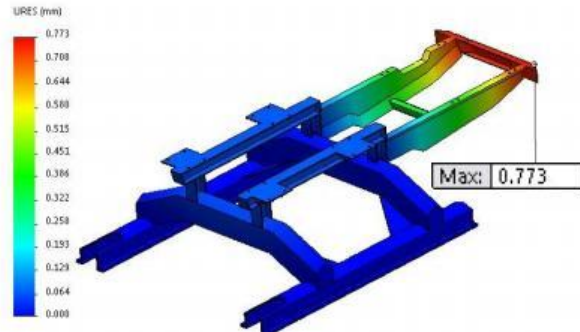
(a) Horizontal header position.



(a) Stress distribution.



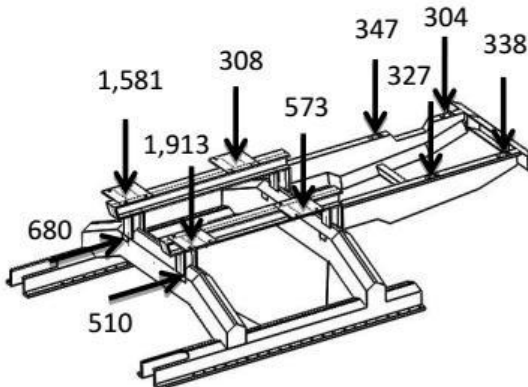
(b) Maximum lift header position.



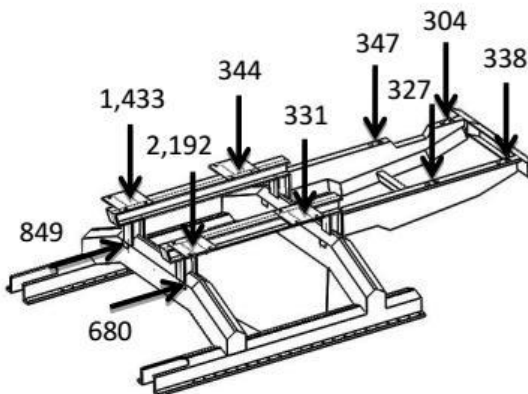
(b) Deflection distribution.

Figure 6 Deflection distributions on the track frame model under two field work conditions.

Figure 8 Stress and deflection distributions on the similitude model of the track frame under horizontal header position.



(a) horizontal header position.



(b) maximum lift header position.

Figure 7 Direction and magnitude of external forces on the similitude model of the track frame under two field work conditions (digits denote forces in Newton).

3.3 ผลการทดสอบแรง

Figure 9 แสดงการเปรียบเทียบที่ตำแหน่ง C ของการทดสอบแรงแบบที่ 1 จากการเปรียบเทียบพบว่า ค่าความเค้นจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าความเค้นที่อ่านได้จริงจากแบบจำลองการทดลองมีค่าแตกต่างกัน $\pm 1\%$ ส่วนในการทดสอบแรงแบบที่ 2 ค่าความเค้นจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าความเค้นจากแบบจำลองการทดลองมีค่าแตกต่างกันต่ำกว่า 5% ดังแสดงใน Figure 10

จากการวัดการโก่งตัวของแบบจำลองย่อส่วนพบว่า ในการทดสอบแรงแบบที่ 1 การโก่งตัวจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่า 0.008 mm ส่วนการโก่งตัวจากแบบจำลองการทดลองไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัด ในการทดสอบแรงแบบที่ 2 การโก่งตัวจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่า 0.396 mm และค่าการโก่งตัวจากแบบจำลองการทดลองมีค่า 0.40 mm ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกัน

ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เนื่องมาจากแบบจำลองทาง FEM มีการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ในทุก ๆ ตำแหน่งของเนื้อวัสดุของโครงสร้าง โดยไม่ได้คำนึงถึงแนวเชื่อมมาวิเคราะห์ด้วย ซึ่งไม่ถูกต้องสำหรับแบบจำลองการทดลอง เพราะการสร้างแบบจำลองการทดลองต้องผ่านกระบวนการเชื่อมประสาน การตัด และการขัดสี เป็นต้น จึงทำให้คุณสมบัติทางกลและกระบวนการทางความร้อนเปลี่ยนแปลง

การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์ความแข็งแรงของ โครงช่วงล่างเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความถูกต้องในระดับที่เชื่อถือได้

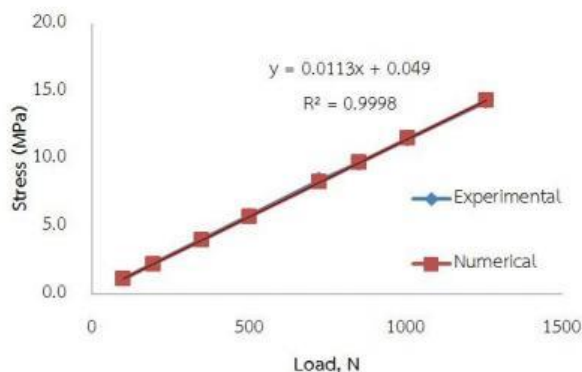


Figure 9 Calculated and measured stresses at C position under the loading test 1.

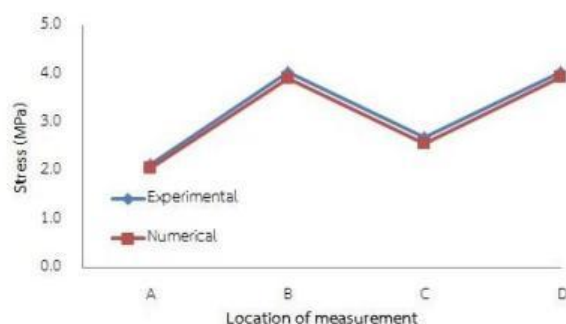


Figure 10 Calculated and measured stresses at A, B, C, and D positions under the loading test 2.

4 สรุป

1) โครงช่วงล่างของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวรับภาระสูงสุด ณ ตำแหน่งที่ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17,214 N และ 19,732 N สำหรับ กรณีหัวเกี่ยวขนานกับพื้นและกรณีหัวเกี่ยวถูกยกสูงสุดตามลำดับ และรับภาระน้อยสุด ณ ตำแหน่งที่ 10 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,737 N ทั้งสองกรณี

2) ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีหัวเกี่ยวขนานกับพื้นและกรณีหัวเกี่ยวถูกยกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 91.1 MPa และ 91.7 MPa ตามลำดับ ความปลอดภัยมีค่า 2.7 ทั้งสองกรณี ส่วนการโก่งตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 2.313 mm และ 2.355 mm ตามลำดับ

3) ความเค้นและการโก่งตัวที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองต้นแบบกับแบบจำลองย่อส่วนมีความสัมพันธ์กันตามหลักการการจำลองรูป ดังนั้นผลการจำลองรูปของโครงช่วงล่างเครื่องเกี่ยวนวดข้าวจึงมีความถูกต้อง

4) ความเค้นและการโก่งตัวจากการทดสอบแบบที่ 1 และ 2 แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงช่วงล่างเครื่องเกี่ยวนวดข้าวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความถูกต้องและสามารถใช้งานได้จริง

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย บริษัททะเลทองแฟคตอรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลงานวิจัย และมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงครามที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษา

6 เอกสารอ้างอิง

- คงเดช พะสีนาม, พยุงศักดิ์ จุลยเสน, คธา วาทกิจ, จริญญาศักดิ์ สมพงศ์. 2557. การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงช่วงล่างของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. รายงานการประชุมวิชาการงานเกษตรแฟร์นนทรีอีสาน ครั้งที่ 2, 62-71. สกลนคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ. 2 ธันวาคม 2557, สกลนคร.
- ธรรมบุญ สีดาการ, สำราญ อินแบน. 2550. การวิเคราะห์และปรับปรุงความแข็งแรงของบ่าเพลาลูกหีบ. รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, 1087-1092. ชลบุรี: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรืออากาศ กองบัญชาการฝึกศึกษาทหารอากาศ. 17-19 ตุลาคม 2550, ชลบุรี.
- บริษัท ทะเลทอง แฟคตอรี จำกัด. 2555. ข้อมูลจำเพาะของรถเกี่ยวนวดทะเลทอง. เอกสารแผ่นพับ.
- วินิต ชินสุวรรณ. 2553. การศึกษาประเมินประสิทธิภาพเครื่องเกี่ยวนวดข้าวเพื่อลดความสูญเสียและเพิ่มศักยภาพในการส่งออก. รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
- สาทิส เวณจันทร์, จารุวัฒน์ มงคลธนตรศ, มานพ คันธามารัตน์, ทรงยศ จันทรมานิตย์. 2548. วิจัยและพัฒนาเครื่องเกี่ยวนวดข้าวขนาดเล็ก. เอกสารวิชาการ, กองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร.
- สันธาร์ นาควัฒนานุกูล, ทรงยศ จันทรมานิตย์, วชิรพันธ์ ตันติภูมิอมร, มานพ คันธามารัตน์. 2544. ศึกษาและพัฒนาระบบการใช้เครื่องเกี่ยวนวดข้าวในประเทศไทย. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2 ประจำปี 2544. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น 25-26 มกราคม 2554, ขอนแก่น.
- Roongruang, K., Singh, G. Power requirement of a Thai-made rice combine harvester. Proceedings of the 2001 Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, 311-319. Khon Kaen: 25-26 January 2001, Khon Kaen, Thailand.
- Langhaar, H.L. 1951. Dimensional Analysis and Theory of Models. New York: John Wiley & Sons.



จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไยสีทองด้วยการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวและอุณหภูมิแบบหลายขั้น Drying Kinetics of Peeled Longan using Single-Stage and Multi-Stage Temperature

ฤทธิชัย อัสวาราชันย์^{1,2,*}, อุมพร อุประ^{1,2}, เสมอขวัญ ตันติกุล^{1,2}, พัชรmani อุณหพิพัฒพงศ์^{1,2}

Rittichai Assavarachan^{1,2,*}, Umaporn Upara^{1,2}, Samerkhwan Tantikul^{1,2}, Patcharamanee Unhapipatpong^{1,2}

¹ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, 50290

¹ Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Sansai, Chiang Mai 50290, Thailand

² ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กทม. 10400

² Postharvest Technology Innovation Center, Commission on Higher Education, Bangkok 10400, Thailand

*Corresponding author: Tel: +66-8-5704-9146, Fax: +66-34-351-896, E-mail: rittichai.assavarachan@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแบบขั้นเดียวของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ 60, 70 และ 80°C และการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น โดยการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C และการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C จนเนื้อลำไยอบแห้งมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ $0.11 \pm 0.03 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดขนาดห้องปฏิบัติการ เพื่อหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมของเนื้อลำไย และผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยค่าพารามิเตอร์ ค่าความสว่าง (L^* -value) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^* -value), ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^* -value), ค่าความแตกต่างสีรวม (TCD) และดัชนีการเป็นสีน้ำตาล (BI) การวิเคราะห์แบบถดถอยเป็นวิธีที่ใช้หาความเหมาะสมของแบบจำลองเอมพิริคัลจำนวน 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของของ Newton, Henderson and Pabis และ Page ผลการศึกษาพบว่าแบบของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเนื้อลำไยอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำสุด ผลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแบบขั้นเดียว และการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นของการอบแห้งเนื้อลำไยพบว่า การอบที่แห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นที่ใช้ความร้อน 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการรักษาสีของเนื้อลำไยอบแห้ง (L^* -value) และค่าความเป็นสีเหลือง-แดง (b^* -value) มากกว่าสภาวะอื่น แต่มีค่าสีแดง-เขียว (a^* -value) และมีค่า Browning Index ต่ำ ทำให้มีลักษณะปรากฏเป็นเนื้อลำไยสีทอง

คำสำคัญ: ลำไยอบแห้ง การอบแห้งด้วยลมร้อน การใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว การใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น

Abstract

In this study, drying characteristics of peeled longan fruit underwent the laboratory-scaled-tray drying system. The drying conditions of single-stage drying temperature were 60, 70 and 80°C and multi-stage drying temperature for 80°C (60 min) followed by 70°C and 80°C (120 min) followed by 70°C. The drying rate of single-stage drying temperature required to reduce moisture content of peeled longan fruit from 8.64 ± 0.34 to $0.11 \pm 0.03 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ was $0.0078\text{-}0.0203 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}^{-1}$. Whereas the drying rate of multi-stage drying temperature were 0.0138 and $0.0189 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}^{-1}$. To evaluate the drying kinetics of peeled longan fruit, the obtained experimental data was applied to three mathematical models (Newton, Page and Henderson & Pabis) and the model with the best fit was determined. The results showed that the Page model could describe the drying characteristics at the most satisfactory level because it gave the highest coefficient of determination ($0.9361\text{-}0.9980$), the least chi-square ($0.0585\text{-}0.0005$), and the lowest root mean square error ($0.0193\text{-}0.2379$). The drying conditions multi-stage drying temperature for 80°C (120 min) followed by 70°C was suitable for color retention of dried peeled longan fruit. The results of the color changes in CIE- $L^*a^*b^*$ of dried peeled longan fruit, L^* -value and b^* -value was highest however a^* -value and Browning Index was low. This trend shows dried peeled longan fruit in gold color after drying.

1 บทนำ

ลำไย (*Dimocarpus longan* Lour.) เป็นไม้ผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจอันดับหนึ่งของภาคเหนือโดยเฉพาะอย่างยิ่งจังหวัดเชียงใหม่และลำพูน ผลผลิตของลำไยสามารถส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศทั้งในรูปของผลสด อบแห้ง แช่แข็ง และลำไยกระป๋อง ซึ่งสร้างรายได้ปีละหลายพันล้านบาท และมีแนวโน้มการส่งออกเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งลำไยอบแห้ง สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรจึงได้ดำเนินการศึกษา (2558) ได้ดำเนินการศึกษาปริมาณการแปรรูปลำไยอบแห้ง และมูลค่าทางเศรษฐกิจในระหว่างปี 2555-2557 พบว่าการแปรรูปลำไยอบแห้งเท่ากับ 466,175 ton/year คิดเป็นมูลค่าทางเศรษฐกิจเท่ากับ 13,319 ล้านบาท การแปรรูปลำไยอบแห้งจึงเป็นแนวทางที่สำคัญอย่างยิ่งในการแก้ไขปัญหาหาค่าลำไยตกต่ำ หรือปริมาณลำไยล้นตลาด ดังนั้นจำเป็นต้องอาศัยองค์ความรู้อย่างมากในการศึกษาและหาแนวทางในการพัฒนากระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นแนวทางปรับปรุงคุณภาพผล หรือสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยสีทองอบแห้ง (Optical properties) ดังนั้นการศึกษาในส่วนที่เกี่ยวกับคุณลักษณะการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบหลายชั้นจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนากระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นแนวทางปรับปรุงคุณภาพผลเนื้อลำไยอบแห้งสีทอง

การทำนายจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ของเนื้อลำไยในระหว่างการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling) เป็นวิธีการที่ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง สามารถวิเคราะห์หาข้อมูลจำนวนมากอย่างละเอียดซึ่งอาจจะเป็นข้อมูลที่วัดได้ยากหรือวัดไม่ได้เลยในห้องปฏิบัติการ (สีกกมน, 2555) ปัจจุบันการจำลองจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์สามารถทำได้ด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง (Curve fitting) ให้ผลการจำลองข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยสามารถจำแนกได้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (Linear model) แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear model) และแบบจำลองพหุนาม (Polynomial model) เพื่อใช้การจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้ง (ฤทธิชัย, 2556) การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด และค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่น้อยสุด (ฤทธิชัย, 2558) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ในการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแบบชั้นเดียว และการใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้นเพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะการอบแห้งของทั้ง 2 เทคนิคในรูปแบบของอัตราการอบแห้ง (Drying rate) ค่าพลังงานรวมจำเพาะในการอบแห้ง (SECs) และการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยอบแห้งในระบบสี CIE ประกอบด้วย ค่า

ความสว่าง (L^* -value) ค่าความเป็นสีเหลือง-แดง (b^* -value) รวมถึงการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมของจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไยสีทองด้วยการใช้อุณหภูมิแบบชั้นเดียวและอุณหภูมิแบบหลายชั้น องค์ความรู้จากงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางให้ผู้ประกอบการหรือผู้ที่สนใจการนำบูรณาการในการทำแผนธุรกิจในการขยายการแปรรูปเนื้อลำไยอบแห้งสีทองต่อไป

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัตถุดิบ

นำผลลำไยพันธุ์อีดอ ขนาดเกรดจัมโบ้ (รหัสเกรด AA) จำนวน 500 kg นำมาปอกเปลือก คว้านเมล็ด และเนื้อลำไยล้างน้ำสะอาด จากนั้นแช่ในสารละลาย KMS ความเข้มข้นที่ 1,000 ppm เป็นเวลา 10 min (พุทธินันท์ และคณะ, 2551) จากนั้นนำมาแบ่งบรรจุลงในถุงพลาสติกโพลีเอทิลีนที่มีซิปล็อคเก็บไว้ในตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 10°C เพื่อรอการนำไปวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นต่อไป

2.2 การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นของเนื้อลำไย

การวิเคราะห์ความชื้นเริ่มต้นของเนื้อลำไยโดยใช้เนื้อลำไยจำนวน 5.0 g ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 oz ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้น จำนวน 25 ตัวอย่าง และทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบแห้งด้วยลมร้อน (500/108I, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 h (AOAC, 2010) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล (CP2245, Sartorius Analytical, Switzerland) ความชื้นของเนื้อลำไย (MC , $\text{g water / g dry matter}^{-1}$) ถูกคำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$MC = \frac{W_i - W_f}{W_f} \quad (1)$$

เมื่อ W_i และ W_f คือน้ำหนักเริ่มต้นของเนื้อลำไย (g) และน้ำหนักสุดท้ายของกากเนื้อลำไย (g) ตามลำดับ

2.3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อลำไย

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแบบชั้นเดียวของการอบแห้งเนื้อลำไย และการใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้น การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น (MR) ของเนื้อลำไยอบแห้ง ด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดถูกออกแบบและสร้างโดย สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ระบบสร้างลมร้อนซึ่งประกอบด้วยขดลวดไฟฟ้าขนาด 1.1 kW จำนวน 3 ขด และพัดลมซึ่งถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ปรับความเร็ว (DVUS-940W1, Panasonic Corp., Japan) ควบคุมอุณหภูมิของ

อากาศร้อนด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิระบบ PID (TTM J4/J5, Toho, Japan) ถาดสำหรับวางตัวอย่างติดตั้งตาข่าย (CDR-3, CST, China) สำหรับวัดและบันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างเนื้อลำไย และบันทึกค่าผ่านจากช่องสัญญาณ RS-485 ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณและเครื่องคอมพิวเตอร์ สำหรับบันทึกข้อมูล โดยข้อมูลที่ถูกบันทึกค่าประกอบด้วย น้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งถูกบันทึกทุกๆ 5 min นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณในรูปแบบของค่าความชื้น และอัตราส่วนความชื้นในตามสมการที่ (2) ตามลำดับ จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบถดถอย (ฤทธิ์ชัย และคณะ 2556)

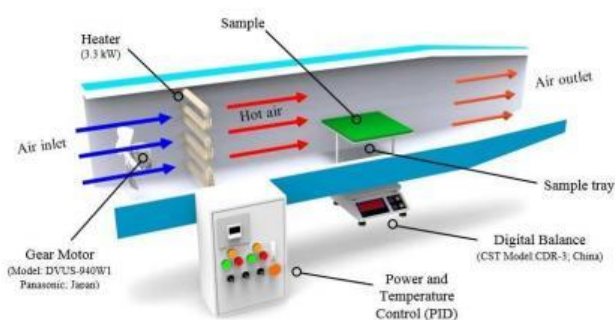


Figure 1. Diagram of the tray drying system.

อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งของเนื้อลำไย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น และ M_t , M_i , M_e คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, EMC) ตามลำดับ นำเนื้อลำไยสดมีน้ำหนักเริ่มต้น 300 ± 15 g อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด (Figure 1) จากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ $0.11 \pm 0.03 \frac{\text{g}_{\text{water}}}{\text{g}_{\text{dry matter}}}$

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

แบบจำลองการอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ แบบจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัล (empirical equation) เช่น แบบจำลอง Newton, Page และ Henderson and Pabis ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดัง Table 1 การวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear regression) ด้วยวิธีปรับเส้นโค้ง (Doymaz and İsmail, 2011; Assawarachan, 2013; Unhapitapong, et al., 2015; ฤทธิ์ชัย และคณะ, 2558)

Table 1 Mathematical models given by various authors.

Model name	Model equation
Newton	$MR = \exp(-k t)$ (3)
Page	$MR = \exp(-k t^n)$ (4)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-k t)$ (5)

การวิเคราะห์รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2), ค่าโคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นดัชนีบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงใน Eq. (6)-(7)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n_p} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (7)$$

เมื่อค่า $MR_{exp,i}$ และ $MR_{pre,i}$ คือ ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของแบบจำลองการอบแห้ง N คือจำนวนข้อมูลในการทดลอง และ n_p คือจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

2.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยอบแห้ง

วัดค่าสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยสดด้วยเครื่อง CR-400 chroma meter (Model: Konica Minolta; Japan) แสดงตาม Figure 2. วัดค่าความสว่าง (L^* -value) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^* -value), ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^* -value) จากนั้นนำค่าสีวิเคราะห์ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) เมื่อเปรียบเทียบการสีเนื้อลำไยสด ตามสมการที่ (8)

$$TCD = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (8)$$

เมื่อค่า L_0^* , a_0^* และ b_0^* คือค่าความสว่าง, ค่าความเป็นสีแดง-เขียว ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงินของเนื้อลำไยสด และ L^* , a^* และ b^* คือค่าความสว่าง, ค่าความเป็นสีแดง-เขียว ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงินของเนื้อลำไยอบแห้ง



Figure 2. Photography of CR-400 chroma meter (Konica Minolta; Japan).

2.6 การวิเคราะห์หาค่า Browning index (BI)

นำตัวอย่างลำไยแห้งบดละเอียด (ลำไยสดจำนวน 10 g และลำไยแห้ง 3-5 g ใส่ในขวดรูปชมพู่เติม 2% acetic acid ปริมาตร 30 ml ทิ้งไว้ 10 min นำมาปั่นละเอียด นาน 30 sec นำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 จากนั้นนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดซึมแสงที่ความยาวคลื่นของแสงที่ 420 nm โดยเทียบกับสารละลาย 2% acetic acid เป็นสารมาตรฐาน (Baloch และคณะ; 1973)

2.7 การวิเคราะห์พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง (SECs)

การวิเคราะห์ค่าพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง หรือ Specific energy consumption (SECs) ของการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้า รุ่น KM-07 บริษัท Primus ประเทศไทย

3 ผลและวิจารณ์

3.1 คุณลักษณะเนื้อลำไยอบแห้ง

การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นของเนื้อลำไยมีค่าเท่ากับ $1.72 \pm 0.03 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ และสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE ด้วยค่าความสว่าง (L^* -value) ค่าความเป็นสีแดง (a^* -value) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^* -value) ของเนื้อลำไยสดเท่ากับ 36.4 ± 0.3 , -1.8 ± 0.2 และ 6.5 ± 0.4 ตามลำดับ จากนั้นดำเนินศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งของเนื้อลำไยอบแห้งในสภาวะต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าเส้นโค้งของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อลำไยในระหว่างการอบแห้งในระหว่างการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว (Single-stage drying) และอุณหภูมิแบบหลายขั้น (Multi-stage drying) ตามที่แสดงใน Figure 3 และ Figure 4 ตามลำดับ ผลการศึกษาเส้นโค้งของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อลำไยในระหว่างการอบแห้งด้วยการใช้ Single-stage drying จากความชื้นเริ่มต้นจนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ $0.0554 \pm 0.003 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ มีอัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.0078, 0.0152 และ $0.0230 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{DM}}^{-1} \cdot \text{min}$ และมีพลังงานเฉพาะในการอบแห้ง (SECs) เท่ากับ 25.36, 23.17 และ $22.90 \text{ kJ kg}_{\text{water}}^{-1}$ ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C ตามลำดับ

Table 2 Drying rate and SECs of of dried peeled longan fruit.

Drying condition	Drying rate ($\text{g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{DM}}^{-1} \cdot \text{min}$)	SECs ($\text{kJ/kg}_{\text{water}}$)
60°C	0.0078	25.36
70°C	0.0152	23.17
80°C	0.0230	22.90
80°C (1 h) 70°C (9.0h)	0.0138	17.64
80°C (2 h) 70°C (6.5 h)	0.0189	15.01

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่า SECs ก็มีค่าลดลง เนื่องจากการอบแห้งเนื้อลำไยที่อุณหภูมิต่ำนั้นใช้เวลาในการอบแห้งที่นานจนส่งผลให้มีค่า SECs มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงที่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C พบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น 46.10% และ 76.27% เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น 60 เป็น 70°C และเพิ่มขึ้น 70 เป็น 80°C ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการอบแห้งของการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยใช้อุณหภูมิแบบ Multi-stage drying เท่ากับ 0.0138 และ $0.0189 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{DM}}^{-1} \cdot \text{min}$ ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C และการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C จนเนื้อลำไยอบแห้งตามลำดับ (Table 2) จากผลการศึกษาพบว่าค่า SECs ของการอบแห้งด้วยการใช้ Single-stage drying มีค่ามากกว่าการใช้อุณหภูมิแบบ Multi-stage drying ทั้งสองสภาวะเนื่องจากเนื้อลำไยมีค่าความชื้นเริ่มต้นที่สูง การเคลื่อนที่ของของเหลวอันเนื่องจากการแพร่ของของเหลวบนผิวรูปทรงภายในโครงสร้างเซลล์ของเนื้อลำไย (Surface diffusion) การเคลื่อนที่ของไอน้ำในรูปแบบของการแพร่เนื่องจากความแตกต่างของความดันไอ (vapor diffusion) ดังนั้นเมื่อเนื้อลำไยได้รับอุณหภูมิความร้อนที่อุณหภูมิสูงในช่วงเริ่มต้นทำให้เกิดความแตกต่างของความดันภายในโครงสร้างเซลล์และที่บริเวณผิวนอกเกิดความดันมากกว่าปกติส่งผลต่อมวลความชื้นที่เคลื่อนที่ผ่านออกไปอย่างรวดเร็วรวมทั้งบริเวณผิวของเนื้อลำไย เนื่องจากสารละลายในเนื้อลำไยมีลักษณะที่เป็นของเหลวความหนืดสูงจึงเกิดเป็นลักษณะที่เคลื่อนที่ผิวนอกของเนื้อลำไยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์การบีบของเหลว (ผดุงศักดิ์, 2550)

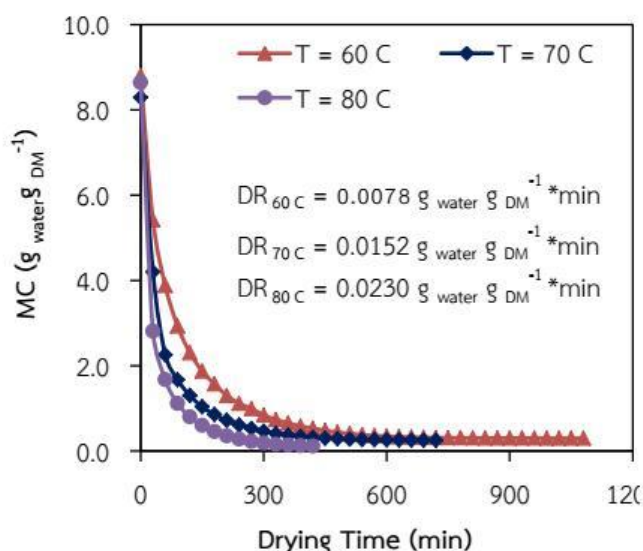


Figure 3 Effects of single-stage drying temperature on the moisture content of peeled longan fruit change at any time.

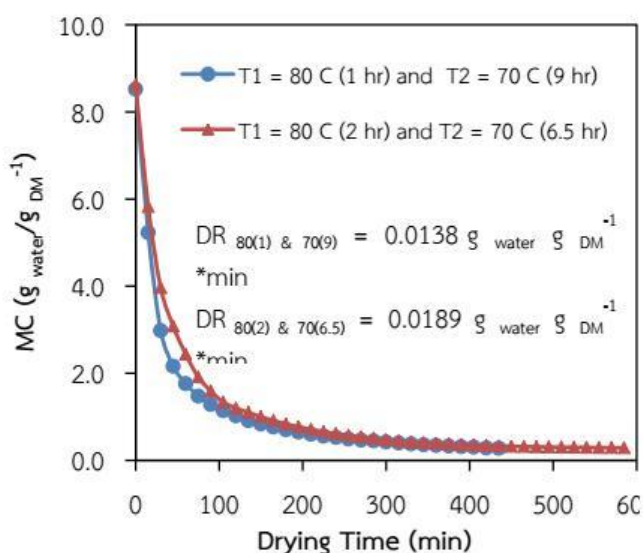


Figure 4. Effects of multi-stage drying temperature on the moisture content of peeled longan fruit change at any time.

ปรากฏการณ์ดังกล่าวมีลักษณะเดียวกับการแพร่ของมวลความชื้นจากพลังงานความร้อน จากนั้นมวลความชื้นของน้ำจะถูกถ่ายเทออกมาที่ผิวของเนื้อลำใยและเปลี่ยนเป็นไอน้ำและถูกพัดพาไปกับตัวกลางอากาศร้อน ดังนั้นเมื่อลดอุณหภูมิลงก็จะส่งผลให้มวลความชื้นในโครงสร้างภายในเซลล์ค่อยๆ แพร่จากที่ผิวของเนื้อลำใย และการใช้อุณหภูมิต่ำในช่วงที่สองสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลโดยไม่ใช้เอนไซม์ได้

3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือแบบจำลองเอมพิริคัลของการอบแห้งเนื้อลำใยโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวและอุณหภูมิแบบหลายขั้นจนเนื้อลำใยอบแห้งมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ $0.11 \pm 0.03\text{ g water/g dry matter}$ ซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองของ Newton, Page และ Henderson and Pabis ซึ่งเป็นแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear model)

การวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเนื้อลำใยอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าโคกกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำสุด (Unhapipatpong, *et al.*, 2015; Doymaz and İsmail, 2011, Assawarachan, 2013 และฤทธิชัย, 2558)

Table 3 Regression coefficients of thin layer drying models for single-stage drying temperature and multi-stage temperature peeled longan.

Drying Model	Drying Condition (°C)	Drying Model Constants		R^2	$\chi^2 \times 10^{-3}$	RMSE
Newton	60	$k = 0.0023$		0.9748	1.97	0.0438
	70	$k = 0.0035$		0.9842	1.54	0.0386
	80	$k = 0.0068$		0.9955	0.58	0.0233
	80 ¹ and 70 ⁹	$k = 0.0203$		0.9361	58.5	0.2379
	80 ² and 70 ^{6.5}	$k = 0.0273$		0.9761	3.01	0.0630
Page	60	$k = 0.0049$	$n = 0.8777$	0.9927	1.55	0.0384
	70	$k = 0.0071$	$n = 0.8740$	0.9841	1.11	0.0321
	80	$k = 0.0073$	$n = 0.9997$	0.9976	0.43	0.0193
	80 ¹ and 70 ⁹	$k = 0.0926$	$n = 0.6324$	0.9408	15.34	0.1195
	80 ² and 70 ^{6.5}	$k = 0.1392$	$n = 0.5743$	0.9863	1.32	0.0412
Henderson and Pabis	60	$k = 0.0023$	$a = 0.9782$	0.9905	2.01	0.0437
	70	$k = 0.0034$	$a = 0.9747$	0.9923	1.53	0.0377
	80	$k = 0.0070$	$a = 0.9989$	0.9980	0.67	0.0251
	80 ¹ and 70 ⁹	$k = 0.9192$	$a = 0.9194$	0.9573	30.24	0.1681
	80 ² and 70 ^{6.5}	$k = 0.0250$	$a = 0.9394$	0.9792	2.76	0.0602

แบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 ในช่วง 0.9408 - 0.9976 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลอง และค่า χ^2 และ RMSE มีค่าเท่ากับ 0.000043-0.0015 และ 0.0193-0.1195 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองเอมพิริคัลของ Newton และ Henderson and Pabis สอดคล้องกับรายงานวิจัยของการศึกษาผลกระทบของต่อจุลินทรีย์การอบแห้งจากเนื้อมะพร้าว, ดอกเก็กฮวย ใบโหระพา และ มะเขือเทศแผ่น พบว่าแบบจำลองเอมพิริคัล Page ที่เหมาะสมในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น (ฤทธิ์ชัย; 2558, ปองพล และคณะ, 2556 และ Abano, et al.2011) ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาแบบจำลองเอมพิริคัลที่ใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัตถุดิบเกษตรเป็นจำนวนมาก และแบบจำลองเอมพิริคัลด้วยการปรับโค้ง (Curve fitting) แบบจำลองเอมพิริคัลแบบลูกผสม (Hybrid model) ซึ่งเป็นการรวมเอาตัวแปรของแบบจำลองอื่นเข้าในใช้ร่วมการทำนาย เช่น Midilli et al. และ Logarithmic อย่างไรก็ตามแบบจำลองเอมพิริคัลแบบลูกผสมนั้นมีข้อจำกัดที่สำคัญในด้านของการพัฒนาสู่เป็นแบบจำลองทั่วไป เนื่องจากมีการปรับโค้งของตัวแปรจำนวนมาก ส่งผลให้ไม่สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรกับสถานะต่างๆ ได้ ดังนั้นผลการศึกษาของการวิจัยนี้จึงเลือกแบบจำลองแบบเดียว

(Single model) และสามารถหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ต่อสถานะการอบแห้งได้ สามารถนำไปใช้ในการประยุกต์กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทำนายอัตราการอบแห้ง และเวลาในการอบแห้งได้อย่างเหมาะสม ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานทางวิศวกรรมที่สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาระบบการควบคุมการอบแห้งได้อย่างเหมาะสม

3.1. ผลของอุณหภูมิแบบขั้นเดียวและอุณหภูมิแบบหลายขั้นในการต่อสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยอบแห้ง

กลไกการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อลำไยในระหว่างกระบวนการให้อบแห้ง และพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของมวลความชื้นเนื่องจากในเนื้อลำไยมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 81.5-85.2% w w⁻¹ ซึ่งเป็นของเหลวในเนื้อลำไยเป็นสารละลายที่มีองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิด มีค่าความหนืดปรากฏที่สูงและมีสมบัติทางกระแสวิทยา (Rheological properties) ในลักษณะของเหลวประเภทนอนนิวโทเนียน (Non-newtonian) มีลักษณะเป็นของเหลวที่ชั้นหนืดจัดเป็นของเหลวในกลุ่มเดียวกับ Psedopastic มีค่าความหนืดปรากฏที่สูงมาก และต้องใช้แรงจากภายนอกในปริมาณมากในระดับให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลความชื้นในโครงสร้างเซลล์ชั้นในแพร่ออกสู่ผิวภายนอก รายงาน

วิจัยของ Yunchalad *et al.* (2008) พบว่าส่วนประกอบของน้ำลำไยสกัดด้วยเทคนิคกรองแบบ microfiltration และ reverse osmosis เป็นสารละลายคาร์โบไฮเดรต ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (Glucose) ปริมาณ 2.77% น้ำตาลฟรุคโตส (Fructose) ปริมาณ 3.91% ซูโครส (Sucrose) ปริมาณ 14.21% และปริมาณเกลือแร่ ซึ่งเป็นสารประกอบตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงสีน้ำตาล (Browning reaction) กลไกการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อลำไยอบแห้งจึงเกิดจากผลกระทบของสมบัติทางกระแสวิทยาซึ่งใช้ในการเคลื่อนย้ายของเหลวในกลุ่ม Psedopastic ซึ่งเกิดแรงเสียดทานระหว่างเนื้อเยื่อเซลล์ในระหว่างการเคลื่อนที่ของเหลวจากโครงสร้างเนื้อเยื่อภายในออกมาที่ผิวเนื้อลำไยสูง ดังนั้นในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำ ระบบมีการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลความชื้นระหว่างของเหลวในโครงสร้างเนื้อเยื่อชั้นในของเนื้อลำไยด้วยอัตราการแพร่ที่ต่ำมาก สารละลายที่ถูกแพร่ออกมาก่อนในช่วงแรกเกิดการถ่ายเทมวลความชื้นไปกับอากาศร้อนในระหว่างการอบแห้งนั้น และสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นเกิดการตกผลึกและเปลี่ยนแปลงเป็นของแข็งเคลือบที่ผิวเนื้อลำไย สารที่เคลือบดังกล่าวมีความเข้มข้นของสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในปริมาณมากส่งผลให้อัตราการเกิดเปลี่ยนแปลงสีในลักษณะที่เป็นสีดำนวล (Dark color) และมีเนื้อสัมผัสที่แข็ง (Hardness)

แผนผังการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อลำไย (Figure 5) แสดงกลไกการเปลี่ยนแปลงสีของลำไยที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของการเคลื่อนที่ของโอมวลความชื้นของสารละลายในเนื้อลำไยที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นอนุภาคของกากเนื้อเนื้อลำไยเกิดเป็นปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) รวมถึงปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction) ชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Non enzymatic browning reaction) เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) กับกรดอะมิโน โปรตีน หรือสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ โดยมีความร้อนเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่การกระตุ้นภายใต้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (การใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวที่ 60 และ 70°C) เนื้อลำไยตัวอย่างได้รับความร้อนเป็นเวลานาน และเกิดการเคลื่อนที่หรือการแพร่ของมวลสารละลาย (Diffusion mass flow) ที่มีค่าความหนืดสูงอย่างช้าๆ ส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างเซลล์ในปริมาณมากจนเกิดความเสียหายที่ Lenticel หรือเนื้อเยื่อ Epidermis และผนังเซลล์เกิดการฉีกขาดที่ผิวและปลายผลที่เป็นทางออกของน้ำส่งผลให้ผนังเซลล์เกิดการเสียหายที่ผนังเซลล์ และโครงสร้างเนื้อเยื่อที่ถูกทำลายจะส่งผลให้เซลล์เกิดการอ่อนตัว เสี่ยงสภาพของโครงสร้างเซลล์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อลำไยของการอบแห้งแบบขั้นเดียวของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ 60 และ 70°C จึงเป็นผลของการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction) ชนิดที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ หรือปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) จนมีลักษณะสีที่ดำคล้ำ

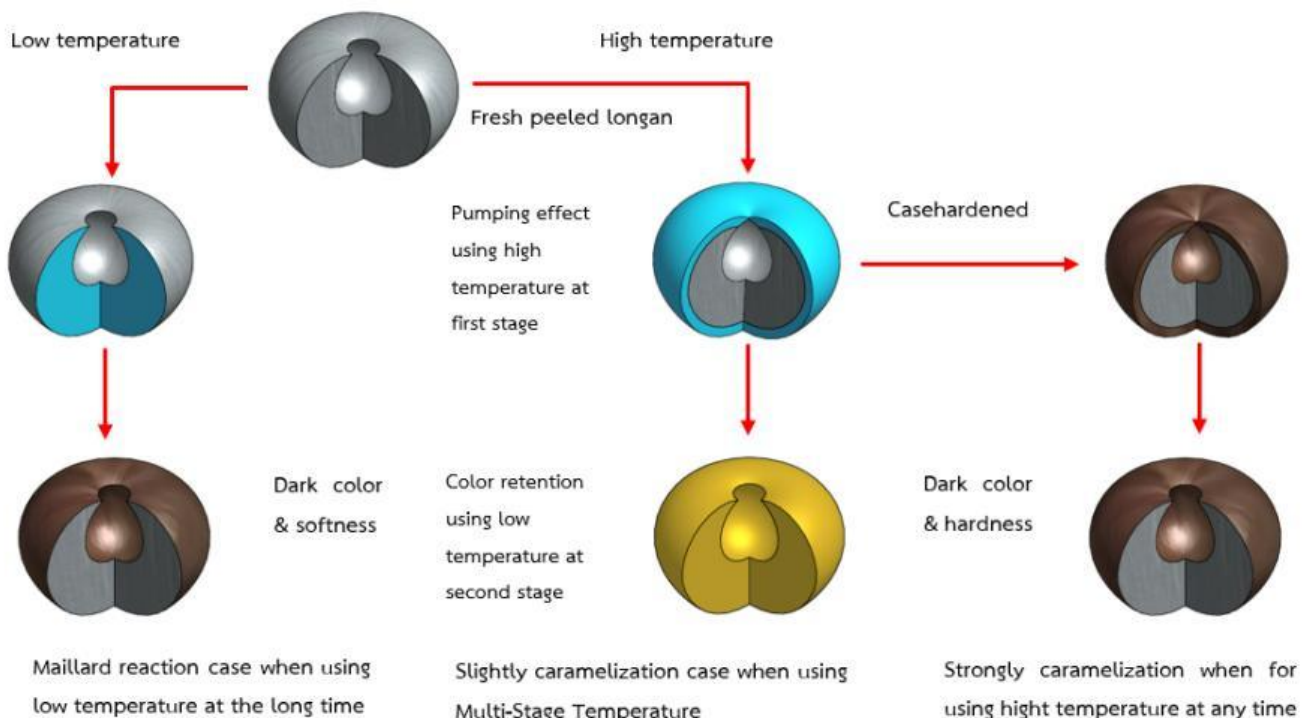


Figure 5. Comparative of mechanism of optical properties change of peeled longan using single-stage drying temperature and multi-stage drying temperature.



60°C



70°C



80°C

Figure 6 Photography of dried peeled longan fruit using single-stage drying temperature (60, 70 and 80°C).



80°C (1 h) 70°C



80°C (2 h) 70°C

Figure 7 Photography of dried peeled longan fruit using multi-stage drying temperature at 80°C (1 h.) follows by 70°C and 80°C (2 h.) follows by 70°C.

ผลของการเคลื่อนที่ของมวลสารละลายที่มีความหนืดสูงด้วยการแพร่อย่างช้าๆ จะส่งผลให้เกิดการทำลายโครงสร้างเซลล์จนเสียหาย เกิดเป็นเนื้อสัมผัสที่อ่อน (Dark color and softness) ในขณะที่การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงในช่วงเริ่มต้นกับเนื้อลำใยที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นสูงทำให้เกิดความแตกต่างของความดันภายในโครงสร้างเซลล์และที่บริเวณผิวนอกเกิดความดันมากกว่าปกติส่งผลต่อมวลความชื้นที่เคลื่อนที่ผ่านออกไปอย่างรวดเร็วมารวมที่บริเวณผิวของเนื้อลำใย เนื่องจากสารละลายในเนื้อลำใยมีลักษณะที่เป็นของเหลวความหนืดสูงจึงเกิดเป็นลักษณะที่เคลือบที่ผิวของเนื้อลำใยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์การบีบของเหลว (Pump effect) การเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดจะขึ้นอยู่กับกลไกการสร้างความร้อนและแรงกลในระหว่างการอบแห้ง เช่นการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีกลไกการกระตุ้นความร้อนจากภายในโครงสร้างเซลล์ (ผดุงศักดิ์, 2551) การอบแห้งระบบสุญญากาศ (Orikasa et al., 2014) ซึ่งใช้แรงกลจากความดันแรงการแพร่ของมวลน้ำเกิดปรากฏการณ์การบีบของเหลว การอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศซึ่งร่วมการเกิดความร้อนจากภายในและแรงดันเชิงกลจน

เกิดปรากฏการณ์การบีบของเหลวของเหลวอย่างฉับพลันจนผลิตภัณฑ์เกิดการฟองตัว ดังนั้นการที่อบแห้งเนื้อลำใยที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การบีบของเหลวออกที่ที่ผิวของเนื้อลำใยซึ่งของเหลวที่ออกจามีลักษณะเป็นของเหลวที่ขึ้นเหนียวเคลือบที่ผิวของเนื้อลำใย ในกรณีที่ให้ความร้อนสูงตลอดการอบแห้งของเหลวที่แพร่ออกมาเคลือบเกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพเคมีอย่างรุนแรง เร่งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Non enzymatic browning reaction) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของโมเลกุลน้ำตาลด้วยความร้อนสูง และมีการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) ของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารที่มีกลิ่นและรสเฉพาะตัว เรียกปฏิกิริยาว่าคาราเมลไรเซชัน (Caramelization) ส่งผลให้สีที่ผิวเนื้อลำใยเป็นสีดำคล้ำและเมื่อการเกิดปรากฏการณ์การบีบภายใต้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานๆ ความเข้มข้นของสารละลายในเนื้อลำใยที่มีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นสูงขึ้น เนื่องจากการสูญเสียน้ำในการระเหยเกิดขึ้นของแข็งบนผิววัสดุ เมื่อเกิดเป็นชั้นของแข็งที่ผิวของวัสดุ (Casehardened) น้ำจะไม่สามารถเคลื่อนที่ออกจากภายในวัสดุได้ อัตราการอบแห้งจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ความดัน

ภายในวัสดุจะเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งผิววัสดุไม่สามารถรองรับแรงดันที่เกิดขึ้นเกิดการแข็งตัวและเกิดเป็นรอยแตก (สีกกมน, 2555) การใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวที่อุณหภูมิต่ำก็อาจจะส่งผลให้

ของเนื้อลำไยเป็นสีดำคล้ำเนื่องจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดแต้มีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มเหมาะกับการรับประทาน

Table 4 Impacts of single-stage drying and multi-stage drying of optical properties (CIE-L*a*b*) and browning Index (BI) of dried peeled longan fruit.

Drying condition	L*-value	a*-value	b*-value	TCD	Browning Index
60°C	39.4±2.6 ^c	16.1±1.9 ^b	20.5±3.4 ^b	22.92±1.22 ^{ab}	22.92±1.22 ^{ab}
70°C	31.6±1.8 ^b	22.3±1.4 ^c	17.6±1.9 ^{ab}	26.96±2.74 ^b	26.96±2.74 ^b
80°C	17.5±3.1 ^a	36.4±2.6 ^d	14.6±2.7 ^a	43.38±4.51 ^c	43.38±4.51 ^c
80°C (1 h) 70°C (9.0 h)	41.2±2.1 ^d	13.2±1.7 ^b	22.3±2.6 ^b	22.31±1.45 ^a	22.31±1.45 ^a
80°C (2 h) 70°C (6.5 h)	45.3±1.9 ^d	4.3±1.7 ^a	34.1±3.1 ^c	20.64±0.85 ^a	20.64±0.85 ^a

Superscripts in different rows of each column show significantly difference at $p < 0.05$.

ในขณะที่การใช้อุณหภูมิสูงก็จะทำให้เกิดสีดำคล้ำจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดและเกิดการเกิดเป็นชั้นของแข็งที่ผิวของวัสดุ แต่มีอัตราการอบแห้งที่เร็วกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงเกิดการพัฒนาศักยภาพการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น โดยการใช้อุณหภูมิขั้นตอนแรกใช้อุณหภูมิสูงเพื่อเร่งการแพร่ของมวลความชื้นหรือสารละลายในเนื้อลำไยออกมาที่ผิวเนื้อลำไยโดยไม่ส่งผลต่อการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดและจากนั้นลดอุณหภูมิลงในระดับที่สามารถรักษาสมดุลการถ่ายเทมวลความชื้นของสารละลายที่ผิวเนื้อลำไยและระเหยออกจากเนื้อลำไย โดยไม่ให้เกิดเป็นชั้นของแข็งที่ผิวของวัสดุ

ภาพถ่ายของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยวิธีการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ 60, 70 และ 80°C และการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น โดยการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C และการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C ตามลำดับ (Figure 6 และ Figure 7) Table 4 แสดงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยอบแห้งของการอบแห้งแบบต่างๆ ของระบบสี CIE-L*a*b* จากผลการวัดค่าสีพบว่าค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) ของการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยวิธีการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ 60, 70 และ 80°C มีค่าเท่ากับ 22.92±1.22, 26.96±2.74 และ 43.38±4.51 ตามลำดับ พบว่าเนื้อลำไยอบแห้งที่อุณหภูมิที่ 60°C มีค่า TCD ที่น้อยที่สุด ลักษณะสีปรากฏที่เหมาะสมของเนื้อลำไยสีทอง ควรซึ่งมีค่าความสว่าง (L*-value) และ ค่าความเป็นสีเหลือง (b*-value) สูงแต่มีค่าความเป็นสีแดง (a*-value) ที่ต่ำ สอดคล้องกับการสมบัติทางสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยอบแห้งที่อุณหภูมิที่ 60°C มีค่า L*-value และค่า b*-value เท่ากับ 39.4±2.6 และ 20.5±3.4 มีค่ามากกว่าสภาวะวิธีการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ 70 และ 80°C แต่มีค่าความเป็นสีแดง (a*-value) น้อยที่สุดเท่ากับ 16.1±1.9 ตามลำดับ ในขณะที่สมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยของเนื้อลำไยอบแห้งของการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น

สามารถลดการเปลี่ยนแปลงสีได้ดีกว่าการใช้วิธีการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว (Jino and Assawarachan; 2015). โดยการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C และการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C มีค่า L*-value และ b*-value ที่สูง แต่มีค่า a*-value ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณค่า Browning Index มีความสอดคล้องกับคุณภาพสีของเนื้อลำไยอบแห้งสีทอง พบว่าเนื้อลำไยอบแห้งที่อุณหภูมิที่ 60°C และเนื้อลำไยอบแห้งของการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น มีค่า Browning Index ในช่วง 20.64±0.85 ถึง 22.92±1.22 และไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในขณะที่เนื้อลำไยอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C มีค่า Browning Index เท่ากับ 43.38±4.51 ซึ่งเป็นค่าปริมาณสูงสุด รวมถึงมีค่า L*-value และ b*-value ที่ต่ำที่สุดและมีค่า a*-value สูงสุด ดังนั้นลักษณะของสีเนื้อลำไยที่อุณหภูมิ 80°C จึงมีลักษณะเป็นสีเหลือง-แดง และคล้ำ เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิที่ 80°C นั้นเป็นการให้พลังงานในการถ่ายโอนโมเมนตัมของมวลความชื้นของของเหลวในเนื้อลำไยมากกว่าความต้องการของระบบในการแพร่ความชื้น ส่งผลให้มีพลังงานความร้อนส่วนเกินจากระบบไปเร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลจากเอนไซม์ และปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non enzymatic browning reaction) เช่น คาราเมลไรเซชัน (caramelization) ส่งผลให้เนื้อลำไยมีสีดำและแดง ปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นไปตามกฎของเทอร์โมไดนามิก หรือกฎการอนุรักษ์พลังงานสามารถอธิบายได้ตามนี้ การให้พลังงานเข้าสู่ระบบมากกว่าปริมาณพลังงานที่ต้องการใช้ในกระบวนการถ่ายเทมวลความชื้นจากโครงสร้างเซลล์ชั้นในของเนื้อลำไยออกสู่ชั้นผิวของเซลล์ พลังงานส่วนเกินดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อนที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งของการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น โดยการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C จนเนื้อลำไยแห้งนั้น พบว่าจะมีการใช้เนื้อลำไยเป็นปริมาณมากใน

ช่วงแรกเพื่อเร่งมวลความชื้นจากภายในโครงสร้างเซลล์ออกที่ผิวของเนื้อลำไย และการลดอุณหภูมิลงเหลือ 70°C จึงเปรียบเหมือนการลดพลังงานของระบบส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลลดลงอย่างเหมาะสม การใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้นเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งและสามารถรักษาสีของเนื้อลำไยได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jino and Assawarachan (2015) และ Cernišev (2010) ในการใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้นในการอบแห้งเพื่อรักษาสีของเห็ดหวานและมันฝรั่ง ตามลำดับ

4 สรุป

การใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้นเป็นเทคโนโลยีการอบแห้งที่ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการอบแห้งสูง และพลังงานเฉพาะในการอบแห้ง (SECs) ในการอบแห้งที่น้อยกว่าสภาวะอื่นๆ แต่มีอัตราการอบแห้งที่สูง รวมถึงสามารถรักษาคูณภาพของการอบแห้งเนื้อลำไยเทียบเคียงการอบแห้งด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่นการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ การใช้อุณหภูมิสูงในช่วงแรกของการอบแห้งนั้นสามารถช่วยเร่งการเคลื่อนไหวของมวลความชื้นในโครงสร้างชั้นในของเซลล์พืชให้เกิดการแพร่ของมวลความชื้นเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวได้มีประสิทธิภาพ เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ปรากฏการณ์การปั๊มของเหลว (Pump effect) และเมื่อลดอุณหภูมิลงหลักการการเกิดปรากฏการณ์การปั๊มของเหลวแบบเต็มรูปแบบนั้นจะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเนื่องจากผลกระทบของความชื้น เนื่องจากไม่มีพลังงานส่วนเกินที่ไปกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในลำไย ผลการศึกษาของโครงการวิจัยนี้พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเนื้อลำไยสีทองคือ การใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้นด้วยการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C สามารถรักษาสีของเนื้อลำไยให้มีลักษณะเป็นสีทอง โดยมีค่า L^* -value และ b^* -value ที่สูง แต่มีค่า a^* -value ต่ำ และมีค่า Browning Index ที่น้อยที่สุด และผลการวิเคราะห์พบว่าแบบของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเนื้อลำไยอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าโคก้างสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำสุด

5 กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่องการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์เนื้อลำไยอบแห้งด้วยการใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้นของเครื่องอบแห้งระบบถาดหมุนได้รับเงินทุนสนับสนุนจากศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กทม. 10400

6 เอกสารอ้างอิง

- ปองพล สุริยะกันธร, ประพันธ์ จิโน, ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2556. ผลกระทบของการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกและแบบจำลองการอบแห้งแก๊สฮวย. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 20(2), 43-51.
- ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2550. พื้นฐานการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ. กรุงเทพฯ, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- พุทธิพันธ์ จารุวัฒน์, พิมล วุฒิสหิ, ชุศักดิ์ ขวประดิษฐ์, ยงยุทธ คงชาน. 2551. ศึกษาวิจัยเครื่องอบแห้งลำไยแบบต่อเนื่อง. รายงานวิจัยกลุ่มวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว กรมวิชาการเกษตร ประจำปี 2551, 29-45.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์, 2558. ผลกระทบของอุณหภูมิและชั้นความหนาต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งจากเนื้อมะพร้าว. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 22(1), 37-47.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์, 2556. จลนพลศาสตร์การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. วารสารวิชาการ Rajabhat Journal of Sciences, Humanities & Social Sciences; 14(2), 13-22.
- สั๊กมน เทพัสติน ณ อยู่ยยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: ท็อป.
- Abano, E.E., Ma, H., Qu, W. 2011. Influence of Air Temperature on the Drying Kinetics and Quality of Tomato Slices, Journal of Food Process Technol 2(5), 1-9.
- AOAC. 2010. Official Methods of Analysis. (18th ed). Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C., USA.
- Assawarachan, R., Kalayanamitra, K. 2015. Mathematical Models of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* Linn.) during Microwave Drying. Acta Horticulure 1088, 611-614.
- Assawarachan, R., Kalayanamitra, K. 2015. Effect of Drying Methods on Color Quality of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* Linn.). Acta Horticulure 1088, 615-618.
- Assawarachan, R. 2013. Drying Kinetics of coconut residue in fluidized bed. International Journal of Agriculture Innovations and Research 2(2), 263-266
- Baloch, A.K., Buckle, K.A., Edwards, R.A. 1973. Measurement of non-enzymatic browning of dehydrated carrot. Journal of the Science of Food and Agriculture 24, 389-398.
- Cernišev, S. 2010. Effects of conventional and multistage drying processing on non-enzymatic browning in tomato. Journal of Food Engineering 96, 114-118.

- Doymaz, İ., İsmail, O. 2011. Drying characteristics of sweet cherry. *Food and Bioprocessing* 89, 31-38.
- Jino, P., Assawarachan R. 2015. Comparative study of color retention of dried stevia leaves (*stevia rebaudiana* Bertoni) by single-stage drying and multi-stage drying. *Journal of food science and agricultural technology* 1(1), 83-88.
- Orikasa, T., Koide, S., Okamoto, S., Imaizumi, T., Muramatsu, Y., Takeda, J., Shiina, T., Tagawa, A. 2014. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. *Journal of Food Engineering* 125, 51-58.
- Pongtong, K., Assawarachan, R., Noomhorm, A. 2011. Mathematical Models for Vacuum Drying Characteristics of Pomegranate Aril. *Journal of Food Science and Engineering* 1(1), 11-19.
- Singh, N.J., Pandey, R.K. 2012. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). *Food and bioproducts processing* 90, 317-322.
- Unhapipatpong, P., Arkanit, K., Upara, U., Tantikul, S., Assavarachan, R. 2015. Mathematical Models of Dried Peeled Longan Fruit using Single-Stage Drying and Multi-Stage Drying. In 2nd International Conference on Interdisciplinary Research and Development; 29-31 October, 2015. Maejo University, Chiang Mai, Thailand, pp 433-443.
- Yunchalad, M., Supasri, R., Boonbamrung, S., Wongkrajank, K., Hiraga, C., Watanasook, A. 2008. Pre-concentration of longan juice extract with micro filtration and reverse osmosis. *Asian Journal of Food and Agro-Industry* 1, 17-23.



ผลของการใช้ความดันสูงในการทำลายจุลินทรีย์และสปอร์ของจุลินทรีย์ในอาหาร

Effects of High Pressure Processing on Microbial and Food Spoilage Eliminating

ฤทธิชัย อัสวาราชันย์^{1*}

Rittichai Assavarachan^{1*}

¹คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, 50290

¹Faculty of Engineering and Agro-Industry; Maejo University, Sansai, Chiang Mai 50290, Thailand

*Corresponding author: Tel: +66-8-5704-9146, Fax: +66-34-351-896, E-mail: rittichai.assavarachan@gmail.com

บทคัดย่อ

การใช้ความดันสูง (HPP) เป็นวิธีการแปรรูปสมัยใหม่ของการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในอาหารที่สามารถรักษาคุณลักษณะ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางประสาทสัมผัสของอาหารที่ถูกแปรรูปด้วยการใช้ HPP สามารถรักษา กลิ่น สี รส กลิ่นเคี้ยวอาหารสด การใช้ความดันสูงเป็นวิธีการแปรรูปแบบไม่ใช้ความร้อนซึ่งเป็นเทคนิคการถนอมอาหารที่สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคและเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค และมีความสามารถในการทำลายสปอร์ของจุลินทรีย์ที่ทนเปื้อนในผักได้ดีกว่าการพาสเจอร์ไรส์แช่ด้วยความร้อน การใช้ความดันสูงสำหรับการแปรรูปจะใช้แรงดันที่ระดับ การใช้ความดันสูงเป็นการแปรรูปอาหารโดยไม่ใช้ความร้อนแต่เป็นการใช้ความดันสูงกว่าความดันที่ระดับ 400–600 MPa หรือ 58,000–87,000 psi ในการทำลายจุลินทรีย์ การแปรรูปโดยการใช้ความดันสูงนับเป็นเทคนิคการพาสเจอร์ไรส์แช่ระบบเย็น องค์ประกอบของการใช้ HPP นั้นจะประกอบด้วย ผลิตภัณฑ์อาหารในบรรจุภัณฑ์, แคปซูลที่ใช้บรรจุอาหาร น้ำตัวกลางในส่งถ่ายพลังงานกลจากแรงดัน และเครื่องกำเนิดแรงดันไฮโดรสแตติก ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 การใช้ความดันสูงประสบความสำเร็จในการแปรรูปอาหารในระดับอุตสาหกรรมอย่างมาก สามารถช่วยรักษาความสด กลิ่น และรสชาติได้ใกล้เคียงกับอาหารสดรวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จัดเป็นการแปรรูปทางเลือกที่สามารถใช้ในระดับทดแทนการแปรรูปด้วยความร้อนแบบดั้งเดิม และการใช้สารเคมีในการถนอมอาหาร

คำสำคัญ: การใช้ความดันสูง, พาสเจอร์ไรส์ระบบเย็น, การแปรรูปสมัยใหม่

Abstract

High-pressure processing (HPP) is a novel method of food processing to achieve microbial inactivation or to alter the food attributes. The unique physical and sensory properties of HPP processed foods offer many potential opportunities for food processing. HPP is a nonthermal food preservation technique that inactivates harmful pathogens and vegetative spoilage microorganisms by using pressure rather than heat to effect pasteurization. HPP utilizes intense pressure (about 400–600 MPa or 58,000–87,000 psi). HPP is a cold pasteurization technique which consists of subjecting food, previously sealed in flexible and water-resistant packaging, to a high level of hydrostatic pressure (pressure transmitted by water) up to 600 MPa (87,000 psi) for a few seconds to a few minutes. Since 2000, HPP has been successfully implemented in all type of food industries worldwide. HPP is a natural, environmentally friendly process that respects the ingredient and helps maintain the fresh food characteristics like flavour and nutrients. It is a real alternative to traditional thermal and chemical treatments.

Keywords: High-pressure processing, Cold pasteurization, Novel food processing

1 บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารมีอัตราการแข่งขันด้านเทคโนโลยีการแปรรูปอาหารทำให้เกิดการพัฒนาแบบการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่มีความต้องการ ด้านการรักษา กลิ่น สี รสของอาหารแปรรูปให้

ใกล้เคียงกับอาหารสด ส่งผลให้เกิดการแข่งขันด้านนวัตกรรมการผลิตด้วยเทคโนโลยีที่สามารถรักษาคุณภาพของอาหาร นวัตกรรม การแปรรูปให้การรักษาความดันสูง (HPP) ประสบความสำเร็จในการนำมาใช้ในการแปรรูปในอุตสาหกรรมอาหารที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณลักษณะ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางประสาทสัมผัสของอาหาร (กลิ่น สี รส) เทียบเคียงอาหารสด

(Da-Wen Sun, 2014) การใช้ HPP เป็นการแปรรูปอาหารโดยไม่ใช้ความร้อน (non thermal processing) แต่เป็นการใช้ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ (400-600 MPa) ซึ่งความดันเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญของปฏิกิริยาทางเทอร์โมไดนามิกส่งผลให้เกิดงาน (work) ที่เกิดในระหว่างการกดอัดในระหว่างการให้ความดัน (Pressurization) ภายใต้สภาวะ Adiabatic heat ส่งผลต่อการเพิ่มของอุณหภูมิในระบบน้อยมากประมาณ 3°C ต่อการเพิ่มความดัน 100 MPa ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอาหาร แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นของการแปรรูปด้วยการใช้ HPP จะหายจากระบบทันทีที่มีการปรับสภาวะความดันกลับเข้าสู่ความดันปกติหรือความดันบรรยากาศ (Farkas and Hoover, 2000) และมีผลต่อโครงสร้างและกระบวนการทางชีวเคมีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียของอาหาร (microbial spoilage) จุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) นอกจากนี้ความดันสูงยังทำลาย เอนไซม์ ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหาร รวมถึงสปอร์และเอนไซม์ที่ไม่ต้องการในอาหารโดยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร และทำให้อาหารมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น การแปรรูปด้วย HPP มีผลเทียบเคียงกับการแปรรูปอาหารด้วยความร้อน (thermal processing) ระดับการพาสเจอร์ไรส์ (pasteurization) ด้วยวิธีใช้ความร้อนสูง - เวลาสั้น (HTST : High Temperature - Short Time) และสำหรับอาหารที่มีความกรด (Acid foods) หรือมีค่า pH ≤ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพของทำลายจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูง (Ultra-High Temperature process; UHT) เพราะสามารถทำลายสปอร์ของจุลินทรีย์ได้หมด แม้ว่ากระบวนการแปรรูป HPP นั้นอาจจะมียุทธศาสตร์ในด้านวิศวกรรมที่สูงกว่าการแปรรูปอื่น มากถึง 10-30 เท่า แต่จะให้ผลตอบแทนดีในระยะยาว เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด รักษาคุณภาพของอาหารในด้านต่างๆ และผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแปรรูปด้วย HPP มีความสด กลิ่น สี รสชาติใกล้เคียงธรรมชาติ ทำให้ผลิตภัณฑ์เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค และสามารถเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี (ฤทธิชัย, 2558) อาหารที่ผ่านการแปรรูปด้วย HPP และได้รับการยกย่องว่าเป็น Super foods ด้วยจุดเด่นของการแปรรูปอาหารที่สามารถสร้างมูลค่าที่เพิ่มเติมได้ส่งผลให้เกิดการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปด้วยเทคโนโลยี HPP มากขึ้นโดยประเทศไทยเป็นประเทศแรกๆ ที่ประสบความสำเร็จในการนำเทคโนโลยี HPP ในการแปรรูปอาหารในระดับอุตสาหกรรม และแพร่หลายไปยังกลุ่มประเทศในสหภาพยุโรป อย่างไรก็ตามการใช้ความดันสูงยังคงเป็นเทคโนโลยีการแปรรูปที่ยังไม่แพร่หลายมากนักในประเทศไทย ดังนั้นบทความวิชาการนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการรวบรวมเนื้อหาจากบทความวิจัย เอกสารทางวิชาการที่เชื่อถือได้มาเรียบเรียงเนื้อหา โดยประกอบหลักการ และกลไกการทำลายจุลินทรีย์ด้วยเทคโนโลยี HPP ผลของความดันสูงต่อปฏิกิริยาชีวเคมีและคุณภาพของอาหาร รวมถึงการเปรียบเทียบกับแปรรูปด้วยความร้อน เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้อ่าน

นำไปใช้ในการศึกษาและนำไปพัฒนาสู่อุตสาหกรรมการผลิตอาหารด้วยเทคโนโลยี HPP ในอนาคต

2 หลักการของการใช้ความดันสูง

การใช้แรงดันสูงเป็นแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้รับนิยมเชิงการค้าอย่างมากในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีการใช้แรงดันสูง (HPP) เป็นวิธีการพาสเจอร์ไรส์ที่ใช้แรงกล (แรงดัน) ทดแทนวิธีการให้ความร้อนเพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร

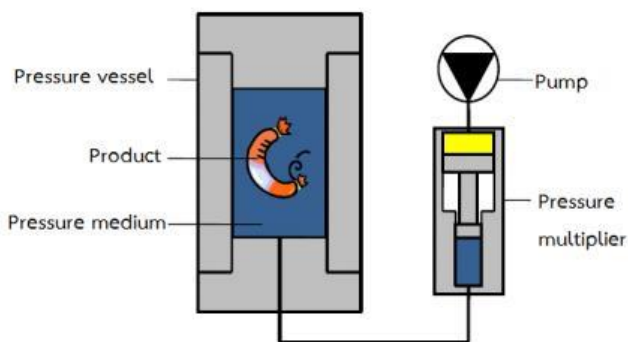


Figure 1 Schematic of an HPP high pressure processing (Source: Ferstl and Ferstl; The National food lab, 2013).

การแปรรูปโดยใช้ HPP ให้ผลเหมือนกับการให้ความร้อนในการแปรรูปอาหารสามารถทำลายจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสียของอาหาร ประกอบไปด้วยยีสต์และแบคทีเรียกรดแลคติก และช่วยให้อาหารให้มีความปลอดภัยขึ้นโดยการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค เช่น *Escherichia coli*, *Salmonella* และ *Listeria monocytogenes* ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารโดยรักษาคุณภาพของอาหาร และลดการทำลายคุณภาพขององค์ประกอบที่สำคัญในอาหารน้อยกว่า เช่น วิตามิน รสชาติ และสี ซึ่งจะช่วยให้การแปรรูปผลิตภัณฑ์ในลักษณะนี้มีคุณภาพเหมือนกับของสด Ferstl and Ferstl (2013) ได้อธิบายส่วนประกอบของอุปกรณ์ในการสร้างระบบความดันสูงประกอบด้วย ปั๊มแรงดันสูง ตัวขยายสัญญาณตัวกลางในการถ่ายพลังงานกล และถังแรงดันสูง (Figure 1)

3 กลไกการทำลายจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการใช้ความดันสูง

3.1 ผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของจุลินทรีย์

การเจริญเติบโตของเซลล์จุลินทรีย์ที่มีความดันบรรยากาศ (ความดันที่ 0.1 MPa) นั้นมีกลไกการการแบ่งตัว โดยเริ่มจากการสร้างระบบเส้นใยของเซลล์ (Cytoskeleton) หรือไมโครฟิลาเมนต์ (Microfilaments) ของเซลล์จุลินทรีย์ เมื่อระบบการสร้างเส้นใยของเซลล์สมบูรณ์ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการแบ่งตัวของจุลินทรีย์ ดังนั้นจำนวนจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นอยู่กับการสร้างเส้นใยหรือไมโครฟิลาเมนต์ของจุลินทรีย์ ซึ่งหากการไมโครฟิลาเมนต์แบ่งเริ่มต้นด้วยการแบ่งเป็นขนาดสั้นจะเกิดการสร้างเส้นใยของเซลล์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นหากการไมโครฟิลาเมนต์มีการแบ่งตัวในลักษณะที่มี

ความยาวก็จะทำให้การแบ่งของจุลินทรีย์ที่จำนวนน้อยกว่า การศึกษาผลกระทบของการใช้ความดันสูงต่อการระบบการสร้าง เส้นใยของเซลล์จุลินทรีย์ ของ *Escherichia coli* พบว่าภายใต้ ความดันสูงที่ความดันที่ 40 MPa พบว่า *Escherichia coli* มีการ สร้างระบบเส้นใยของเซลล์ที่มีขนาดยาว 10-100 nm และไมโคร พิลามেন্টที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความดันมีลักษณะเป็น เซลล์เดี่ยวที่ไม่มีปล้อง (Single unsegmented cells) มีความ กว้างประมาณ 0.6 μm เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ขนาดปกติ (1-2 nm) ซึ่งมีขนาดที่สั้นกว่า ดังนั้นการแบ่งตัวของ *Escherichia coli* ภายใต้ความดันสูงที่ความดันจะเกิดการแบ่งตัวของจุลินทรีย์ให้ จำนวนน้อยกว่าหลายล้านเท่า เช่นเดียวกับผลกระทบของแรง ความดันต่อจุลินทรีย์ *Vibrio* spp. จะสร้างพิลามেন্টที่มีขนาด ยาว 5-8 เท่าของเซลล์ปกติที่เจริญที่ 1 atm ส่วน *Bacillus mycoides* จะมีขนาดยาวขึ้น 2-3 เท่า เมื่อให้ความดันที่ 37 MPa และ *Serratia marinoirubra* จะสร้างพิลามেন্টที่ยาวถึง 200 μm ที่ความดัน 60 MPa เปรียบเทียบกับเซลล์ปกติที่มีความ ยาว 0.6-1.5 μm ที่เจริญที่ความดันบรรยากาศ การสร้างพิลามেন্ট ของจุลินทรีย์เมื่อให้ความดันสูงจะมีความแตกต่างกันขึ้นกับสปีชีส์ และสายพันธุ์ ดังนั้นผลกระทบของแรงความดันสูงจะส่งผลต่อ การสร้างระบบเส้นใยของเซลล์ให้มีขนาดยาวส่งผลให้การแบ่งตัว ของจุลินทรีย์ลดลง นอกจากนี้ผลกระทบของแรงดันสูงจะส่งผล ต่อการหยุดการเคลื่อนที่ของแบคทีเรียที่เคลื่อนที่ได้โดยส่วนใหญ่ จะหยุดการเคลื่อนที่เมื่อให้ความดันต่อเนื่องที่ 20-40 MPa และ ที่ความดัน 10 MPa พบว่า *Escherichia coli*, *Vibrio* และ *Pseudomonas* จะยังคงมีแฟลกเจลลา (Flagella) แต่เมื่อเพิ่ม ความดันเป็น 40 MPa พบว่าเชื้อเหล่านี้จะสูญเสียอวัยวะของ เซลล์

3.2 การทำลายจุลินทรีย์

การแปรรูปด้วยเทคโนโลยีการใช้แรงดันสูง (HPP) ได้รับการ ยอมรับตามมาตรฐานความปลอดภัยของแปรรูปอาหารของ

องค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (FDA) และกระทรวง เกษตรของสหรัฐอเมริกา (USDA) ตอบโจทย์ความต้องการและ ความคาดหวังของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์แปรรูปอาหารที่สามารถ รักษาความสด กลิ่น และรสชาติได้ใกล้เคียงกับอาหารสด HPP สามารถทำลายจุลินทรีย์ได้ โดยทั่วไปแบคทีเรียที่อยู่ในระยะ Log phase สามารถทนต่อความดันสูงได้น้อยกว่า (มีความไวหรือ Sensitive มากกว่า) เซลล์ที่อยู่ในระยะ Stationary สปอร์และ จุลินทรีย์ที่อยู่ในระยะ Death phase อย่างไรก็ตามความดันสูง ขนาดปานกลาง (ระหว่าง 400-600 MPa) จะสามารถยับยั้งการ เจริญหรือทำลายเซลล์ปกติ (vegetative cells) ได้ Hoover et al. (1989) รายงานว่าการใช้ความดัน 350 MPa เป็นเวลา 30 min หรือ 400 MPa เป็นเวลา 5 min จะสามารถลดปริมาณ เซลล์ปกติของแบคทีเรีย ยีสต์และเชื้อราได้ถึง 10 เท่า การใช้ ความดันที่ระดับสูงมากจะทำให้ยับยั้งการเจริญเติบโตของสปอร์ ของแบคทีเรียและทำลายเซลล์ที่กำลังจะขยายตัว เป็นที่รู้กันว่า ความดันสูงทำให้แวคิวโอล (vacuoles) ภายในเซลล์แตกและ ทำลายผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรนฉีกขาดเป็นผลให้เมตาโบลิซึม ต่างๆ ถูกทำลาย โดยทั่วไปแบคทีเรียส่วนใหญ่สามารถเจริญได้ที่ ความดันระหว่าง 20-30 MPa ส่วนจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญได้ที่ ความดันที่สูงกว่า 40-50 MPa เรียกว่า barophiles ซึ่งจุลินทรีย์ เหล่านี้จะเจริญได้น้อยมากหรือไม่เจริญเลยที่ความดันในช่วง 300-400 MPa ส่วนจุลินทรีย์ที่เจริญในช่วงความดันที่ 1-50 MPa นั้นเรียกว่า Eurybaric และจุลินทรีย์ชนิด Baroduric จะ รอดชีวิตแต่จะไม่สามารถเจริญได้ที่ความดันที่สูงตั้งแต่ 50-200 MPa ผลของความดันสูงต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของ จุลินทรีย์ ความดันสูงปานกลาง (20-30 MPa) มีผลทำให้อัตรา การเจริญและการขยายพันธุ์ของจุลินทรีย์ลดลง ส่วนความดันที่ สูงมากจะทำลายจุลินทรีย์ได้ ขนาดของความดันสูงที่สามารถ ยับยั้งการขยายพันธุ์และการเจริญจะมีค่าที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ชนิด และสปีชีส์ (species) ของจุลินทรีย์

Table 1 Response of microorganisms (Pathogenic bacterial) to high hydrostatic pressure processing.

HPP Treatmet (MPa/min/°C)	Microorganism	Inactivation	Product	References
350 /20 /30	Listeria monocytogenes	$6.0 \log_{10} \text{CFU g}^{-1}$	Raw poultry meat	Patterson et al. (1995)
253 /25 /15	Aeromonas hydrophila	$7.0 \log_{10} \text{CFU g}^{-1}$	Ground pork	Ellenberg and Hoover (1999)
550/ 20/ 5	Esclerichla coli. O157:H7	$< 7.0 \log_{10} \text{CFU ml}^{-1}$	Orange juice (pH 3.4–3.9)	Linton et al. (1999)
400/ 30/ 18	Bacillus cereus	$2.9\text{-}3.4 \log_{10} \text{CFU ml}^{-1}$	Skimmed milk	McClements et al. (2001)
350/ 30/ 5	Salmonella Enteritidis	$> 8.0 \log_{10} \text{CFU ml}^{-1}$	Orange juice Sour cherry juice	Bayindirli et al. (2005)
550 /10 /25	Esclerichla coli. (ATCC 25922)	$8.0 \log_{10} \text{CFU ml}^{-1}$	Phosphate buffer saline suspension	Koseki and Yamamoto (2006)
500 /10 /25	Listeria monocytogenes (ATCC2913)	$5.1 \log_{10} \text{CFU g}^{-1}$	Sliced cooked ham	Koseki et al. (2007)
350 /2 /20	Esclerichla coli. O157:H7 mixing with thee stanins	$3.0 \log_{10} \text{CFU ml}^{-1}$	Wetted green onion	Neetoo et al. (2011)
500/ 4/ 2	Esclerichla coli. O157:H7 Salmonella Typhimurium Listeria monocytogenes	$5.0 \log_{10} \text{CFU ml}^{-1}$	Coconut water	Lukas et al. (2013)

(Source: ฤทธิชัย, 2558 ดัดแปลงจาก Doona and Feeherry, 2007; Lukas, 2013 and Da-Wen Sun, 2014)

การศึกษาการทนต่อความดันสูงของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ สามารถทำลายจุลินทรีย์พวก *Bacillus cereus* *Campylobacter jejuni* *Candida utilis* *Esclerichla coli* *Mocrococcus luteus* *Pseudomas aeruginosa* *Saccharomyces cerevisiae* *Salmonella typhimurium* *Staphylococcus aureus* *Streptococcus faecalis* และ *Yersinia enterotica* ลงไปในเนื้อหมูบดเหลว (pork slurries) และทดลองทำลายจุลินทรีย์ด้วยแรงดันที่ 300-600 MPa ผลการศึกษาพบว่าสามารถทำลาย จุลินทรีย์ทั้งหมด ยกเว้น *Bacillus cereus* ซึ่งเป็นชนิดที่สร้างสปอร์โดยลดปริมาณลงเหลือ น้อยกว่า 10CFU mL^{-1} จากการสังเกตลักษณะของเนื้อหมูบด เหลวที่ผ่านการให้ความดันสูงพบว่ามียีสต์ติดจางลงและเกิด ตกตะกอน ซึ่งลักษณะตะกอนที่ได้จะมีสีขาวกว่าและมีความแข็ง เพิ่มขึ้นเมื่อให้ความดันที่สูงกว่า 300 Mpa (Shigehisa et al., 1991) การเจริญและการขยายพันธุ์ของ *Esclerichla coli* ถูก

ยับยั้งที่ความดันระหว่าง 100-300 MPa และการขยายพันธุ์ (การเพิ่มจำนวนของเซลล์ที่มีชีวิต) จะถูกยับยั้งมากกว่าการเจริญ และถูกทำลายที่ความดันสูงกว่า 400 Mpa โดยจะลดปริมาณลง มากกว่า $6 \log_{10} \text{cycle}$ ภายในเวลา 10 min ที่ความดันสูง 400 Mpa และสปอร์ของเชื้อ *Bacillus cereus* จะถูกทำลาย ลดลงน้อยกว่า $1 \log_{10} \text{cycle}$ เมื่อใช้ความดันสูง 600 Mpa การใช้ความดันสูงประสบความสำเร็จในการแปรรูปอาหารในระดับอุตสาหกรรมและถูกนำมาใช้ในการแปรรูปอย่างแผ่หลายและถูก นำมาใช้ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารหลายรูปแบบภายใต้ สภาวะการแปรรูปที่แตกต่างกันไปต่างๆ

Table 1 แสดงรายงานสรุปการศึกษาผลการทำลายจุลินทรีย์ ภายใต้ความดันสูงในช่วง 350-500 MPa ของอาหารพวก เครื่องดื่ม และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ ประสิทธิภาพทำลาย จุลินทรีย์จะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อจุลินทรีย์และสมบัติของอาหาร การแปรรูปโดยใช้ HPP เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหารที่ความ

เป็นกรดอ่อน เช่น ผลิตภัณฑ์น้ำส้ม น้ำเชอร์รี่แปรรูปพร้อมดื่ม พบว่า การแปรรูปด้วยแรงดันสูงที่ระดับ 350 MPa เป็นเวลา 30 min และใช้ตัวกลางน้ำที่อุณหภูมิ 5°C พบว่าสามารถลดปริมาณ *Salmonella Enteritidis* ได้มากกว่า $8.0 \log_{10}$ CFU mL^{-1} สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Linton et al. (1999) พบว่า การแปรรูปด้วยแรงดันสูงมีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ที่มีลักษณะผนังเซลล์หนาและมีความทนทานต่อการโดนทำลาย เช่น *Escherichia coli*. O157:H7 โดยการใช้แรงดันสูงที่ระดับ 550 MPa เป็นเวลา 20 min และใช้ตัวกลางน้ำที่อุณหภูมิ 5°C เป็นตัวกลางสามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ได้มากถึง $7.0 \log_{10}$ CFU mL^{-1} ในขณะที่ผลการศึกษาของ Neetoo et al., (2011) พบว่าการให้ HPP ที่ 350 MPa เป็นเวลา 2 min และใช้ตัวกลางน้ำที่อุณหภูมิ 20°C ต่อการลดปริมาณ *Escherichia coli*. O157:H7 ได้เท่ากับ $3.0 \log_{10}$ CFU mL^{-1} จาก 3 รายงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่ามีผลของสมบัติของอาหาร เช่นความเป็นกรด จะช่วยเสริมประสิทธิภาพในการลดปริมาณจุลินทรีย์ด้วยการใช้ HPP ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ผลการศึกษาของ Lukas (2013) พบว่าการใช้ HPP ที่ระดับ 500 MPa เป็นเวลา 30 min และใช้ตัวกลางน้ำที่อุณหภูมิ 2°C สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์พวก *Escherichia coli*. O157:H7 *Salmonella Typhimurium* *Listeria monocytogenes* ได้มากถึง $5.0 \log_{10}$ CFU mL^{-1} ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรม ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพการแปรรูปด้วยแรงดันสูง ด้วยวิธีการเปลี่ยนตัวกลางจากน้ำเป็น carbon dioxide ที่อุณหภูมิ 40°C ในการส่งถ่ายพลังงานกลในการทำลายจุลินทรีย์ และเพิ่มประสิทธิภาพในหยุดกระบวนการเมตาโบลิซึมของจุลินทรีย์ได้ดีกว่าการใช้ตัวกลางของน้ำ โดยใช้แรงดันเพียง 120 MPa เป็นเวลา 30 min แต่สามารถรักษาสมาบัติทางกายภาพ กลิ่น สี รส อย่างเหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทางประสาธสัมผัสพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมะพร้าวสด (Cappelletti et al., 2015)

3.3 การทำลายสปอร์ (Damage in spores using HPP)

การศึกษาเทคโนโลยีการใช้แรงดันสูง (HPP) ในการทำลายสปอร์ของ *Bacillus subtilis* ปริมาณเริ่มต้น 8×10^4 spores mL^{-1} ที่อุณหภูมิ 93.6°C ที่ความดัน 1 atm พบว่าสามารถทำลายสปอร์ได้หมดภายในเวลา 1 h แต่ถ้าเพิ่มความดันเป็น 600 atm ที่อุณหภูมิ 93.6°C พบว่าต้องใช้เวลาราว 4 h เพื่อที่จะทำลายสปอร์ได้หมด ในทางกลับกันพบว่าที่อุณหภูมิ อัตราการทำลายสปอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันสูงที่ใช้เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ

25°C และความดัน 600 atm จะเร่งอัตราการทำลายสปอร์และพบสปอร์ที่รอดชีวิตปริมาณน้อยกว่า 10% ของจำนวนสปอร์เริ่มต้นหลังจากเวลาผ่านไป 48 h (Johnson and Zobell, 1949) นอกจากนั้น Sale et al. (1969) ศึกษาการทำลายสปอร์ของ *Bacillus* spp. โดยใช้ความดันสูงในช่วง 100 และ 800 MPa พบว่าอัตราการทำลายสปอร์จะสูงกว่าเมื่อใช้ความดันสูงในระดับต่ำกว่า (ประมาณ 100-300 MPa) และเมื่อใช้อุณหภูมิ 70°C ร่วมด้วยพบว่าอัตราการทำลายสปอร์จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ในช่วงความดันสูงระหว่าง 100-300 MPa ภายใต้แรงดันสูงประมาณ 20-30 MPa พบว่าทำให้สปอร์งอกกลายเป็นเซลล์แต่ความดันสูงระดับนี้ยังไม่สามารถทำลายเซลล์ได้และสปอร์ที่กระตุ้นด้วยความร้อน อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้ความร้อนกระตุ้นการงอกของสปอร์และให้ความดันสูงกว่า 100 MPa จะมีผลน้อยกว่าการงอกของสปอร์เมื่อให้ความดันสูงในระดับต่ำกว่า (Gould and Sale, 1970) การใช้แรงดันสูงในการทำลายสปอร์นั้นพบว่าอุณหภูมิมีบทบาทที่สำคัญมาก ส่วนปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลรองลงมาได้แก่ค่า pH วอเตอร์แอคทิวิตี (Water activity) และความแรงของไอออน (Ionic strength) โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเริ่มงอกของสปอร์จะมีความแตกต่างกันไปตามระดับของความดันสูงการยับยั้งการงอกของสปอร์จะมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อ pH มีค่าปานกลางและมีประสิทธิภาพต่ำสุดเมื่อค่า pH สูงหรือต่ำเกินไป ความดันระดับที่ทำให้สปอร์เริ่มงอกได้ดีจะมีความเหมาะสมที่ระดับ pH ปานกลาง สำหรับตัวถูกทำลายที่ไม่แตกตัวเป็นไอออนที่มีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีต่ำมีผลเล็กน้อยในการยับยั้งสปอร์ด้วยความดันสูง ในขณะที่สารละลายที่แตกตัวเช่น โซเดียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์ จะมีผลในการลดประสิทธิภาพในการยับยั้งสปอร์ซึ่งโดยทั่วไปสปอร์ส่วนใหญ่ไม่สามารถงอกได้ในสภาวะที่มีความดันสูง และปราศจากไอออนของสารอนินทรีย์เนื่องจากไอออนมีผลต่อการสลายตัวของสารเปปติโดไกลแคน (Peptidoglycan) จากปฏิกิริยาของเอนไซม์ระหว่างการงอก และยังมีผลทำให้การทนต่อความร้อนของสปอร์ในสารละลายบัฟเฟอร์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายสปอร์ในน้ำกลั่นที่ความดันสูงและอุณหภูมิเดียวกันในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำนมสเตอริไลส์บรรจุกระป๋องนั้นต้องใช้อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 20 min แต่วิธีนี้จะมีผลทำให้น้ำนมเกิดสีที่ผิดปกติรวมทั้งเคซีน (Casein) เกิดการตกตะกอน (การแปรรูปอาหารโดยใช้ความดันสูง, 2016)

1 Table 2 Response of spores of microorganisms (Pathogenic) to high hydrostatic pressure processing

HPP Treatmet (MPa/min/ °C)	Microorganism	Inactivation	Product	References
875 /10 /55	Clostridium botulinum nonproteolytic type B (KAP8-B)	$1.8 \log_{10} N_0 N^{-1}$	Crabmeat blend	Reddy et al. (2006)
600 /20 /80	Bacillus cereus (AS 1.1846)	$7.53 \log_{10} N_0 N^{-1}$	Milk buffer	Ju et al. (2008)
600 /12.5 /65	Clostridium perfringens (AS 64701)	$2.54 \log_{10} N_0 N^{-1}$	Ultraheat- treated milk	Gao et al. (2011)
900 /5 /100	Clostridium sporogenes (PA 3679) spores	$4.0 \log_{10} \text{CFU mL}^{-1}$	Ultraheat- treated milk	Shao et al. (2010)
520 /18 /40	Bacillus sporothermodurans LTIS27	$3.3 \log_{10} N_0 N^{-1}$	Distilled water	Aouadhi et al. (2013)
600 /1 /75	Bacillus coagulans	$4.0 \log_{10} \text{CFU mL}^{-1}$	Tomato Juice	Daryaei and Balasubramaniam (2013)

2 (Source: Da-Wen Sun, 2014)

3

Da-Wen Sun (2014) ได้รวบรวมเอกสารวิชาการและ
รายงานวิจัย การทำลายสปอร์ของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค
(Pathogenic bacterial spores) ที่เกิดจากอาหารเป็นสื่อด้วย
การแปรรูปอาหารด้วยแรงดันสูง (HPP) ที่สภาวะต่างๆ (Table
2) ผลของแรงดันสูงนั้นพบว่าเมื่อเปรียบเทียบข้อมูล สภาวะการ
แปรรูปด้วยแรงดันสูงของการทำลายจุลินทรีย์ (Table 1) พบว่า
การทำลายสปอร์ของจุลินทรีย์นั้นจำเป็นต้องใช้ความดันสูง รวม
กับการใช้ความร้อนผ่านตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน ระดับความดัน
สูงที่ใช้สำหรับการทำลายสปอร์มีระดับสูงถึง 520-900 MPa
รวมกับการให้ความร้อนผ่านตัวกลางในช่วยอุณหภูมิ 65-80°C
โดยสมบัติของอาหารเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในการศึกษา
เมื่อเปรียบเทียบรายงานวิจัยของ Shao et al. (2010) และ
Daryaei and Balasubramaniam (2013) ที่ศึกษาผลของ
แรงดันสูงต่อการทำลายสปอร์จุลินทรีย์ของน้ำมะเขือเทศที่มี
ความเป็นกรด (มีระดับ pH 3.8-4.2) และน้ำนมดิบที่ไม่มีกรด
เป็นกรดเลย พบว่าสามารถทำลายสปอร์ของจุลินทรีย์ได้ถึง $4.0 \log_{10} \text{CFU mL}^{-1}$ พบว่าความเป็นกรดของอาหารจะช่วยเพิ่ม
ประสิทธิภาพในการทำลายสปอร์ของจุลินทรีย์ด้วยการใช้ความ
ดันและอุณหภูมิของน้ำตัวกลางที่ต่ำ โดยการแปรรูปน้ำมะเขือ
เทศใช้ความดันที่ 600 MPa และอุณหภูมิของน้ำที่ 75°C

ในขณะที่น้ำนมดิบจะใช้แรงดันสูงถึง 900 MPa และอุณหภูมิของ
น้ำที่ 100°C.

3.4 การประยุกต์ใช้แรงดันสูงในกระบวนการแปรรูปอาหาร

ปัจจุบันการใช้แรงดันสูงในกระบวนการแปรรูปอาหารกำลัง
เป็นที่นิยม และถูกพัฒนาเครื่องจักรและอุปกรณ์มาใช้ในระดับ
อุตสาหกรรมมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากต้นทุนคงที่ ของเครื่องจักร
และอุปกรณ์การแปรรูปด้วยการใช้แรงดันสูงนั้นมีราคาต่ำลง จน
สามารถนำมาใช้ในการแปรรูปในระดับอุตสาหกรรมได้ โดย
ผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปด้วยระบบ HPP นั้นมีมูลค่าทางการตลาดที่
สูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปแบบดั้งเดิม โดยมีจุดเด่นในเรื่องรักษา
คุณภาพ สำหรับการแปรรูปด้วยความดันสูงนั้นมีขั้นตอนการ
ทำงานโดยการนำผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านเตรียมขั้นต้นแล้วและ
บรรจุในบรรจุภัณฑ์ด้วยเทคโนโลยีการบรรจุแบบปลอดเชื้อแล้ว
นำเข้าบรรจุการบรรจุผลิตภัณฑ์เข้าเวสเซล จากนั้นเวสเซลถูก
ลำเลียงเข้าสู่ห้องความดันในระบบปิด เติมน้ำในซึ่งทำหน้าที่เป็น
ตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงานกลจากแรงดันในการทำลาย
จุลินทรีย์ และสามารถกลับสู่รูปร่างเดิมได้เมื่อปรับสภาพความดัน
สูงกลับเข้าสู่สภาวะปกติ และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ HPP เวส
เซลที่บรรจุผลิตภัณฑ์จะถูกปรับสภาพเข้าสู่ความดันปกติแล้ว และ
ปล่อยน้ำทิ้งออกจากเวสเซล จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ออกจากเวสเซล
(Figure 2) เข้าสู่การแปรรูปและบรรจุเพื่อจำหน่ายต่อไป

ภาชนะบรรจุอาหาร (Package) ที่เหมาะสำหรับ HPP ต้องไม่มีส่วนผสมของแก๊ส ไม่มีที่ว่างในภาชนะบรรจุอาหาร และมีความชื้นสูง นอกจากนี้ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการบรรจุผลิตภัณฑ์ต้องมีความเหมาะสม วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่มีความยืดหยุ่นพอที่จะสามารถส่งความดันโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้าง เนื่องจากความดัน อาหารจะถูกบีบอัดและทำให้ภาชนะบรรจุอาหารเสียรูปได้ วัสดุแข็งเช่นโลหะและกระจกไม่เหมาะสมเพราะไม่สามารถทนต่อความดันสูง บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมควรมีความยืดหยุ่นและสามารถรองรับการต่อความดันสูงได้ Figure 3 แสดงภาพถ่ายของระบบการแปรรูปด้วยการใช้แรงดันสูงในระดับอุตสาหกรรมของการพาสเจอร์ไรซ์ของบริษัทเอกชนในประเทศอเมริกา

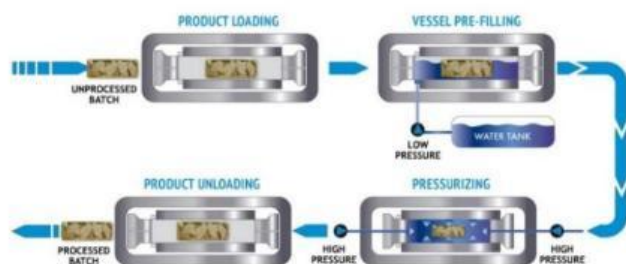


Figure 2 Diagram of high pressure food processing work (Source: <http://www.hpplousangeles.com>).



Figure 3 Actual photograph of a batch HPP system owned and operated by American Pasteurization Company (Source: Ferstl and Ferstl; the National food lab, 2013).

4 สรุป

การแปรรูปด้วยการใช้ความดันสูง (HPP) แต่เป็นการใช้ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ (400-600 MPa) มีความสามารถและผลการทำลายจุลินทรีย์เทียบเคียงกับการแปรรูปอาหารด้วยความร้อน เช่นการพาสเจอร์ไรซ์ ด้วยวิธีใช้ความร้อนสูง - เวลาสั้น (HTST) และอาหารที่มีความกรด (Acid foods) หรือมีค่า $\text{pH} \leq 4.5$ พบว่าประสิทธิภาพของการทำลายจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพเทียบเท่าการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูงเพราะสามารถทำลายสปอร์ของจุลินทรีย์ได้หมด จุดโดดเด่นของการแปรรูปด้วยเทคโนโลยี HPP เป็นเทคโนโลยีที่สะอาดแต่ใช้อุณหภูมิในการแปรรูปไม่เกินที่

45°C การแปรรูปด้วยเทคโนโลยี HPP จะช่วยรักษาสสมบัติทางเคมีและกายภาพ ผลิตภัณฑ์มีความสด กลิ่น สี รสที่ใกล้เคียงธรรมชาติ ทำให้เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค ส่งผลต่อการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์

5 เอกสารอ้างอิง

- ฤทธิ์ชัย อัครวราพันธ์. 2558. การแปรรูปด้วยแรงดันสูง เอกสารคำสอนวิชา วอ.482 การแปรรูปอาหารสมัยใหม่.คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยแม่โจ้. เชียงใหม่.
- การแปรรูปอาหารโดยใช้ความดันสูง. 2016. คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยนเรศวร. Available at: http://conf.agi.nu.ac.th/agmis/download/publication/70_file.pdf. Accessed on 20 April 2016.
- Cappelletti, M., Ferrentino, G., Endrizzi, Aprea, E., Betta, E., Maria Laura Corollaro, M.L., Charles, M. Flavia Gasperi, F. Spilimbergo, F. 2015. High pressure carbon dioxide pasteurization of coconut water: A sport drink with high nutritional and sensory quality. *Journal of Food Engineering* 145, 73-81.
- Da-Wen, Sun. 2014. High Pressure Processing: An overview. (2nd ed.). Emerging Technologies for Food Processing. Academic Press is an imprint of Elsevier. London: United Kingdom.
- Daryaei, H., Balasubramaniam, V.M. 2013. Kinetics of bacillus coagulans spore inactivation in tomato juice by combined pressure-heat treatment. *Food Control* 30(1), 168-175.
- Doona, C.J., Feeherry, F.E. 2007. High Pressure Processing of Foods. Blackwell Publishing Asia. Victoria: Australia.
- Gould, G.W., Sale, A.J.H. 1970. Initiation of germination of bacterial spores by hydrostatic pressure. *Journal of general microbiology Society for General Microbiology* 60, 335-346.
- Hoover, D.G., Metrick, C., Papineau, A.M., Farkas, D.F., Knorr, D. 1989. Biological effects of high hydrostatic pressure on food microorganisms. *Food Technology* 43(3), 99-107.
- Farkas, D.F., Hoover, D.G. 2000. High pressure processing. *Journal of Food Science Supplement* 65, 47-64.
- Ferstl, C., Ferstl, P. 2013. High pressure processing: Insights on technology and regulatory requirements. *The National food lab* 10, 1-6.

- Johnson, F.H., Zobell, C.E. 1949. The retardation of thermal disinfection of *Bacillus subtilis* spores by hydrostatic pressure. *Journal of Bacteriol* 57, 353-358.
- Neetoo, H., Lu., Y., Wu., C., Chen, H. 2012. Use of high hydrostatic pressure to inactivate *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enteritidis* within and Adhered to preharvest contaminated green onions. *Applied and Environmental Microbiology* 78(6), 2063-2065.
- Linton, M., McClements, J.M.J., Patterson, M.F. 1999. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in orange juice using a combination of high pressure and mild heat. *Journal of Food Protection* 3, 211-301.
- Lukas, A.R. 2013. Use of high pressure processing to reduce foodborne pathogen in coconut water. Master of Science. Blacksburg Virginia, United States: Department of Food Science and Technology, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Sale, A.J.H., Gould, G.W., Hamilton, W.A. 1969. Inactivation of bacterial spores by hydrostatic pressure. *The Journal of General and Applied Microbiology* 60(3), 323-346.
- Shigehisa, T., Ohmori, T., Saito, A., Taji, S., Hayashi, R. 1991. Effects of high pressure on the characteristics of pork slurries and the inactivation of micro-organisms associated with meat and meat products. *International Journal of Food Microbiology* 12, 207-216.



การประเมินสมรรถนะของระบบอบแห้งแบบพาหะลมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล

Performance Evaluation of Flash Drying System for Biomass Fuel Production

ธนัท มุขขันธุ์¹, วีรชัย อางหาญ¹, พรชชา ลิบลับ^{1*}Thanathat Mookkan¹, Weerachai Arjharn¹, Pansa Liplap^{1*}¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000¹School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author: Tel +66-44-225-007, Fax: +66-44-224-610, E-mail: pansa@g.sut.ac.th

บทคัดย่อ

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีศักยภาพมากสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทน อย่างไรก็ตาม วัสดุดังกล่าวมักยังไม่ได้รับความสนใจมากนักในการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจาก ขนาดไม่เหมาะสม ความชื้นสูง เป็นต้น ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อใช้เป็นพลังงานโดยวิธีการอบแห้งแบบพาหะลม โดยเลือกใช้วัตถุดิบชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว มาศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนที่ 130 และ 160 °C และอัตราการป้อนชีวมวลที่ 300 480 และ 600 kg h⁻¹ ต่อการลดลงของความชื้น อัตราการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ประสิทธิภาพทางความร้อนในการอบแห้ง รวมไปถึงประเมินต้นทุนที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล ผลการศึกษา พบว่า อุณหภูมิลมร้อน 130 °C และอัตราการป้อนวัตถุดิบชีวมวล 300 kg h⁻¹ เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการลดความชื้นของชีวมวลที่เลือกมาทดสอบ โดยการเพิ่มอุณหภูมิ (160 °C) ไม่ส่งผลต่อการลดความชื้น และอัตราการอบแห้งชัดเจน นอกจากนี้ การเพิ่มอัตราการป้อนมากกว่านี้ (480 และ 600 kg h⁻¹) ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง โดยที่สภาวะเหมาะสมนี้มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง แต่มากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการป้อนที่สูงกว่า ประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบแห้งโดยรวมอยู่ระหว่าง 64 และ 76% และเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนในการเตรียมเชื้อเพลิง พบว่า มีต้นทุนใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงฟอสซิล ดังนั้น เศษเหลือใช้ทางการเกษตรที่ผ่านการเตรียมด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลมจึงมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน

คำสำคัญ: การอบแห้งแบบพาหะลม, เชื้อเพลิงชีวมวล, สมรรถนะในการอบแห้ง, พลังงานทดแทน

Abstract

Agricultural residues are highly potential for use as alternative energy sources. However, they are less attractive to apply as commercial fuels because of their inferior properties, i.e. unexpectable size, high moisture content, etc. In this research, the study of biomass preparation with agricultural residues as feedstocks was conducted using a flash drying process. Three different types of biomass comprised of Eucalyptus bark, empty fruit bunch (EFB) and coconut coir dust were selected to investigate the effects of hot air temperatures of 130 and 160 °C and biomass feed rates of 300, 480 and 600 kg h⁻¹ on moisture reduction, drying rate, specific energy consumption (SEC), thermal efficiency of drying and cost covered by biomass preparing process. The results showed that the hot air temperature of 130 °C and the biomass feed rate of 300 kg h⁻¹ were the optimum condition for drying all biomass tested. The increase in the hot air temperature (160 °C) did not have significant effect on moisture reduction and drying rate. In addition, the higher feed rates (480 and 600 kg h⁻¹) tended to decrease drying rate. At the optimum condition, the SEC value was lower than that obtained by the higher hot air temperature and it was slightly higher with respect to the result of the higher feed rate. The drying thermal efficiency varied between 64 and 76%. Comparing the cost of biomass preparation, it was found to be competitive with fossil fuels. Consequently, agricultural residues prepared through the flash drying process are potential for use as alternative energy sources.

Keywords: Flash drying, Biomass fuel, Drying performance, Alternative energy

1 บทนำ

ประเทศไทยมีการนำชีวมวลจำพวกเศษวัสดุเหลือใช้ในภาคอุตสาหกรรมเกษตรมาใช้เป็นเชื้อเพลิงกันอย่างแพร่หลาย เช่น แกลบ กะลาปาล์ม ชานอ้อย เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยังมีเศษวัสดุเหลือใช้อีกหลายประเภทที่ยังไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เหลือจากโรงงานสับไม้ ทะลายปาล์มที่เหลือจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์ม และขุยมะพร้าวที่เหลือจากอุตสาหกรรมแปรรูปมะพร้าว เนื่องจากวัสดุดังกล่าว ยังมีสภาพไม่พร้อมใช้ เช่น มีความชื้นสูง ความหนาแน่นต่ำ ขนาดไม่เหมาะสม ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องมีการแปรรูปเศษวัสดุเหลือใช้เหล่านี้ ให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน

เชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรส่วนใหญ่แล้วจะมีความชื้นสูง เช่น ทางปาล์มมีความชื้นประมาณ 70% w.b. เหน้้ำมันสำปะหลังมีความชื้นประมาณ 50-60% w.b. (สุภัทร, 2551) ชังข้าวโพดมีความชื้นประมาณ 20-55% w.b. (Morey and Thimsen, 1980) ทะลายปาล์มมีความชื้นประมาณ 60% w.b. (Abdullah et al., 2011) และขุยมะพร้าวมีความชื้นประมาณ 40-70% w.b. (Islam et al., 2014) เป็นต้น ที่ความชื้นสูงนี้จะส่งผลทำให้เชื้อเพลิงนั้นมีค่าความร้อนต่ำ จากการศึกษาการนำเชื้อเพลิงชีวมวลหลายชนิดในประเทศไทยมาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน พบว่า วัสดุดิบควรมีค่าความชื้นไม่เกิน 15% w.b. (Arjhan et al., 2012) นอกจากนี้ยังพบว่า เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงจะมีแนวโน้มเสื่อมคุณภาพเนื่องจากถูกย่อยสลายโดยเชื้อราและเชื้อจุลินทรีย์ได้ง่าย ทำให้ระยะเวลาการเก็บรักษาเชื้อเพลิงชีวมวลสั้นลง (Alakoski et al., 2016) ส่งผลต่อการวางแผนการจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลของโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้น การลดความชื้นจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวล

การอบแห้งแบบพาหะลมเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นเมื่อเทียบกับการอบโดยวิธีอื่น (ฉัตรชัย, 2555) อย่างไรก็ตามการอบแห้งแบบพาหะลมมีข้อจำกัดคือ วัสดุที่ใช้อบแห้งต้องมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาหรือความหนาแน่นต่ำ สามารถลอยตัวในอากาศได้ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุเพื่อให้เหมาะสมก่อนทำการอบแห้งแบบพาหะลม

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักในการอบแห้งของวัสดุ โดยทั่วไป ยิ่งอุณหภูมิสูง ยิ่งทำให้อบแห้งได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม หากอุณหภูมิสูงเกินไป (260-280°C) จะมีโอกาสทำให้วัสดุเกิดการลุกไหม้เองได้ (auto-ignition) สำหรับการอบแห้งชีวมวลควรใช้อุณหภูมิไม่เกิน 150°C แต่หากเป็นการอบแห้งโดยใช้เวลาสั้น เช่น การอบแห้งแบบพาหะลม สามารถใช้อุณหภูมิในการอบแห้งได้ถึง 200°C (Haque and Somerville, 2013) อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่ใช้การอบแห้งชีวมวลนี้ยังขึ้นปัจจัยอื่น อาทิ ประเภท ความชื้นเริ่มต้น ขนาด อัตราการป้อนของชีวมวล เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการลดความชื้นชีวมวล 3 ชนิด คือ เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมร่วมกับกระบวนการลดขนาดเพื่อให้ได้

คุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำไปแปรรูปต่อไป โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ และอัตราการป้อนวัตถุดิบ ต่อสมรรถนะประสิทธิภาพ รวมไปถึงประเมินต้นทุนในการอบแห้งของชีวมวล

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัตถุดิบ

จากในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวแทนชีวมวลที่มีความชื้นสูง ได้แก่ เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เหลือจากกระบวนการผลิตไม้สับ ทะลายปาล์มที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม และ ขุยมะพร้าวที่ได้จากกระบวนการแยกใยออกกะลา ลักษณะของวัตถุดิบชีวมวลที่ใช้ในการทดลองแสดงใน Figure 1

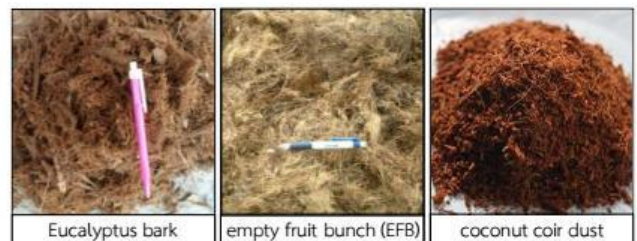


Figure 1 Biomass raw materials.

2.2 การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

สำหรับชุดการทดลองการอบแห้งแบบพาหะลมในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก คือ (1) เครื่องสับย่อย (chipper) ขนาดกำลังการผลิต 1,400 kg h⁻¹ (2) ถังอบแห้งแบบพาหะลมตัวที่ 1 และ 2 โดยแต่ละถังมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 m สูง 4.6 m (3) เครื่องเป่า (blower) มีต้นกำลัง 3 hp และมีอัตราการไหล 0.43 m³ s⁻¹ (4) ถังพัก และ (5) เครื่องบดย่อยด้วยเครื่องแฮมเมอร์ มิลล์ที่มีขนาดตะแกรง 10 mm ดังแสดงใน Figure 2

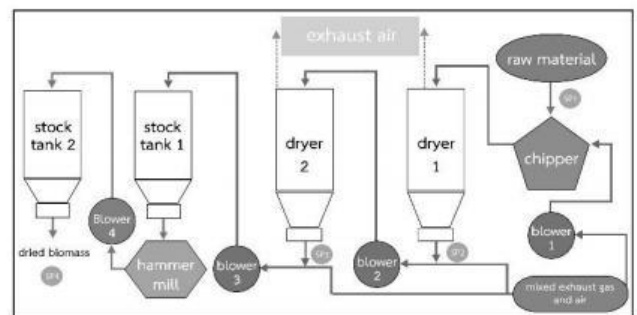


Figure 2 Schematic process of flash dryer for biomass preparation.

ระบบมีการทำงานโดยเริ่มจากการนำเอาลมร้อนจากแก๊ส ไอเสียของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อ ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 160-250°C มาผสมกับอากาศในถังผสมจนได้อุณหภูมิตามที่กำหนด ลมร้อนนี้จะถูกแบ่งเข้าสู่เครื่องเป่า 3 ตัว ดังแสดงใน Figure 2 เมื่อวัตถุดิบชีวมวลถูกสับในเครื่องสับย่อย (chipper) แล้วชีวมวลที่มีขนาดเล็กลงนี้จะถูกลำเลียงโดยใช้ลมร้อนเข้าสู่ถังอบแห้งที่ 1 และถังที่ 2 ตามลำดับ เมื่อชีวมวลผ่านถังอบแห้งทั้ง 2 ถังแล้วชีวมวลจะถูกส่งเข้าไปในถังพัก

เพื่อป้อนเข้าสู่เครื่องบดย่อย (hammer mill) อีกครั้ง และถูกลำเลียงไปสู่ถังพักเพื่อรอป้อนเข้าสู่เครื่องอัดเม็ดสำหรับผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดต่อไป

2.3 สภาพการอบแห้งแบบพาหะลมร้อน

การทดลองอบแห้งแบบพาหะลมร้อนในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนที่ $130 \pm 10^{\circ}\text{C}$ และ $160 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ร่วมกับอัตราการป้อนวัตถุดิบชีวมวลที่ 300, 480 และ 600 kg h^{-1} ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น รวมไปถึงอัตราการอบแห้ง โดยมีตัวแปรควบคุม คือ อัตราการไหลของลมร้อน และความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ สำหรับการเก็บข้อมูล ตัวอย่างจะถูกเก็บที่ตำแหน่งต่างๆ (sampling point: SP) ของชุดการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย (1) ความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง (2) ความชื้นหลังผ่านเครื่องอบแห้งตัวที่ 1 (3) ความชื้นหลังผ่านเครื่องอบแห้งตัวที่ 2 และ (4) ความชื้นหลังผ่านเครื่องบดละเอียด (hammer mill) ดังแสดงใน Figure 2 โดยจะเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความชื้นทุก 5 min เป็นเวลา 3 h และนำเสนอโดยใช้ค่าเฉลี่ย

2.4 การหาคุณสมบัติของชีวมวล

คุณสมบัติของชีวมวลที่สนใจในการทดลองนี้คือ ค่าความชื้น โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 1 และ สมการที่ 2 ใช้สำหรับหาค่าหนาแน่นปรากฏ

$$MC = \frac{m_w - m_d}{m_w} \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นวัสดุชีวมวลมาตรฐานเปียก (%w.b.)

m_d คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)

m_w คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)

$$\rho_b = \frac{m}{V} \quad (2)$$

เมื่อ ρ_b คือ ความหนาแน่นปรากฏ (kg m^{-3})

m คือ มวลของชีวมวลในภาชนะ (kg)

V คือ ปริมาตรของภาชนะ (m^3)

2.5 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะของกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงด้วยวิธีการอบแห้งแบบพาหะลมร้อน ประกอบไปด้วย การหาอัตราการอบแห้ง (drying rate) (สมการที่ 3) พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง (Specific Energy Consumption, SEC) (สมการที่ 4) ประสิทธิภาพรวมของการอบแห้ง (สมการที่ 5) รวมถึงการประเมินต้นทุนในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

$$DR = \frac{MC_i - MC_f}{t} \quad (3)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (% d.b. h^{-1})

MC_i คือ ความชื้นวัสดุชีวมวลก่อนการอบแห้ง (% d.b.)

MC_f คือ ความชื้นวัสดุชีวมวลหลังการอบแห้ง (% d.b.)

$$SEC = \frac{E_{\text{electric}} + E_{\text{exhaust}}}{m_w} \quad (4)$$

เมื่อ SEC คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($\text{MJ kg}_{\text{water}}^{-1}$)

E_{electric} คือ พลังงานจากไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ (MJ)

E_{exhaust} คือ พลังงานความร้อนจากไอเสีย (MJ)

m_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหย (kg)

$$\eta_{th} = \frac{m_w h_{fg}}{E_{\text{electric}} + E_{\text{exhaust}}} \quad (5)$$

เมื่อ η_{th} คือ ประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง (%)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (MJ kg^{-1})

3 ผลและวิจารณ์

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล

คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เบื้องต้นพบว่ายังไม่เหมาะแก่การนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากมีความชื้นที่สูงและขนาดใหญ่ โดยเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว มีความชื้น 52.9 ± 2.4 54.8 ± 3.3 และ $50.4 \pm 1.0\%$ w.b. ตามลำดับ มีความหนาแน่น 122, 145 และ 120 kg m^{-3} ตามลำดับ และมีลักษณะเป็นชิ้น ความยาวประมาณ 50-100 mm หนาประมาณ 5 mm สำหรับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและทะลายปาล์ม ส่วนขุยมะพร้าวมีลักษณะเป็นผงปนกับเส้นใย ดังกล่าว ในการอบแห้งวัตถุดิบชีวมวลด้วยวิธีพาหะลมจำเป็นต้องมีการลดขนาดเพื่อให้มีน้ำหนักเบา และสามารถถูกพาไปในระหว่างการอบแห้งได้ โดยในงานวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องสับ (chipper) ที่มีขนาดของรูตะแกรง 25 mm

3.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้น

การเปลี่ยนแปลงความชื้นของชีวมวลเนื่องจากผลของอุณหภูมิและอัตราการป้อน ที่ตำแหน่งต่างๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลมแสดงดัง Figure 3 โดยพบว่า อุณหภูมิและอัตราการป้อนชีวมวลส่งผลต่อการลดลงของความชื้น โดยยิ่งเพิ่มอัตราการป้อนชีวมวลมากขึ้น ยิ่งทำให้ความชื้นลดลงช้าลง อย่างไรก็ตาม ในกรณีของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส และทะลายปาล์มที่อัตราการป้อนสูง (480 และ 600 kg h^{-1}) แทบจะไม่มี ความแตกต่างของความชื้น ซึ่งแตกต่างจากขุยมะพร้าว ทั้งนี้ สาเหตุดังกล่าวบางส่วนอาจเกิดมาจากความสามารถในการรับน้ำของอากาศที่น้อยลงเมื่อมีอัตราการป้อนสูงขึ้น แต่สาเหตุหลักน่าจะเกิดมาจากลักษณะของวัตถุดิบที่ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน กล่าวคือ ทั้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและทะลายปาล์มยังมีลักษณะเป็นเส้นใยแม้จะผ่านเครื่องสับ (chipper)

แล้วก็ตาม ทำให้ความร้อนถ่ายเทเข้าไปในอนุภาคของวัสดุได้ไม่ทัน และสุดท้ายส่งผลให้ความชื้นไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน นอกจากนี้ Borde and Levy (2006) ได้รายงานไว้ว่า ขนาดของวัตถุดิบนอกจากส่งผลโดยตรงต่อการถ่ายเทความร้อนแล้ว ยังส่งผลต่อการถ่ายเทมวลอีกด้วย โดยในการอบแห้งแบบพาหะลมวัสดุควรมีขนาดประมาณ 10-500 μm อย่างไรก็ตาม ขนาดของวัตถุดิบที่ใช้สามารถมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ หากมีการปรับความเร็วลมที่เหมาะสมทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ลักษณะรูปร่างของวัตถุดิบ และความชื้นที่ต้องการด้วย

สำหรับผลของอุณหภูมิต่อการลดลงของความชื้น พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก 130 ไป 160 °C มีแนวโน้มจะทำให้ความชื้นลดลง แต่ไม่ส่งผลต่อการลดลงของความชื้นอย่างชัดเจน โดยมีความแตกต่างมากที่สุดของการลดลงของความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ ไม่เกิน 5% นอกจากนี้กราฟความชื้นยังแสดงให้เห็นว่า อัตราการลดความชื้นจะสูงในระยะแรกช่วงที่มีความชื้นสูง และค่อยๆ ลดลงเมื่อความชื้นต่ำลง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Nair et al., 2011, 2012) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของน้ำอิสระ (free water) และน้ำในรูปของพันธะเคมี (bound water) ที่มีอยู่ในชีวมวล สำหรับในงานวิจัยนี้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการอยู่ระหว่าง 25-30% w.b. ซึ่งเพียงพอสำหรับการนำไปผสมกับตัวประสาน (binder) เพื่อแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงสำเร็จรูป (เชื้อเพลิงอัดเม็ด/อัดแท่ง) เพราะหากมีความชื้นน้อยเกินไปจะทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ ขณะที่ความชื้นสูงเกินไปจะมีผลให้เชื้อเพลิงสำเร็จรูปนี้คลายตัวและแตกหลังการแปรรูป (Tumuluru et al., 2016)

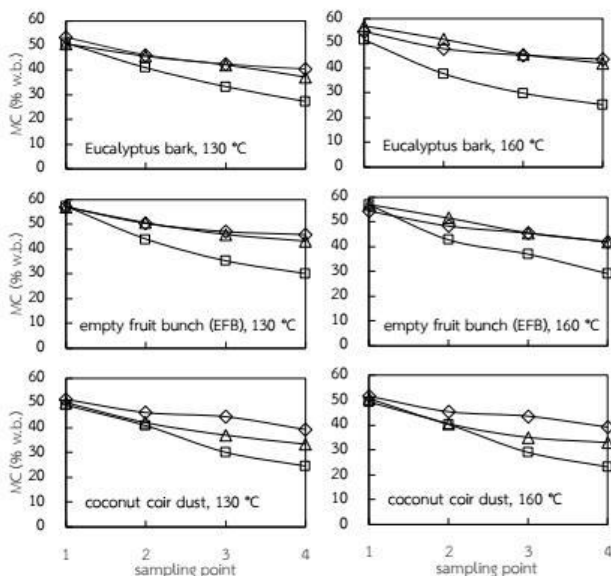


Figure 3 Effects of temperature and biomass feed rate on moisture reduction; 600 kg h⁻¹ (◇), 480 kg h⁻¹ (Δ), 300 kg h⁻¹ (□).

3.3 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

Figure 4 แสดงอัตราการอบแห้งรวมของชีวมวลแต่ละชนิดโดยพิจารณาจากความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายหลังผ่านระบบ พบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในการทดลองนี้มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

เล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อน โดยภาพรวมที่อัตราการป้อน 300 kg h⁻¹ มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด ส่วนอัตราการป้อนที่ 480 และ 600 kg h⁻¹ มีอัตราการอบแห้งส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสมร้อน 130 °C เพียงพอสำหรับการอบแห้งชีวมวลทั้ง 3 ชนิด และอัตราการป้อนชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งในครั้งนี้อยู่ที่ 300 kg h⁻¹ จึงจะทำให้มีความชื้นตามที่ต้องการได้

3.4 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

ค่า SEC ในการอบแห้งชีวมวลด้วยพาหะลมในงานวิจัยนี้พิจารณาพลังงานจากอากาศร้อนผสมและพลังงานจากไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ (Figure 5) พบว่า เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจาก 130 เป็น 160 °C ค่า SEC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยทุกวัตถุดิบชีวมวลอยู่ในช่วง 7-11% ขณะที่การเพิ่มอัตราการป้อนมีแนวโน้มทำให้ค่า SEC ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ฉัตรชัย (2555) ที่ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมร้อน อย่างไรก็ตาม ที่อัตราการป้อนสูง (480 และ 600 kg h⁻¹) ค่า SEC ของวัตถุดิบชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันประมาณ 2-10% โดยสาเหตุที่ค่า SEC ลดลงเป็นผลมาจากปริมาณน้ำที่ระเหยมากขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสูงขึ้น แต่หากมีอัตราการป้อนมากเกินไปจะทำให้เวลาที่อยู่ในวัตถุดิบระเหยไม่ทัน ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับลักษณะกราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่แสดงก่อนหน้านี้

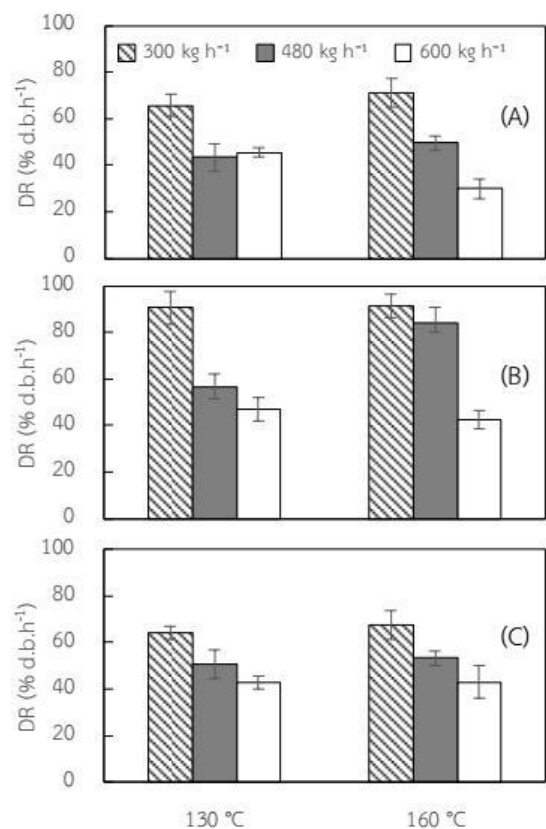


Figure 4 Effects of temperature and biomass feed rate on drying rate; Eucalyptus bark (A), EFB (B), coconut coir dust (C). Values represent an average and standard deviation (S.D.) of data collected for three hours.

3.5 ประสิทธิภาพทางความร้อนในการอบแห้ง (Thermal efficiency of drying)

จากผลการทดลองการอบแห้งที่อุณหภูมิและอัตราการป้อนต่างๆ แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิลมร้อน 130°C และอัตราการป้อน 300 kg h^{-1} เป็นสภาวะที่เหมาะสมทำให้ได้ความชื้นที่ต้องการแม้ว่าจะมีค่า SEC สูงกว่าที่อัตราการป้อนอื่นเล็กน้อย ดังนั้น เมื่อพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับหาประสิทธิภาพทางความร้อนในการอบแห้ง พบว่า ชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมีประสิทธิภาพการอบแห้งค่อนข้างสูง โดยที่ ทะลายปาล์มมีประสิทธิภาพสูงที่สุด (76.4%) รองลงมาเป็นขุยมะพร้าวและเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (~ 64%) ดังแสดงใน Figure 6

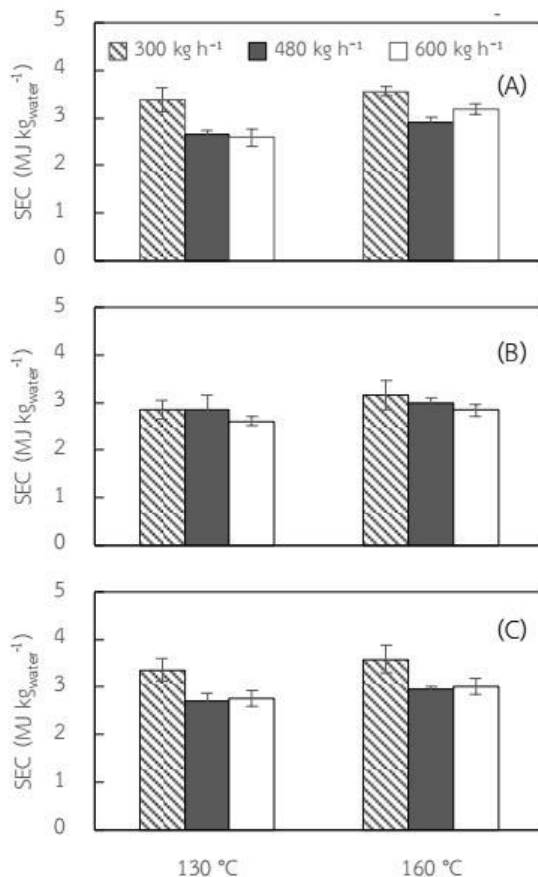


Figure 5 Effects of temperature and biomass feed rate on specific energy consumption (SEC); Eucalyptus bark (A), EFB (B), coconut coir dust (C). Values represent an average and standard deviation (S.D.) of data collected for three hours.

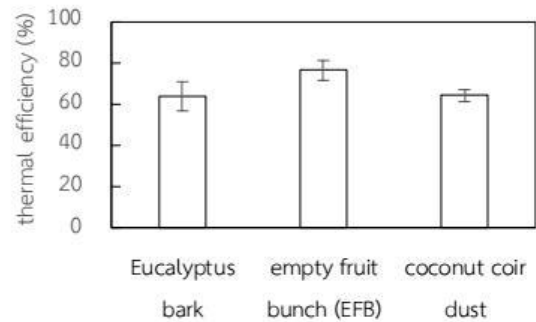


Figure 6 Thermal efficiency of biomass drying at hot air temperature of 130°C and biomass feed rate of 300 kg h^{-1} . Values represent an average and standard deviation (S.D.) of data collected for three hours.

3.6 การวิเคราะห์ต้นทุน-ผลตอบแทน

ต้นทุนการอบแห้งวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ประเภท ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ อาทิ ต้นทุนค่าเครื่องอบแห้งและเครื่องจักร ต้นทุนวัตถุดิบ ต้นทุนการจัดหาพลังงาน และต้นทุนจากแรงงานในขั้นตอนการผลิต แต่ในประเมินครั้งนี้เบื้องต้นจะไม่คำนึงถึงต้นทุนของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม โดยทำการวิเคราะห์ต้นทุนการอบแห้ง ที่ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด ในปริมาณ 1 ton กำหนดให้วัตถุดิบแต่ละชนิดมีราคา 100 Baht ton^{-1} แรงงานในการทำงาน 2 คน พลังงานไฟฟ้าในการลำเลียงและสับย่อย 165 kWh แต่ไม่คิดพลังงานจากความร้อนเนื่องจากเป็นความร้อนเหลือทิ้งจากหม้อไอน้ำ และใช้ระยะเวลาทั้งหมดจนเสร็จสิ้นกระบวนการ 3.3 h ดังแสดงใน Table 1-2

Table 1 Cost of biomass drying

Description	Cost (Baht)
raw material 1,000 kg x 0.1 Baht kg ⁻¹	100
heat source (exhaust gas)	-
labor 2 people x 40 Baht h ⁻¹ x 3.3 h	264
electricity 50 kWh x 3.3 h x 3 Baht kWh ⁻¹	495
Total	859

Table 2 Cost of water evaporation

Item	Eucalyptus	EFB	Coconut
production cost (Baht)	859	859	859
mass of evaporated water (kg)	346	389	340
mass of dried product (kg)	654	611	660
cost of evaporation (Baht kg ⁻¹)	2.48	2.21	2.53
biomass drying cost (Baht kg ⁻¹)	1.31	1.4	1.3

ผลวิเคราะห์ต้นทุนการแปรรูปชีวมวลแสดงใน Table 3 โดยคิดที่ความชื้น 30% w.b. และอัตราการป้อน 300 kg h⁻¹ พบว่า เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว มีราคาเทียบกับค่าความร้อนเท่ากับ 0.43 0.39 และ 0.43 Baht Mcal⁻¹ ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านหิน ที่มีราคา 0.48 Baht Mcal⁻¹ ดังนั้น วัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิดนี้ จึงมีศักยภาพในการนำมาแปรรูปสำหรับใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้ โดยที่ทะลายปาล์มมีศักยภาพสูงสุด

Table 3 Cost of biomass with respect to its calorific value

biomass	calorific value (Mcal kg ⁻¹) *	biomass cost (Baht Mcal ⁻¹)
Eucalyptus bark	3.010	0.43
EFB	3.580	0.39
coconut coir dust	3.027	0.43

* calorific values were referenced from Arjarn et. al. (2012)

4 สรุป

ในงานวิจัยนี้ วัตถุดิบชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว ถูกนำมาลดความชื้นด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลมควบคู่ไปกับกระบวนการเตรียมเพื่อนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงสำเร็จรูป โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้ง ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ (130 และ 160 °C) และอัตราการป้อนวัตถุดิบ (300 480 และ 600 kg h⁻¹) พร้อม

ทั้งวิเคราะห์หาสมรรถนะ ประสิทธิภาพ และต้นทุนที่ใช้ในการอบแห้ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิลมร้อน 130 °C เพียงพอสำหรับการอบแห้งชีวมวลทั้ง 3 ชนิด โดยผลที่ได้ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับอุณหภูมิลมร้อนที่ 160 °C นอกจากนี้ การเพิ่มอัตราการป้อนยังทำให้อัตราการลดความชื้นลดลง โดยอัตราการป้อนที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้คือ 300 kg h⁻¹ ซึ่งทำให้ได้ความชื้นตามที่ต้องการ (25-30% w.b.) ที่สภาวะเหมาะสมดังกล่าวมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า แต่มากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการป้อนที่สูงกว่า โดยระบบการอบแห้งแบบพาหะลมมีประสิทธิภาพทางความร้อนค่อนข้างสูง (64-76%) และเมื่อพิจารณาต้นทุนในการเตรียมเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดนี้พบว่า มีศักยภาพในการนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้ โดยมีราคาเทียบเคียงกับเชื้อเพลิงฟอสซิล

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการสนับสนุนงบประมาณในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

6 เอกสารอ้างอิง

- ฉัตรชัย นิยมล. 2555. ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือก ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียว. วารสารวิจัย มข 17(1), 97-109.
- สุภัทร หนูแย้ม วีรชัย อาจหาญ. 2551. การศึกษาลักษณะการอบแห้งของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารี. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตร ครั้งที่ 9 ประจำปี 2551. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- Abdullah, N., Sulaiman, F., Gerhauser, H. 2011. Characterisation of oil palm empty fruit bunches for fuel application. Journal of Physical Science 22(1), 1-24.
- Alakoski, E., Jamsen, M., Agar, D., Tampio, E., Wihersaari, M. 2016. From wood pellets to wood chips, risks of degradation and emissions from the storage of woody biomass – A short review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 54, 376-383.
- Arjarn, W., Hinsui, T., Liplap, P., Raghavan, G. S. V. 2012. Evaluation of electricity production from different biomass feedstocks using a pilot-scale downdraft gasifier. Journal of Biobased Materials and Bioenergy 6, 1-11.
- Borde, I., Levy, A. 2006. Pneumatic and Flash Drying. Handbook of Industrial Drying, Third Edition, Ed. A. S. Mujumdar, CRC Press, UK.

- Haque, N., Somerville, M. 2013. Techno-economic and environmental evaluation of biomass dryer. *Procedia Engineering* 56, 650-655.
- Islam, M. H., Hossain, M. M., Momin, M. A. 2014. Development of briquette from coir dust and rice husk blend: an alternative energy source. *International Journal of Renewable Energy Development (IJRED)* 3(2), 119-123.
- Morey, R.V., Thimsen, D.P. 1980. Combustion of crop residues to dry corn. *Proceedings of the ASAE Energy Symposium, Kansas City, Missouri, Sept. 29 - Oct. 1, 1980*, 6.
- Nair, G. R., Liplap, P., Garipey, Y., Raghavan, G. S. V. 2011. Microwave drying of flax fibre at controlled temperatures. *Journal of Agricultural Science and Technology B1*, 1103-1115.
- Nair, G. R., Liplap, P., Garipey, Y., Raghavan, G. S. V. 2012. Effect of microwave and hot air drying on flax straw at controlled temperatures. *International Journal of Postharvest Technology and Innovation* 2(4), 355-369.
- Tumuluru, J.S., Conner, C.C., Hoover, A.N. 2016. Method to produce durable pellets at lower energy consumption using high moisture corn stover and a corn starch binder in a flat die pellet mill. *Journal of Visualized Experiments* (112):54092 doi:10.3791/54092.



การออกแบบและสร้างเรือเก็บขยะแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกลสำหรับแหล่งน้ำเพื่อการเกษตร

Design and Fabrication of Remote Controlled Garbage Collecting Boat for Agricultural Water Resources

เกรียงไกร แซมสีม่วง^{1*}, จุลพงษ์ พฤกษะศรี¹, พงศ์พิชญ์ ต่วนภูษา¹, วีรศักดิ์ หมูเจริญ¹

Grianggai Samseemoung^{1*}, Junlaphong Bhucksasri¹, Pongpitch Tuenpusa¹, Weerasak Moocharoen¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 12110

¹Agricultural engineering, Faculty of engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Pathumthani, 12110

*Corresponding author: Tel: +66-8-9641-7532 or +66-8-2798-8098, Fax: +66-2-549-3581,

E-mail: kkriankkai@hotmail.com, grianggai@exchange.rmUTT.ac.th, grianggai.s@en.rmUTT.ac.th

บทคัดย่อ

การออกแบบและสร้างเรือเก็บขยะแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกลสำหรับแหล่งน้ำเพื่อการเกษตร มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเรือเก็บขยะในคลองแบบบังคับวิทยุไปใช้งาน โดยสามารถทำการเก็บขยะที่มีขนาดเล็กได้ ในการออกแบบนั้นจะใช้แหล่งต้นกำลังเป็นมอเตอร์กระแสตรงแบบ EMAXGT 3520/04 Out runner Brushless Motor 1150 KV ชุดโครงสร้างของเรือเก็บขยะจะเป็นวัสดุอลูมิเนียม โดยมีขนาด 900 mm×700 mm×300 mm จากการทดสอบหาความสามารถในการเก็บขยะลอยน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นถุงพลาสติก และขวดน้ำ จำนวน 50 pieces โดยความเร็วมอเตอร์จะอยู่ที่ 7000 rpm ในพื้นที่ขนาด 25 m² พบว่าเรือที่ทำการออกแบบนั้น สามารถทำการเก็บขยะคิดเป็น 76.33% มีความสามารถในการทำงานอยู่ที่ 27 pieces/min มีค่าใช้จ่ายในการทำงานอยู่ที่ 0.22 baht/m² และมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 31 days จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าเรือเก็บขยะในคลองแบบบังคับวิทยุนั้น จะมีประสิทธิภาพและความสามารถในการทำงานสูงกว่าการใช้แรงงานคน โดยสามารถช่วยลดได้ทั้งแรงงานคน เวลาในการทำงาน ต้นทุน และยังสามารถช่วยลดอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นในการทำงานลงได้อีกด้วย

คำสำคัญ: เรือเก็บขยะในคลองแบบบังคับวิทยุ, ต้นกำลัง, ความเร็วมอเตอร์, ประสิทธิภาพ, ขยะลอยน้ำ

Abstract

The main purpose of design and fabrication of remote controlled garbage collecting boat for agricultural water resources is to study the feasibility of using the unmanned remote control garbage collecting boat in term of small garbage collection. In the design was used a directly current motor sourced EMAXGT 3520/04 Out runner Brushless Motor 1150 KV and the main of structure was made from material aluminums with dimension 900 mm×700 mm×300 mm. Field performance test under controlled field conditions were used the plastic bags and bottles around 50 pieces with the motor speed 7000 RPM with actual area covered 25 m². The results of the field performance test were 76.33% and the effective work capacity 27 pieces/min. The cost of garbage collecting was around 0.22 baht/m² and the break-even point in 31 days. The unmanned remote control garbage collecting boat could be effective to work and could be reduce labor force, actual operating time, cost, and the danger that may arise in the work down, too.

Keywords: Unmanned remote control garbage collecting boat, power system, motor speed, efficiency, garbage

1 บทนำ

ปริมาณขยะของประเทศไทยถือเป็นข้อมูลที่น่าสนใจเนื่องจากปริมาณขยะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง โดยขยะมูลฝอยเป็นขยะที่มีปริมาณมากที่สุดของประเทศไทย ในปีพ.ศ. 2555 มีขยะมูลฝอยปริมาณ 16 M tons ซึ่งเป็นขยะที่เกิดขึ้นในกรุงเทพมหานคร ร้อยละ 22 หรือเฉลี่ย 9,800 tons/day

สำหรับขยะกลุ่มนี้ได้มีการกำจัดอย่างถูกวิธีตามหลักวิชาการเพียง 5.8 M tons หรือคิดเป็นร้อยละ 36 ส่วนที่เหลืออีกกว่า 10 M tons นั้นจะถูกกำจัดโดยการเผาทิ้ง กองทิ้งในบ่อดิน ในพื้นที่กร้างและตามแหล่งน้ำต่างๆ ตามลำดับ (สำนักข่าวออนไลน์ไทยพับลิก้า, 2556) การเก็บเก็บสิ่งปฏิกูลที่อยู่บนผิวน้ำ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้แรงงานคน หรือการทำผงดักเก็บ หากสิ่งปฏิกูลมีปริมาณมากหรือแหล่งน้ำมีขนาดใหญ่ วิธีการดังกล่าวนี้จะมี

ประสิทธิภาพต่ำ และต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการที่สูงขึ้น โดยในปัจจุบันได้มีการสร้างเรือเก็บขยะขึ้นมาหลากหลายรูปแบบ (ประปาไทยดอตคอม, 2559; วิชาการดอตคอม, 2559; ณัฐรท และคณะ, 2556) แต่ยังมีปัญหาต่างๆ มากมาย เช่น ปัญหาในการบรรทุกน้ำหนักได้น้อย ปัญหาในการควบคุมเรือให้ถึงจุดที่มีขยะอยู่ และปัญหาในด้านระยะเวลาทำงานที่ยาวนานขึ้น

จากปัญหาดังกล่าวคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบและสร้างเรือเก็บขยะในคูคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกล เพื่อทำการแก้ไขปัญหาในการเก็บขยะมูลฝอยที่ลอยอยู่ในแหล่งน้ำทางการเกษตรต่างๆ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำการออกแบบและสร้างเรือเก็บขยะในคูคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกลต้นแบบ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการเก็บขยะ จากนั้นทำการออกแบบระบบอัลกอริทึมของชุดควบคุมเรือ และสุดท้ายทำการออกแบบชุดเก็บขยะมูลฝอยในคูคลอง แบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกลขึ้น

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับขยะมูลฝอยที่ลอยบนผิวน้ำในคูคลอง

1) ทำการศึกษาถึงปัญหา และวิธีการเก็บขยะบนผิวน้ำ โดยใช้แรงงานคน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทราบถึงปัญหาความยากลำบากในการเก็บขยะรวมถึงการหาข้อมูลเปรียบเทียบการทำงานระหว่างเรือเก็บขยะในคูคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกล กับแรงงานคน และทำการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายเชิงเศรษฐศาสตร์ การดำเนินการศึกษาโดยการสัมภาษณ์จากคนเก็บขยะในพื้นที่ที่มีขยะในคูคลอง

2) ทำการศึกษาลักษณะของประเภทขยะที่ลอยบนผิวน้ำ วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงประเภทของขยะมูลฝอย เช่น ขวดน้ำ กล่องโฟมใส่อาหาร ถุงพลาสติก และเศษใบไม้ เป็นต้น การดำเนินการศึกษาโดยการแยกประเภทของขยะ จากนั้นทำการวัดขนาดเพื่อแยกขนาดออกมาเป็น เล็ก กลาง ใหญ่ โดยข้อมูลที่ได้เราจะนำไปทำการออกแบบชุดหัวเกี่ยวขยะ และชุดตะแกรงรองรับขยะด้านในตัวเรือต่อไป (Figure 1)

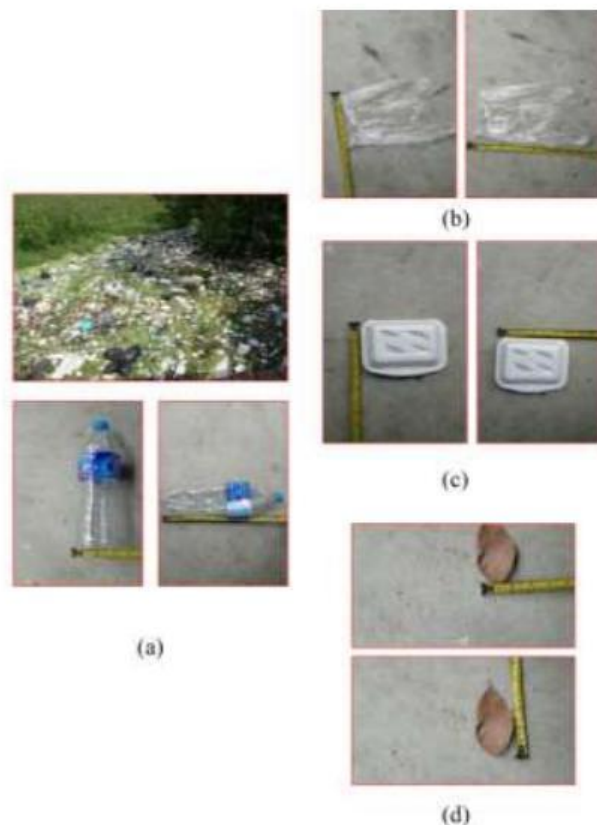


Figure 1 Specifications of the garbage in the irrigations canal (a) Agricultural irrigations canal and a bottle dimension (100 mmx320 mm) (b) a plastic bag dimension (150 mmx270 mm) (c) a foam box dimension (110 mmx140 mm) (d) a foliage dimension (40 mmx90 mm) (ทีนิสส์สังคม, 2559).

2.2 ทำการศึกษาลักษณะของวิธีการเก็บขยะบนผิวน้ำในคูคลอง

1) การศึกษาถึงปัญหาและวิธีการเก็บขยะโดยแรงงานคน วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงปัญหาในการเก็บขยะโดยใช้แรงงานคน รวมถึงการหาข้อมูลเปรียบเทียบการทำงานระหว่างเรือเก็บขยะในคูคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกล กับแรงงานคนเก็บ และวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายเชิงเศรษฐศาสตร์ การดำเนินการศึกษาโดยการสอบถามของผู้ที่รับจ้างเก็บขยะในคูคลองทั่วไป (Figure 2)



Figure 2 Specifications of the garbage collecting. (a) The risk from the garbage collecting; (b) Garbage collecting in the agricultural canal; (c) Garbage collecting in the river (ทีนิวส์สังคม, 2559).

2.3 ออกแบบและสร้างเรือเก็บขยะในคูคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกล

1) เกณฑ์ในการออกแบบ จะมีข้อกำหนดที่สำคัญดังต่อไปนี้ การเก็บขยะโดยการลำเลียงขยะมายังตะกร้ารองรับขยะด้วยชุดหัวเกี่ยวขยะ กลไกการทำงานของเรือเก็บขยะในคูคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกล ทำงานง่ายไม่ซับซ้อนมากเกินไปและ ผู้ปฏิบัติงานสามารถปฏิบัติงานได้สะดวกและมีความปลอดภัย การบำรุงรักษาง่าย อุปกรณ์ชิ้นส่วนหากชำรุดสามารถถอดเปลี่ยนได้ และมีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด และสามารถให้ผู้ปฏิบัติงานเพียง 1 คน

2) ในการออกแบบเรือเก็บขยะในคูคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกลนั้น จะทำการออกแบบให้มีส่วนประกอบหลักๆ 5 ส่วน ได้แก่ โครงสร้างของเรือ โดยจะเป็นวัสดุโลหะอะลูมิเนียม ชุดหัวเกี่ยวขยะ (THAITRATOR (www.thaitractor.com)) ใบพัดเรือ (MABUCHI Model: DOWNSOL 3V 7000 rpm, AliExpress.com, CHINA) มอเตอร์ (EMAX GT3520/04 Out runner Brushless Motor 1150 KV for RC Airplane) เป็นมอเตอร์เครื่องบินบังคับ ระบบรับส่งสัญญาณ (บริษัท เฉิงกั่ง อิเลคทริคัล เอ็นจิเนียริง (ประเทศไทย) จำกัด (Chenggang Electrical Engineering (Thailand) Co.,Ltd)) และชุดรีโมทควบคุมการบังคับเรือ (Wireless trigger control (Jelsoft Enterprises Ltd.)) ซึ่งวิธีการออกแบบนั้นจะดำเนินการโดยรวบรวมข้อมูลการศึกษา จากหัวข้อ 2.1 และ 2.2 รวมถึงการประยุกต์ใช้ความรู้ และหลักการทางวิศวกรรมเพื่อให้เรือเก็บขยะในคูคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกล ทำงานได้ตามวัตถุประสงค์

3) การสร้างเรือเก็บขยะในคูคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกล ดำเนินการสร้าง ณ อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยโครงสร้างเรือเก็บขยะในคูคลอง

แบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกล ทำมาจากวัสดุโลหะอะลูมิเนียม ขนาด 900 mmx700 mmx300 mm ทำการยึดประกอบกันเป็นโครงและระบบชุดหัวเกี่ยวขยะจะทำหน้าที่เกี่ยวขึ้นขยะบนผิวน้ำและทำการส่งขยะไปยังตะกร้ารองรับขยะด้านในตัวเรือ ส่วนชุดใบพัดเรือนั้นจะทำหน้าที่ควบคุมทิศทางเรือ ซ้าย-ขวา (Figure 3,4) (สำนักข่าวออนไลน์ไทยพับลิก้า, 2556)

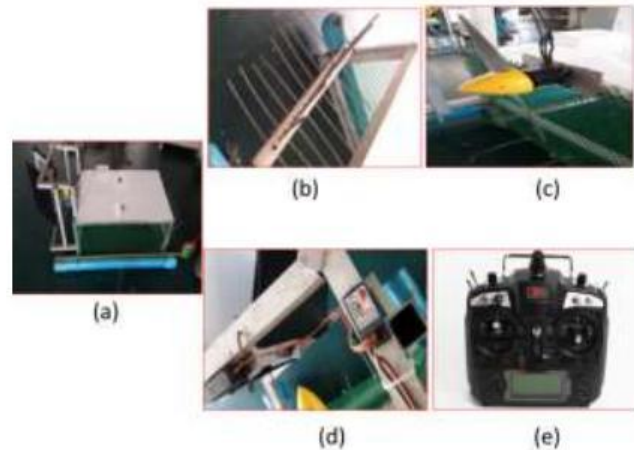


Figure 3 Specifications of the design and fabrication of unmanned remote control garbage collecting boat: (a) garbage collecting boat, (b) head set pertaining garbage, (c) boat propeller, (d) System Transceiver, (e) remote controller.

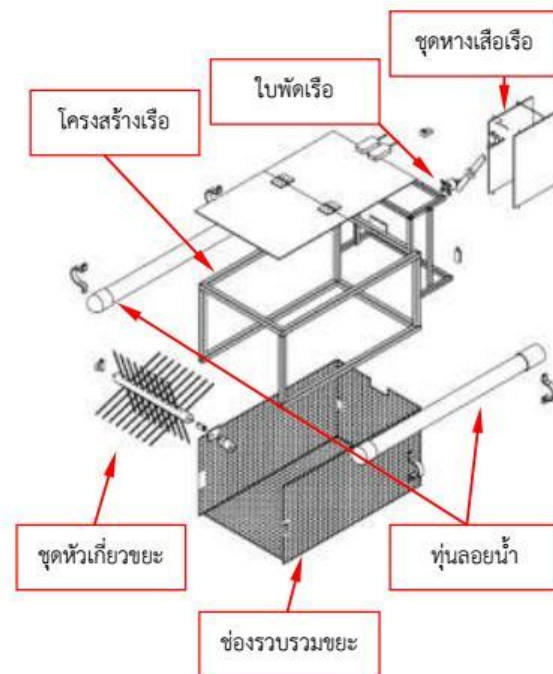


Figure 4 System details of the unmanned remote control garbage collecting boat.

2.4 หลักการทำงานของเรือเก็บขยะในคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกล

Figure 5, 6 แสดงหลักการทำงานของเรือเก็บขยะในคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกลนั้น จะเริ่มต้นจากมอเตอร์ และตัวเฟืองทด จะเป็นต้นกำลังให้ชุดเก็บขยะทำการหมุน ควบคุมทิศทาง และทำการเกี่ยวขยะที่ลอยอยู่บนผิวน้ำให้เข้ามายังตระแกรงสำหรับเก็บขยะ โดยตะแกรงเก็บขยะจะทำเป็นช่องไว้ได้เรือ ทำให้สามารถลอยน้ำได้ไม่เกิดภาระขึ้นกับตัวเรือ ส่วนชุดวงจรสำหรับการบังคับทิศทางของเรือ จะใช้โมโบบังคับวิทยุในการควบคุมเรือ โดยใบพัดในการควบคุมการเคลื่อนที่ ต้นกำลังมาจากแบตเตอรี่ 12 V และมอเตอร์ทดรอบจำนวน 2 ตัว (ณัฐวรท และคณะ, 2556; เกรียงไกร และ เกียรติศักดิ์, 2557)



Figure 5 Work operating of the unmanned remote control garbage collecting boat.



Figure 6. Created the unmanned remote control garbage collecting boat procedure.

2.5 การทดสอบและประเมินผล

เรือเก็บขยะในคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกลได้ถูกทดสอบสมรรถนะการทำงาน และคุณภาพในการเก็บขยะในคลอง โดยจะประเมินสมรรถนะการทำงานจากเปอร์เซ็นต์การเก็บขยะในคลอง (% , Equation 1) และความสามารถในการทำงานจริงของเครื่องต้นแบบ (kg/hr⁻¹, Equation 2) (Samseemoung et al., 2011)

$$\frac{\text{จำนวนขยะที่เครื่องต้นแบบเก็บได้}}{\text{จำนวนขยะที่ใช้ทดสอบทั้งหมด}} \times 100 \quad (1)$$

$$\frac{\text{น้ำหนักของขยะที่เครื่องต้นแบบเก็บได้ทั้งหมด}}{\text{เวลาที่ใช้ทดสอบทั้งหมด}} \quad (2)$$

ส่วนการทดสอบแรงลอยตัว จะคำนวณจากสูตร

$$F = \rho g v \quad (3)$$

โดยที่ ค่า F หมายถึง แรงลอยตัว (มีหน่วยเป็น นิวตัน) ค่า ρ หมายถึง ความหนาแน่นของของเหลว (มีหน่วยเป็น kg/m³) ต่อมา ค่า g หมายถึง ค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วงโลก มีค่าเท่ากับ 9.8 หรือ 10 (มีหน่วยเป็น m/s²) และสุดท้ายค่า V หมายถึง ปริมาตรของวัตถุที่จม (มีหน่วยเป็น m³)

2.6 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

2.6.1 การวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่ายโดยเฉลี่ย

วิธีการประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวมจะเกี่ยวกับต้นทุนในการใช้งานเครื่องต้นแบบฯ สมมติว่าเกษตรกรผู้ใช้ทำการซื้อเครื่องต้นแบบฯ แทนการใช้แรงงานคน ซึ่งค่าใช้จ่ายโดยรวมจะประกอบด้วย ค่าเสื่อมราคาของเครื่อง (คิดค่าเสื่อมราคาโดยวิธีเส้นตรงเมื่อประมาณอายุการใช้งานของเครื่องต้นแบบฯ ได้ 5 ปี) และค่าเสียโอกาสของเงินทุน (คิดดอกเบี้ยที่ 10%) ซึ่งเป็นต้นทุนคงที่ทั้งหมด จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการเก็บขยะในคลอง และต้นทุนแปรผัน (Hunt, 1995)

2.6.2 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน

เป็นการคาดคะเนว่า เมื่อทำการลงทุนใช้เครื่องต้นแบบฯ ไปแล้ว จะได้รับผลตอบแทนกลับคืนมาในจำนวนเงินเท่ากับที่ลงทุนไปก่อนหน้านี้นี้ภายในระยะเวลาที่ปี โดยคิดดอกเบี้ยที่ 10% แต่ไม่ทราบค่า n ทำการเปลี่ยนค่า n ไปเรื่อยๆ จนค่าทั้งสองข้างของสมการเท่ากัน ก็จะได้ค่า n โดยที่ n นั้น คือระยะเวลาคืนทุน (ปี)

2.6.3 การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน

เป็นการคาดคะเนว่าการหาจำนวนหน่วยขายของเครื่องต้นแบบฯ ที่ทำให้ยอดขายรวมเท่ากับค่าใช้จ่ายรวม/ต้นทุนทั้งหมด จึงเป็นจุดที่ไม่มีกำไรหรือขาดทุนเกิดขึ้นในการใช้เครื่องต้นแบบฯ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ราคาขาย} - \text{ต้นทุนคงที่} - \text{ต้นทุนแปรผัน} = \text{กำไร} \quad (4)$$

3 ผลและวิจารณ์

3.1 เปอร์เซ็นต์การเก็บขยะในคูคลอง

จากการทดสอบเครื่องต้นแบบฯ ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ต่างๆ 3000 rpm, 5000 rpm และ 7000 rpm พบว่าที่ความเร็วรอบ 7000rpm มีเปอร์เซ็นต์การเก็บขยะในคูคลอง 39%, 58.33% และ 76.33% ตามลำดับ ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเก็บขยะในคูคลองจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์ และมีค่าสูงที่สุดเมื่อความเร็วรอบมอเตอร์อยู่ที่ 7000 rpm

3.2 ความสามารถในการทำงานจริงของเครื่องต้นแบบฯ

ความสามารถในการเก็บขยะของเครื่องต้นแบบฯ จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบมอเตอร์ โดยที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 3000 rpm, 5000 rpm และ 7000 rpm เรือเก็บขยะเครื่องต้นแบบฯ สามารถทำงานได้ 13.92 kghr^{-1} , 20.76 kghr^{-1} และ 27.54 kghr^{-1} ตามลำดับ (Figure 7)

แต่ในการทำงานควรจะใช้ความเร็วรอบที่ทำให้เรือมีเปอร์เซ็นต์ในการเก็บขยะสูงที่สุด และมีปริมาณขยะที่หลงเหลืออยู่น้อยที่สุด ซึ่งเท่ากับ 7000 rpm และจากการสังเกตขณะทำการทดสอบพบว่า ที่ความเร็วรอบนี้เป็นความเร็วที่ผู้ควบคุมเรือเก็บขยะสามารถควบคุมทิศทางเรือหันเข้าสู่เป้าหมายได้อย่างง่ายดายและมีความแม่นยำมากที่สุด ทำให้ใช้เวลาไม่น้อยไม่เปลืองแบตเตอรี่ กว่าความเร็วรอบมอเตอร์ที่ต่ำกว่านี้

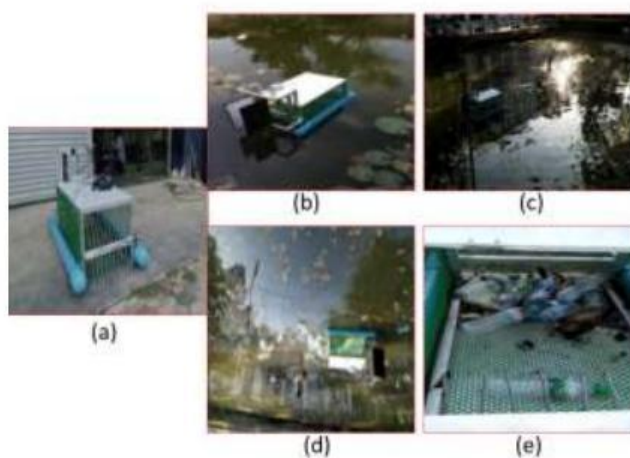


Figure 7 Experimental set up and field preparation, (a) the unmanned remote control garbage collecting boat; (b) the unmanned remote control garbage collecting boat in the canal; (c) field preparation set up; (d) garbage collecting boat in the canal repairing; (e) garbage in the boat.

3.3 ผลการวิเคราะห์และประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์ของเครื่องต้นแบบฯ

จากผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยคิดที่ราคาเครื่องต้นแบบฯ 7,000 bath อายุการใช้งาน 5 year อัตราดอกเบี้ยคิดที่ 10% ใช้ผู้ควบคุมเครื่อง 1 คน ความสามารถในการ

การทำงานของเรือเก็บขยะ 27.54 kghr^{-1} และทำงาน $1,440 \text{ hr year}^{-1}$ จะได้ค่าใช้จ่ายจากการใช้เรือเก็บขยะในคูคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกลต่อวันจะอยู่ที่ 0.023 bath/day โดยคิดจากมูลค่าเครื่อง ราคา 7,000bath พื้นที่การทำงานภายในต่อวันเท่ากับ $12,000 \text{ m}^2/\text{day}$ ในขณะที่ถ้าใช้แรงงานคนในการเก็บขยะต่อวันจะอยู่ที่ 0.22 bath/day โดยคิดจากค่าแรงงานคนจำนวน 2 คน ราคา 560 bath/day ทำงานวันละ 8 hr พื้นที่การทำงานภายในต่อวันเท่ากับ $2,500 \text{ m}^2/\text{day}$

ดังนั้นถ้าใช้เรือเก็บขยะในคูคลองแบบบังคับวิทยุแทนแรงงานคนจะสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 220 bath/day และสามารถคืนทุนภายในระยะเวลาเพียง 31.8 day หรือประมาณ 1 เดือน

3.4 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของขยะที่ใช้เป็นกลุ่มตัวอย่างในการทดสอบ

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพโดยทำการเก็บขยะเป็นจำนวนทั้งหมด 50 pieces มาทำการวัดขนาดความกว้าง ความยาว น้ำหนัก แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าไปบันทึกเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบชุดเก็บขยะ และช่องทางเข้าออกของตะแกรงเก็บขยะ โดยใช้ค่า maximum size เป็นค่าในการออกแบบ ค่าที่ได้จากการวัดขนาดขยะตัวอย่าง ดังแสดงในตารางด้านล่างนี้

Table 1 The average width, length and weight of garbage samples in canal.

Garbage sizing	Width (mm)	Length (mm)	Weight (kg)
Maximum size	100	320	0.04
Medium size	110	140	0.01
Minimum size	40	90	0.001
Average	83.33	183.33	0.017

การคำนวณหาแรงลอยตัวของเรือเก็บขยะบังคับวิทยุควบคุมระยะไกล โดยเราจะใช้ท่อพีวีซีเพื่อเป็นหุ่นลอยน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 inch จำนวน 2 ท่อน มีขนาดความยาวท่อนละ 1100 mm

$$\begin{aligned} \text{จาก ปริมาตรทรงกระบอก} &= \frac{\pi d^2 d}{4} \\ &= \pi (0.0722)^2 \times 1.1 \\ &= 4.478 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

จาก $F = \rho g v$

$$\begin{aligned} F &= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 4.478 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \\ F &= 43.93 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\text{ท่อฟิวซี 1 ท่อน รับน้ำหนักได้ } \frac{43.93}{9.81} = 4.47 \text{ kg}$$

ดังนั้น ท่อฟิวซี 2 ท่อน จะสามารถรับน้ำหนักได้ $4.47 \times 2 = 8.90 \text{ kg}$

3.5 ทดสอบและประเมินสมรรถนะการทำงานของเรือเก็บขยะ บังคับวิทยุควบคุมระยะไกล

การทดสอบจะทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์ในการทดสอบ 3 ระดับ คือ 3000 rpm, 5000 rpm และ 7000 rpm ผลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ หน่วยเป็นรอบต่อนาที (Figure 8) น้ำหนักขยะที่เก็บได้ หน่วยเป็นกิโลกรัม และจำนวนขยะที่เก็บได้ โดยเรือ จำนวน 50 pieces ใช้เวลาในการทดสอบครั้งละ 1min ขนาดพื้นที่ 25 m² ข้อมูลที่ได้จะเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพจากการใช้แรงงานคนเก็บขยะ ดังแสดงในตารางที่ 2



Figure 8 Position of motor speed test (rpm) and performance of the garbage collecting boat (%).

Table 2 Motor speed test (rpm), weight of garbage (kg) and the garbage collected (50 pieces) of the ship garbage collection in the canal. Take the time to test each 1 minute (min) and the size of test area 25 m².

No.	Motor speeds (rpm)	Performance of the garbage collecting boat (pieces)	Performance from labor force (pieces)	Weight of garbage (kg)
1	3000	13.67 ^a	50	0.232
2	5000	20.33 ^b	50	0.346
3	7000	27.00 ^c	50	0.459

Means in a column followed by the same character are not significantly different at 0.05 significant levels according to Duncan's Multiple Range Test.

ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ และประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบในการเก็บจำนวนชิ้นของขยะ กลุ่มตัวอย่างที่เก็บได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ในการ

ทดสอบที่ดีที่สุดคือ 7000 rpm ซึ่งที่ความเร็วรอบ 7000 rpm มีจำนวนชิ้นขยะที่เก็บได้ใกล้เคียงกับจำนวนชิ้นขยะที่เก็บโดยใช้แรงงานคนมากที่สุดคือ 27pieces หรือคิดเป็น 0.459kgmin⁻¹

3.5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์การเก็บขยะในคูคลอง (%) และความเร็วรอบมอเตอร์ในการทดสอบ (rpm)

จากการทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์ในการทดสอบ 3 ระดับ คือ 3000 rpm, 5000 rpm และ 7000 rpm พบว่ามีจำนวนเปอร์เซ็นต์การเก็บขยะในคูคลอง ดังนี้ 39%, 58.33% และ 76.33% ตามลำดับ

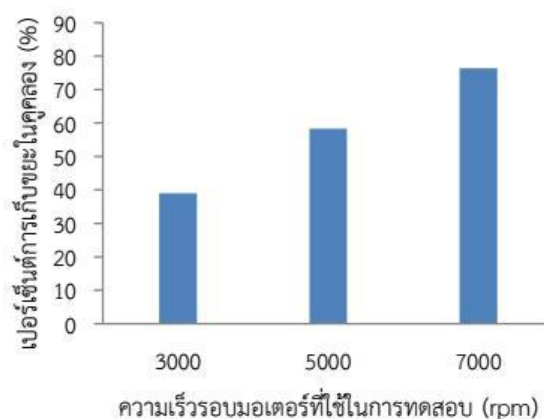


Figure 9 The relationship between the percentage of the ship garbage collection in the canal (%) and motor speed (rpm).

3.5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความสามารถในการทำงานจริงของเครื่องต้นแบบ (kghr⁻¹) และความเร็วรอบมอเตอร์ในการทดสอบ (rpm)

จากการทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์ในการทดสอบ 3 ระดับ คือ 3000 rpm, 5000 rpm และ 7000 rpm พบว่าเครื่องต้นแบบมีความสามารถในการทำงานจริง ดังนี้ คือ 13.92 kghr⁻¹, 20.76 kghr⁻¹ และ 27.54 kghr⁻¹ ตามลำดับ

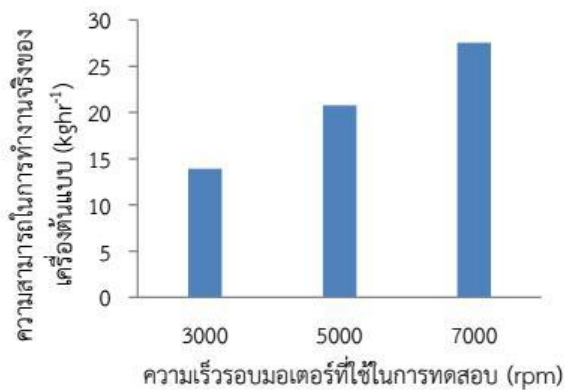


Figure 10 The relationship between the working ability of the prototype (kg hr^{-1}) and motor speed (rpm).

3.5.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ในการทดสอบ (rpm) กับระยะความสูงของชุดหัวเกี่ยวขยะ (m)

การทดสอบจะทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์ในการทดสอบ 3 ระดับ คือ 3000 rpm, 5000 rpm และ 7000 rpm โดยใช้ระดับความสูงของชุดหัวเกี่ยวขยะ ที่ 0.2 m, 0.4 m และ 0.6 m ในการทดสอบเพื่อทำการหาความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด และค่าระยะความสูงของชุดหัวเกี่ยวขยะที่ดีที่สุดแสดงในตารางด้านล่างนี้

Table 3 Motor speed test (rpm) and the elevation of the garbage head set (m) of the ship garbage collection in the canal. Take the time to test each 1 minute (min) and size of the test area 25 m^2 .

No.	Motor speed test (rpm)	Elevation of the garbage head set (m)	Number of garbage collecting (pieces)	Weight of garbage (kg)
1	3000	0.2	12.00 ^b	0.204
		0.4	11.00 ^{ab}	0.170
		0.6	8.67 ^a	0.119
2	5000	0.2	22.67 ^d	0.340
		0.4	16.33 ^c	0.272
		0.6	10.67 ^{ab}	0.187
3	7000	0.2	27.00 ^e	0.459
		0.4	23.33 ^d	0.374
		0.6	15.00 ^c	0.255

Means in a column followed by the same character are not significantly different at 0.05 significant levels according to Duncan's Multiple Range Test.

ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ และระยะความสูงของชุดหัวเกี่ยวขยะมีผลต่อจำนวนชิ้นของขยะกลุ่มตัวอย่างที่เก็บได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ดีที่สุดคือ 7000 rpm และระยะความสูงของชุดหัวเกี่ยวขยะที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.2 m

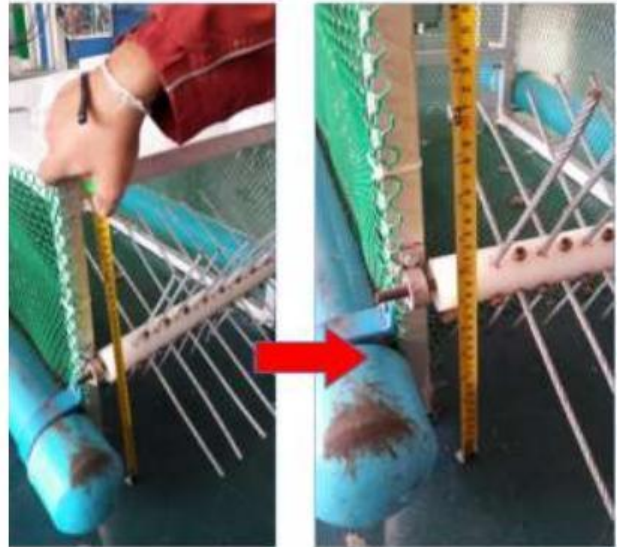


Figure 11 Experimental set up for the suitable elevation of the garbage head set (0.2 m) of the ship garbage collection in the canal.

4 สรุป

จากการทดสอบสมรรถนะเรือเก็บขยะเครื่องต้นแบบฯ โดยใช้ค่าชี้วัดการศึกษา ได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์การเก็บขยะ และค่าความสามารถในการทำงานของเรือเก็บขยะเครื่องต้นแบบฯ พบว่า มีประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ยอยู่ที่ 76.33% มีความสามารถการทำงานอยู่ที่ 27 pieces/min มีค่าใช้จ่ายในการทำงานอยู่ที่ 0.22 bath/m^2 และจะมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 31 day จากข้อมูลชี้ให้เห็นได้ชัดว่าเรือเก็บขยะในคลองแบบบังคับวิทยุนี้มีทั้งประสิทธิภาพและความสามารถในการทำงานที่สูงกว่าแรงงานคน โดยเรือเก็บขยะในคลองแบบบังคับวิทยุนี้ สามารถช่วยลดได้ทั้ง แรงงานคน เวลาในการทำงาน ต้นทุน และยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้สูงขึ้นอีกด้วย

จากความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์การเก็บขยะในคลอง (%) และความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ (rpm) พบว่าที่ความเร็วรอบมอเตอร์ในการทดสอบ 3 ระดับ คือ 3000 rpm, 5000 rpm และ 7000 rpm จะมีจำนวนเปอร์เซ็นต์การเก็บขยะในคลอง ดังนี้ 39%, 58.33% และ 76.33% ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ระหว่าง ความสามารถในการทำงานจริงของเครื่องต้นแบบ (kg hr^{-1}) และความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ (rpm) พบว่าที่ความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ 3 ระดับ คือ 3000 rpm, 5000 rpm และ 7000 rpm

เครื่องต้นแบบนั้นจะมีความสามารถในการทำงานจริง ดังนี้ 13.92 kghr⁻¹, 20.76 kghr⁻¹ และ 27.54 kghr⁻¹ ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ (rpm) กับระยะความสูงของชุดหัวเกี่ยวขย (m) พบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ดีที่สุดคือที่ 7000 rpm และระยะความสูงของชุดหัวเกี่ยวขยที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.2 m

โดยที่ผลสัมฤทธิ์ของงานวิจัยนี้ พบว่าเกษตรกรผู้ใช้สามารถลดปัญหาในด้านการบรรทุกขยของเรือลง สามารถลดปัญหาในด้านการควบคุมเรือให้ถึงจุดที่มีขยอยู่ลง สามารถลดปัญหาการเมื่อลำของผู้ปฏิบัติงานลง สามารถลดอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นในการเกี่ยวขยลง และสุดท้ายสามารถที่จะลดปัญหาในด้านระยะเวลาทำงานลง

5 ข้อเสนอแนะหรือแนวคิงานวิจัย

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับงานทางด้านวิศวกรรมเกษตรโดยตรง โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเครื่องต้นแบบฯ ไม่ว่าจะเป็นความเร็วรอบมอเตอร์ที่เหมาะสม ค่าเปอร์เซ็นต์การเกี่ยวขยในคูคลอง ค่าความสามารถในการทำงาน และค่าระดับความสูงของชุดหัวเกี่ยวขยที่เหมาะสม ซึ่งจะเห็นว่าเป็นข้อมูลจำเป็นพื้นฐานที่สำคัญเพื่อใช้ในการต่อยอด และพัฒนาการออกแบบให้เรือเกี่ยวขยในคูคลองให้สามารถใช้งานได้กับการเกี่ยวขยประเภทอื่นๆ เช่น วัชพืชผักตบชวาที่มีอยู่ในแหล่งน้ำเป็นจำนวนมาก และยังสามารพัฒนาให้เรือเกี่ยวขยในคูคลองแบบบังคับวิทยุควบคุมระยะไกลสามารถเกี่ยวขยได้ในปริมาณที่สูงมากกวานี้

6 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี ที่สนับสนุนเงินงบประมาณอุปกรณ์ บุคลากร และสถานที่ ในการเตรียมการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้วิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

7 เอกสารอ้างอิง

ที นี ว ส์ สั ง ค ม . 2559. แ ห ล่ ง ขั อ มู ล : <http://social.tnews.co.th/content/138997/>. เข้าถึงเมื่อ 5 กรกฎาคม 2559.

สำนักข่าวออนไลน์ไทยพับลิก้า. 2556. สถานการณ์ขยของไทย Thai Publica. แ ห ล่ ง ขั อ มู ล : <http://thaipublica.org/2013/05/weast-1/>. เข้าถึงเมื่อ 5 กรกฎาคม 2559.

ประปาไทยดอตคอม. 2559. มอเตอร์ไฟฟ้าและการควบคุม. แหล่งข้อมูล: <http://202.129.59.73/tn/motor10-52/>. เข้าถึงเมื่อ 5 กรกฎาคม 2559.

เว็บบอร์ดวิชาการดอตคอม. วิทยุบังคับ PROPORTIONNAL 2 CHANNEL. 2559. แ ห ล่ ง ขั อ มู ล : <http://www.vcharkarn.com/vcafe/186885>. เข้าถึงเมื่อ 5 กรกฎาคม 2559.

ณัฐวรท มิรัตนไพร, สุทัศน์อ่อนอก, รัชพล โพธิ์อำพล, เดชฤทธิ์ กลิ่นสุนทร. 2556. เรือเกี่ยวขยในคูคลอง. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยราชชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร.

เกรียงไกร แซมสีม่วง, เกียรติศักดิ์ แสงประดิษฐ์. 2557. การพัฒนาระบบถ่ายภาพทางอากาศระยะไกลแบบติดตั้งบนเฮลิคอปเตอร์บังคับวิทยุสำหรับการเฝ้าระวังการระบาดของโรคพืชในพื้นที่ปลูกพืชมันสำปะหลัง. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 20(1), 1-9.

Samseemoung, G., Jayasuriya, H.P.W., Soni, P. 2011. Oil palm pest infestation monitoring and evaluation by helicopter-mounted low altitude remote sensing platform. Journal of Applied Remote Sensing 5(1), 3540.

Hunt, D. 1995. Farm Power and Machinery. (9th ed.). Iowa, State University Press. Ames: Iowa.

สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
อาคาร 5 ชั้น 5 กรมส่งเสริมการเกษตร ถนนพหลโยธิน
แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทร. 0 2940 6185 โทรสาร 0 2940 6185
www.tsae.asia

ISSN 1685-408X