ISSN 1685-408X

วารสาร สวกท.
TSAE JOURNAL

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
Thai Society of Agricultural Engineering Journal

ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2560
Volume 23 No. 2 July-December 2017

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
Thai Society of Agricultural Engineering Journal

ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2560 (Volume 23 No. 2 July - December 2017) 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

คณะกรรมการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ประจำปี พ.ศ. 2558 – 2559

ที่ปรึกษา

ฯพณฯ นายอำพล เสนาณรงค์
ฯพณฯ พลเอกสุรยุทธ์ จุลานนท์
ศ. ดร. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์
ศ. ดร. อรรถพล นุ่มหอม
ศ. ดร. สุรินทร์ พงศ์ศุภสมิทธิ์
รศ. ดร. ธวัชชัย ทิวาวรรณวงศ์
รศ. ดร. วินิต ชินสุวรรณ

Prof. Dr. Vilas M Salokhe
Prof. Dr. Gajendra Singh
Prof. Dr. Chin Chen Hsieh
ดร. สุภาพ เอื้อวงศ์กูล
นายทรงศักดิ์ วงศ์ภูมิวัฒน์
นายสุรเวทย์ กฤษณะเศรณี

นางพรรณพิมล ชัญญานุวัตร
นายวิกรม วัชรคุปต์
นายสมชัย ไกรครุฑรี
นายปราโมทย์ คล้ายเนตร
นายสุวิทย์ เทิดเทพพิทักษ์
นายชนะธัช หยกอุบล

กรรมการบริหาร

นายกสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย	นางดาเรศร์ กิตติโยภาส
อุปนายก	ผศ. ดร. วีรชัย อาจหาญ
ประธานฝ่ายวิชาการ	ศ. ดร. สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา
ผู้ช่วยประธานฝ่ายวิชาการ	รศ. ดร. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์
ผู้ช่วยประธานฝ่ายวิชาการ	ผศ. ดร. สุเนตร สืบค้า
ผู้ช่วยประธานฝ่ายวิชาการ	ผศ. ดร. ชัยยันต์ จันทร์ศิริ
เลขาธิการ	นายณรงค์ ปัญญา
เหรัญญิก	นายบุญส่ง หนองนา
ผู้ช่วยเหรัญญิก	นางสาวชัญญานุช ปานเอี่ยม
นายทะเบียน	นายชีรวรรธก์ มั่นกิจ
สาราณียากร	ผศ. ดร. วัชรพล ชยประเสริฐ
ผู้ช่วยสาราณียกร	รศ. ดร. สมชาย ชวนอุดม
ปฎิคม	นายนเรสน์ รังสิมันตศิริ
ประชาสัมพันธ์	นางสาวนฤมล ลดาวัลย์ ณ อยุธยา
ผู้ประสานงานกลาง	นายอนุรักษ์ เรือนหล้า

กรรมการกลางและวิชาการ

รศ. ดร. สมยศ เชิญอักษร
รศ. ดร. ธัญญา นิยมาภา
รศ. ดร. ธัญญะ เกียรติวัฒน์
รศ. ดร. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์
รศ. สาทิป รัตนภาสกร
ผศ. ดร. สมโภชน์ สุดาจันทร์
ผศ. ดร. เสรี วงส์พิเชษฐ์
ดร. ชัยพล แก้วประกายแสงกูล
รศ. ดร. สัมพันธ์ ไชยเทพ
รศ. ดร. วิชัย ศรีบุญลือ
ผศ. เธียรชัย สันดุษฎี
นายไพศาล พันพึ่ง
ผศ. ฉัตรชาย ศุภจารีรักษ์
รศ. กิตติพงษ์ วุฒิจำนง

ดร. สมเกียรติ เฮงนิรันดร์
รศ. ผดุงศักดิ์ วานิชชัง
รศ. จิราภรณ์ เบญจประกายรัตน์
รศ. ดร. รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์
ผศ. ดร. ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์
ดร. วันรัฐ อับดุลลากาซิม
รศ. ดร. รังสินี โสธรวิทย์
รศ. ดร. ประเทือง อุษาบริสุทธิ์
รศ. มานพ ตันตระบัณฑิตย์
ผศ. ดร. สุเนตร สืบค้า
ผศ. ภรต กุญชร ณ อยุธยา
ดร. วสันต์ จอมภักดี
ดร. ชูศักดิ์ ชวประดิษฐ์
รศ. ดร. อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล

นางดาเรศร์ กิตติโยภาส
รศ. ใจทิพย์ วานิชชัง
นายชนะธัช หยกอุบล
นายจารุวัฒน์ มงคลธนทรรศ
ดร. ไมตรี แนวพนิช
นายอัคคพล เสนาณรงค์
นายวิบูลย์ เทเพนทร์
นายสุภาษิต เสงี่ยมพงศ์
ดร. อนุชิต ฉ่ำสิงห์
นายวีระชัย เชาว์ชาญกิจ
นายนรเชษฐ์ ฉัตรมนตรี
นายไมตรี ปรีชา
รศ. ดร. สมชาย ชวนอุดม
นายสมศักดิ์ อังกูรวัฒนานุกูล

นางสาวพนิดา บุษปฤกษ์
นายมลฑล แสงประไพทิพย์
นางสาวระพี พรหมภู่
นายพัฒนศักดิ์ ฮุ่นตระกูล
นายมรกต กลับดี
นายนเรศวร์ ชิ้นอินทร์มนู
นายสุรสิทธิ์ บุญรักชาติ
นายบุญส่ง หนองนา
นางสาวศิระษา เจ็งสุขสวัสดิ์
นางสาววิไลวรรณ สอนพูล
นางสาวนฤมล ลดาวัลย์ ณ อยุธยา
หัวหน้าภาควิชาและสาขาวิศวกรรมเกษตรของสถาบันการศึกษาทุกแห่งของประเทศ

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

1. หลักเกณฑ์ทั่วไป

1.1 คำนำ

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

1.2 ขอบข่ายวารสาร

1) ต้นกำลังและเครื่องจักรกลเกษตร
- เครื่องยนต์และกำลัง
- การออกแบบและทดสอบเครื่องจักรกลเกษตร
- กระบวนการผลิตเครื่องจักรกลเกษตร
- เทคนิคปฏิบัติและการใช้เครื่องจักรกลเกษตร

2) วิศวกรรมดินและน้ำ
- การอัดแน่น การชะล้าง และการปรับปรุงดิน
- พื้นที่แห้งแล้ง และการเก็บกักน้ำ
- อุทกวิทยาและการจัดการน้ำ
- ชลศาสตร์และระบบชลประทาน
- การให้น้ำพืชระดับไร่นา

3) กระบวนการหลังเก็บเกี่ยวและวิศวกรรมอาหาร
- กระบวนการหลังเก็บเกี่ยวและการเก็บรักษา
- การบรรจุ
- เทคนิคแบบไม่ทำลาย
- กระบวนการและเครื่องจักรกลอาหาร
- วิศวกรรมชีวภาพ

4) โครงสร้างอาคารเกษตร
- การออกแบบอาคารเกษตร
- ไซโล โรงเรือน และโรงงานผลิตพืช
- การวางผังฟาร์มการออกแบบโรงงานอุตสาหกรรมเกษตร

5) ระบบเกษตร
- โลจิสติกส์และโซ่อุปทานผลิตผลและสินค้าเกษตร
- ระบบตรวจสอบย้อนกลับและความปลอดภัยอาหาร
- การจัดการระบบเกษตร และการจำลองสถานการณ์
- อุตสาหกรรมเกษตร

6) คอมพิวเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- การเกษตรแม่นยำ การตรวจวัดระยะไกล ระบบภูมิสารสนเทศ ระบบผู้เชี่ยวชาญ
- เซ็นเซอร์ หุ่นยนต์ และระบบอัตโนมัติ
- ชีวสารสนเทศ
- การประยุกต์คอมพิวเตอร์ การพัฒนาซอฟแวร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ

7) พลังงานและสิ่งแวดล้อม
- พลังงานทดแทน ชีวมวลและพลังงานชีวมวล
- การจัดการพลังงาน
- การจัดการของเสียการเกษตรรีไซเคิลและเทคโนโลยีไร้ของเสีย
- วิศวกรรมระบบนิเวศน์เกษตร

1.3 ประเภทบทความ

บทความที่เผยแพร่ในวารสารมี 3 ประเภทคือ

- บทความวิจัย (research paper) คือ รายงานผลการศึกษาทดลองที่ทำให้ได้มาซึ่งองค์ความรู้ใหม่ หรือนวัตกรรมใหม่ ที่ได้ดำเนินการจนสำเร็จและมีการเรียบเรียงอย่างครบถ้วนสมบูรณ์ตามระเบียบวิธีวิจัย
- บทวิจัยย่อ (research note) คือ รายงานผลการศึกษาทดลองเฉพาะในบางประเด็นที่ผู้วิจัยค้นพบ แต่ยังไม่เสร็จสมบูรณ์
- บทความปริทัศน์ (review paper) คือ รายงานที่ได้จากการรวบรวม ทบทวน และสังเคราะห์งานวิจัยที่ผ่านมาในเรื่องใดเรื่องหนึ่งโดยสอดแทรกทัศนคติ ประสบการณ์ หรือความคิดเห็นของผู้เขียนที่มีต่อเรื่องนั้นๆ

1.4 ความยาวบทความ

- บทความวิจัย ความยาวไม่ควรเกิน 10 หน้าเรียงพิมพ์
- บทวิจัยย่อ 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

ผู้เขียนจะต้องระบุประเภทของบทความที่มุมบนขวาในหน้าแรกของบทความว่าเป็นบทความวิจัย บทวิจัยย่อ หรือบทความปริทัศน์ (ดูแบบฟอร์มต้นฉบับ)

2.4 หัวเรื่อง

ส่วนหัวเรื่องจะมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ประกอบด้วย

- ชื่อบทความ ใช้อักษรขนาด 16 pt ตัวหนา จัดกระจายแบบไทย (Thai distributed) ชื่อบทความควรสั้นกระชับ ได้ใจความและมีความจำเพาะเจาะจงกับเนื้อหาของงาน
- 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 และอีเมล์ 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 หัวเรื่องย่อยให้ใช้หมายเลขกำกับ 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 ควรใช้การอ้างอิงโดยไม่ต้องอธิบายรายละเอียดซ้ำ การกล่าวถึงชื่อทางการค้าของอุปกรณ์เพื่อความสมบูรณ์ของข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์สามารถทำได้ แต่ทั้งนี้ต้องไม่มีนัยที่แสดงถึงการรับรองหรือสนับสนุนผู้ผลิตรายใดรายหนึ่ง
- ผลและวิจารณ์ (results and discussion) ผลที่นำเสนอควรเป็นข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์สังเคราะห์ ไม่ใช่ข้อมูลดิบ โดยนำเสนอเป็นลำดับสอดคล้องกับที่อธิบายไว้ในส่วนอุปกรณ์และวิธีการ ควรมีการแปลและวิจารณ์ผลอย่างมีหลักการและมีข้อมูลสนับสนุนชัดเจน อาจมีการเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยในทำนองเดียวกันที่เผยแพร่มาก่อน รวมทั้งอาจให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยที่เกี่ยวข้องกันในอนาคต
- สรุป (conclusions) เป็นการลงความเห็นหรือสรุปการค้นพบที่สำคัญที่ได้จากงานวิจัย ควรสั้นกระชับ และไม่อธิบายซ้ำซ้อนกับเนื้อความในส่วนก่อนหน้า
- กิตติกรรมประกาศ (acknowledgement) เป็นส่วนที่ผู้เขียนแสดงคำขอบคุณแก่บุคคล หรือหน่วยงานที่มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้ ไม่จำเป็นต้องแสดงคำขอบคุณแก่ผู้ร่วมเขียนบทความซึ่งมีชื่อปรากฏในส่วนหัวเรื่องแล้ว ส่วนกิตติกรรมประกาศอาจมีหรือไม่มีก็ได้
- 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

<u>บทความวารสารวิชาการ</u>

จักรมาส เลาหวณิช, พรมมี แพงสีชา, สุเมธี คำวันสา. 2552. การหาค่าความขาวข้าวสารโดยวิธีการวัดค่าสี. 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.

<u>หนังสือที่มีผู้แต่งแต่ละบท (Edited book)</u>

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.

<u>ตำรา</u>

ประดิษฐ์ หมู่เมืองสอง, สุชญาน หรรษสุข. 2550. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

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

<u>รายงานการประชุมวิชาการ</u>

วัฒนชัย ภัทรเธียรสกุล, วารุณี เตีย, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 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.

<u>วิทยานิพนธ์</u>

สยาม ตุ้มแสงทอง. 2546. การปรับปรุงเครื่องคัดขนาดผลมังคุดแบบจานหมุน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต. 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.

<u>แหล่งข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์</u>

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” ไม่ใช้ “มวล 15 กิโลกรัม” หรือ “มวล 15 กก.” เป็นต้น ให้เขียนหน่วยที่มีลักษณะเป็นเศษส่วนในรูปตัวเลขยกกำลัง เช่น “m s-1” ไม่ใช้ “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 ไม่ใช้เส้นแนวตั้ง

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 ...” ควรแทรกภาพหรือตารางเมื่อจบย่อหน้าที่มีการอ้างถึงภาพหรือตารางนั้นๆ ทันที

2.12 หมายเลขบรรทัด (line number)

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

3. การส่งต้นฉบับ

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

สารบัญ

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 (2560) 1-8
Available online at www.tci-thaijo.org /index.php/TSAEJ

บทความวิจัย

ISSN 1685-408X

กลไกการเปลี่ยนแปลงความชื้นในข้าวพันธุ์ กข31 ระหว่างการแช่น้ำในกระบวนการผลิตข้าวนึ่ง

Water Absorption of RD31 Paddy during Soaking in Parboiling Process

ณัฐวุฒิ เนียมสอน[1], เชาว์ อินทร์ประสิทธิ์[2], อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล[1]*

Natawut Neamsorn[1], Chouw Inprasit[1], Anupun Terdwongworakul[1]*

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

[1]Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

[2]ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

[2]Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

*Corresponding author: Tel: +66-34-351-896, Fax: +66-34-351-896, E-mail: fengant@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ถูกแช่น้ำที่ระดับอุณหภูมิต่างกันเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในเมล็ดและสร้างสมการทำนายความชื้นระหว่างการแช่ ผลการศึกษาพบว่าความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการแช่ จาก 12.39-13.42% มาตรฐานแห้ง เป็น 24.95-35.63% มาตรฐานแห้ง และอัตราการเพิ่มขึ้นของความชื้นในเมล็ดข้าวจะลดลงเมื่อระยะเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิการแช่ต่ำกว่า gelatinization temperature ข้าวใหม่จะสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าข้าวเก่า ที่อุณหภูมิการแช่สูงกว่า gelatinization temperature ข้าวเก่าจะสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าข้าวใหม่ สมการสำหรับทำนายค่าความชื้นสร้างขึ้นจากตัวแบบของ Becker และ Peleg สามารถใช้ในการทำนายค่าความชื้นของเมล็ดข้าวโดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.925-0.990 แต่สมการทำนายของ Becker มีค่า RMSE ต่ำกว่าสมการทำนายของ Peleg สำหรับการแช่ที่อุณหภูมิ 80°C ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการทำนายทั้งสองสมการให้ผลที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ได้จากการทดลอง

คำสำคัญ: ข้าวเปลือกพันธุ์ กข31, แช่น้ำ, ข้าวนึ่ง

Abstract

RD31 rough rice was soaked in water at several temperature levels and a change in moisture content of rice during soaking was examined. Moisture content of rice rapidly increased from 12.39%-13.42% (dry basis) to 24.95-35.63% (dry basis) at initial of soaking but increasing rate of moisture content decreased with soaking time. Water absorption of newly-harvested rice was higher than aged rice at soaking temperature which was lower than gelatinization temperature (GT). However, for soaking temperature above GT, water absorption of the aged rice was higher than the newly-harvested rice. Either Becker's model or Peleg's model could be used for predict moisture content of rough rice during soaking, except at soaking temperature which was higher than GT, RMSE of the Becker's prediction model was lower than the Peleg's model. Model's paremeters of both prediction models were coincident with the hydration characteristics of rice in the experiment.

Keywords: RD31 paddy, Soaking, Parboiled rice

1 บทนำ

กระบวนการผลิตข้าวนึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การแช่ข้าวเปลือกในน้ำ การให้ความร้อนเพื่อให้ข้าวเปลือกสุก และการทำแห้งข้าวเปลือกที่สุกแล้ว สำหรับในขั้นตอนแรกคือการแช่ข้าวนั้นมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความชื้นในเมล็ดข้าวให้เพียงพอต่อกระบวนการทำให้ข้าวสุก (gelatinization) ในขั้นตอนถัดไป (Gariboldi, 1975) โดยทั่วไปแล้วความชื้นที่เพียงพอต่อการ gelatinization จะอยู่ที่ประมาณ 30% w.b (Bhattacharya, 2011) การแช่ข้าวที่มีประสิทธิภาพนั้นจะต้องกระทำอย่างรวดเร็วและให้น้ำแพร่กระจายเข้าไปในเมล็ดข้าวอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ (Gariboldi, 1975; Luh, 1991) ซึ่งหากขั้นตอนการแช่ใช้เวลานานเกินไปนอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองแล้วยังทำให้ข้าวมีสีและกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์อันเกิด

จากกระบวนการหมักอีกด้วย (Luh, 1991) การแช่ข้าวเพื่อการผลิตข้าวนึ่งในอุตสาหกรรมจึงนิยมแช่ข้าวนึ่งในน้ำอุ่นเพื่อลดเวลาในการแช่ให้น้อยที่สุด ทั้งนี้อุณหภูมิของน้ำและเวลาที่ใช้ในการแช่ต่างก็ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของข้าวนึ่งที่ผลิตได้ ดังนั้นความเข้าใจในกลไกการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวเปลือกระหว่างการแช่จึงเป็นหนึ่งในความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการผลิตข้าวนึ่งให้เป็นไปอย่างถูกต้องและเหมาะสม มีงานวิจัยที่ศึกษากลไกการดูดซับน้ำทั้งในข้าวและเมล็ดธัญพืชอื่น และได้มีการพัฒนาสมการเพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในเมล็ดระหว่างการแช่น้ำที่อุณหภูมิต่างๆ (Bandyopadhyay and Roy, 1978; Jideani and Mpotokwana, 2009; Lu et al., 1994; Turhan et al., 2002; Vasudeva et al., 2010) โดยที่การแพร่ของน้ำเข้าไปยังเมล็ดข้าวเปลือกจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างได้แก่ โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าว อุณหภูมิของน้ำที่แช่ เวลาในการแช่ ซึ่งข้าวต่างสายพันธุ์กันก็จะมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน ดังนั้นการดูดซับน้ำจะต่างกันไปตามลักษณะประจำพันธุ์ของข้าว (Wimberly, 1983) นอกจากนี้ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวก็มีอิทธิพลต่อการดูดซับน้ำของข้าวเปลือก เนื่องจากข้าวเก่าหรือข้าวที่เก็บไว้นานจะมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีที่แตกต่างไปจากข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ (Bhattacharya, 2011) ดังนั้นการศึกษาการดูดซับน้ำของข้าวเปลือกพันธุ์ต่างๆ ทั้งข้าวใหม่และข้าวเก่าจึงยังคงมีความสำคัญต่อการพัฒนากระบวนการผลิตข้าวนึ่ง

ข้าวพันธุ์ กข31 เป็นข้าวไม่ไวแสง จัดเป็นข้าวอมิโลสสูงมีปริมาณอมิโลสระหว่าง 27.3-29.8% (กรมการข้าว, 2550) และปลูกได้ทั่วไปในเขตที่ราบลุ่มภาคกลาง (กรมการข้าว, 2556) แต่เนื่องจากเป็นพันธุ์ข้าวค่อนข้างใหม่ได้รับการรับรองพันธุ์และสนับสนุนให้เกษตรกรปลูกเมื่อปี พ.ศ. 2550 องค์ความรู้เกี่ยวกับกลไกการดูดซับน้ำของข้าวพันธุ์ กข31 จึงยังมีอยู่อย่างจำกัด งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ระหว่างการแช่น้ำและสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ระหว่างการแช่น้ำเพื่อการผลิตข้าวนึ่งทั้งในข้าวใหม่และข้าวเก่า

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วิธีการทดลอง

ข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ของฤดูกาลเก็บเกี่ยวปีพ.ศ.2557 ซึ่งเป็นข้าวเก่าอายุการเก็บรักษา 1 ปี และข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ซึ่งเป็นข้าวใหม่ของฤดูกาลเก็บเกี่ยวปี พ.ศ. 2558 ได้รับจากโรงสีเอกชนในจังหวัดนครสวรรค์ ถูกนำมาทำความสะอาด คัดแยกสิ่งเจือปนและเมล็ดลีบ การวัดความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกวัดโดยวิธีตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (ASAE Standards, 1998) จากนั้นบรรจุตัวอย่างข้าวเปลือกจำนวน 20 กรัม ในถุงผ้าที่ให้น้ำผ่านได้แล้วจึงแช่ในน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 60 70 และ 80°C ทุกชั่วโมงข้าวเปลือกจะถูกนำขึ้นมาจากน้ำและซับด้วยกระดาษทันทีเพื่อกำจัดน้ำส่วนเกินออกจากข้าวเปลือก (Lu et al., 1994; Oli et al., 2014) แล้วจึงวัดความชื้นด้วยวิธีตู้อบลมร้อน จนครบ 7 ชั่วโมง ทำซ้ำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

2.2 สมการทำนายการดูดซับน้ำ

ตัวแบบที่ใช้อธิบายการดูดซับน้ำเข้าไปในเมล็ดธัญพืชมีหลายสมการซึ่งแต่ละสมการมีความเหมาะสมกับการใช้งานที่ภาวะการแช่และชนิดธัญพืชต่างๆ กัน การวิเคราะห์และสร้างสมการทำนายในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวแบบสองสมการได้แก่ Becker's model และ Peleg's model

2.2.1 *สมการทำนายของ Becker*

ในปี 1960 Becker สร้างสมการการแพร่ของน้ำในเมล็ดข้าวสาลีโดยอาศัยพื้นฐานจากสมการ Fick's Law โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$M_t = M_0 + \propto t^{0.5} \tag{1}$$

โดยที่ M_t เป็นความชื้นเฉลี่ยของธัญพืชที่เวลา t (g g^{-1}, dry basis) M_0 เป็นความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของธัญพืช (g g^{-1}, dry basis) t เป็นเวลาในการดูดซับน้ำ (s) และ $\propto$ เป็นค่าคงที่ในสมการ หรือ lump parameter

เนื่องจากในช่วงแรกที่เมล็ดข้าวสัมผัสน้ำ น้ำจะเคลื่อนที่เข้าไปยังเมล็ดด้วยแรง capillary ผ่านรูพรุนของแกลบ ค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกมีค่าสูงจึงมีการปรับปรุงรูปแบบสมการทำนายให้เป็นดังสมการ (2)

$$M_t = M_0 + M_i + \propto t^{0.5} \tag{2}$$

โดยที่ M_i เป็นค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการแช่ และเมื่อสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง $(M_t - M_0)$ และ $t^{0.5}$ จะสามารถหาค่า M_i และค่า $\propto$ ได้จากค่าจุดตัดแกน y และความชันของกราฟเส้นตรงที่สร้างจากสมการ (2) และค่า $\propto$ ยังสามารถแสดงในรูปสมการดังนี้

$$\propto = \left(\frac{2}{\pi^{0.5}}\right)(M_s - M_0)\left(\frac{S}{V}\right){D_m}^{0.5} \tag{3}$$

โดยที่ M_s เป็นความชื้นที่พื้นผิวของธัญพืช (g g^{-1}, dry basis) ซึ่งสำหรับการดูดซับน้ำ ค่า M_s จะมีค่าเท่ากับค่าความชื้นที่ภาวะสมดุล M_e (Singh, 1989) และสามารถประมาณได้ตามวิธีของ Bello et al. (2004) S เป็นพื้นที่ผิวของธัญพืช (m^2) และ V เป็นปริมาตรของแข็งของเมล็ดข้าว (m^3) D_mเป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2 s^{-1}) โดยที่ค่า D_m สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิได้จากสมการ Arrhenius ดังแสดงในสมการ

$$D_m = D_0 e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} \quad (4)$$

เมื่อรวมสมการ (3) และสมการ (4) จะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\propto = \left(\frac{2}{\pi^{0.5}}\right)(M_s - M_0)\left(\frac{S}{V}\right)\left[D_0 e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)}\right]^{0.5} \quad (5)$$

หรือแสดงในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการ (6)

$$\propto = \propto_0 \left[e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)}\right]^{0.5} \quad (6)$$

สมการ (6) สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ $\propto_0$ และ E ดังแสดงในสมการ (7)

$$\ln \propto = \ln \propto_0 - \frac{E}{2RT} \quad (7)$$

โดยที่ E เป็นค่าพลังงานกระตุ้นในการแพร่ของน้ำ (J mol^{-1}) R เป็นค่าคงตัวของก๊าซ (8.314 J K^{-1} mol^{-1}) และ T เป็นค่าอุณหภูมิในการแช่ (K)

สำหรับค่า S และ V หาได้จากสมการ (8) (9) และ (10) (Jain and Bal, 1997; Varnamkhasti et al., 2008)

$$V = 0.25 * \left[\frac{\pi}{6} L(W + T)^2\right] \quad (8)$$

$$S = \pi B L^2 (2L - B)^{-1} \quad (9)$$

$$B = [WT]^{0.5} \quad (10)$$

เมื่อ L W และ T เป็นความยาว ความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเริ่มต้น

เนื่องจากสมการ Becker ถูกสร้างขึ้นมาโดยมีพื้นฐานจากสมการการแพร่และสามารถอธิบายปรากฏการณ์การดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวได้ดี จึงมีนักวิจัยจำนวนมากที่ใช้สมการนี้ในการอธิบายการเพิ่มขึ้นของความชื้นในระหว่างการแช่ ทั้งในข้าวเปลือกและข้าวกล้อง (Lu et al., 1994; Miah et al., 2002; Sridhar and Manohar, 2003)

2.2.2 สมการทำนายของ Peleg

Peleg's model เป็นสมการทำนายการดูดซับน้ำของวัสดุเกษตรและอาหารที่นิยมใช้อีกสมการหนึ่ง โดยในปี 1988 Peleg ได้สร้างสมการทำนาย empirical โดยมีรูปแบบสมการดังนี้ (Peleg, 1988)

$$M_t = M_0 + \frac{t}{(k_1 + k_2 t)} \quad (11)$$

โดยที่ M_t เป็นความชื้นเฉลี่ยของธัญพืชที่เวลา t (g g^{-1}, dry basis) M_0 เป็นความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของธัญพืช (g g^{-1}, dry basis) t เป็นเวลาในการดูดซับน้ำ (s) k_1 เป็นPeleg's rate constant (%h^{-1}) k_2 เป็น Peleg's capacity constant ($\%^{-1}$)

ค่าอัตราการดูดซับน้ำ (R) สามารถหาได้จากอนุพันธ์อันดับแรกของสมการ Peleg ดังสมการ (12)

$$R = \frac{dM}{dt} = \frac{k_1}{(k_1 + k_2 t)^2} \quad (12)$$

ซึ่งอัตราการดูดซับน้ำในช่วงแรกที่น้ำสัมผัสเมล็ดข้าวสามารถพิจารณาได้จากค่า R ที่เวลา t=0 จะได้

$$R_0 = \frac{1}{k_1} \quad (13)$$

ค่าความชื้นสุดท้ายหรือความชื้นที่ภาวะสมดุล หาได้จากค่าความชื้นที่เวลา t→∞ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (14)

$$M_{t\to\infty} = M_e = M_0 + \frac{1}{k_2} \quad (14)$$

โดยที่ค่า M_e เป็นค่าความชื้นที่ภาวะสมดุล (g g^{-1}, dry basis) เมื่อจัดรูปแบบสมการ (14) ให้เป็นสมการเชิงเส้น จะได้

$$\frac{t}{M_t - M_0} = k_1 + k_2 t \quad (15)$$

การสร้างกราฟเส้นตรงจากสมการ (15) จะทำให้สามารถหาค่า k_1 และ k_2 ได้

2.3 การคำนวณทางสถิติ

งานวิจัยนี้วางแผนการทดลองแบบ Factorial in completely randomized design ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นในแต่ละสภาวะการแช่ถูกนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดย Duncan's multiple-range test (DMRT) จากนั้นข้อมูลถูกนำไปใช้ในการสร้างสมการสำหรับทำนายค่าความชื้น

การตรวจสอบค่าความแม่นยำในการประมาณค่าความชื้นในเมล็ดข้าวของสมการทำนายทั้งสองแบบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่า Root mean square error (RMSE) (Yadav, B. K. and V. K. Jindal, 2007) ซึ่งสมการที่มีความเหมาะสมจะมีค่า R^2 สูง และค่า RMSE ต่ำ ค่า RSME คำนวณได้จากสมการ

$$RMSE = \frac{1}{N}\left[\sum_{i=1}^{N}(M - M_{est})_i^2\right]^{0.5} \quad (16)$$

เมื่อ M เป็นค่าความชื้นที่ได้จากการทดลอง M_{est} เป็นค่าความชื้นที่ได้จากสมการทำนาย N เป็นจำนวนข้อมูล และ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N

3 ผลและวิจารณ์

3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก

ค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ในระหว่างการแช่ในน้ำที่อุณหภูมิต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 60 70 และ 80°C สำหรับข้าวใหม่และข้าวเก่าแสดงใน Figure 1 โดยในช่วงชั่วโมงแรกค่าความชื้นของข้าวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ 12.39% db. เพิ่มขึ้นเป็น 24.95 27.97 และ 35.61% db. ในข้าวเก่า และจากความชื้น 13.42% db. เพิ่มเป็น 26.75 28.48 และ 35.63% db. ในข้าวใหม่ สำหรับข้าวเปลือกที่แช่น้ำอุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในเมล็ดข้าวในระหว่างการแช่พบว่าค่าความชื้นในเมล็ดข้าวที่ถูกแช่น้ำที่ระดับอุณหภูมิทั้งสามระดับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) และค่าความชื้นในระหว่างการแช่ของข้าวเก่าและข้าวใหม่ก็มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เช่นกัน

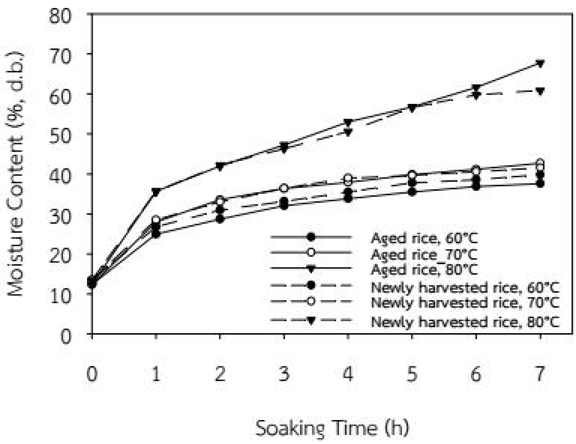


Figure 1 Change of moisture content in aged and newly harvested rice at three soaking temperatures.

จาก Figure 1 จะสังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิการแช่ 60 และ 70°C เมื่อเวลาผ่านไปจนในชั่วโมงที่ 5-7 อัตราการเพิ่มขึ้นของความชื้นจะลดลงและมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่ความชื้นสมดุลทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่ นั่นแสดงว่าทั้งอุณหภูมิของน้ำและเวลาในการแช่ต่างมีอิทธิพลกับอัตราการดูดซับน้ำของข้าวเปลือก ข้าวเปลือกที่แช่น้ำที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีการดูดซับน้ำมากกว่าข้าวเปลือกที่แช่น้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า ในขณะที่เมื่อระยะเวลาในการแช่มากขึ้นข้าวเปลือกจะดูดซับน้ำเข้าไปมากขึ้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นไปในลักษณะเช่นเดียวกับการดูดซับน้ำในธัญพืชทั่วไป กล่าวคืออัตราการแพร่จะสูงที่สุดในช่วงแรกและจะค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่ภาวะสมดุล (Chakraverty and Singh, 2014) ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของความชื้นภายในเมล็ดข้าวในช่วงแรกของการแช่นี้ถูกอธิบายว่าเป็นผลจากการที่แกลบดูดซับน้ำเอาไว้อย่างรวดเร็วประกอบกับมีน้ำเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างแกลบและเมล็ด แต่การเพิ่มขึ้นของความชื้นของข้าวเปลือกทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ที่แช่น้ำอุณหภูมิ 80°C จะมีลักษณะที่แตกต่างออกไป โดยค่าความชื้นจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราค่อนข้างคงที่ในชั่วโมงที่ 1-7 และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงในรูปแบบนี้ถูกพิจารณาว่าเป็นลักษณะของการแช่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเจลาติไนเซชั่น (gelatinization temperature) และเป็นรูปแบบที่คล้ายกับการหุงข้าว โดยเมื่อแป้งในเมล็ดข้าวเกิด gelatinization ก็จะมีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมาก (Bhattacharya and Ali, 2015)

ในการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60°C ข้าวเปลือกเก่าจะมีความชื้นต่ำกว่าข้าวใหม่ตลอดระยะเวลาการแช่ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Tani et al. (1969) ที่พบว่าเมื่อแช่ข้าวญี่ปุ่นในน้ำที่อุณหภูมิปกติ ความสามารถในการดูดซับน้ำของข้าวญี่ปุ่นซึ่งเป็นข้าวเก่าจะมีค่าต่ำกว่าข้าวใหม่ ส่วนที่อุณหภูมิในการแช่ที่ 70°C ค่าความชื้นของทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ไม่ต่างกันมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของความสามารถในการแพร่ของน้ำเข้าไปเมล็ดข้าวที่มีค่าสูงและส่งผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของความชื้นในเมล็ดข้าว สำหรับการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 80°C ค่าความชื้นระหว่างการแช่ของข้าวเปลือกเก่าจะมีแนวโน้มสูงกว่าข้าวเปลือกใหม่ โดยอุณหภูมิของน้ำที่ประมาณ 80°C ถูกพิจารณาว่าเป็นระดับอุณหภูมิที่ต่ำสุดที่เหมาะในการหุงข้าวอินเดีย (Bhattacharya, 2011) ดังนั้นการแช่น้ำที่อุณหภูมินี้อย่างน้อยจะต้องมีการสุกบางส่วนของข้าวเปลือก การสุกหรือกระบวนการ gelatinization นั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแป้งในเมล็ดข้าว เม็ดแป้งจะพองตัวและมีปริมาตรสูงขึ้นอย่างมาก ทำให้มีการเคลื่อนที่ของน้ำเข้าไปยังเมล็ดข้าวได้มากกว่าเดิม ผลการทดลองข้างต้นจึงสอดคล้องกับสมบัติการดูดน้ำของข้าวเก่าที่มีอายุการเก็บรักษาระยะเวลาประมาณ 1 ปี ที่จะมีอัตราการดูดน้ำระหว่างการหุงสูงกว่ากว่าข้าวใหม่ (Bhattacharya, 2011; Bhattacharya and Ali, 2015)

3.2 สมการทำนาย

ค่าความชื้นที่ได้จากสมการทำนายที่สร้างขึ้นจากตัวแบบของ Becker และตัวแบบของ Peleg ทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่เปรียบเทียบกับค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองแสดงใน Figure 2 ซึ่งพบว่าในช่วงชั่วโมงแรกของการแช่ ความชื้นจากสมการทำนาย Peleg จะให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าจากการทดลองและค่าทำนายจากสมการ Becker ส่วนในช่วงชั่วโมงที่ 2-6 ค่าความชื้นที่ได้จากสมการ Peleg กลับมีค่าสูงกว่าค่าความชื้นจากการทดลองและค่าความชื้นจากสมการ Becker และหลังจากการแช่ที่ 6 ชั่วโมง ค่าความชื้นจากสมการ Peleg จะมีค่าน้อยกว่าค่าทำนายจากสมการ Becker

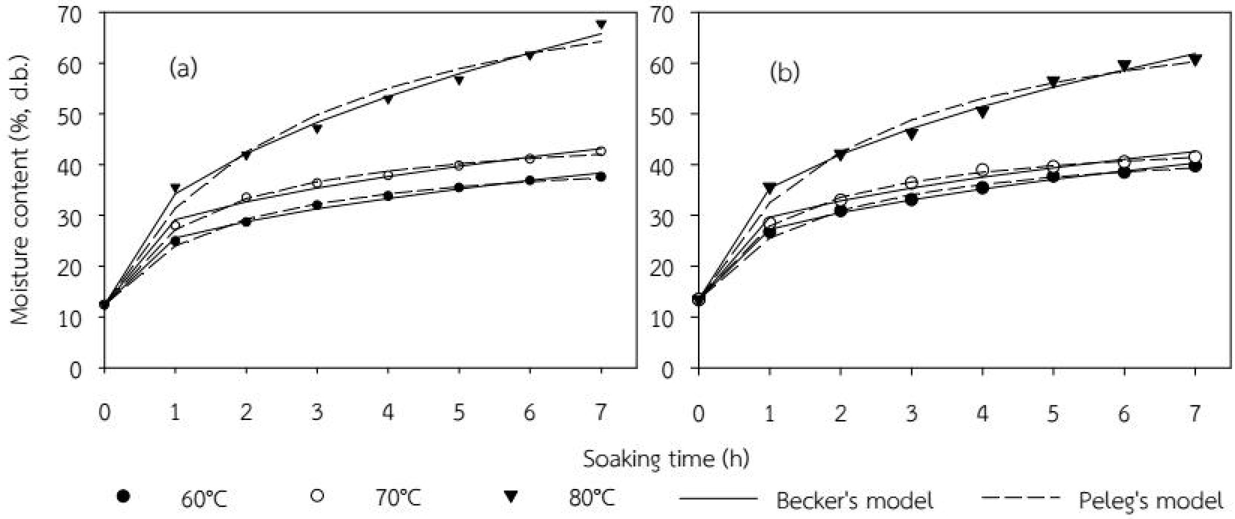


Figure 2 Comparision of moisture content predicted from models and experimental data. a) Aged rice b) Newly harvested rice.

นอกจากนั้นจาก Figure 2 ยังพบว่าเส้นกราฟจากสมการทั้งสองมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยกราฟที่ได้จากสมการ Peleg จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งต่อเนื่อง ในขณะที่กราฟจากสมการ Becker จะมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องโดยเส้นกราฟจะแบ่งเป็นสองช่วงอย่างชัดเจน ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟที่ได้จากสมการทำนายทั้งสองสมการมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่

3.3 ความแม่นยำของการทำนาย

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าความคลาดเคลื่อน (RMSE) ของสมการทำนายทั้งสองสมการแสดงใน Table 1 และ Table 2 ซึ่งจากตารางจะพบว่าสมการ Becker มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.976-0.990 และค่า RMSE ระหว่าง 0.516-1.126% ส่วนสมการ Peleg มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.925-0.999 และค่า RMSE ระหว่าง 0.479-2.583% ตลอดระยะเวลาการแช่

เมื่อพิจารณาจากค่า RSME ของสมการทำนายที่อุณหภูมิการแช่ 60 และ 70°C พบว่าสมการทำนายทั้งสองสามารถใช้ทำนายความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างการแช่ได้ดี อย่างไรก็ตามค่า RMSE ที่ได้จากสมการทำนายของ Peleg มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากสมการทำนายของ Becker ทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่ ส่วนที่อุณหภูมิการแช่ 80°C ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่า gelatinization temperature นั้น ค่า RMSE ของสมการ Peleg มีค่าสูงกว่าค่าจากสมการ Becker ทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่ และไม่เหมาะสมที่จะใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการแช่ในอุณหภูมิที่สูงกว่า gelatinization temperature

Table 1 Paremeters and statistics of Becker's model.

	T (°C)	M_e (%)	ΔM_i (%)	α ($\times10^{-3}$, $s^{-0.5}$)	D_m ($\times10^{-11}$, m^2s^{-1})	α_0	E ($kJ.mol^{-1}$)	R^2	RMSE (%)
AR[a]	60	38.458	5.354	1.3007	0.611	7443.53	86.87	0.985	0.516
	70	42.317	8.299	1.4163	0.724			0.976	0.713
	80	71.776	2.280	3.1844	3.662			0.988	1.126
NR[a]	60	40.610	5.918	1.3212	0.341	16741.4	68.58	0.990	0.422
	70	41.445	8.341	1.3118	0.337			0.957	0.907
	80	69.092	5.832	2.6828	1.407			0.990	0.900

[a]AR = Aged rice, NR = Newly harvested rice.

Table 2 Paremeters and statistics of Peleg's model.

	T (°C)	M_e (%)	R ($\times10^{-5}$)	R_0	k_1	k_2	R^2	RMSE (%)
AR[a]	60	43.339	13.654	0.185	5.4044	3.2257	0.939	0.479
	70	47.967	9.7905	0.254	3.9441	2.8110	0.925	0.522
	80	85.127	29.926	0.258	3.8803	1.3749	0.997	2.583
NR[a]	60	44.415	13.860	0.195	5.1361	3.1228	0.9940	0.676
	70	45.490	8.3645	0.258	3.8800	3.0214	0.9988	0.381
	80	74.288	20.586	0.275	3.6352	1.6156	0.9781	1.887

[a]AR = Aged rice, NR = Newly harvested rice.

3.4 ค่าคงที่ในสมการทำนายของสมการ Becker

ค่าคงที่ในสมการ Becker ได้แก่ ค่า ΔM_i และค่า α ที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับข้าวเก่าและข้าวใหม่แสดงใน Table 1 ซึ่งค่า ΔM_i ของข้าวใหม่จะมีค่าสูงกว่าข้าวเก่าในทุกอุณหภูมิการแช่น้ำ ซึ่งหมายความว่าข้าวใหม่จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำในช่วงแรกที่ข้าวสัมผัสน้ำมากกว่าข้าวเก่า ซึ่งอาจเกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแกลบระหว่างการเก็บรักษา และค่า ΔM_i ทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการแช่เพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 70°C และกลับลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 70 เป็น 80°C ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Bandyopadhyay and Roy (1978) ในข้าวเมล็ดยาว การเพิ่มขึ้นและลดลงของค่า ΔM_i มีความสัมพันธ์กับ gelatinization temperature ของข้าว โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงช่วง gelatinization temperature หากอุณหภูมิในการแช่ยังคงเพิ่มขึ้นต่อไป ΔM_i จะกลับมีค่าลดลง สำหรับค่า α ในข้าวเก่าและข้าวใหม่จะมีค่าใกล้เคียงกันที่การแช่ที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C แต่ค่า α ของข้าวที่แช่ในน้ำอุณหภูมิ 80°C จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่ โดยค่า α หรือ lump parameter แสดงถึงค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการแพร่ของน้ำเข้าสู่เมล็ดข้าว (Chakraverty and Singh, 2014) อีกทั้งค่า α เป็นตัวชี้วัดถึงค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองช่วงตามอุณหภูมิในการแช่ กล่าวคือช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า gelatinization temperature และช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า gelatinization temperature (Chakraverty and Singh, 2014) เนื่องจากจุดเปลี่ยนค่า α จากสมการ Becker อยู่ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 70-80°C ซึ่งสอดคล้องกับผลการเปลี่ยนความชื้นจากการทดลอง ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า gelatinization temperature ของข้าว กข31 อยู่ระหว่างช่วงอุณหภูมิดังกล่าว

3.5 ค่าคงที่ในสมการทำนายของสมการ Peleg

ค่าคงที่ k_1 และ k_2 สำหรับสมการ Peleg แสดงใน Table 2 ซึ่งค่า k_1 และ k_2 จะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการแช่เพิ่มสูงขึ้นทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่ ซึ่ง k_1 จะสัมพันธ์กับการถ่ายเทมวลในการแพร่ซึ่งถ้ามีค่าต่ำจะทำให้อัตราการแพร่ในช่วงแรกมีค่ามาก ส่วน k_2 เป็นตัวชี้วัดปริมาณน้ำสูงสุดที่เมล็ดข้าวสามารถดูดซับไว้ได้ซึ่งถ้ามีค่าต่ำแล้วจะทำให้ปริมาณน้ำที่ดูดซับไว้ได้สูงขึ้น ซึ่งการลดลงของค่าคงที่ดังกล่าวสะท้อนผลของอุณหภูมิที่มีต่อความชื้นของเมล็ดข้าวระหว่างการแช่ กล่าวคือเมื่อแช่ข้าวที่อุณหภูมิสูง ค่าความชื้นในชั่วโมงแรกของการแช่น้ำก็จะสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และเมล็ดข้าวจะสามารถดูดซับน้ำไว้ได้ปริมาณมากกว่าภายใต้ขอบเขตของเวลาที่จำกัด ที่อุณหภูมิการแช่เดียวกันค่า k_1 ของข้าวเก่าจะมีค่าสูงกว่าข้าวใหม่เล็กน้อย นั่นคือข้าวใหม่จะมีอัตราการแพร่ของน้ำในช่วงแรกเข้าไปยังเมล็ดสูงกว่าข้าวเก่า ซึ่งอาจเป็นผลของโครงสร้างของแกลบและช่องว่างในเมล็ดข้าว ส่วนค่า k_2 ในข้าวใหม่มีแนวโน้มที่จะสูงกว่าข้าวเก่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงว่าข้าวเก่ามีแนวโน้มที่จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำไว้ได้มากกว่าข้าวใหม่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทั้งลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการแช่ของข้าวและผลการวิเคราะห์จากสมการ Becker

3.6 ค่าความชื้นที่ภาวะสมดุล

ค่าความชื้นที่ภาวะสมดุล (M_e) ที่ประมาณจากวิธีของ (Bello et al. 2004) ทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการแช่ที่สูงขึ้นและมีค่าสอดคล้องกันทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า M_e ที่ประมาณจากวิธีนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 80°C ทั้งนี้อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเมล็ดข้าวเมื่ออุณหภูมิการแช่สูงเกิน gelatinization temperature

สำหรับค่าความชื้นที่ภาวะสมดุล (M_e) ที่ได้จากสมการ Peleg ก็มีลักษณะคล้ายกับที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีของ Bello กล่าวคือมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการแช่สูงขึ้น และมีค่าสูงขึ้นอย่างมากเมื่ออุณหภูมิในการแช่เพิ่มขึ้นจาก 70 เป็น 80°C เนื่องจากค่า M_e ที่ได้จากสมการ Peleg นี้คำนวณจากส่วนกลับของค่าคงที่ k_2 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่า M_e สำหรับสมการ Peleg จึงแปรผกผันกับค่าคงที่ k_2 และเป็นที่น่าสังเกตว่าค่า M_e ที่ได้จากสมการ Peleg จะมีค่าสูงกว่าค่า M_e ที่คำนวณได้จากวิธีของ (Bello et al. 2004) ในทุกช่วงอุณหภูมิ

3.7 ค่าพลังงานกระตุ้น

พลังงานกระตุ้น (E) ในการดูดซับน้ำในข้าวเก่าที่คำนวณจากสมการ Becker สำหรับข้าวเก่าเท่ากับ 86.87 kJ/mol และในข้าวใหม่มีค่าเท่ากับ 68.58 kJ/mol ค่า E ของข้าวพันธุ์กข31 ที่ได้ในงานวิจัยนี้มีค่าสูงเมื่อเทียบกับค่า E ของข้าวพันธุ์ IR-20 ซึ่งมี

ค่าเท่ากับ 20.51 kJ/mol (Sridhar and Manohar, 2003) และในข้าวกล้องพันธุ์หอมมะลิ105 เท่ากับ 30.46 kJ/mol Cheevitsopon and Noomhorm, 2011) ค่าพลังงานกระตุ้นในการดูดซับน้ำนี้จะสะท้อนถึงค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าว กล่าวคือถ้าค่า E มีค่าต่ำ อัตราการเพิ่มขึ้นของการดูดซับน้ำเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็จะมีค่าน้อยตามไปด้วย (Sopade et al., 1992) นั่นคือสำหรับการแช่น้ำที่อุณหภูมิสูงแล้วข้าวเก่าจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำมากกว่าข้าวใหม่

3.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_m) ของทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ที่คำนวณได้จากสมการ Becker จะมีค่าระหว่าง 0.337×10^{-11} – 0.724×10^{-11} $m^2 s^{-1}$ เมื่อแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C ดังแสดงใน Table 1 ส่วนที่อุณหภูมิ 80°C ค่า D_m มีค่า 1.407×10^{-11} $m^2 s^{-1}$ ในข้าวใหม่ และ 3.662×10^{-11} $m^2 s^{-1}$ ในข้าวเก่า จะพบว่าค่า D_m ของข้าวเก่าจะมีค่ามากกว่าค่า D_m ของข้าวใหม่ในทุกอุณหภูมิการแช่

3.9 ค่าอัตราการดูดซับน้ำ

ค่าอัตราการดูดซับน้ำ (R) และค่าอัตราการดูดซับน้ำในช่วงแรก (R_0) ที่คำนวณจากสมการ Peleg แสดงใน Table 2 สำหรับค่า R_0 ซึ่งคำนวณได้จากส่วนกลับของค่าคงที่ k_1 ก็จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับค่า k_1 ส่วนค่า R ซึ่งเป็นค่าอัตราการดูดซับน้ำระหว่างการแช่น้ำจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่ กล่าวคือค่า R ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 70°C และกลับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการแช่เพิ่มสูงขึ้นเป็น 80°C.

4 สรุป

สมการสำหรับทำนายค่าความชื้นของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข31 ที่สร้างจากตัวแบบของ Peleg จะให้ความผิดพลาดในการทำนายน้อยกว่าสมการทำนายที่สร้างจากตัวแบบของ Becker เมื่อแช่เมล็ดข้าวที่อุณหภูมิต่ำกว่า gelatinization temperature และการเพิ่มขึ้นของความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 สามารถอธิบายได้จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทั้งจากสมการของ Becker และ Peleg ทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่

เมื่อพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการทำนายทั้งสองได้ผลสอดคล้องกัน กล่าวคือเมื่อแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60-70°C ข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ที่เป็นข้าวใหม่จะมีความสามารถในการแพร่ผ่านของน้ำและมีความสามารถในการดูดซับน้ำไว้ได้สูงกว่าในข้าวเก่า ส่วนการแช่น้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า gelatinization temperature ของข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 70-80°C นั้น ข้าวเก่าจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากกว่าในข้าวใหม่

5 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่สนับสนุนทุนการวิจัย

6 เอกสารอ้างอิง

กรมการข้าว. 2550. พันธุ์ข้าวเฉลิมพระเกียรติ. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพมหานคร.

กรมการข้าว. 2556. แนะนำพันธุ์ข้าวรายตำบล ฤดูนาปรัง. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพมหานคร.

ASABE Standards, 1998. S352.2: Moisture measurements-unground grain seeds, ASAE, St. Joseph, MI.

Bandyopadhyay, S., Roy, N. 1978. A semiempirical correlation for prediction of hydration characteristics of paddy during parboiling. International Journal of Food Science & Technology 13, 91-98.

Bello, M., Tolaba, M.P., Suarez, C. 2004. Factors affecting water uptake of rice grain during soaking. Lwt - Food Science and Technology 37, 811-816.

Bhattacharya, K.R., 2011. Rice quality: A guide to rice properties and analysis, (1st ed.), Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.

Bhattacharya, K.R., Ali, S.Z., 2015. An introduction to rice-grain technology, WPI India.

Chakraverty, A., Singh, R.P., 2014. Postharvest Technology and Food Process Engineering, CRC Press.

Cheevitsopon, E., Noomhorm, A. 2011. Kinetics of hydration and dimensional changes of brown rice. Journal of Food Processing and Preservation 35, 840-849.

Gariboldi, F., 1975. Rice parboiling, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Jain, R., Bal, S. 1997. Properties of pearl millet. Journal of Agricultural Engineering Research 66, 85-91.

Jideani, V.A., Mpotokwana, S. 2009. Modeling of water absorption of Botswana Bambara varieties using peleg's equation. Journal of Food Engineering 92, 182-188.

Lu, R., Siebenmorgen, T.J., Archer, T.R. 1994. Absorption of water in long-grain rice rough during soaking. Journal of Food Process Engineering 17, 141-154.

Luh, B.S., 1991. Rice, volume 2: Utilization, (2nd ed.), Springer Science & Business Media, NY.

Miah, M.A.K., Haque, A., Douglass, M.P., Clarke, B. 2002. Parboiling of rice. Part i: Effect of hot soaking time on quality of milled rice. International Journal of Food Science and Technology 37, 527-537.

Oli, P., Ward, R., Adhikari, B., Torley, P. 2014. The diffusion of moisture in paddy during hydration and dehydration processes. Drying technology 32, 1423-1434.

Peleg, M. 1988. An empirical model for the description of moisture sorption curves. Journal of Food Science 53, 1216-1217.

Singh, B. 1989. Model for absorption of liquid water by grains. Transactions of the ASAE 32, 2067-2079.

Sopade, P., Ajisegiri, E., Badau, M. 1992. The use of peleg's equation to model water absorption in some cereal grains during soaking. Journal of Food Engineering 15, 269-283.

Sridhar, B.S., Manohar, B. 2003. Hydration kinetics and energy analysis of parboiling indica paddy. Biosystems engineering 85, 173-183.

Tani, T., Chikubu, S., Horiuchi, H. 1969. Physicochemical quality of rice Journal of the Japanese society of Starch Science 17, 139-153.

Turhan, M., Sayar, S., Gunasekaran, S. 2002. Application of peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. Journal of Food Engineering 53, 153-159.

Varnamkhasti, M.G., Mobli, H., Jafari, A., Keyhani, A.R., Soltanabadi, M.H., Rafiee, S., Kheiralipour, K. 2008. Some physical properties of rough rice (oryza sativa l.) grain. Journal of Cereal Science 47, 496-501.

Vasudeva, S., Vishwanathan, K., Aswathanarayana, K., Swamy, Y.I. 2010. Hydration behaviour of food grains and modelling their moisture pick up as per peleg's equation: Part I. Cereals. Journal of food science and technology 47, 34-41.

Wimberly, J.E., 1983. Technical handbook for the paddy rice postharvest industry in developing countries, International Rice Research Institute.

Yadav, B.K., Jindal, V.K. 2007. Dimensional changes in milled rice (oryza sativa l.) kernel during cooking in relation to its physicochemical properties by image analysis. Journal of Food Engineering 81, 710-720.

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 (2560) 9-16
Available online at www.tci-thaijo.org /index.php/TSAEJ

บทความวิจัย

ISSN 1685-408X

การประเมินความแก่ทุเรียนแบบทำลายน้อยที่สุดด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้
Minimally Destructive Evaluation of Durian Maturity Using Near Infrared Spectroscopy

อริยนันท์ ตลับนาค[1], อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล[1*]
Ariyanan Talabnark[1], Anupun Terdwongworakul[1*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140
[1]Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University – Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140. Thailand
*Corresponding author: Tel: +66-86-775-1723, Fax: +66-34-351-897, E-mail: fengant@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินคุณภาพทุเรียนแบบทำลายน้อยที่สุดด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy:NIRS) เพื่อแก้ปัญหาการส่งออกทุเรียนอ่อน โดยใช้ทุเรียนพันธุ์หมอนทองจำนวน 140 ผล ใน 4 ช่วงอายุหลังดอกบานตั้งแต่ 101 วัน จนถึง 122 วัน โดยจะวัดค่าการดูดกลืนแสงที่พูเอกซึ่งฝานเปลือกให้เรียบเปรียบเทียบกับการวัดค่าการดูดกลืนแสงของเนื้อผลโดยตรง แล้วนำข้อมูลการดูดกลืนแสงและค่าน้ำหนักเนื้อแห้งมาสร้างโมเดลประเมินน้ำหนักเนื้อแห้งด้วยเทคนิค Partial least squares regression (PLSR) ผลการวิเคราะห์พบว่า โมเดลของสเปกตรัมเนื้อผลที่สร้างจาก FT-NIR spectrometer มีความแม่นยำในการประเมินมากกว่าด้วยค่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r_p) เท่ากับ 0.78 และค่า Root mean square error of prediction (RMSEP) เท่ากับ 3.02% โดยโมเดลที่สร้างจากสเปกตรัมทั้งผลฝานเปลือกให้ค่า r_p เท่ากับ 0.69 และ RMSEP เท่ากับ 3.57% โดยความคลาดเคลื่อนของทั้งสองโมเดลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามผลการศึกษาแสดงให้เห็นแนวทางการวัดการดูดกลืนแสงแบบทำลายน้อยที่สุดที่ให้ผลการประเมินค่าน้ำหนักเนื้อแห้งที่มีแนวโน้มที่ดี

คำสำคัญ: ทุเรียน, ความแก่, สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

Abstract

This research studied minimally destructive evaluation of durian maturity by near infrared spectroscopy (NIRS) in order to solve an exporting problem of immature durians. One hundred and forty durian samples of variety Mongthong were harvested at number of days after anthesis from 101 days to 122 days. The absorbance was acquired from the whole fruit with sliced rind and compare with the absorbance of the pulp. Obtained absorbances and measured dry matter percentage were used to develop a predicting model with partial least squares regression. The analysis results showed that a model based on pulp absorbance using FT-NIR spectrometer yielded better accuracy in prediction of the dry matter content (coefficient correlation, r_p and root meant square error of prediction of 0.78 and 3.02% respectively) than the model based on absorbance from the whole fruit with sliced rind (r_p = 0.69 and RMSEP = 3.57%). Although the accuracy of the two models appeared to be similar, the errors from the two models were found to be different significantly. However, the outcome of this study presented the possibility of using minimally destructive technique for evaluation of the dry matter content.

Keywords: Durian, Maturity, Near Infrared Spectroscopy

1. บทนำ

ทุเรียนเป็นผลไม้ส่งออกที่มีความสำคัญของประเทศไทย แหล่งปลูกทุเรียนที่สำคัญอยู่ในภาคตะวันออกและภาคใต้ โดยในปี 2559 ไทยส่งออกทุเรียนสดแช่แข็ง 19.436 ล้านตัน เป็นมูลค่า 2,029 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2560) เนื่องจากทุเรียนไทยมีรสชาติและคุณภาพดี ทำให้ผู้บริโภคในต่างประเทศให้การยอมรับ อย่างไรก็ตามในช่วงระยะเวลาก่อนการเก็บเกี่ยวผู้ส่งออกทุเรียนมักจะประสบปัญหาการส่งออกทุเรียนอ่อน ทำให้ตลาดส่งออกเกิดความเสียหาย ปัญหานี้เกิด

จากความผิดพลาดในการคัดเลือกทุเรียนที่มีความแก่ที่เหมาะสม ในปัจจุบันการเก็บทุเรียนแก่ต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามวิธีที่ใช้พิจารณาโดยเกษตรกรก็มีโอกาสทำให้เกิดความผิดพลาดในการคัดเลือกเป็นอย่างมาก มีงานวิจัยที่ศึกษาการวัดความแก่ทุเรียนโดยไม่ทำลายผลหรือทำลายน้อยที่สุดอย่างต่อเนื่อง ในปี ค.ศ. 2004 ได้มีการประยุกต์ใช้วิธีตรวจสอบคุณภาพทุเรียน โดยการวัดความแข็งแรงของก้านทุเรียนด้วยเครื่องมือบีบก้านที่สร้างขึ้นโดยเฉพาะร่วมกับการวัดเสียงเคาะเพื่อนำมาหาความถี่ธรรมชาติ (Neamsorn and Terdwongworakul, 2004) เนื้อทุเรียนนำมาอบแห้งเพื่อหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้งสำหรับใช้เป็นค่าอ้างอิงความแก่ การวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาความสัมพันธ์พบว่า ในการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณโดยเลือกตัวแปรทำนายเข้าโมเดลแบบขั้นพื้นที่ใต้กราฟแรงกดกับระยะยุบตัวและความถี่ธรรมชาติมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้ง ที่ค่า correlation coefficient (r) เท่ากับ 0.844 นอกจากนั้นมีการใช้สเปกโทรสโกปีในช่วงที่มองเห็น (350 nm ถึง 700 nm) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่หนามทุเรียน โดยค่าการดูดกลืนแสงจะสัมพันธ์กับคลอโรฟิลด์ แคโรทีนอยด์ และแอนโทไซยานินส์ของหนามทุเรียน (Timkhum and Terdwongworakul, 2012) ในการวิเคราะห์สร้างโมเดลจำแนกกลุ่มโดยใช้การดูดกลืนแสงของหนามเป็นตัวแปรทำนายกลุ่ม พบว่า สามารถคัดแยกทุเรียนออกเป็น 4 กลุ่มความแก่ด้วยความแม่นยำ 94.7% ต่อมา Kuson and Terdwongworakul (2013) ศึกษาการใช้ electrical impedance spectroscopy (EIS) เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสมที่สุดที่มีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับจำนวนวันหลังดอกบานของทุเรียน พบว่า ความต้านทานที่ความถี่ 141 และ 200 kHz สามารถนำมาใช้จำแนกกลุ่มทุเรียนแก่จากกลุ่มทุเรียนอ่อนด้วยความถูกต้อง 83.3% Near Infrared Spectroscopy (NIRS) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับความนิยมและการยอมรับอย่างกว้างขวางในการวัดคุณภาพภายในของผลไม้ทั้งผลที่มีเปลือกบาง เนื่องจากแสงสามารถทะลุผ่านเปลือกผลไม้ไปถึงเนื้อได้โดยไม่ต้องทำลายผล อย่างไรก็ตามทุเรียนเป็นผลไม้ที่มีเปลือกหนา ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ สำหรับการประเมินความแก่ทุเรียนทางอ้อม โดยวัดการดูดกลืนแสงที่ก้านผลและเปลือกซึ่งเป็นการทำลายผลทุเรียนบางส่วน เพื่อนำมาสร้างโมเดลจำแนกทุเรียนตามกลุ่มความแก่ (Somton et al., 2015) ผลการวิจัยพบว่า โมเดลที่สร้างจากข้อมูลการดูดกลืนแสงก้านร่วมกับเปลือกให้ความแม่นยำในการจำแนกทุเรียนออกเป็น 3 กลุ่มความแก่ด้วยความถูกต้อง 94.4% นอกจากนั้นมีงานวิจัย (Onsawai and Sirisomboon, 2015) ที่ศึกษาการประเมินค่าน้ำหนักเนื้อแห้งด้วยการดูดกลืนแสง NIR ซึ่งมีความแม่นยำที่ดี (r^2 = 0.89 และ RMSEP = 3.60)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาการตรวจสอบคุณภาพทุเรียนแก่แบบทำลายน้อยที่สุดด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้โดยวัดการดูดกลืนแสงของผลทุเรียนที่ฝานเปลือกออกบางส่วนเพื่อให้แสงสามารถส่องผ่านเปลือกถึงเนื้อทุเรียนได้โดยตรง เพื่อนำมาพัฒนาโมเดลเปรียบเทียบความแม่นยำกับการดูดกลืนแสงของเนื้อผลโดยตรง ซึ่งจะเป็นการพัฒนาการตรวจสอบคุณภาพทุเรียนแบบทำลายน้อยที่สุดสำหรับการแก้ปัญหาส่งออกทุเรียนอ่อน

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 เตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างผลทุเรียนพันธุ์หมอนทองถูกเลือกจากสวนที่อำเภอสวี จังหวัดชุมพร ผลทุเรียนจะถูกตัดที่ช่วงอายุ 101 108 115 และ 122 วันหลังดอกบาน (Days After Anthesis, DAA) จำนวนช่วงอายุละ 35 ผล รวม 140 ผล โดยระยะการเก็บเกี่ยวผลผลิตที่เหมาะสมอยู่ที่ 115-120 วัน หลังจากดอกบาน (ปิยะ, 2559) จากนั้นตัวอย่างจะถูกควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25°C เป็นเวลานาน 24 hr ก่อนทำการทดลอง

2.2 การวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้

ในการวัดการดูดกลืนแสงทั้งผล ตัวอย่างผลทุเรียนจะได้รับการฝานหนามและเปลือกออกขนาดพื้นที่กว้าง 3 cm ยาว 6 cm โดยจะฝานให้ชิดโคนหนามของตัวอย่างทุเรียนทุกผล (เหลือความหนาเปลือกในช่วง 0.49 - 12.04 mm) เพื่อให้เปลือกมีความบางและมีพื้นที่เรียบตรงตำแหน่งพูเอกก่อนนำมาวัดด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA FT-NIR, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany) ด้วยโหมดการวัดแบบ diffuse reflectance โดยวัดตำแหน่งละ 3 สเปกตรัม ตรงกลางพูเอกซึ่งพูเอกคือ พูของที่ผลเห็นชัดเจนและมีขนาดใหญ่ที่สุดเพียงพูเดียว (แสวง, 2527) โดยวัดที่ตำแหน่งเดิมทั้ง 3 ครั้ง ในช่วงเลขคลื่น 12500–3500 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 800–2857 nm) ที่ resolution เท่ากับ 16 cm^{-1} โดย 1 สเปกตรัมเกิดจากการเฉลี่ยในการสแกน 32 ครั้ง (Figure 1) จากนั้นนำตัวอย่างเดิมไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง portable NIR Quest (NIR Quest USB2000, Ocean Optics Co., Ltd., Dunedin, FL, USA) ในช่วงเลขคลื่น 11111-5882 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 900–1700 nm) ด้วยโหมดการวัดแบบ reflectance โดยตั้งค่า Integration time เท่ากับ 850 Scans to Average เท่ากับ 3 และค่า Boxcar Width เท่ากับ 6 บันทึกข้อมูลโดยโปรแกรม Spectra suite (Figure 2) ต่อจากนั้นนำเปลือกและเนื้อผลใต้เปลือกที่ถูกสแกนมาวัดการดูดกลืนแสงด้วยการวัดเช่นเดียวกับการวัดแบบทั้งผล

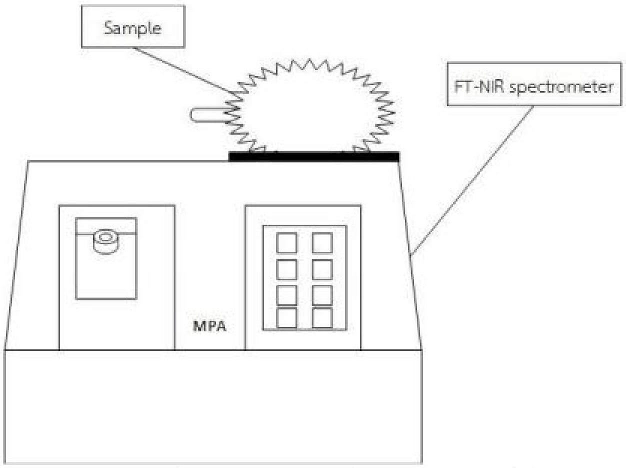


Figure 1 Setup for NIR spectral acquisition of Durian in reflectance mode using FT NIR spectrophotometer, (MPA FT-NIR, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany)

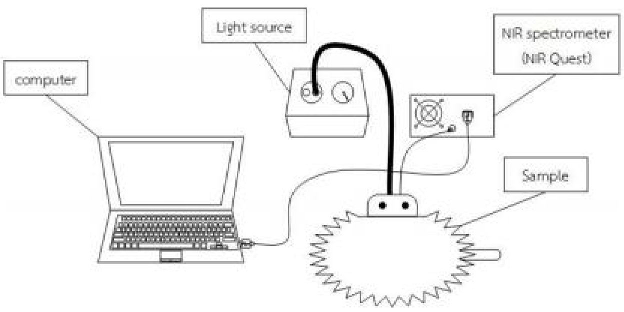


Figure 2 Setup for NIR spectral acquisition of Durian in reflectance mode by a portable NIR Quest, (NIRQuest, Ocean Optics, FL, USA)

จากนั้นนำเนื้อทุเรียนตรงตำแหน่งที่วัดค่าการดูดกลืนแสงไปหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้ง (percent dry weight, DW) โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 48 hr หรือจนกว่าน้ำหนักคงที่ (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2556)

2.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลจะเปรียบเทียบโมเดลของ 2 เครื่องมือวัด ได้แก่ FT-NIR spectrometer และ portable NIR Quest โดยสร้างโมเดลเชิงปริมาณ ด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR; The Unscrambler v.9.8; Camo; Oslo, Norway) เพื่อสร้างโมเดลการประเมินน้ำหนักเนื้อแห้งจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงทั้งผลผ่านเปลือกเปรียบเทียบกับโมเดลที่สร้างจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเนื้อผลโดยตรงเพื่อศึกษาเปรียบเทียบความแม่นยำของการวัดการดูดกลืนแสงผ่านเปลือกกับการวัดการดูดกลืนแสงของเนื้อผลโดยตรงซึ่งใช้เป็นค่าอ้างอิง โดยได้ศึกษาการปรับปรุงความแม่นยำของโมเดลด้วยการใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ เช่น Smoothing, Second derivative, Standard normal variate และ Multiplicative scatter correction เพื่อลดการกระเจิงแสงของสเปกตรัมเริ่มต้น ตัวอย่างในการวิเคราะห์จะแบ่งเป็น กลุ่มแคลิเบรชันและกลุ่มทำนายโดยใช้อัตราส่วน 1:1 ที่มีการกระจายตัวของค่าน้ำหนักเนื้อแห้งใกล้เคียงกัน โดยนำข้อมูลของตัวอย่างกลุ่มแคลิเบรชันมาสร้างโมเดล และนำโมเดลที่ได้มาทำนายค่าน้ำหนักเนื้อแห้งของตัวอย่างในกลุ่มทำนาย แล้วประเมินความแม่นยำของโมเดลจากการเปรียบเทียบด้วยค่า r_p (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการทำนาย) และค่า root mean square error of prediction (RMSEP)

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและสเปกตรัมที่ปรับแก้การกระเจิงแสงที่ใช้วิเคราะห์เชิงปริมาณดังกล่าวถูกนำมาวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยเทคนิค Discriminant Analysis (SPSS version 9.0, SPSS Inc., Chicago, USA) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้หลายตัวแปรในการสร้างโมเดลเชิงเส้นสำหรับการจำแนกกลุ่ม โดยตัวแปรตาม คือ กลุ่มความแก่ทุเรียนที่อ้างอิงจากอายุหลังดอกบาน โดยเปรียบเทียบระหว่างโมเดลที่สร้างจากการดูดกลืนแสงทั้งผลเปรียบเทียบกับโมเดลที่สร้างจากการดูดกลืนแสงของเนื้อผลโดยตรง โดยใช้กลุ่มตัวอย่างแคลิเบรชันในการสร้างโมเดลและนำโมเดลที่ได้มาจำแนกตัวอย่างในกลุ่มทำนาย ความแม่นยำของโมเดลเปรียบเทียบด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจำแนกทุเรียนออกเป็นกลุ่มความแก่ จากนั้นนำโมเดลที่สร้างจากเครื่อง FT-NIR spectrometer มาเปรียบเทียบความแม่นยำในการประเมินน้ำหนักเนื้อแห้งกับเครื่อง portable NIR Quest

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ข้อมูลทางสถิติของน้ำหนักเนื้อแห้ง

ค่าทางสถิติพื้นฐานของน้ำหนักเนื้อแห้งของตัวอย่างทุเรียนในกลุ่มกลุ่มแคลิเบรชันและกลุ่มทำนายแสดงใน Table 1 และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสุ่มสมบูรณ์พบว่า ในแต่ละช่วงอายุมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักเนื้อแห้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Table 2)

3.2 สเปกตรัมของทุเรียนทั้งผลและเนื้อผล

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทุเรียนทั้งผลและเนื้อผลโดยตรง ทุเรียนทั้งผลที่ผ่านเปลือกมีลักษณะของการดูดกลืนแสงโดยรวมใกล้เคียงกับเนื้อผลดังแสดงใน Figure 3 และ Figure 4 ตามลำดับ

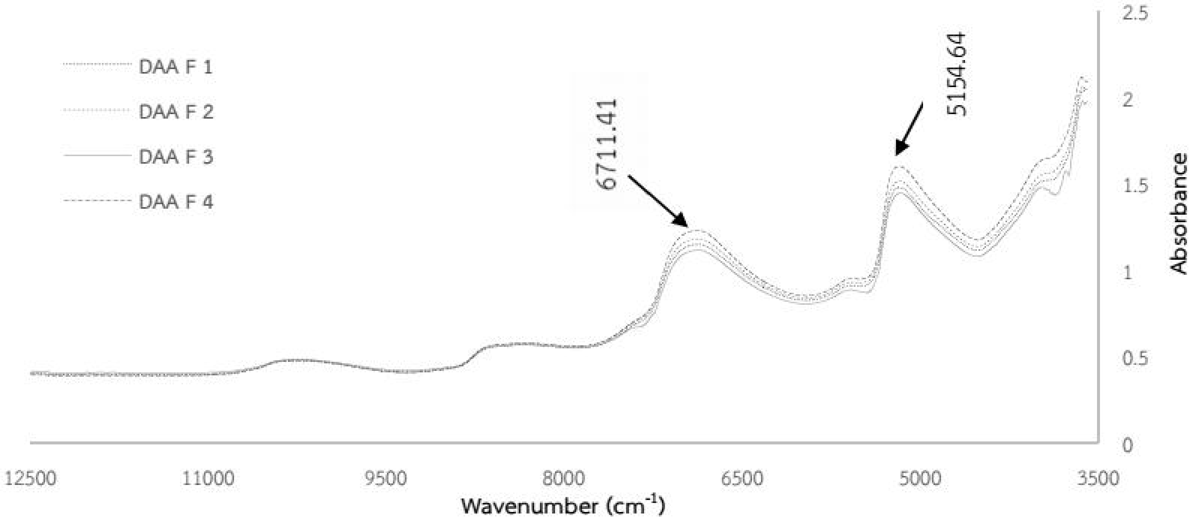


Figure 3 Absorbance of whole durian fruit with sliced rind as affected by a number of DAA (1 = 101 days, 2 = 108 days, 3 = 115 days and 4 = 122 days).

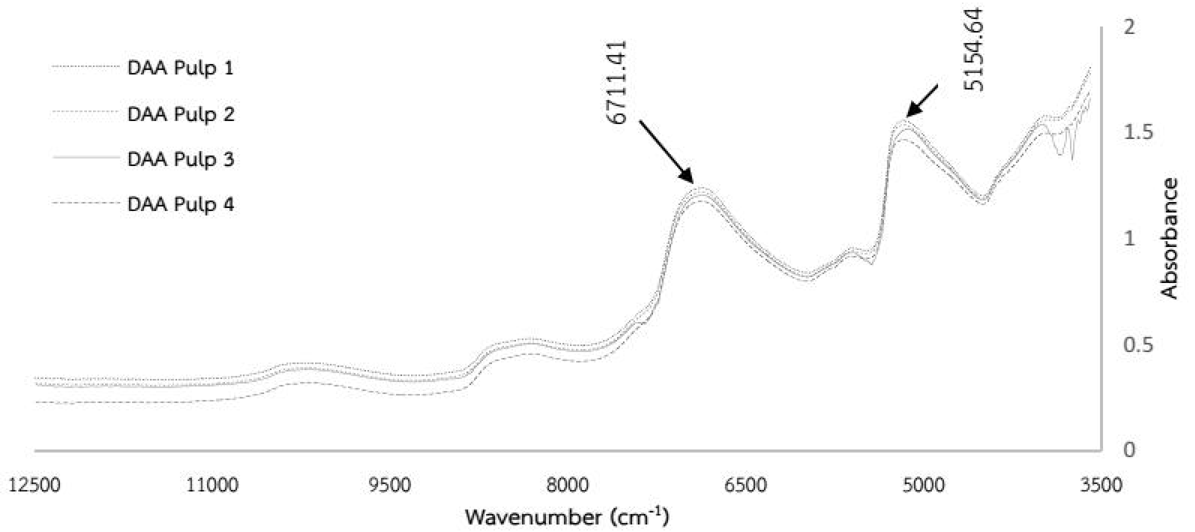


Figure 4 Absorbance of durian pulp with respect to a number of DAA (1 = 101 days, 2 = 108 days, 3 = 115 days and 4 = 122 days).

พีคการดูดกลืนแสงของน้ำเป็นพีคเด่นของผลทุเรียนและเนื้อผลที่ความยาวคลื่น 6711.41 และ 5154.64 cm^{-1} อย่างไรก็ตาม ใน Figure 4 ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงของเนื้อผลจะมีพีคขนาดเล็กที่ความยาวคลื่น 4397.13 cm^{-1} ซึ่งไม่เกิดขึ้นในการดูดกลืนแสงของทั้งผล (Figure 3) โดยพีคขนาดเล็กนี้ตรงกับการดูดกลืนแสงเนื่องจาก O-H stretching + C-H stretching ของ starch ซึ่งจะพบโดยทั่วไปที่ความยาวคลื่น 2276 nm (Osborne and Fearn, 1986)

Table 1 Minimum (Min), maximum (Max), mean, and standard deviation (SD) of dry matter of Durian pulp samples of calibration set and prediction set

Properties	Calibration set					Prediction set				
	No.	Max	Min	Mean	SD	No.	Max	Min	Mean	SD
Dry matter (%)	71	39.89	13.92	27.18	5.10	69	37.63	15.75	27.19	4.89

Table 2 A variance of dry matter in each days after anthesis

Days after anthesis	Dry matter (%)
101	21.76[a]
108	24.75[b]
115	29.67[c]
122	32.87[d]

3.3 ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณเพื่อสร้างโมเดลประเมินน้ำหนักเนื้อแห้ง

จากผลการทดลองกับตัวอย่างทุเรียน 4 ช่วงอายุ พบว่าโมเดลที่สร้างจากข้อมูลการดูดกลืนแสงของเครื่อง FT-NIR spectro-meter และเครื่อง portable NIR Quest มีความแม่นยำในการทำนายน้ำหนักเนื้อแห้งดังแสดงใน Table 3 โดยโมเดลที่ได้จากการวัดเนื้อผลโดยตรงและการวัดทั้งผลฝานเปลือก เมื่อพิจารณาเฉพาะเครื่อง FT-NIR spectrometer โมเดล PLSR ที่สร้างจากการดูดกลืนแสงเนื้อผลโดยตรงให้ความแม่นยำในการประเมินน้ำหนักเนื้อแห้งด้วยค่า rp = 0.78 และ RMSEP = 3.02% (Table 3) ซึ่งสูงกว่าโมเดลที่สร้างจากการดูดกลืนแสงของผลทุเรียนฝานเปลือก (r_p = 0.69 และ RMSEP = 3.57%) โดยโมเดลที่สร้างจากการวัดเนื้อผลให้ค่า r^2 น้อยกว่า Onsawai and Sirisomboon (2015) ซึ่งคาดว่ามีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากช่วงข้อมูลน้ำหนักเนื้อแห้งมีช่วงแคบกว่า และในช่วงเลขคลื่น 8000 – 11500 cm^{-1} มี noise เกิดขึ้นมาก ซึ่งอาจมาจากปัจจัยภายนอกที่ควบคุมได้ไม่สมบูรณ์ จึงส่งผลให้ค่า r^2 ที่ได้มีค่าน้อยกว่า

เพื่อประเมินว่าโมเดลการทำนายน้ำหนักเนื้อแห้งจากข้อมูลผลฝานเปลือกมีประสิทธิภาพเทียบเคียงได้กับการทำนายเนื้อแห้งโดยตรงจากโมเดลเนื้อผล ดังนั้นจึงได้วิเคราะห์เปรียบเทียบความแม่นยำในการทำนายน้ำหนักเนื้อแห้งของโมเดลที่สร้างจากข้อมูลการดูดกลืนแสงของเครื่อง FT-NIR spectrometer โดยโมเดลของทั้งผลฝานเปลือกว่ามีความแม่นยำใกล้เคียงกับโมเดลที่สร้างจากข้อมูลการดูดกลืนแสงของเนื้อผลโดยตรงหรือไม่ โดยเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนจากการทำนายของโมเดลผลฝานเปลือกว่าใกล้เคียงกับโมเดลเนื้อผลหรือไม่ ดังนั้นจึงนำค่าน้ำหนักเนื้อแห้งจริง น้ำหนักเนื้อแห้งที่ทำนายจากโมเดลของเนื้อผลและน้ำหนักเนื้อแห้งที่ทำนายจากโมเดลของผลฝานเปลือก มาวิเคราะห์ว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติหรือไม่ โดยใช้เทคนิคของ (Sedecor and Cochran 1989) ซึ่งนำค่าน้ำหนักเนื้อแห้งทั้งสองค่าดังกล่าวมาคำนวณค่า standard error of prediction (SEP) ของทั้งสองโมเดล (SEP_1 เป็นค่าโมเดลของเนื้อผลและ SEP_2 เป็นค่าของโมเดลทั้งผลฝานเปลือก) และหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างค่าความแตกต่างของค่าที่ทำนายกับค่าจริงจากทั้งสองโมเดล และคำนวณค่า k และ ค่า L ดังสมการ

$$k = 1 + \frac{2(1-r^2)t^2_{(N-2),0.025}}{N-2} \tag{1}$$

โดยที่ N คือ จำนวนตัวอย่าง, $t_{(N-2),\,0.025}$ คือ ค่า t-distribution ที่ upper 2.5% percentile และจำนวน degree of freedom เท่ากับ N

$$L = \sqrt{\left[k + \sqrt{(k^2-1)}\right]} \tag{2}$$

ต่อจากนั้นจึงนำค่า SEP ของทั้งสองโมเดลและค่า L มาคำนวณค่า $SEP_1/(SEP_2 \times L)$ และค่า $(SEP_1 \times L)/SEP_2$ ถ้าค่าที่ได้ครอบคลุมค่า 1.0 แสดงว่าค่า SEP ของโมเดลทั้งสองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้าค่าที่ได้ไม่ครอบคลุมค่า 1.0 ค่า SEP ของทั้งสองโมเดลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Sedecor and Cochran, 1989)

จากการคำนวณได้ค่า $SEP_1/(SEP_2 \times L)$ และ $(SEP_1 \times L)/SEP_2$ เท่ากับ 1.03 และ 1.33 ตามลำดับ ซึ่งไม่ครอบคลุมค่า 1.0 แสดงว่าค่า SEP (3.48%) ของโมเดลทั้งผลฝานเปลือกมีความแตกต่างจากค่า SEP (2.97%) ของโมเดลเนื้อผลอย่างมีนัยสำคัญ ในที่นี้คือ มีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามค่า 1.03 มีความใกล้เคียงกับ 1.0 แสดงว่าผลการศึกษามีแนวโน้มที่ดี

ผลที่ได้แสดงว่า การวัดการดูดกลืนแสงจากผลฝานเปลือกยังไม่สามารถนำมาใช้ทำนายน้ำหนักเนื้อแห้งได้แม่นยำเพียงพอ เมื่อเปรียบเทียบกับการวัดการดูดกลืนแสงจากเนื้อผลโดยตรง แต่มีแนวโน้มที่ดีและเป็นการวัดทำลายผลเพียงบางส่วน ดังนั้นจึงได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับเลขคลื่นสำคัญที่มีการดูดกลืนแสงที่สอดคล้องกันของทั้งสองโมเดลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า regression coefficient กับเลขคลื่น

จากกราฟ regression coefficient ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบ Partial Least Squares Regression (PLSR) ของทั้งสองโมเดลดังแสดงใน Figure 5 สำหรับเนื้อโดยตรงและ Figure 6 สำหรับทั้งผลฝานเปลือก พบว่าเลขคลื่นที่ใกล้เคียงกันคือ 5168.56 cm^{-1} และ 5758.71 cm^{-1} ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ Osborne et al. (1993) ที่ได้รายงานว่าที่เลขคลื่น 5155 cm^{-1} มีโครงสร้างเป็นน้ำ และที่ 5755 cm^{-1} มีโครงสร้างเป็นโปรตีน อย่างไรก็ตาม ค่า regression coefficient ของโมเดลทั้งผลฝานเปลือกจะมี noise เกิดขึ้นในช่วง ความยาวคลื่นสูง ซึ่งมีมากตั้งแต่ประมาณ 8000-11500 cm^{-1} อาจเกิดจากกรณีที่ทั้งผลฝานเปลือกมีข้อมูลการสะท้อนแสงของเนื้อต่ำกว่าการสะท้อนแสงของเนื้อโดยตรง เพราะว่ามียังเปลือกอยู่

Table 3 Prediction performances of dry matter by PLSR models for durian samples of 4 classes based on number of days after anthesis

Treatment	Factors	r_p	RMSEP (%)	Bias (%)
SNV treated spectra of durian pulp from FT-NIR spectrometer	7	0.78	3.02	0.0023
SNV treated spectra of durian pulp from NIR-Quest spectrometer	3	0.25	4.61	0.0118
SNV treated spectra of whole fruit with sliced rind from FT-NIR spectrometer	8	0.69	3.57	-0.016
SNV treated spectra of whole fruit with sliced rind from NIR-Quest spectrometer	1	0.24	4.84	0.0127

SNV: Standard normal variate; RMSEC: Root mean square

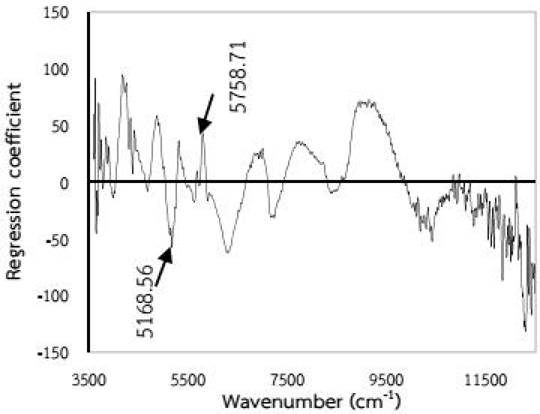


Figure 5 Regression coefficient of PLSR model using spectra of durian pulp from 4 classes of maturity based on DAA by SNV methods.

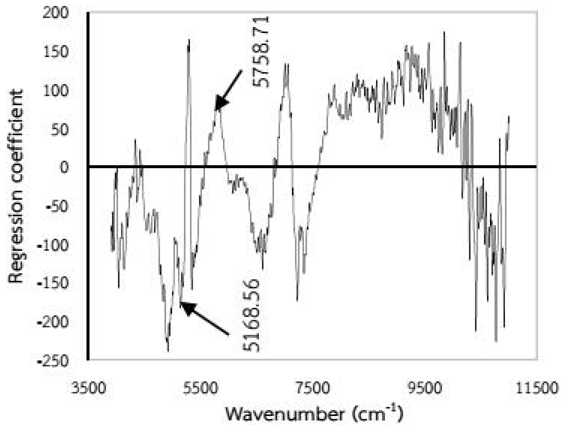


Figure 6 Regression coefficient of PLSR model using spectra of the whole fruit with sliced rind from 4 classes of maturity based on DAA by SNV methods.

3.4 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อสร้างโมเดลจำแนกกลุ่มความแก่ทุเรียน

โมเดลจำแนกกลุ่มที่สร้างจากการดูดกลืนแสง ของผลทุเรียนฝานเปลือกใน 4 ช่วงอายุของเครื่อง FT-NIR spectrometer สามารถจำแนกกลุ่มทุเรียนออกเป็นสี่กลุ่มความแก่ได้ด้วยความถูกต้อง 87.48% (Table 4) ซึ่งมากกว่าโมเดลที่ได้จากเครื่อง NIR-Quest spectrometer (36.09%) สำหรับโมเดลจำแนกกลุ่มที่สร้างด้วยข้อมูลการดูดกลืนแสงของเนื้อผลทุเรียนโดยตรงของเครื่อง FT-NIR spectrometer สามารถจำแนกกลุ่มได้ความถูกต้องสูงกว่าโมเดลที่สร้างจากผลทุเรียนฝานเปลือกด้วยความถูกต้อง 92.5% โดยการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง หาได้จากค่าที่ทำนายเทียบกับค่าจริงโดยการกำหนดค่าอายุทั้งหมดของตัวอย่างเป็น 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ จากนั้นกำหนดค่ากลางเช่น ถ้าช่วงอายุแรกมีค่าเป็น 1 ช่วงอายุที่สองมีค่าเป็น 2 ค่ากลางคือ 1.5 หากค่าการทำนายตัวอย่างในช่วงอายุแรก มีค่า 1.6 ก็ถือว่าตัวอย่างนั้นอยู่ในช่วงอายุที่สอง และนับเป็นตัวอย่างที่ทำนายผิด หรือหากว่าตัวอย่างในช่วงอายุที่สอง มีค่าการทำนาย 1.4 ก็จะนับว่าอยู่ในช่วงอายุแรก และจะนับเป็นการทำนายผิด จากนั้นคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง โดยการนำจำนวนตัวอย่างที่ทำนายถูกต้อง/จำนวนตัวอย่างทั้งหมด คูณด้วย 100

Table 4 Classification performance of durian by PLS-DA models for durian samples of 4 classes based on number of days after anthesis

	Spectra of pulp	Spectra whole fruit
spectra from FT-NIR spectrometer	92.5%	87.48%
spectra from NIR-Quest spectrometer	58.91%	36.09%

จากการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทั้งผลและของเนื้อผล เบื้องต้นพบว่า ตัวอย่างที่อายุ 115 วันหลังดอกบานจากเครื่อง portable NIR Quest มีรูปแบบการดูดกลืนที่ผิดปกติ

แตกต่างจากตัวอย่างที่เหลืออีกสามอายุ ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการวัดค่าการดูดกลืนแสง เนื่องจากเครื่อง portable NIR Quest ต้องทำการวัดค่า dark และ reference เองจึงสร้างโมเดลจำแนกกลุ่มใน 3 ช่วงอายุ โดยโมเดลที่สร้างจากการค่าดูดกลืนแสง ของผลทุเรียนผ่านเปลือกของเครื่อง FT-NIR spectrometer สามารถจำแนกกลุ่มทุเรียนออกเป็นสามกลุ่มความแก่ได้ด้วยความถูกต้อง 89.23% (Table 5) ซึ่งมากกว่าโมเดลที่ได้จากเครื่อง portable NIR Quest (36.1%) สำหรับโมเดลจำแนกกลุ่มที่สร้างด้วยข้อมูลการดูดกลืนแสงของเนื้อผลทุเรียนโดยตรงของเครื่อง FT-NIR spectrometer สามารถจำแนกกลุ่มได้แม่นยำสูงกว่าโมเดลที่สร้างจากผลทุเรียนผ่านเปลือกด้วยความถูกต้อง 94.09%

Table 5 Classification performance of durian by PLS-DA models for durian samples of 3 classes based on number of days after anthesis.

	Spectra of pulp	Spectra of whole fruit
spectra from FT-NIR spectrometer	94.09%	89.23%
spectra from portable NIR Quest	55.19%	36.10%

ความถูกต้องในการจำแนกกลุ่มที่สร้างจากข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของผลทุเรียนมีค่าน้อยกว่าโมเดลเนื้อผลโดยตรง เนื่องจากข้อมูลการดูดกลืนแสงมีข้อมูลของเปลือกรวมอยู่ด้วย อย่างไรก็ตามผลความถูกต้องในการจำแนกกลุ่มความแก่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้ข้อมูลทั้งผลในการจำแนกกลุ่ม ซึ่งการศึกษาเพื่อลดผลกระทบจากการดูดกลืนแสงของเปลือกเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการจำแนกกลุ่มเป็นงานที่จะต้องศึกษาต่อไป

4 สรุป

เทคนิค NIRS สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินน้ำหนักเนื้อแห้งและจำแนกทุเรียนตามช่วงอายุ โดยโมเดล 4 ช่วงอายุที่สร้างด้วยข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่วัดผ่านเปลือกสามารถทำนายน้ำหนักเนื้อแห้งด้วยค่า r_p = 0.69 ค่า RMSEP = 3.57% ซึ่งแม่นยำน้อยกว่าโมเดลที่สร้างจากสเปกตรัมเนื้อผลโดยตรง (r_p = 0.78 ค่า RMSEP = 3.02%) โดยค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทำนองเดียวกันโมเดลจำแนกกลุ่มที่สร้างจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่วัดผ่านเปลือกให้ความถูกต้องในการจำแนกกลุ่มความแก่ทุเรียนเท่ากับ 87.48% ซึ่งต่ำกว่ากรณีโมเดลที่สร้างจากสเปกตรัมเนื้อผลโดยตรง (ความถูกต้องในการจำแนกกลุ่มเท่ากับ 92.5%)

การเพิ่มความแม่นยำในการประเมินน้ำหนักเนื้อแห้งและความถูกต้องในการจำแนกกลุ่มจะต้องมีการศึกษาต่อไปเพื่อลดผลกระทบจากการดูดกลืนแสงของเปลือก

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

6 เอกสารอ้างอิง

ปิยะ, 2559. ระยะการเก็บเกี่ยวทุเรียน. แหล่งข้อมูล: https://www.gotoknow.org/posts/285780. เข้าถึงเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2559.

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2556. THAI AGRICULTURAL STANDARD, หน้า. 1-9.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2560. สถิติการส่งออกทุเรียนสด. แหล่งข้อมูล: http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php. เข้าถึงเมื่อ 18 มกราคม 2560.

แสวง, 2527. นิยามพูเอกของทุเรียน. แหล่งข้อมมูล: http://www.lib.kps.ku.ac.th/SpecialProject/Horticulture/2538/Ms/SomsukAt/chapter1.pdf. เข้าถึงเมื่อ 9 มีนาคม 2560

Kuson, P., Terdwongworakul, A., 2013. Minimally-destructive evaluation of durian maturity based on electrical impedance measurement. Journal of Food Engineering 116, 50-56.

Neamsorn, N., Terdwongworakul, A., 2004. Non-destructive Maturity Measurement of “Montong” Durian Using Stem Strength and Resonant Frequency. วิศวกรรมสาร มข. 33, 555-563.

Onsawai, S., Sirisomboon, P., 2015. Determination of dry matter and soluble solids of durian pulp using diffuse reflectance near infrared spectroscopy. JOURNAL OF NEAR INFRARED SPECTROSCOPY 23, 167-179.

Osborne B., Fearn T., Hindle P. H., 1993. Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis, Longman Scientic and Technical, Harlow, UK.

Somton, W., Pathaveerat, S., Terdwongworakul, A., 2015. Application of Near Infrared Spectroscopy for Indirect Evaluation of "Monthong" Durian Maturity. International Journal of Food Properties 18, 1155-1168.

Snedecor, G. W., Cochran, W. G. 1989. Statistical Methods. Iowa State University Press, Eighth Edition Ames, IA, USA. 534 p.

Timkhum, P., Terdwongworakul, A., 2012. Non-destructive classification of durian maturity of 'Monthong' cultivar by means of visible spectroscopy of the spine. Journal of Food Engineering 112, 263-267.

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 (2560) 17-25
Available online at www.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ

บทความวิจัย

ISSN 1685-408X

การพัฒนาเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่

Development of a Brassica Alboglabra Vegetable Seeder in Tray for Modern Agriculture

เกรียงไกร แซมสีม่วง*, จุลพงศ์ พฤกษะศรี

Grianggai Samseemoung*, Junlaphong Bhucksasri

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี,12110

Department of agricultural engineering, Faculty of engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Pathumthani, 12110

*Corresponding author: ผศ. ดร. เกรียงไกร แซมสีม่วง, 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

เครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่นี้ทำการพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของเกษตรกรผู้ปลูกผักคะน้าในระบบโรงเรือนโดยเฉพาะ เพื่อทดแทนการใช้แรงงานคน เนื่องจากทำให้เกิดการสิ้นเปลืองเมล็ดพันธุ์ เวลา และเกิดความเมื่อยล้าแก่ผู้ปฏิบัติงาน โดยหลักการทำงานเน้นแบ่งออกเป็น ส่วนที่ 1 ชุดส่งกำลัง ซึ่งเน้นใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.5 Hp ต่อเข้ากับชุดเกียร์ทดรอบเพื่อขับโซ่ลำเลียง ส่วนที่ 2 ชุดบรรจุดิน เน้นบรรจุดินลงในถาดเพาะมาตรฐานขนาด 105 หลุม (แบบ CHIA TAI 105 I) โดยมีตัวคลุกเคล้าและกวาดดิน ทำให้ดินไหลลงสู่ถาดเพาะได้ในปริมาณที่กำหนด และส่วนที่ 3 ชุดหยอดเมล็ด เน้นหยอดเมล็ดพันธุ์ลงในถาดเพาะด้วยจำนวน 4 เมล็ดต่อหลุมแบบทำงานต่อเนื่อง ผลการทดสอบเครื่องพบว่าที่ความเร็วรอบของชุดหยอด 8 rpmหรือความเร็วของถาดเพาะกล้าที่ 0.035 m s^{-1} มีความสามารถทำงานเป็น 140 trays hr^{-1} คิดเป็นอัตรา 14,700 holes hr^{-1} โดยมีร้อยละของการงอกหลังจากหยอดเป็น 86.62 และมีร้อยละการสูญเสียของเมล็ดเฉลี่ยเท่ากับ 12.48 และเมื่อเปรียบเทียบกับการหยอดโดยใช้แรงงานคน พบว่าความสามารถทำงานของคนเป็น 16 trays hr^{-1} หรืออัตรา 1,680 holes hr^{-1} โดยมีร้อยละของการงอกหลังจากหยอด และร้อยละของการสูญเสียเป็น 87.01 และ 13.16 ตามลำดับ

คำสำคัญ: เครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้า, เกษตรกรรมสมัยใหม่, ชุดหยอดเมล็ดพันธุ์, ชุดบรรจุดิน, ถาดเพาะกล้า

Abstract

The *Brassica alboglabra* vegetable seeder with tray for modern agriculture in this research was developed to specifically response the *Brassica alboglabra* planter in greenhouse. The machine aims to solve the problems of seed losing, long operating time, labors and the human fatigue of seeding. There were three units in this semi-automatic vegetable seeder. Firstly, the power transmission unit was designed to work with 0.5 Horsepower of electrical motor that assembled to the transmission gear and chain conveyor. Secondly, the soil packaging units designed for seeding tray type 105 holes (a CHIA TAI 105 I type) operate with the soil mixing and soil sweeping devices to contact the soil into the tray holes. And finally, the seeder unit was designed to control seed flow rate around 4 seeds per hole. The proper speed of the seeder unit (8 rpm) or seeding tray speed at 0.035 m s^{-1} was recognized. The performance could be obtained 140 seeding trayshr^{-1} or 14,700 holes hr^{-1}. The seed losing is around 12.48 %. The growth rate was obtained 86.62%. On the other hand, the performance of labor seeding was obtained 16 seeding trays hr^{-1} or 1,680 holes hr^{-1}. The growth rate and seed losing were obtained 87.01 and 13.16% respectively.

Key words: Brassica alboglabra vegetable seeder, Modern agriculture, Seeder unit, Soil packaging unit, Trays

1 บทนำ

ผู้บริโภคผักปลอดสารพิษในปัจจุบันนั้นมีมากขึ้น (เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการ, 2555) โดยเฉพาะผักคะน้า (Brassica Aboglabra) ซึ่งเป็นผักที่ได้รับความนิยมปลูกและบริโภคกันมาก โดยจะบริโภคส่วนของใบและลำต้นพบว่าประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกคะน้าประมาณ 48,731 ไร่ ให้ผลผลิตรวม 58,019.86 ตันราคาขายส่งจะอยู่ที่ 20 บาท/กิโลกรัม (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) ซึ่งผลผลิตทั้งหมดใช้สำหรับบริโภคภายในประเทศ โดยคะน้าสามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี ปลูกได้ในดินแทบทุกชนิดที่มีความชื้นในดินสูงสม่ำเสมอ มีความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของดินอยู่ระหว่าง 5.5-6.8 (เมืองทอง และ สุรีรัตน์, 2532) เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสและให้ผลผลิตที่น่าพอใจในสภาพอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส (เกษม, 2524) อายุการเก็บเกี่ยวคะน้าสำหรับการบริโภคสด คือ อายุ 45 วัน ซึ่งเป็นระยะที่ตลาดมีความต้องการมาก (สุนทร, 2540) พันธุ์คะน้าที่นิยมปลูกในประเทศไทยเป็นคะน้าดอกขาวทั้งสิ้นซึ่งในการปลูกผักคะน้าปลอดสารพิษนั้น จะทำการปลูกในระบบโรงเรือนแบบปิดเพื่อง่ายต่อการควบคุมปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ สำหรับการเพาะปลูกภายในระบบโรงเรือนแบบปิดนั้น ปัญหาที่เกิดขึ้นจะพบว่า ในการเพาะเมล็ดพันธุ์ลงในถาดเพาะกล้าแต่ละครั้งนั้นมีจำนวนของเมล็ดพันธุ์ในแต่ละหลุมไม่เท่ากันส่งผลให้มีอัตราการงอกไม่สม่ำเสมอ (นิพนธ์, 2548) เกิดการสิ้นเปลืองเมล็ดพันธุ์และใช้เวลาค่อนข้างมากในการหยอดแต่ละถาดเพาะกล้า ส่งผลทำให้เกิดความเมื่อยล้าขึ้น จากปัญหาดังกล่าวมีผลทำให้ต้นทุนในการเพาะปลูกแต่ละครั้งนั้นเพิ่มสูงขึ้นการผลิตผักคุณภาพมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นการนำเทคโนโลยีด้านโรงเรือนเข้ามาช่วยในการปลูกคะน้าสามารถยกระดับปริมาณและคุณภาพผลผลิตคะน้าต่อหน่วยพื้นที่ให้สูงขึ้นการเพาะปลูกคะน้าภายใต้โรงเรือนช่วยทำให้ระบบการผลิตมีความประณีตมากขึ้นเนื่องจากใช้พื้นที่น้อยสามารถควบคุมระบบการจัดการต่างๆ ซึ่งได้แก่การจัดการดินน้ำปุ๋ยและการควบคุมวัชพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนี้เกษตรกรยังสามารถปลูกพืชได้หลายชนิดตลอดปีและเลือกปลูกชนิดพืชที่ตลาดต้องการในแต่ละฤดูกาลทำให้มีรายได้อย่างต่อเนื่องและลดต้นทุนการผลิตในระยะยาวโดยการปลูกคะน้าภายใต้โรงเรือนให้ได้ปริมาณและคุณภาพที่ดีนั้นมีองค์ประกอบที่สำคัญหลายประการเริ่มตั้งแต่การวางแผนการจัดการดินการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และธาตุอาหารก่อนปลูกให้เหมาะสม

Figure 1 Characteristics and controlled greenhouses model (เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการ, 2555).

Figure 2 แสดงให้เห็นถึงวิธีการส่วนใหญ่ที่เกษตรกรใช้กันในการหยอดเมล็ดพันธุ์ผักลงในถาดเพาะกล้า

(a)

(b)

Figure 2 Seeding methods with labor force (https://-medium.com/@thitiluang)

Figure 3 เป็นชุดเครื่องมือโรยเมล็ดข้าวที่ออกแบบและผลิตโดยคุณอภิชาติ ชิณบุตรซึ่งแบบนี้สามารถเรียงซ้อนถาดได้ถึง 25

ชั้นก่อนนำดินเพาะมาโรยทับต่อไป ช่วยให้สามารถหยอดเมล็ดพันธุ์ลงในถาดได้วันละหลายพันถาด

Figure 3 Specifications of the tool kit sprinkled rice seeds (http://www.kasetporpeang.com).

Figure 4 แสดงการใช้งานโต๊ะเพาะกล้าข้าวโดยต้องใช้แรงงานคน 2-4 คน และยังสามารถเพาะกล้าในถาดหลุมนาโยนได้วันละ 500-600 ถาดต่อวัน

Figure 4 Specifications of the Table planting rice (http://www.raiporjai.com).

ดังนั้นจากปัญหาที่พบและความต้องการของเกษตรกรผู้ปลูกผักคะน้าในโรงเรือนที่ต้องการให้ประสิทธิภาพในการหยอดและปริมาณผลผลิตมีจำนวนเพิ่มสูงขึ้นนั้น ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่ขึ้น เพื่อที่จะทำให้เกิดการหยอดแบบสม่ำเสมอ (The Hamilton drum seeder, 2010) มีเมล็ดพันธุ์ผักในแต่ละหลุมเท่ากัน ลดอัตราการสูญเสียเมล็ดพันธุ์ผักจากการหยอดให้น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบจากวิธีการเดิมโดยใช้แรงงานคน และเป็นการลดเวลาและต้นทุนการประกอบการของเกษตรกรให้ต่ำลง

2 อุปกรณ์และวิธีการ

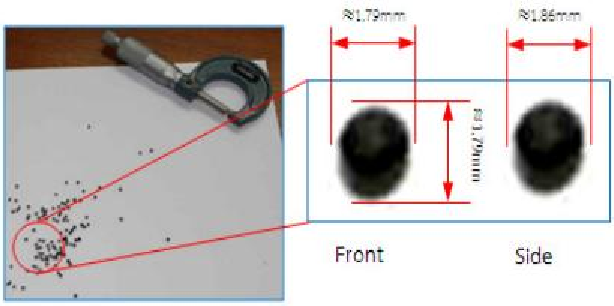
การวิจัยประกอบไปด้วย การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดพันธุ์ผักคะน้า การออกแบบ และสร้างเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าฯ โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของเมล็ดพันธุ์ผักคะน้า

วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย, d (mm) ของเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าจำนวน 20 เมล็ด (Figure5 (a) และ Figure 5 (b)) และคำนวณหาปริมาตรของทรงกลมเฉลี่ยด้วยสมการที่ (1) (นิพนธ์, 2548)

$$\text{ปริมาตรของทรงกลม} = (4/3) \times \pi \times (d/2)^3 \qquad (1)$$

(a)



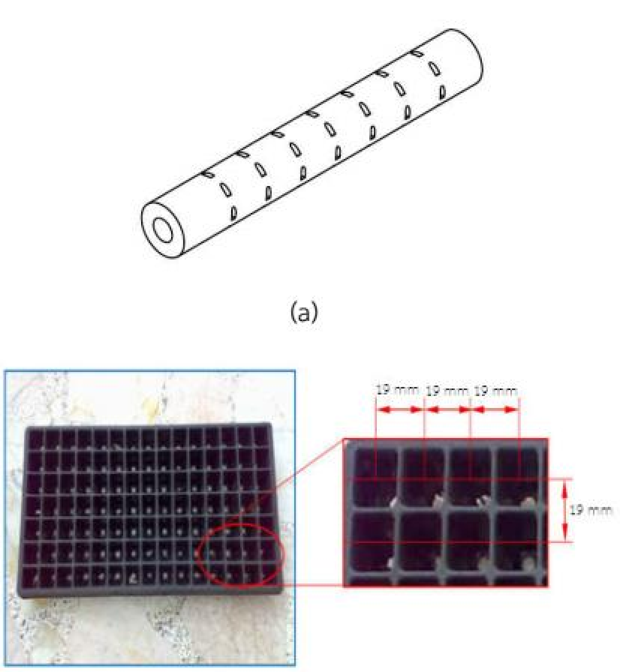
(b)

Figure 5 Seed diameter measurement, (a); micrometer measured and (b); an approximately Brassica Albo-glabra seed diameter.

2.2 ศึกษาการออกแบบและสร้างเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าแบบมีประสิทธิภาพสูงสำหรับถาดเพาะกล้า

2.2.1 ***การออกแบบชุดหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้า***

ชุดหยอดเมล็ดออกแบบโดยใช้พลาสติกแข็ง (ซุปเปอร์ลีน) ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 43 mm ยาว 300 mm เจาะร่องด้วยระยะห่าง 19 mm ทั้งหมดจำนวน 7 แถว (Fiure6a) ตามระยะห่างระหว่างหลุมในถาดเพาะ (Figure6b) โดยถาดเพาะกล้ามาตรฐาน 105 หลุม ขนาด กว้าง x ยาว เท่ากับ 14 x 30 เซนติเมตร จากข้อมูลทางกายภาพของเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าที่ได้พบว่าเมล็ดมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเป็น 1.84 mm และมีค่าปริมาตรของทรงกลมเฉลี่ยเป็น 3.26 mm^3 จากข้อมูลดังกล่าวจึงทำการเจาะร่องสำหรับรับเมล็ดเมล็ดพันธุ์ขนาด กว้าง x ยาว x ลึก เท่ากับ 2.25 x 8 x 4 mm^3 โดยเมล็ดพันธุ์ผักจะเรียงตัวกันอยู่ด้านในประมาณ 4 เมล็ด ดังแสดงใน Figure 6a



(a)

(b)

Figure 6 Seeding unit material, (a); cylindrical seeding unit, and (b); seeding tray distance designed.

2.2.2 ***ออกแบบระบบส่งถ่ายกำลังของชุดต้นกำลังเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้า***

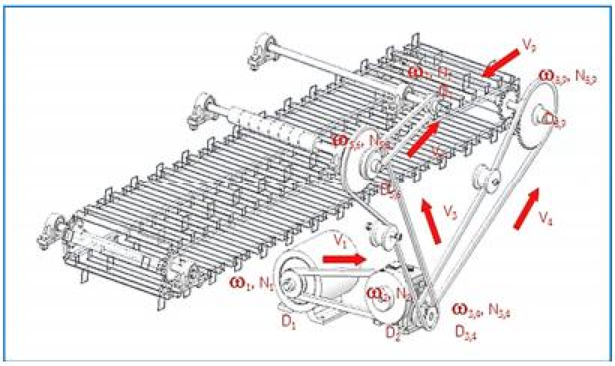


Figure 7 Force direction of the semi-automatic *Brassica Alboglabra* vegetable seeder transmission system.

การทำงานของเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่นี้ จะเริ่มต้นจากต้นกำลังขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.5 Hp โดยจะส่งกำลังไปยังชุดหยอดเมล็ด ชุดบรรจุดินใส่ถาดเพาะ และชุดโซ่ลำเลียงตามลำดับ โดยมอเตอร์จะส่งถ่ายกำลังไปยังชุดเกียร์ทดรอบด้วยความเร็วเชิงเส้น V_1 และมีค่าอัตราทด I_1 (คำนวณได้จากสมการที่ 2และ 3) และจากชุดเกียร์ทดรอบนี้ ทำการส่งถ่ายกำลังแยกออกไปขับชุดโซ่ลำเลียงด้วยค่าความเร็วเชิงเส้น V_9 ชุดหยอดเมล็ด V_5 และชุดบรรจุดินใส่ลงในถาดเพาะ V_6 (Figure 7) จากความเร็วสัมพัทธ์ของชุดทั้งสองดังกล่าวซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4 (มานพ, 2545)

$$V_1 = R_1 \times \omega_1 \tag{2}$$

เมื่อ V_1 คือ ความเร็วเชิงเส้นตัวขับ(m s^{-1}), R_1 คือ รัศมีพูลเล่ย์ตัวขับ (mm) และ ω_1 คือ ความเร็วเชิงมุมตัวขับ (rad/s)

$$I = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{D_1}{D_2} \tag{3}$$

เมื่อ I คือ ค่าอัตราทด, ω_2 คือ ความเร็วเชิงมุมตัวตาม (rad s^{-1}), D_1คือ เส้นผ่านศูนย์กลางพูลเล่ย์ตัวขับ (mm) และ D_2คือ เส้นผ่านศูนย์กลางพูลเล่ย์ตัวตาม (mm)

$$V_{5\text{-}6} = V_6 + V_5 \tag{4}$$

เมื่อ V_6 คือ ความเร็วเชิงเส้นชุดบรรจุดินใส่ลงในถาดเพาะ (m s^{-1}) และ V_5 คือ ความเร็วเชิงเส้นชุดหยอดเมล็ด (m s^{-1})

จากสมการที่ 2-4 ทำให้สามารถออกแบบเครื่องหยอดที่ทำการทดรอบแล้วจนได้ความเร็วรอบของชุดหยอด 5 rpm,8 rpm และ 12 rpmโดยความเร็วเชิงเส้นของโซ่ลำเลียง (ความเร็วถาดเพาะกล้า) ที่วัดได้คือ 0.020, 0.035 และ 0.049 m/s ตามลำดับ

เครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่ที่สร้างขึ้น ดังแสดงใน Figure 8

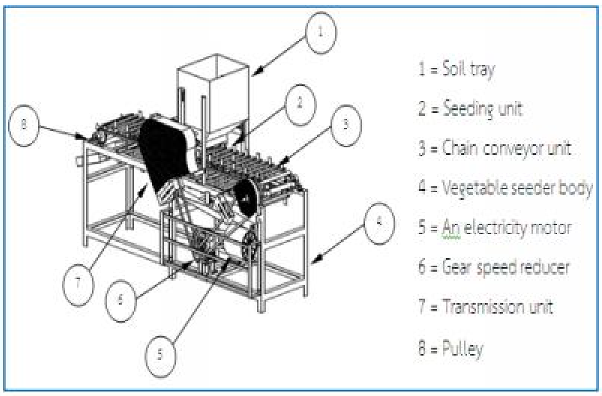


Figure 8 The semi-automatic Brassica Alboglabra vegetable seeder components (All dimension in mm).

2.3 *การประเมินสมรรถนะของเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่*

ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าฯ ด้วยความเร็วรอบของชุดหยอดที่ 5 rpm กับความเร็วเชิงเส้นของโซ่ลำเลียง 0.020 m/s, 8 rpm กับความเร็วเชิงเส้นของโซ่ลำเลียง 0.035 m/s, 12 rpm กับความเร็วเชิงเส้นของโซ่ลำเลียง 0.049 m/s ความเร็วรอบละ 3 ซ้ำ หยอดต่อเนื่องจำนวนซ้ำละ 5 ถาดเพาะกล้า ปริมาณเมล็ดพันธุ์ที่หยอดจำนวน 4 เมล็ดต่อหลุม เนื่องจากอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์จากบริษัทที่ใช้ทดสอบประมาณ 98% ความงอก (ที่มา: บริษัท เจียไต๋ จำกัด) ดังนั้นเพื่อลดปัญหาความคลาดเคลื่อนในการหาอัตราการงอกหลังจากหยอดแล้ว จึงต้องเผื่อปริมาณเมล็ด

พันธุ์ที่ใช้หยอดเป็นจำนวน 4 เมล็ดต่อหลุม ดัง Figure 9 อธิบายลักษณะภาพรวมของการศึกษาหาค่าร้อยละของการสูญเสียของเมล็ดพันธุ์ ต่อ 1 ถาดเพาะ และทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การงอกระหว่างวิธีการหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าโดยใช้เครื่องหยอดกับการใช้แรงงานคนทำการหยอดโดยคะน้าที่ได้จากการเพาะกล้าเมื่อมีความสูงของต้นกล้าประมาณ 50 mm ขั้นตอนต่อไปจะทำการแยกปลูกภายในระบบโรงเรือนแบบปิดต่อไป

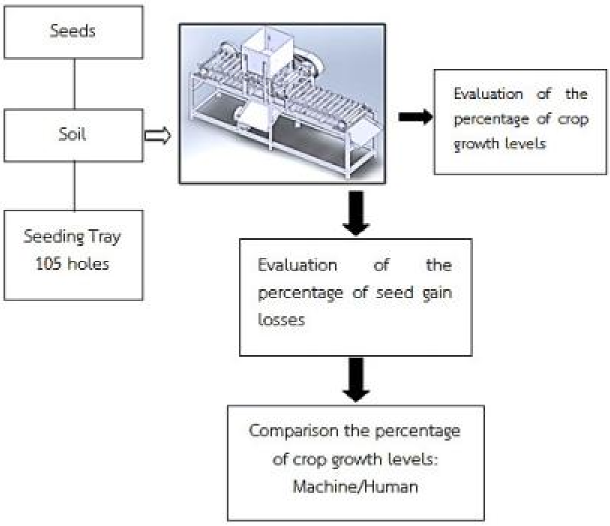


Figure 9 Semi-automatic *Brassica Alboglabra* vegetable seeder processing steps.

โดยที่ Figure 10 แสดงการหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าโดยใช้เครื่อง ซึ่งเมื่อเครื่องทำงานดินจะร่วงลงมาบรรจุในถาดเพาะในขณะเดียวกันกับที่ชุดหยอดก็จะเกิดการหมุนปล่อยเมล็ดพันธุ์ลงมาในหลุมพอดี หลังจากนั้นเมื่อทำการหยอดจนครบแล้วก็จะนำไปเพาะในโรงเรือนมาตรฐาน

(a)

(b)

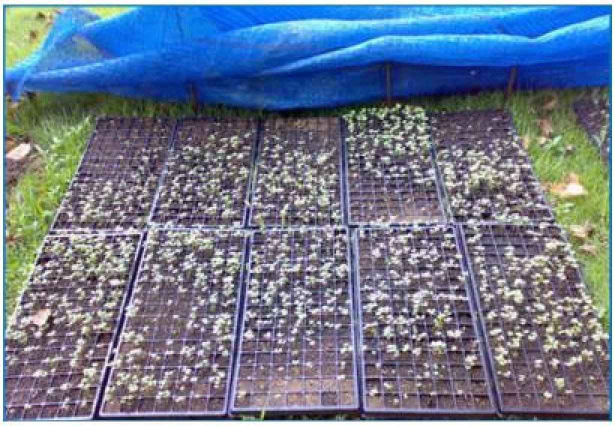
(c)

Figure 10 Vegetable seeder (a); seeded by machine, (b); soil cutting unit, and (c); crop growth level.

Figure 11 แสดงการหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าโดยใช้แรงงานคน หลังจากนั้นเมื่อทำการหยอดจนครบแล้วก็จะนำไปเพาะกล้าในโรงเรือนมาตรฐาน

(a)

(b)



(c)

Figure 11 Hand seeding (a); seeded by labor-force, (b); manual soil cutting unit, and (c); crop growth level.

การคำนวณหาค่าร้อยละของการสูญเสียของเมล็ดพันธุ์ ต่อ 1 ถาดเพาะค่าร้อยละของอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ ต่อ 1 ถาดเพาะและค่าการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย(บาท)นั้น สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (5) (6) และ (7) ตามลำดับต่อจากนั้น ทำการเปรียบเทียบอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ระหว่างใช้เครื่องหยอดกับใช้แรงงานคนหยอดต่อไป

ร้อยละของการสูญเสียของเมล็ดพันธุ์ ต่อ 1 ถาดเพาะ = [(นน.เมล็ดที่แตกหัก (กรัม) + นน.เมล็ดที่ร่วงหล่น (กรัม))/นน.เมล็ดทั้งหมด (กรัม)] x 100 (5)

การสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย (บาท)=(ราคาต้นทุน (บาท) x ปริมาณการสูญเสียของเมล็ด (กรัม))/นน.เมล็ดทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ (กรัม) (6)

ร้อยละของอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ ต่อ 1 ถาดเพาะ = (จำนวนต้นอ่อนจากเมล็ดที่งอก (ต้น) /จำนวนเมล็ดที่ใช้หยอดทั้งหมด (เมล็ด)) x 100 (7)

2.4 หลักการทำงานของเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่

การทำงานของเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่นี้ เริ่มจากต้นกำลังขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.5 Hp โดยจะส่งกำลังไปยังชุดหยอดเมล็ด ชุดบรรจุดินใส่ถาดเพาะ และชุดโซ่ลำเลียง เมื่อถาดเพาะมาถึงตำแหน่งพอดีแล้ว ดินจะร่วงลงมาบรรจุในถาดเพาะในขณะเดียวกันชุดหยอดก็จะเกิดการหมุนปล่อยเมล็ดพันธุ์ลงมาในหลุมพอดี (เกรียงไกร แซมสีม่วง และคณะ, 2559)

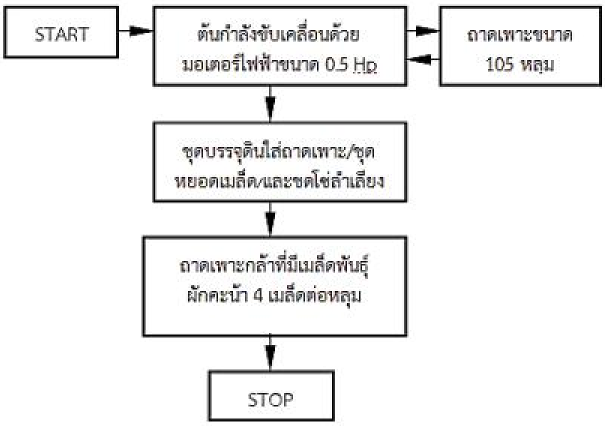


Figure 12 Created the unmanned remote control garbage collecting boat procedure.

2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ในการพัฒนาเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่นี้ จะวิเคราะห์ความแตกต่างของ treatment โดยใช้โปรแกรม SPSS 11.5 ซึ่ง T-Test ใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอัตราการงอกของเมล็ดพันธ์โดยใช้เครื่องหยอดกับใช้แรงงานคนหยอด และ Analysis of variance (ANOVA) ใช้ในการวิเคราะห์ความแตกต่างของความเร็วรอบของชุดหยอดต่อประสิทธิภาพการหยอดและเวลาที่ใช้ในการหยอดเมล็ดพันธุ์ โดยจะใช้ Least Significant Difference (LSD) ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ treatment ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2.6 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

*2.6.1 **การวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่ายโดยเฉลี่ย***

การประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวมจะเกี่ยวกับต้นทุนในการใช้งานเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่ โดยจะสมมุติว่าเกษตรกรผู้ใช้ทำการซื้อเครื่องหยอดที่พัฒนาขึ้นฯ แทนการใช้แรงงานคน ซึ่งค่าใช้จ่ายโดยรวมจะประกอบด้วย ค่าเสื่อมราคาของเครื่องหยอดฯ (คิดค่าเสื่อมราคาโดยวิธีเส้นตรงเมื่อประมาณอายุการใช้งานของเครื่องหยอดต้นแบบฯ ได้ 5 ปี) และค่าเสียโอกาสของเงินทุน (คิดดอกเบี้ยที่ 10%) ซึ่งเป็นต้นทุนคงที่ทั้งหมด จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการหยอดเมล็ดพันธุ์ผักสำหรับเพาะกล้าในโรงเรือนมาตรฐานและต้นทุนแปรผัน (Hunt, 1995)

*2.6.2 **การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน***

เป็นการคาดคะเนว่า เมื่อทำการลงทุนใช้เครื่องหยอดต้นแบบที่พัฒนาขึ้นฯ ไปแล้ว จะได้รับผลตอบแทนกลับคืนมาในจำนวนเงินเท่ากับที่ลงทุนไปก่อนหน้านี้ภายในระยะเวลากี่ปี โดยทำการคิดดอกเบี้ยที่อัตรา 10% แต่ไม่ทราบค่า *n* ทำการเปลี่ยนค่า *n* ไปเรื่อยๆ จนค่าทั้งสองข้างของสมการเท่ากัน ก็จะได้ค่า *n* โดยที่ค่าตัวแปร *n* นั้น คือ ระยะเวลาคืนทุนจากการใช้เครื่องหยอดต้นแบบที่พัฒนาขึ้นฯ (ปี)

2.6.3 ***การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน***

เป็นการคาดคะเนว่าการหาจำนวนหน่วยขายของเครื่องหยอดต้นแบบที่พัฒนาขึ้นฯ ที่ทำให้จำนวนยอดขายรวมเท่ากับค่าใช้จ่ายรวม/ต้นทุนทั้งหมด จึงเป็นจุดที่ไม่มีกำไรหรือขาดทุนเกิดขึ้นในการใช้เครื่องหยอดต้นแบบที่พัฒนาขึ้นฯ โดยสามารถคำนวณได้จากสูตร

ราคาขาย-ต้นทุนคงที่ - ต้นทุนแปรผัน = กำไร (8)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าที่ใช้เป็นกลุ่มตัวอย่างในการทดสอบ

จากการวัดตัวอย่างเมล็ดพันธุ์ผักคะน้า เป็นจำนวนทั้งหมด 20 เมล็ด พบว่าเมล็ดมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเป็น 1.84 mm และมีค่าปริมาตรของทรงกลมเฉลี่ยเป็น 3.26 mm^3 ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Seeding properties; Seed diameter (mm) and the average volume of a sphere (mm^3).

Number of samples	Seed diameter (mm)	The average volume of a sphere (mm^3)
1-20	1.841±0.0386	3.265±0.2083

หมายเหตุ: รายงานผลการทดลองโดยค่า $\bar{X} \pm$ SD

3.2 ทดสอบและประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องและความเร็วรอบชุดหยอดที่เหมาะสมของเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่

จากผลการทดสอบพบว่าการหยอดเมล็ดพันธุ์ผักในถาดเพาะแบบติดต่อกันถาดต่อถาด (ขอบของถาดชนต่อกัน) เป็นผลให้เกิดระยะของขอบถาดต่อถาดเท่ากับระยะห่างของหลุม 1 หลุมพอดี ทำให้เกิดการสูญเสียของเมล็ดในการหยอดขึ้นระหว่างรอยต่อนี้ด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 5.29 ของเมล็ดพันธุ์ที่ใช้ทดสอบต่อรอบๆ ละ 40 g (จำนวน 4 ซอง) เมื่อใช้ทดสอบที่ความเร็วรอบของชุดหยอดเหมาะสม 8 rpm และที่ความเร็วเชิงเส้นของโซ่ลำเลียง 0.035 m/s พบว่าความสามารถในการหยอดที่เวลา 1 hr สามารถหยอดได้มากที่สุดคือ 140 trays และมีปริมาณเมล็ดที่สูญเสียเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วชุดหยอดทั้ง 3 ระดับ ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Seeding unit basic information; speed (rpm), seeding time (minute), and the percentage of seed gain losses (%)

Speed (rpm)	Seeding time (minute)	percentage of seed gain losses (%)
5	0.40 ± 0.02^{c}	2.45 ± 0.01^{b}
8	0.24 ± 0.04^{b}	2.23 ± 0.01^{a}
12	0.15 ± 0.06^{a}	12.5 ± 0.01^{c}

หมายเหตุ: รายงานผลการทดลองโดยค่า $\bar{X} \pm C.V.$ และตัวอักษร a,b,c คือ ความแตกต่างกันของตัวแปรที่ทำการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ถ้าตัวอักษรเหมือนกันแสดงว่าตัวแปรไม่แตกต่างกัน ถ้าตัวอักษรแตกต่างกันแสดงว่าตัวแปรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS Version 11.5 พบว่าความเร็วรอบมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการหยอดเมล็ดลงในถาดเพาะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ความเร็วรอบ 12 rpm ใช้เวลาในการหยอดน้อยที่สุด รองลงมาคือ ที่ความเร็วรอบ 8 rpm และ 5 rpm ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ทางสถิติยังพบอีกว่าความเร็วรอบมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์เมล็ดที่สูญเสียอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ความเร็วรอบ 8 rpm ให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมล็ดที่สูญเสียน้อยที่สุด รองลงมาก็คือ ที่ความเร็วรอบ 5 rpm และ 12 rpm ตามลำดับดังนั้นคำแนะนำคือ ควรใช้ความเร็วรอบในการหยอดเมล็ดพันธุ์ที่ 8 rpm โดยเครื่องหยอดจะทำงานด้วยประสิทธิภาพสูงสุด โดยจะเกิดอัตราการร่วงหล่นของเมล็ดพันธุ์น้อยที่สุด

จากข้อมูลเวลาที่ใช้ทั้งหมดระหว่างการหยอดด้วยเครื่องหยอดและคนหยอด แสดงให้เห็นว่าเครื่องมีความสามารถในการทำงานสูงกว่า โดยใช้เวลาน้อยกว่าการใช้แรงงานคนถึง 9 เท่า เมื่อเปรียบเทียบที่จำนวนถาดเท่ากัน ในเวลา 1 hr เครื่องสามารถหยอดได้ 140 ถาดเพาะ ในขณะที่คนสามารถหยอดได้เพียง 16 ถาดเพาะ และร้อยละของการสูญเสียของเมล็ดจะแปรผันอยู่ระหว่าง 7.88-16.56 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 12.48 ในขณะที่การหยอดด้วยแรงงานคนมีร้อยละของการสูญเสียมีค่าแปรผันอยู่ระหว่าง 10.90-17.22 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 13.16

3.3 ทดสอบหาอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าระหว่างใช้เครื่องหยอดกับใช้แรงงานคนหยอด

ค่าร้อยละของการงอกของเมล็ด (Table3) ที่หยอดด้วยเครื่องหยอดเมล็ดนั้นแปรผันอยู่ระหว่าง 83.42-89.82 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 86.62 ในขณะที่ร้อยละการงอกของเมล็ดเมื่อใช้แรงงานคนหยอด พบว่าค่าแปรผันอยู่ในช่วง 84.92-89.10 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 87.01 โดยที่อัตราการงอกจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง อาทิเช่น ความสม่ำเสมอในการให้น้ำ สภาพแวดล้อม ลักษณะโครงสร้างของดิน ปริมาณแสงแดด และคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ผัก

Table 3The comparative of the crop growth level at speed 8 rpm between machine and labor-force by seed amount per tray 420 seeds.

Percentage of crop growth level (%)	Amount of tray	$\overline{X}$	S.D.	t	Sig.
Machine	5	86.62	2.45	-1.051	0.324
Labor-force	5	87.01	1.50		

จากผลการทดลองพบว่าวิธีการหยอดโดยใช้เครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้านั้น จะให้อัตราการงอกของเมล็ดใกล้เคียงกับการหยอดโดยใช้แรงงานคน ดังนั้นจึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%.

3.4 ผลการวิเคราะห์และประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์ของเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่

จากผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยคิดที่ราคาเครื่องต้นแบบฯ 30,000 bath อายุการใช้งาน 5 year อัตราดอกเบี้ยคิดที่ 10% ใช้ผู้ควบคุมเครื่อง 1 คน ความสามารถในการทำงานของเครื่องหยอด 140trayshr^{-1} หรือในอัตรา 14,700 holes hr^{-1}และทำงาน 1,440 hr year^{-1}จะได้ค่าใช้จ่ายจากการใช้เครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่ต่อวันจะอยู่ที่ 0.092 bath day^{-1} โดยคิดจากมูลค่าเครื่อง ราคา 30,000 bath ความสามารถทำงานเป็นต่อวันเท่ากับ 117,600 holes day^{-1} ในขณะที่ถ้าใช้แรงงานคนในการหยอดต่อวันจะอยู่ที่ 0.88 bath day^{-1} โดยคิดจากค่าแรงงานคนจำนวน 1 คน ราคา 300 bath day^{-1} ทำงานวันละ 8 hr ความสามารถทำงานต่อวันเท่ากับ อัตรา 13,440 holes day^{-1}.

ดังนั้นถ้าใช้เครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าแทนแรงงานคนจะสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 2,287.50 bath/day และสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลาเพียง 15days หรือประมาณ 0.5 เดือน

4 สรุป

เครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าในถาดเพาะกล้าสำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ มีความเร็วรอบของชุดหยอดเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าที่เหมาะสมคือ 8 rpm โดยความสามารถการทำงานของเครื่องหยอดคิดเป็น 140 trays hr^{-1} หรือในอัตรา 14,700 holes hr^{-1}โดยเครื่องหยอดจะทำงานด้วยประสิทธิภาพสูงสุด มีค่าเฉลี่ยร้อยละการงอกเจริญเติบโตหลังจากการหยอดแล้วคิดเป็น 86.62 และเมื่อเปรียบเทียบกับแรงงานคน พบว่า ความสามารถในการทำงานคิดเป็น 16 trays hr^{-1} หรือในอัตรา 1,680 holes hr^{-1} และมีค่าเฉลี่ยร้อยละของการงอกเจริญเติบโต หลังจากการหยอดแล้วคิดเป็น 87.01การประเมินผลในเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่ามีอัตราการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องหยอดแบบอัตโนมัติ และที่สำคัญเกษตรกรสามารถซ่อมบำรุงตัวเครื่องเองได้ โดยมีข้อจำกัดอยู่ที่ ชุดหยอดเมล็ด ซึ่งออกแบบมาให้ใช้ได้เฉพาะกับถาดเพาะแบบ CHIATAI105I เท่านั้น

5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีจังหวัดปทุมธานี ที่สนับสนุนเงินงบประมาณ อุปกรณ์ บุคลากร และสถานที่ ในการเตรียมการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้ซึ่งความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้วิจัยโดยที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีนั้น ไม่จำเป็นที่จะต้องเห็นด้วยเสมอไป

6 เอกสารอ้างอิง

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2558. สถิติปริมาณการเพาะปลูกพืชผักปีการผลิต 2557/2558. ระบบสารสนเทศการผลิตทางด้านการเกษตร. แหล่งข้อมูลwww.oae.go.th /estimate, เข้าถึงเมื่อ28 ธันวาคม 2559.1-240.

เกษม พิลึก. 2524. ผักกาดและผักกะหล่ำ. (ผักฤดูหนาวเล่ม1). สาขาพืชผัก ภาควิชาพืชสวนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 1-96.

เกรียงไกร แซมสีม่วง, เกียรติศักดิ์ แสงประดิษฐ์, อภิรัฐ ปิ่นทอง. 2559. การพัฒนาระบบตรวจสอบโรคกล้วยไม้ควบคุมระยะไกลร่วมกับเทคนิคประมวลผลภาพถ่ายเพื่อควบคุมการให้สารเคมีแบบแม่นยำสำหรับโรงเรือนมาตรฐาน. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 22(1), 7-20.

นิพนธ์ ไชยมงคล. 2548. ระบบข้อมูลผัก. สาขาพืชผัก ภาควิชาพืชสวน คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 1-93.

มานพ ตันตระบัณฑิต. 2545.การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล 1. พิมพ์ครั้งที่2. สำนักพิมพ์กรุงเทพฯ .1-372.

เมืองทอง ทวนทวี, สุรีรัตน์ ปัญญาโตนะ. 2532. ผักบ้านเรา: สวนผัก. โรงพิมพ์ทั่งฮั้วซิน, กรุงเทพฯ.1-456.

สุนทร เรืองเกษม. 2540. ผักกินใบ. ครั้งที่ 2. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ. 1-87.

เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการ. 2555. ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยฮ่องไคร้อันเนื่องมาจากพระราชดำริอำเภอดอยสะเก็ดจังหวัดเชียงใหม่ 1(1).1-24.

The hamilton drum seeder. 2010. HAMILTON DESIGN LTD. Nethercliff, Green Lane, Littlewick Green, Maidenhead, Berks SL6 3RH, England. แหล่งที่มา www.hamilton-design.co.uk. 1-2.

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

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย **บทความวิจัย**
ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 (2560) 26-35
ISSN 1685-408X
Available online at www.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ

การทดสอบเครื่องวัดความพรุนที่ทำงานด้วยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน

Testing of a Porosity Measuring Apparatus Based on Comparisons of Pressure Decay Rates

วรินทร์ คูหามณีโชติ[1], วัชรพล ชยประเสริฐ[1]*, ภวินท์ ธัญภัทรานนท์[1], เอนก สุขเจริญ[2]
Warin Koohamaneechote[1], Watcharapol Chayaprasert[1]*, Pawin Thanpattranon[1], Anak Sukcharoen[2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140
[1]Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University – Kamphaengsaen Campus, Nakorn Phatom, 73140
[2]ฝ่ายเครื่องจักรกลเกษตรแห่งชาติ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140
[2]National Agricultural Machinery Center, Kasetsart University – Kamphaengsaen Campus, Nakorn Phatom, 73140
*Corresponding author: Tel: +66-34-351-896, E-mail: fengwpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

เครื่องวัดความพรุนที่ทำงานด้วยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันถูกพัฒนาขึ้นความพรุนสามารถหาได้จากการทดสอบความดัน (pressurization test) จำนวน 2 ครั้ง ซึ่งเครื่องวัดความพรุนสามารถทำการทดสอบความดันได้โดยอัตโนมัติครั้งที่ 1 เป็นภาชนะบรรจุว่างเปล่าและในครั้งที่ 2 มีตัวอย่างอยู่ภายในภาชนะบรรจุความดันอากาศภายในภาชนะบรรจุถูกทำให้สูงขึ้นจนกระทั่งถึงค่าคงที่ค่าหนึ่งหลังจากนั้น อากาศจะถูกปล่อยให้ไหลออกจากภาชนะเป็นเหตุให้ความดันอากาศภายในภาชนะลดลงความดันภายในภาชนะบรรจุที่ว่างเปล่าจะลดลงด้วยอัตราที่ช้ากว่าความดันภายในภาชนะบรรจุที่มีวัสดุ อัตราการลดลงของความดันที่แตกต่างกันนี้ถูกใช้ในการคำนวณเพื่อหาปริมาตรและความพรุนของวัสดุ ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีลักษณะแตกต่างกัน 4 ชนิดคือ วัสดุทรงกลมจำนวน 3 ขนาดได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.35 (±0.01), 5.94 (±0.01) และ 37.86 (±0.19) mm ซึ่งมีจำนวน ~123,400, 9,435 และ 24 ชิ้น ตามลำดับ และวัสดุทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.91 (±1.43) mm ยาว 134.02 (±0.24) mm จำนวน 17 ชิ้นผลการวัดความพรุนจากเครื่องวัดความพรุนถูกเปรียบเทียบกับผลการวัดอ้างอิงด้วยวิธีการวัดขนาดโดยตรง หรือด้วยเครื่อง gas pycnometer ความถูกต้องของผลการวัดถูกแสดงอยู่ในรูปของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (absolute percentage error) และถูกประเมินผลกระทบต่อความถูกต้องของผลการวัดด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งมีปัจจัยหลักคือ pressure half-life ของภาชนะบรรจุว่างเปล่า, ความดันเริ่มต้น และชนิดของวัสดุผลการวัดให้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 4.44% นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติปัจจัยหลัก PHL_{empty} มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการทดลองเปรียบเทียบกับเครื่อง gas pycnometer และปัจจัยความดันเริ่มต้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 2 การทดลอง ซึ่งปฏิสัมพันธ์ของคู่ปัจจัยนี้ให้ค่านัยสำคัญด้วย (Sig. < 0.05) อย่างไรก็ตาม ปัจจัยชนิดของวัสดุไม่มีผลกระทบต่อความถูกต้องอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. > 0.05) ดังนั้น เครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นให้ผลการวัดที่ถูกต้องในระดับที่น่าพอใจ

คำสำคัญ: ความพรุน, เครื่องวัด, การทดสอบความดัน, ค่าครึ่งชีวิตความดัน

Abstract

A porosity measuring apparatus based on comparisons of pressure decay rates was developed. The porosity of a granular sample was determinated by conducting two pressurization tests. The apparatus could perform these pressurization tests automatically. In the first and second tests, the sample chamber was empty and filled with the sample, respectively. The air pressure inside the chamber was increased to a specified level and then the inside air was released from the chamber. The pressure in the empty chamber decreased slower than that in the chamber filled with the sample. These different pressure decay rates were used in the calculation of the solid volume and then the porosity of the sample. The four different types of samples were used in this study, three sizes of spherical samples with diameters of 2.35 (±0.01), 5.94 (±0.01) and 37.86 (±0.19) mm and one size of cylindrical samples with a diameter of 21.91 (±1.43) mm and a height of 134.02

(±0.24) mm. The numbers of the sample pieces were ~123,400, 9,435 and 24, and 17, respectively. The porosity measurements from the apparatus were compared against the reference porosities measured based on either the dimensional measurement method or a gas pycnometer. The measurement accuracy was expressed in terms of absolute percentage error and was analyzed using analysis of variance (ANOVA). The main factors were the pressure half-life of the empty sample chamber, initial pressure and type of the sample. The maximum absolute percentage error was 4.44%. In addition, the statistical analysis showed that the PHL_{empty} (i.e., main factors) have significant effects in experimental comparing with the gas pycnometer and the initial pressure have significant effects in both experiment which the interaction of those factors have significant on the measurement accuracy (Sig. < 0.05). However, the sample factor did not have significant effects on the measurement accuracy (Sig. > 0.05). As a result, the porosity measuring apparatus developed in the present study yielded satisfying accuracy.

Keywords: Porosity, Measuring apparatus, Pressurization test, Pressure half-life

1 บทนำ

ความพรุนรวม (total porosity, ε_{tot}) คือ สัดส่วนของปริมาตรช่องว่าง (pore volume, V_p) ที่รวมถึงรอยแตก (crack), โพรงช่องว่าง (vug) ต่อปริมาตรรวม (bulk volume, V_b) ของวัสดุ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$\varepsilon_{tot} = \frac{V_p}{V_b} \times 100\% \quad (1)$$

ความพรุนยังผล (effective porosity, ε) หรือเรียกอีกอย่างว่าความพรุนจลนศาสตร์ (kinematic porosity) ถูกนิยามว่าเป็นสัดส่วนของบริเวณของปริมาตรช่องว่างที่ซึ่งของไหลสามารถแพร่เข้าไปได้ (connected pore, Vc) ต่อปริมาตรรวม (Glover, 2001) ดังนั้น ความพรุนยังผลจะมีค่าน้อยกว่าความพรุนรวมและสามารถหาได้จากสมการที่ 2

$$\varepsilon = \frac{V_c}{V_b} \times 100\% \quad (2)$$

ความพรุนเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของวัสดุพรุนที่นอกจากจะมีความสัมพันธ์กับปริมาตรและความหนาแน่นของวัสดุพรุนแล้ว ยังมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติอื่นๆ อีกด้วยเช่น ความพรุนมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการไหลของอากาศผ่านวัสดุพรุน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการพาความร้อน (convective heat transfer) (Nithiarasu et al., 1996; Alazmi and Vafai, 2004) สยาม และคณะ (2015) กล่าวว่า ความสามารถในการซึมผ่านได้ (permeability) มีความสัมพันธ์กับช่องว่างภายในวัสดุพรุน (pore space) และเป็นสมบัติที่สำคัญในการพิจารณาโดยเฉพาะเมื่อใช้ในทางวิศวกรรมโยธา เช่น ดินที่ใช้ในการก่อสร้างถนนหรือเขื่อน จะต้องเป็นดินมวลละเอียด มีความสามารถในการซึมผ่านได้ต่ำ เนื่องจากว่าหากน้ำซึมผ่านดินที่ยึดเกาะกันอยู่ได้ง่ายจะทำให้คันดินสูญเสียความแข็งแรงได้ ดังนั้น จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวัดความพรุนหลากหลายวิธี ซึ่งวิธีที่ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวางและสะดวกต่อการใช้งานคือ การแทนที่ด้วยของเหลว (liquid displacement) (Glover, 2001; Alan et al., 2014; Encyclopædia Britannica, 2016) และการขยายตัวของก๊าซ (gas expansion) (Glover, 2001; Leclaire et al., 2003)

นอกจากนี้ (Chayaprasert et al., 2014) ได้พัฒนาวิธีการวัดปริมาตรและความพรุนโดยใช้หลักการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน ซึ่งใช้การทดสอบความดัน (pressurization test) แบบ pressure decay (P-t) test เป็นวิธีพื้นฐานของการวัดในกระบวนการทดสอบ P-t test อากาศจะถูกอัดเข้าสู่ภายในโครงสร้างปิด จนกระทั่งถึงความดันเริ่มต้นค่าหนึ่งแล้วจึงหยุดอัดอากาศหากโครงสร้างปิดมีรอยรั่วอยู่ อากาศจะรั่วออกตามรอยรั่วบนโครงสร้าง และความดันภายในโครงสร้างปิดจะลดลงอย่างช้าๆพฤติกรรมการลดลงของความดันภายในโครงสร้างปิดสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 3

$$p_t = \frac{p_i}{2^{\frac{t}{PHL}}} \quad (3)$$

โดยที่ p_t คือ ความดันภายในโครงสร้างปิดที่เวลาใดๆ (Pa), p_i คือ ความดันเริ่มต้น (Pa), t คือ เวลา (s) และ PHL คือ pressure half-life หรือค่าครึ่งชีวิตความดัน (s) ซึ่งถูกนิยามเป็นระยะเวลาที่ความดันภายในโครงสร้างปิดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความดันเริ่มต้นจากสมการที่ 3 สามารถพิสูจน์ได้ว่า PHL มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับปริมาตรช่องว่างภายในโครงสร้างปิดดังนั้น ปริมาตรและความพรุนของวัสดุที่เป็นเมล็ด (granular material) สามารถหาได้จากการทดสอบ P-t test จำนวน 2 ครั้ง โดยที่ในการทดสอบครั้งที่ 1 โครงสร้างปิดไม่มีวัสดุอยู่ภายใน และในการทดสอบครั้งที่ 2 วัสดุที่ต้องการวัดปริมาตรหรือความพรุนถูกบรรจุอยู่ภายในโครงสร้างปิดการทดสอบ P-t test เพื่อหาความพรุนหรือปริมาตรจำเป็นต้อง

กำหนดเงื่อนไขการทดสอบให้เท่ากันทั้ง 2 ครั้ง (อภิรัฐ, 2557) คือ โครงสร้างปิดมีช่องเปิดให้อากาศรั่วไหลออกมา, คุณสมบัติของช่องเปิดไม่เปลี่ยนแปลง, อุณหภูมิและความดันแวดล้อมบรรยากาศโดยรอบสถานที่ทดสอบมีค่าคงที่ และความดันเริ่มต้นไม่เปลี่ยนแปลงทั้งนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรช่องว่างอากาศภายในโครงสร้างปิด (V_1) และค่าครึ่งชีวิตความดัน (PHL_1) จากการทดสอบครั้งที่ 1 และค่าดังกล่าวจากการทดสอบครั้งที่ 2 (V_2 และ PHL_2) สามารถแสดงได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{V_1}{PHL_1}=\frac{V_2}{PHL_2} \quad (4)$$

นอกจากนี้ ปริมาตรของวัสดุที่อยู่ภายในโครงสร้างปิด (V_S) ซึ่งไม่นับรวมปริมาตรช่องว่างอากาศระหว่างเนื้อวัสดุ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$V_s=\left(1-\frac{PHL_2}{PHL_1}\right)V_1 \quad (5)$$

และยังสามารถพิสูจน์ต่อไปได้ว่า ความพรุนยังผลของวัสดุที่เป็นเมล็ดคือ อัตราส่วนร้อยละของ PHL_2 ต่อ PHL_1 ดังสมการที่ 6

$$\varepsilon=\frac{PHL_2}{PHL_1}\times 100\% \quad (6)$$

ในงานวิจัยนี้ เครื่องวัดความพรุน (porosity measuring apparatus) ที่ใช้หลักการของ (Chayaprasert et al., 2014) เป็นพื้นฐานการทำงานถูกสร้างขึ้น และผู้วิจัยประเมินความถูกต้องของเครื่องโดยทำการทดลองวัดความพรุนของตัวอย่างรูปทรงเรขาคณิตและเปรียบเทียบค่าความพรุนที่ได้กับการวัดขนาดโดยตรง (dimensional measurement method) และเครื่อง gas pycnometer (เครื่องวัดความหนาแน่น)

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ฮาร์ดแวร์ (hardware)

เครื่องวัดความพรุนที่ถูกพัฒนาขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ระบบจ่ายอากาศ (air supply system) และระบบควบคุม (control system) (Figure 1) ระบบจ่ายอากาศถูกบรรจุอยู่ภายในกล่องโฟม (polystyrene insulator) ประกอบด้วย ภาชนะบรรจุตัวอย่าง (sample chamber) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากอลูมิเนียม ขนาดบรรจุ 1,772 ml ถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนฟอลย์กันความร้อน (foil-bubble insulation), เซ็นเซอร์วัดความดัน (pressure sensor) (PSE-550, SMC Co., Ltd., Tokyo, Japan), บอลวาล์วไฟฟ้า (CWX-15Q, Tianjin Tianfei High-Tech Valve Co., Ltd., Tianjin, China) จำนวน 2 ตัว ซึ่งใช้เป็นวาล์วควบคุมทิศทางการไหลขาเข้าและขาออก, วาล์วปรับอัตราการไหล (flow control valve) (AS 1200, SMC (Thailand) Ltd., Pathum Thani, Thailand), ท่อลม PU (polyurethane) เส้นผ่านศูนย์กลางใน 4.76 mm (3/16” × 20M, อุตสาหกรรมท่อน้ำไทย จำกัด, กรุงเทพมหานคร, ไทย) และข้อต่อ 3 ทาง ระบบควบคุมทำหน้าที่ควบคุมขั้นตอนการทำงานของเครื่องวัดความพรุน, ประมวลผลและบันทึก และแสดงผลการวัด ซึ่งประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) (Mega 2560, Arduino LLC, Ivrea, Italy), รีเลย์ (relay) (SRD-05VDC-SL-C, Ningbo Songle Relay Co., Ltd., Zhejiang, China) และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (power supply) 24 VDC (KV-U2, Keyence Corp., Osaka, Japan)

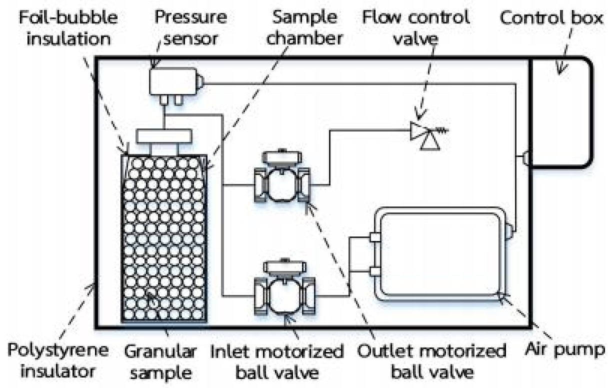


Figure 1 Porosity measuring apparatus.

2.2 ซอฟท์แวร์ (software)

โปรแกรมของระบบควบคุมถูกเขียนด้วย LabVIEW (LabVIEW 2015, National Instrument Co., Texas, USA) ขั้นตอนการทดสอบ P-t test ทั้ง 2 ครั้งสามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้ขณะเริ่มต้นเครื่องวัดความพรุนควบคุมให้ปั๊มอัดอากาศจ่ายอากาศเข้าสู่ภาชนะบรรจุตัวอย่าง, บอลวาล์วขาเข้าเปิด และบอลวาล์วขาออกปิดเมื่อความดันภายในภาชนะบรรจุตัวอย่างมีค่ามากกว่าความดันเริ่มต้นที่กำหนดไว้ (เช่น 3,000 Pa) เล็กน้อย ปั๊มอัดอากาศจะหยุดจ่ายอากาศและบอลวาล์วขาเข้าจะปิด แล้วจึงหน่วงเวลา 30 s หลังจากนั้น บอลวาล์วขาออกจะเปิด ทำให้อากาศภายในภาชนะบรรจุตัวอย่างถูกระบายออกผ่านวาล์วปรับอัตราการไหล ซึ่งในขณะเดียวกัน ความดันภายในภาชนะบรรจุตัวอย่างจะถูกบันทึกทุกๆ 1 s ไปพร้อมกันเมื่อความดันภายในภาชนะบรรจุตัวอย่างลดลงต่ำกว่า 500 Pa บอลวาล์วขาออกจะปิดจากนั้น โปรแกรมของระบบควบคุมจะประมวลผลข้อมูลอัตราการลดลงของความดัน เพื่อคำนวณค่า PHL

2.3 การวัดความพรุน

ในการวัดความพรุนของวัสดุตัวอย่าง 1 ครั้ง จำเป็นต้องทำการทดสอบ P-t test 2 ครั้ง ต่อเนื่องกัน ในการทดสอบ P-t test ครั้งที่ 1 ภาชนะบรรจุตัวอย่างจะเป็นภาชนะว่างเปล่า ซึ่งค่า PHL_1 จากผลการทดสอบครั้งที่ 1 ถูกกำหนดให้เป็นค่า PHL ของ

ภาชนะบรรจุเปล่า (PHL_{empty}) ในการทดสอบครั้งที่ 2 ตัวอย่างจะถูกเทลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง แล้วทำการทดสอบ P-t test โดยที่ไม่มีการปรับตั้งวาล์วปรับอัตราการไหล (i.e., ช่องเปิดของวาล์วปรับอัตราการไหลระหว่างการทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 มีขนาดไม่เปลี่ยนแปลง) ดังนั้น ค่า PHL_2 จึงเป็นค่าครึ่งชีวิตความดันจากภาชนะซึ่งมีตัวอย่างบรรจุอยู่ภายในจากนั้น ค่า PHL_1 และ PHL_2 ที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 ครั้ง จะถูกคำนวณหาค่าความพรุนด้วยสมการที่ 6

2.4 แผนการทดลอง

ผู้วิจัยทำการทดลองเพื่อประเมินว่าค่า PHL ของภาชนะบรรจุว่างเปล่า (PHL_{empty}), ความดันเริ่มต้น (initial pressure) และชนิดของตัวอย่าง (sample) (i.e., ขนาดและรูปร่าง) ไม่ส่งผลต่อความถูกต้องของผลการวัดความพรุนด้วยเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้น

ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุรูปทรงเรขาคณิต มีลักษณะเป็นทรงกลม 3 ขนาดคือ ทรงกลมขนาดเล็ก (S sphere), กลาง (M sphere) และใหญ่ (L sphere) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.35 (±0.01), 5.94 (±0.01) และ 37.86 (±0.19) mm จำนวน ~123,400, 9,435 และ 24 ชิ้น ตามลำดับ และทรงกระบอก (cylinder) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.91 (±1.43) mm ยาว 134.02 (±0.24) mm จำนวน 17 ชิ้นขนาดของตัวอย่างดังกล่าวถูกวัดโดยใช้เวอร์เนีย (vernier caliper) ความละเอียด (resolution) 0.05 mm (Mitutoyo Corp., Kawasaki, Japan) และไมโครมิเตอร์ (micrometer) ความละเอียด 0.001 mm (Mitutoyo Corp., Kawasaki, Japan)

การทดลองถูกออกแบบเป็น split-split plot design (Gardner, 2004; Bradley and Nachtsheim, 2009) โดยมีปัจจัยหลัก (main plot) คือ PHL_{empty} (ค่า PHL ของผลการทดสอบความดันขณะภาชนะบรรจุว่างเปล่า), ปัจจัยรอง (sub plot) คือ ความดันเริ่มต้น (initial pressure) และปัจจัยรองอันดับ 2 (sub-sub plot) คือ ชนิดของตัวอย่าง (sample) เงื่อนไขและลำดับการทดลองถูกสรุปไว้ใน Table 1 PHL_{empty} ของแต่ละเงื่อนไขการทดลองสามารถปรับตั้งค่าได้โดยปรับตั้งวาล์วปรับอัตราการไหลจนกระทั่งค่า PHL_{empty} อยู่ในช่วง ±10 s ของค่าเงื่อนไขที่กำหนดความดันเริ่มต้นสามารถตั้งค่าในโปรแกรมที่ผู้วิจัยเขียนขึ้น (หัวข้อ 2.2) ผลการวัดจากเครื่องวัดความพรุนถูกเปรียบเทียบกับผลการวัดด้วยวิธีการวัดขนาดโดยตรงและเครื่อง gas pycnometer (Accupyc 1330, Micromeritics Instrument Corp., Norcross, USA) ในวิธีการวัดขนาดโดยตรงปริมาตรของตัวอย่างเรขาคณิตถูกคำนวณได้จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของตัวอย่าง

ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่อง gas pycnometer ถูกแสดงใน Figure 2 เครื่อง gas pycnometer ใช้หลักการพื้นฐานของกฎของบอยล์ (Boyle's Law) (Dickerson et al., 1979) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและความดันของก๊าซทำงาน ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้ก๊าซ helium ในขั้นตอนการทดสอบด้วยเครื่อง gas pycnometer ตัวอย่างจะถูกชั่งน้ำหนัก (w_{sample}) และถูกบรรจุลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง (sample chamber ใน Figure 2) ซึ่งมีปริมาตรเป็น $V_{chamber}$ เมื่อเครื่องเริ่มทำงานก๊าซ helium จะถูกปล่อยเข้าไปในภาชนะบรรจุตัวอย่างจนกระทั่งความดันภายในภาชนะมีค่าคงที่ ที่ประมาณ 137 kPa (Micromeritics Instrument Corp., 2001) และค่าความดันนี้จะถูกบันทึกไว้ (P_1) ลำดับต่อมา เครื่องจะเปิดวาล์วภายใน (3-way valve ใน Figure 2) เพื่อให้ก๊าซ helium ที่อยู่ในภาชนะบรรจุตัวอย่างขยายตัวเข้าสู่ภาชนะอ้างอิง (reference chamber) ซึ่งมีปริมาตรเป็น V_{ref} และทำให้ความดันภายในภาชนะบรรจุตัวอย่างลดต่ำลงสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง (P2) หลังจากนั้น ปริมาตรตัวอย่าง V_{sample} สามารถถูกคำนวณได้จากสมการที่ 7 ความหนาแน่นของตัวอย่างค่าที่วัดได้จากเครื่อง gas pycnometer (ρ_{pyc}) จะถูกคำนวณจากปริมาตรและน้ำหนักของตัวอย่างที่ถูกบรรจุอยู่ภายในภาชนะบรรจุตัวอย่าง (สมการที่ 8) ทั้งนี้ รายละเอียดการใช้งานเครื่อง gas pycnometer สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Hintz et al. (2008)

$$V_{sample} = V_{chamber} - \frac{V_{ref}}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \tag{7}$$

$$\rho_{pyc} = \frac{w_{sample}}{V_{sample}} \tag{8}$$

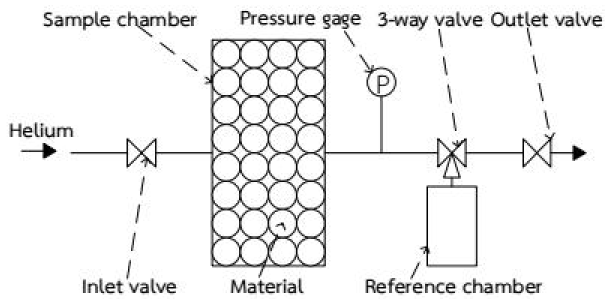


Figure 2 Basic component of a gas pycnometer.

Source: Modified from Hintz et al. (2008)

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยทำการทดสอบด้วยเครื่อง gas pycnometer กับตัวอย่างเพียง 2 ชนิดคือ ทรงกลมขนาดเล็กและขนาดกลาง เนื่องจากภาชนะบรรจุตัวอย่างของเครื่อง gas pycnometer มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 mm × ยาว 39.8 mm ซึ่งเล็กเกินกว่าจะสามารถบรรจุตัวอย่างทรงกลมขนาดใหญ่และทรงกระบอกได้อย่างไรก็ตาม เนื่องจากภาชนะบรรจุตัวอย่างของเครื่อง gas pycnometer มีขนาดเพียง 100 ml ซึ่งมีความแตกต่างกับภาชนะบรรจุตัวอย่างของเครื่องวัดความพรุนที่ถูกใช้ในการศึกษาครั้งนี้มาก (i.e., 1,772 ml) ซึ่งส่งผลให้เกิดความ

คลาดเคลื่อนของการวัดผลการวัดความพรุนของวัตถุทรงกลมหรือทรงกระบอกที่ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะทรงกระบอกจะขึ้นอยู่กับความแน่นของการบรรจุ, ปริมาตรโดยรวมของช่องว่างระหว่างวัสดุกับผนังด้านข้าง (radial direction) และผนังด้านบน-ล่าง (axial direction), และสัดส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางภาชนะบรรจุตัวอย่างต่อเส้นผ่านศูนย์กลางวัตถุ (Zhang et al., 2006; Burtseva et al., 2015) เมื่อภาชนะบรรจุตัวอย่างมีขนาดเล็ก สัดส่วนระหว่างปริมาตรโดยรวมของช่องว่างระหว่างวัสดุทรงกลมกับผนังกับปริมาตรระหว่างชิ้นวัสดุจะมีค่าสูง ซึ่งในกรณีนี้ผลการวัดความพรุนที่ได้จะคลาดเคลื่อนจากค่าความพรุนซึ่งพิจารณาเฉพาะปริมาตรระหว่างชิ้นวัสดุเท่านั้น ดังนั้น เพื่อลดผลกระทบของปริมาตรช่องว่างระหว่างวัสดุกับผนังภาชนะ ค่าความพรุนจากเครื่อง gas pycnometer จะถูกคำนวณ โดยใช้ปริมาตรของแข็งของตัวอย่างซึ่งมีน้ำหนักเท่ากับน้ำหนักของตัวอย่างซึ่งภาชนะของเครื่องวัดความพรุน (Figure 1) สามารถบรรจุได้จนเต็ม (w') ปริมาตรดังกล่าว (Vs,pyc) ถูกคำนวณดังสมการที่ 9.

$$V_{s,pyc} = \frac{w'}{\rho_{pyc}} \tag{9}$$

จากนั้น ความพรุนของตัวอย่างสามารถคำนวณได้จาก $V_{s,pyc}$ และปริมาตรของภาชนะบรรจุ (i.e., 1,772 ml) ดังสมการที่ 10

$$\varepsilon = \frac{V_b - V_{s,pyc}}{V_b} \tag{10}$$

ความถูกต้องของการวัดความพรุนถูกประเมินด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Absolute Percentage Error - APE) ดังแสดงในสมการที่ 11 ซึ่งแสดงถึงความถูกต้องของผลการวัดความพรุน (Makridakis and Hibon, 1995; Hyndman and Koehler, 2006)

$$APE = \left| \frac{\varepsilon_{ref} - \varepsilon_{mea}}{\varepsilon_{ref}} \right| \times 100 \tag{11}$$

โดยที่ ε_{ref} คือ ความพรุน (%) ที่วัดได้จากวิธีการวัดขนาดโดยตรงหรือจาก gas pycnometer และ ε_{mea} คือ ความพรุน (%) ที่วัดได้จากเครื่องวัดความพรุน

Table 1 Experimental conditions for evaluating the accuracy of the porosity measuring apparatus.

PHL_{empty} (s)	Initial pressure (Pa)	Sample	PHL_{empty} (s)	Initial pressure (Pa)	Sample	PHL_{empty} (s)	Initial pressure (Pa)	Sample
180	3,000	L sphere	120	3,000	S sphere	60	2,000	S sphere
		S sphere			L sphere			M sphere
		Cylinder			Cylinder			L sphere
		M sphere			M sphere			Cylinder
	2,000	Cylinder		2,000	L sphere		3,000	Cylinder
		M sphere			M sphere			S sphere
		L sphere			S sphere			M sphere
		S sphere			Cylinder			L sphere

3 ผลและวิจารณ์

Table 2 แสดงผลการวัดความพรุนของตัวอย่างรูปทรงเลขาคณิตทั้ง 4 ชนิดที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับการวัดขนาดโดยตรง และ Table 3 แสดงผลการวัดความพรุนของตัวอย่างทรงกลมขนาดเล็กและขนาดกลางที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความพรุนเปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่อง gas pycnometer ค่าความพรุนจากการวัดขนาดโดยตรง, เครื่อง gas pycnometer และเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้น ของตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดอยู่ในช่วงประมาณ 40–60% ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับการศึกษาของ Zhang et al. (2006) และ Burtseva et al. (2015) ซึ่งพบว่าวัตถุทรงกลมหรือทรงกระบอกทั่วไปที่ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะทรงกระบอกจะมีค่าความพรุนอยู่ในช่วง 25.9 – 67%

นักวิจัยหลายกลุ่มได้พัฒนาเครื่องวัดปริมาตร, ความหนาแน่น หรือความพรุน โดยใช้หลักการพื้นฐานแตกต่างกันและทดสอบกับวัสดุหลายชนิด Leclaire et al. (2003) พัฒนารูปแบบการวัดด้วยหลักการของเครื่อง gas pycnometer โดยทดสอบกับทราย, เม็ดดิน และคอนกรีตพรุน (Iraguen et al., 2006) พัฒนาเครื่องวัดแบบไม่ทำลาย (non-destructive) ชนิดพกพาสำหรับใช้วัดปริมาตรของพวงองุ่นบนต้น โดยใช้เทคนิคการแทนที่อากาศ การศึกษาทั้ง 2 นี้เปรียบเทียบผลการวัดกับการแทนที่ด้วยน้ำ นอกจากนี้ (Chayaprasert et al., 2014) ใช้หลักการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันเพื่อวัดความพรุนของวัสดุรูปทรงเลขาคณิต โดยเปรียบเทียบกับการวัดขนาดโดยตรงเครื่องวัดของการศึกษาเหล่านี้ให้ผลการวัดซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ±5% ด้วยเหตุนี้ การศึกษาครั้งนี้จึงกำหนดให้ ยอมรับผลการ

ทดสอบเครื่องวัดความพรุนที่ทำงานด้วยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความการวัด ที่ค่า APE ไม่เกิน 5% สังเกตว่า ใน Table 2 และ 3 ที่ทุกเงื่อนไขการทดลอง ค่า APE มีค่าต่ำกว่า 5% การทดลองที่เงื่อนไข PHL_{empty} ~180 s, ความดันเริ่มต้น 3,000 Pa และตัวอย่างทรงกระบอก ให้ค่า APE สูงสุดอยู่ที่ 4.44% ดังนั้น ผู้วิจัยจึงพิจารณาให้ผลการวัดของเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นอยู่ในระดับที่น่าพอใจและมีความน่าเชื่อถือในระดับเดียวกับงานวิจัยอื่น

Table 2 Porosity measurements from the porosity measuring apparatus (ε_{mea}) compared with those from the dimensional measurement method (ε_{ref}).

PHL_{empty} (s)	Initial pressure (Pa)	Sample	ε_{mea} (%) [SD]	ε_{ref} (%) [SD]	APE (%)
60	2,000	S sphere	51.78 [0.34]	52.66 [0.67]	1.67
		M sphere	41.20 [0.11]	41.57 [0.21]	0.90
		L sphere	61.56 [0.21]	61.52 [0.93]	0.07
		Cylinder	55.41 [0.27]	55.14 [5.09]	0.49
	3,000	S sphere	50.57 [0.15]	52.66 [0.67]	3.98
		M sphere	41.12 [0.17]	41.57 [0.21]	1.08
		L sphere	63.05 [0.28]	61.52 [0.93]	2.50
		Cylinder	56.74 [0.20]	55.14 [5.09]	2.89
120	2,000	S sphere	50.80 [0.31]	52.66 [0.67]	3.54
		M sphere	41.98 [0.35]	41.57 [0.21]	0.99
		L sphere	62.11 [0.31]	61.52 [0.93]	0.96
		Cylinder	55.20 [0.20]	55.14 [5.09]	0.11
	3,000	S sphere	51.20 [0.21]	52.66 [0.67]	2.78
		M sphere	41.38 [0.30]	41.57 [0.21]	0.45
		L sphere	60.85 [0.51]	51.52 [0.93]	1.08
		Cylinder	55.16 [0.29]	55.14 [5.09]	0.03
180	2,000	S sphere	51.61 [0.21]	52.66 [0.67]	2.00
		M sphere	41.59 [0.30]	41.57 [0.21]	0.04
		L sphere	61.81 [0.51]	61.52 [0.93]	0.48
		Cylinder	56.29 [0.20]	55.14 [5.09]	2.09
	3,000	S sphere	52.81 [0.21]	52.66 [0.67]	0.27
		M sphere	42.84 [0.15]	41.57 [0.21]	3.05
		L sphere	62.35 [0.26]	61.52 [0.93]	1.36
		Cylinder	57.59 [0.30]	55.14 [5.09]	4.44

Table 3 Porosity measurements from the porosity measuring apparatus (ε_{mea}) compared with those from the gas pycnometer (ε_{ref}).

PHL_{empty} (s)	Initial pressure (Pa)	Sample	ε_{mea} (%) [SD]	ε_{ref} (%) [SD]	APE (%)
60	2,000	S sphere	51.78 [0.34]	51.23 [0.04]	1.09
		M sphere	41.20 [0.11]	41.65 [0.04]	1.10
	3,000	S sphere	50.57 [0.15]	51.23 [0.04]	1.28
		M sphere	41.12 [0.17]	41.65 [0.04]	1.28
120	2,000	S sphere	50.80 [0.31]	51.23 [0.04]	0.83
		M sphere	41.98 [0.35]	41.65 [0.04]	0.79
	3,000	S sphere	51.20 [0.21]	51.23 [0.04]	0.05
		M sphere	41.38 [0.30]	41.65 [0.04]	0.65
180	2,000	S sphere	51.61 [0.21]	51.23 [0.04]	0.76
		M sphere	41.59 [0.30]	41.65 [0.04]	0.15
	3,000	S sphere	52.81 [0.21]	51.23 [0.04]	3.08
		M sphere	42.84 [0.15]	41.65 [0.04]	2.85

ปัจจัยหลัก PHL_{empty}, ความดันเริ่มต้น (initial Pressure) และชนิดของตัวอย่าง (sample) ถูกวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยมีสมมุติฐาน (null hypothesis) คือ ปัจจัยหลักที่ระดับแตกต่างกันไม่ทำให้ค่า APE แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (i.e., ความถูกต้องของผลการวัดด้วยเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นไม่ขึ้นอยู่กับค่า PHL_{empty} หรือ ความดันเริ่มต้น หรือ ชนิดตัวอย่าง ที่ใช้ในการวัด) อีกทั้ง ปฏิสัมพันธ์ (interaction) ของปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย ซึ่งประกอบด้วยคู่ปัจจัยดังนี้ PHL_{empty} กับความดันเริ่มต้น (PHL_{empty} × initial pressure), ชนิดของตัวอย่างกับความดันเริ่มต้น (sample × initial pressure) และชนิดของตัวอย่างกับ PHL_{empty} (sample × PHL_{empty}) และปฏิสัมพันธ์ทั้ง 3 ปัจจัย (i.e., PHL_{empty} × Initial pressure × Sample) ถูกประเมิน โดยมีสมมุติฐานคือ ปฏิสัมพันธ์ของแต่ละคู่ปัจจัยไม่มีผลกระทบต่อค่า APE อย่างมีนัยสำคัญ (i.e., การเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยหลักคู่ที่สนใจไม่ทำให้ความถูกต้องของผลการวัดด้วยเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นเปลี่ยนแปลงไป)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นกับการวัดขนาดโดยตรงถูกแสดงใน Table 4 สังเกตว่า ที่ข้อมูลของปัจจัย PHL_{empty} มีค่า Sig. (p-value) อยู่ที่ 0.067 ซึ่งค่านัยสำคัญนี้บอกเป็นนัยว่า ผู้ใช้งานเครื่องวัดความพรุนสามารถเลือกใช้ค่า PHL ของภาชนะบรรจุเปล่าใดๆ ในช่วง 60 – 180 s ได้โดยที่ไม่ทำให้ค่า APE (i.e., ความถูกต้องของผลการวัด) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. > 0.05) ในทำนองเดียวกัน ปัจจัยชนิดของตัวอย่างมีค่า Sig. อยู่ที่ 0.211 ซึ่งกล่าวได้ว่าปัจจัยชนิดของตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดคือ ทรงกลมขนาดเล็ก, กลาง และใหญ่ และทรงกระบอกไม่ทำให้ความถูกต้องของผลการวัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. > 0.05) ปัจจัยความดันเริ่มต้นให้ค่า Sig. = 0.000 ซึ่งหมายความว่า ความดันเริ่มต้นที่ระดับ 2,000 และ 3,000 Pa มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. < 0.05) สังเกตว่าผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง PHL_{empty} กับความดันเริ่มต้นมีค่า Sig. = 0.000 (Table 4) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ค่า PHL_{empty} ใดๆ ในช่วง 60-180 s และความดันเริ่มต้นใดๆ ในช่วง 2,000 - 3,000 Pa มีอิทธิพลซึ่งกันและกันที่ส่งผลให้ความถูกต้องของผลการวัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. < 0.05) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของคู่ปัจจัย PHL_{empty} กับความดันเริ่มต้นในแต่ละระดับถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ว่าระดับใดเหมาะสมในการวัดนั่นคือปัจจัย PHL_{empty} ที่ระดับ 60 s และความดันเริ่มต้นที่ระดับ 2,000 Pa ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.828% อย่างไรก็ตาม ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวอย่างกับ PHL_{empty} และระหว่างชนิดของตัวอย่างกับความดันเริ่มต้น มีค่า Sig. อยู่ที่ 0.161 และ 0.554 ตามลำดับ ซึ่งทำให้ไม่สามารถปฏิเสธสมมุติฐานหลักได้ (Sig. > 0.05) กล่าวคือ คู่ปัจจัยชนิดของตัวอย่างกับความดันและคู่ปัจจัยชนิดของตัวอย่างกับ PHL_{empty} ไม่มีอิทธิพลซึ่งกันและกันที่ส่งผลให้ความถูกต้องของผลการวัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญอีกทั้งปฏิสัมพันธ์ของทั้ง 3 ปัจจัยแสดงให้เห็นว่าไม่มีอิทธิพลซึ่งกันและกันอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. > 0.05)

การเปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องวัดความพรุนที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นกับเครื่อง gas pycnometer ถูกวิเคราะห์ความแปรปรวนในลักษณะเดียวกันกับการเปรียบเทียบกับการวัดขนาดโดยตรง ซึ่งผลการวิเคราะห์ถูกแสดงอยู่ใน Table 5 สังเกตว่าปัจจัยหลัก PHL_{empty} และความดันเริ่มต้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. < 0.05) อีกทั้งยังมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างคู่ปัจจัย PHL_{empty} กับความดันเริ่มต้นด้วยอย่างไรก็ตามปัจจัยชนิดของตัวอย่างและคู่ปัจจัยอื่น (i.e., sample × PHL_{empty}, sample × initial pressure และ PHL_{empty} × Initial pressure ×

Sample) ไม่สามารถปฏิเสธสมมุติฐานหลักได้ (Sig. > 0.05) ดังนั้น เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับใช้งานเครื่องวัดความพรุนคือ PHL_{empty} ที่ระดับ 120 s, ความดันเริ่มต้นที่ระดับ 3,000 Pa และตัวอย่างทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 – 6 mm ได้โดยที่ไม่ทำให้ความถูกต้องของผลการวัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และคู่ปัจจัยทุกคู่ไม่มีอิทธิพลซึ่งกันและกันที่ส่งผลให้ความถูกต้องของผลการวัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Table 4 Analysis of variance for the porosity measurements from the porosity measuring apparatus as compared with those from the dimensional measurement method.

Source	DF	Type III sum of squares	Mean square	F	Sig.
Main plot:					
PHLempty	2	5.413	2.707	3.420	0.067
Main plot error	12	9.507	0.792		
Sub plot:					
Initial pressure	1	19.722	19.722	125.410	0.000
PHLempty × Initial pressure	2	19.348	9.674	61.520	0.000
Sub plot error	12	1.887	0.157		
Sub-sub plot:					
Sample	3	28.149	9.383	2.030	0.211
Sample × PHLempty	6	65.253	10.876	2.350	0.161
Sample × Initial pressure	3	10.591	3.530	0.760	0.554
PHLempty × Initial pressure × Sample	6	27.713	4.619	1.000	0.500
Sub-sub plot error	72	335.295	4.656		
Total	119	522.878			

Table 5 Analysis of variance for the porosity measurements from the porosity measuring apparatus as compared with those from the gas pycnometer.

Source	DF	Type III sum of squares	Mean square	F	Sig.
Main plot:					
PHLempty	2	13.799	6.899	12.950	0.001
Main plot error	12				
Sub plot:					
Initial pressure	1	7.288	7.288	48.350	0.000
PHLempty × Initial pressure	2	18.804	9.402	62.380	0.000
Sub plot error	12				
Sub-sub plot:					
Sample	1	0.008	0.008	0.040	0.845
PHLempty × Sample	2	0.428	0.214	1.040	0.369
Initial pressure × Sample	1	0.063	0.063	0.310	0.585
PHLempty × Initial pressure × Sample	2	0.327	0.163	0.790	0.464
Sub-sub plot error	24	4.939	0.206		
Total	59	53.859			

ผลการวิเคราะห์ใน Table 4 และ 5 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยชนิดของตัวอย่าง ไม่มีผลกระทบต่อค่า APE ของเครื่องวัดความพรุนที่ถูกพัฒนาขึ้น แต่ปัจจัยความดันเริ่มต้นมีความแตกต่างกัน เครื่องวัดความพรุนในงานวิจัยนี้ถูกพัฒนาขึ้นจากชุดอุปกรณ์ต้นแบบของ อภิรัฐ (2557) และ (Chayaprasert et al. 2014) ซึ่งทุกขั้นตอนในการทดสอบความดันต้องถูกดำเนินการโดยใช้แรงงานคน (manual) นอกจากนี้ ชุดข้อมูลความดันที่ได้จากการทดสอบ P-t test จะต้องถูกประมวลผลหลังจากดำเนินการทดสอบเสร็จสิ้น (post processing) ด้วยโปรแกรมอื่น (e.g., MS Excel) เพื่อคำนวณหาค่า PHL และความพรุนดังนั้น เครื่องวัดความพรุนในการศึกษาครั้งนี้ซึ่งสามารถทำการทดสอบ P-t test และคำนวณค่า PHL และความพรุนโดยอัตโนมัติ ทำให้ผู้ใช้งานมีความสะดวกเพิ่มมากขึ้นและได้ผลการวิเคราะห์ในเวลาที่สั้นลง อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นเพียงวัตถุรูปทรงเลขาคณิตเท่านั้นดังนั้น ควรมีการทดสอบเครื่องวัดความพรุนกับวัสดุที่หลากหลายขึ้นเช่น วัสดุเกษตร (e.g., ข้าวเปลือก, ข้าวโพด, ถั่วเขียว) และวัสดุก่อสร้าง (e.g., กรวด, ทราย, หิน) ต่อไป

4 สรุป

เครื่องวัดความพรุนที่ทำงานด้วยหลักการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้การทำงานและการประมวลผลเป็นแบบอัตโนมัติอีกทั้ง ความถูกต้องของการวัดต้องอยู่ระดับที่ยอมรับได้การประเมินผลกระทบต่อความถูกต้องของผลการวัดภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่ประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก คือ PHL_{empty}, ความดันเริ่มต้น และชนิดของวัสดุ

การทดลองแบบ split-split plot design ถูกเลือกใช้เป็นแผนการทดลองโดยมีระดับปัจจัยของปัจจัยหลักต่างๆ ดังนี้ PHL_{empty} มี 3 ระดับคือ 60, 120 และ 180 s, ความดันเริ่มต้นมี 2 ระดับคือ 2,000 และ 3,000 Pa และวัสดุรูปทรงเลขาคณิตมี 4 ชนิดคือ วัสดุทรงกลมขนาดเล็ก, กลาง และใหญ่ และวัสดุทรงกระบอกผลการวัดความพรุนของวัสดุทั้ง 4 ชนิด (ε_{mea}) ถูกเปรียบเทียบกับค่าความพรุนอ้างอิง (ε_{ref}) ซึ่งวัดได้จากวิธีการวัดขนาดโดยตรง หรือเครื่อง gas pycnometer การเปรียบเทียบเพื่อประเมินความถูกต้องของการวัดแสดงด้วยค่า APE

ความพรุนของวัสดุทั้ง 4 ชนิดอยู่ในช่วงประมาณ 40 – 60% ซึ่งสอดคล้องกับความพรุนของวัตถุทรงกลมทั่วไปที่ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะทรงกระบอกผลการเปรียบเทียบกับวิธีการวัดขนาดโดยตรงและเครื่อง gas pycnometer ให้ค่า APE สูงสุดอยู่ที่ 4.44% ค่าความคลาดเคลื่อน (i.e., APE) ที่ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องวัดความพรุนให้ผลการวัดที่ถูกต้องในระดับเดียวกับงานวิจัยอื่นอีกทั้ง ความถูกต้องของผลการวัดถูกวิเคราะห์อีกว่าได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยหลักที่สนใจอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ และปฏิสัมพันธ์ของแต่ละคู่ปัจจัยไม่มีผลกระทบต่อค่า APE อย่างมีนัยสำคัญการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ถูกใช้สำหรับประเมินผลกระทบดังกล่าวผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นกับการวัดขนาดโดยตรงและเครื่อง gas pycnometer ถูกแสดงใน Table 4 และ 5 ตามลำดับปัจจัยหลักและความดันเริ่มต้นที่แนะนำสำหรับผู้ใช้งานเครื่องวัดความพรุนคือ 120 s และ 3,000 Pa และสามรถวัดตัวอย่างได้ทั้ง 4 ชนิด

5 กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี 2560 โครงการวิจัย รหัส ป-ย(ด)114.60 เรื่อง การพัฒนาและทดสอบเครื่องวัดความพรุนที่ทำงานด้วยหลักการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร และฝ่ายเครื่องจักรกลเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำหรับความอนุเคราะห์สถานที่, สาธารณูปโภค, อุปกรณ์การทดลอง และความอนุเคราะห์อื่นๆ

ขอขอบคุณฝ่ายวิจัยและพัฒนาการผลิตอุตสาหกรรมเซรามิก กรมวิทยาศาสตร์บริการ สำหรับความอนุเคราะห์การทดสอบวัดความหนาแน่นด้วยเครื่อง gas pycnometer

6 เอกสารอ้างอิง

สยาม แกมขุนทด, พานิช วุฒิพฤกษ์, สันชัย อินทพิชัย และ พิทยา แจ่มสว่าง 2558 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังที่มีขนาดคละแตกต่างกัน.วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 25 (1). 11-19

อภิรัฐ จันทลักษณ์ 2557: การพัฒนาวิธีการวัดความพรุนด้วยวิธีการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สาขาวิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

Alan, R.H., Jong-Moon, K., Peihong, C., 2014. Accuracy of water displacement hand volumetry using an ethanol and water mixture. Aviation Space and Environmental Medicine 85, 187-190.

Alazmi, B., Vafai, K., 2004. Analysis of variable porosity, thermal dispersion, and local thermal nonequilibrium on free surface flows through porous media. Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme 126, 389-399.

Bradley, J., Nachtsheim, C.J., 2009. Split-Plot Designs: What,Why and How. Journal of Quality Technology 41, 340-361.

Burtseva, L., Salas, B.V., Werner, F., Petranovskii, V., 2015. Modeling of Monosized Sphere Packings into Cylinders. Univ., Fak. für Mathematik

Chayaprasert, W., Chantalak, A., Sukcharoen, A., 2014. Porosity Measurement of Granular Materials by

Comparisons of Air Pressure Decay Rates. Transactions of the Asabe 57, 1431-1440.

Dickerson, R.E., Gray, H.B., Haight, J.G.P., 1979. Gas laws and the kinetic theory. In *Chemical Principles*, 97-102. 2727 Sand Hill Road Menlo Park, California 94025: The Benjamin/Cummungs Publishing Company, Inc.

Encyclopædia Britannica, 2016. Archimedes' principle. Encyclopædia Britannica Inc. Available at: http://global.britannica.com/science/Archimedes-principle. Accessed 29 February 2016.

Gardner, R.C., 2004. Split-plot Factorial Multivariate Analysis of Variance. *in* Department of Psychology, T.U.o.W.O., ed., London, Ontario N6A 5C2.

Glover, P., 2001. Porosity. In *MSc Petroluem Geology*, 43-53. University of Aberdeen, UK: Department of Geology and Petroleum Geology.

Hintz, W., Antonyuk, S., Schubert, W., Ebenau, B., Haack, A., Tomas, J., 2008. Determination of Physical Properties of Fine Particles, Nanoparticles and Particle Beds. In *Modern Drying Technology*, 279-361. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Hyndman, R.J., Koehler, A.B., 2006. Another look at measures of forecast accuracy. International Journal of Forecasting 22, 679-688.

Iraguen, V., Guesalaga, A., Agosin, E., 2006. A portable non-destructive volume meter for wine grape clusters. Measurement Science and Technology 17, N92-N96.

Leclaire, P., Umnova, O., Horoshenkov, K.V., Maillet, L., 2003. Porosity measurement by comparison of air volumes. Review of Scientific Instruments 74, 1366-1370.

Makridakis, S., Hibon, M., 1995. Evaluating Accuracy (or Error) Measures. Fontainebleau, France: INSEAD - Technology Management.

Micromeritics Instrument Corp., 2001. AccuPyc TM1330 Pycnometer.

Nithiarasu, P., Seetharamu, K.N., Sundararajan, T., 1996. Natural convective heat transfer in a fluid saturated variable porosity medium. Pergamon 40, 3955-3967.

Zhang, W., Thompson, K.E., Reed, A.H., Beenken, L., 2006. Relationship between packing structure and porosity in fixed beds of equilateral cylindrical particles. Chemical Engineering Science 61, 8060-8074.

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 (2560) 36-43
Available online at www.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ

บทความวิจัย

ISSN 1685-408X

อิทธิพลของความดันต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของไข่เยี่ยวม้า

Influence of Pressure on Physicochemical Properties Changing of Century Egg

เบญจวรรณ วานมนตรี[1], เทวรัตน์ ตรีอำนรรค[1*], กระวี ตรีอำนรรค[2]
Benjawan Vanmontree[1], Tawarat Treeamnuk[1*], Krawee Treeamnuk[2]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา 30000
[1]School of Agricultural Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา 30000
[2]School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000
*Corresponding author: Tel: +66-4-694-2933, E-mail: tawarat@sut.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงภายในของไข่เป็ดในกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะความดัน 1 2 3 และ 4 บาร์ ในสารละลายด่าง ตัวอย่างไข่ถูกสุ่มขึ้นมาเพื่อทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ความถ่วงจำเพาะ ความแข็งแรงไข่ขาว ค่า pH ของไข่แดงและไข่ขาว และลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย ทุกๆ 2 วัน เป็นเวลา 12 วัน ผลจากการศึกษาพบว่าค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่า pH ของไข่ขาวและไข่แดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้นและระยะเวลาที่แช่ไข่ในสารละลายด่าง ส่วนความแข็งแรงเจลไข่ขาวมีแนวโน้มลดลง ลักษณะปรากฏด้านสีของไข่พบว่าเมื่อจำนวนวันในการแช่เพิ่มขึ้น ไข่ขาวมีแนวโน้มเป็นสีน้ำตาลเพิ่มมากขึ้นและการแช่ไข่เป็ดในสารละลายด่างที่ความดัน 2 บาร์ เป็นระยะเวลา 6 วัน มีความเหมาะสมต่อการผลิตไข่เยี่ยวม้า

คำสำคัญ: ไข่เยี่ยวม้า, ความดัน, สมบัติทางเคมีกายภาพ

Abstract

The objective of this research was to study on internal changing of century egg in production process under high pressure conditions. The samples of duck egg that used in century egg production were soaked in alkali solution at pressure conditions of 1, 2, 3 and 4 bars. The samples of egg were random sampling to evaluate internal change of physical and chemical properties in term of percentage of weight increase, specific gravity, hardness of albumen, pH of albumen and yolk, and visible changing with image analysis in every 2 days for 12 days. The results of this study indicate that percentage of weight increase, specific gravity, pH of albumen and yolk are increase when pressure and time of soaking increased, but by contrast, the hardness of albumen is decreased. The soaking time affect to change the color of albumen from transparent gel to dark brown in all pressure conditions. In addition, the eggs that soaked in alkaline at 2 bars for 6 days were suitable for produce century egg.

Keywords: Century egg, Pressure, Physico-chemical properties

1 บทนำ

ไข่เป็ดสดเป็นอาหารที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคทั่วไป เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูงเป็นแหล่งของโปรตีนที่มีคุณภาพดี อย่างไรก็ตามไข่เสื่อมเสียและเปลี่ยนแปลงคุณภาพได้ง่ายโดยเฉพาะเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง พบว่าระยะเวลาในการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คุณภาพของไข่ลดลงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในของไข่ ได้แก่ การสูญเสียน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านรูของเปลือกไข่ (Wardy et al., 2011) การชะลอการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างเก็บรักษาไข่ทำได้หลายวิธี เช่นการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ แต่ผู้ค้าปลีกส่วนใหญ่ในประเทศไทยยังนิยมเก็บไข่ระหว่างขายไว้ที่อุณหภูมิห้อง (27-28°C) ดังนั้นจึงพบการเสื่อมเสียของไข่เกิดขึ้นอยู่เสมอและเหตุผลดังกล่าวก่อให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจต่ออุตสาหกรรมการผลิตไข่มาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามนอกจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำแล้วยังอาจชะลอการเปลี่ยนแปลงในไข่ได้โดยการเคลือบผิวหน้าของเปลือกไข่ด้วยสารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ (Suppakul et al., 2010) เช่นไฮดรอกซีโพรพิลเมททิล เซลลูโลส (hydroxyproplymethyl cellulose, HPMC) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่เกิดเจลและขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดี การเคลือบผิวหน้าของเปลือกไข่ให้เป็นฟิล์มบางๆ ช่วยป้องกันการซึมผ่านเข้าออกของความชื้น ซึ่งอาจช่วยให้คุณภาพในการเก็บรักษาของไข่ทั้งด้าน เคมี กายภาพ และชีวภาพดีขึ้น (Torrico et al., 2014) การศึกษาผลของการเคลือบผิวหน้าเปลือกไข่ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของไข่ยังมีอยู่อย่างจำกัด สำหรับวิธีในการยืดอายุการเก็บรักษาไข่เป็ดที่นิยมกันมากคือ การผลิตเป็นไข่เค็มและไข่เยี่ยวม้า เพราะนอกจากจะเป็นการยืดอายุของไข่เป็ดแล้วยังเป็นที่นิยมของผู้บริโภคเนื่องจากสามารถนำมาประกอบอาหารได้หลากหลาย โดยกระบวนการแปรรูปไข่เป็ดสดเป็นไข่เยี่ยวม้า มีวิธีการแปรรูปได้หลายวิธี เช่น การพอกด้วยดินสอพอง การแช่ในสารละลายและการประยุกต์ใช้วิธีการแช่ร่วมกับการพอกดินสอพอง ซึ่งวิธีที่น่าสนใจได้แก่ การแช่ในสารละลายด่าง เพราะเป็นกระบวนการที่ประหยัด มีต้นทุนการผลิตไม่สูง ง่ายต่อกระบวนการผลิต สามารถผลิตได้ปริมาณมากต่อครั้ง ใช้ระยะเวลาเร็วกว่าวิธีการพอก ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ความดันสูงรวมกับการแช่ไข่ในสารละลายด่างโดยความดันมีผลต่อการแพร่โมเลกุลน้ำหรือสารละลายเข้าสู่เปลือกไข่เป็ด ทำให้ไข่อยู่ในสภาวะความดันที่ต่างกันด้วยการอัดอากาศเข้าไปในช่องว่างเหนือผิวสารละลาย จึงเกิดความดันในสารละลายเพิ่มขึ้นเป็นการย่นระยะเวลากระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้า และเร่งการแปรสภาพของไข่เยี่ยวม้า (ณัฐดนัยและสุวรรณ, 2554; เบญจวรรณและเทวรัตน์, 2558) แต่อย่างไรก็ตามการผลิตไข่เยี่ยวม้านั้นมีช่วงสภาวะของการเป็นไข่เยี่ยวม้าที่เหมาะสมคือค่า pH อยู่ในช่วง 11.0-11.6 ซึ่งจะทำให้เกิดการแข็งตัวของไข่ขาว และหากค่า pH สูงเกินกว่า 11.9 จะเกิดการเปลี่ยนสภาพของเจลไปเป็นของเหลวใสอย่างสิ้นเชิง (สุมนทา, 2550; ทรงพล และคณะ, 2532) ซึ่งการติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของไข่เยี่ยวม้าในระหว่างกระบวนการผลิตภายใต้สภาวะความดันยังไม่มีข้อมูลการศึกษาที่ชัดเจนดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของความดันและระยะเวลาในการแช่สารละลายด่างต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและเคมีของไข่เยี่ยวม้าในระหว่างกระบวนการผลิตภายใต้สภาวะความดัน

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ไข่เป็ด

ไข่เป็ดที่ใช้ในการทดลองซื้อจากตลาดเคหะ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ก่อนการผลิตไข่เยี่ยวม้า ทำการตรวจสอบรอยร้าว ล้างทำความสะอาด ผึ่งลมให้แห้ง จากนั้นทำการหาค่าฮอกยูนิตเพื่อตรวจสอบความสดของไข่ โดยการสุ่มตัวอย่างไข่เป็ดมาทำการวัดความสูงไข่ขาวของไข่เป็ดสดด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักไข่เป็ดสดทั้งฟองแล้วคำนวณค่าดังสมการ (1)

$$HU = 100 \times \log(H + 7.57 - 1.7W^{0.37}) \qquad (1)$$

เมื่อ HU คือค่าฮอกยูนิต, H คือความสูงของไข่ขาว (mm), W คือน้ำหนักฟองไข่ (g)

2.2 การผลิตไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะความดัน

นำไข่เป็ดที่ผ่านการล้างทำความสะอาดแล้วจำนวน 60 ฟอง แช่สารละลายด่างซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 240 g โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 600 g น้ำเปล่า 6,000 g (ประเวทย์ และคณะ, 2544) ทำการเพิ่มความดันในถังโดยการอัดอากาศเหนือสารละลายให้มีความดัน 1 2 3 และ 4 bar ทำการควบคุมความดันโดยใช้วาล์วควบคุมแบบโซลินอยด์ (VXD2130-03-5DZ1-B, SMC (Thailand) Ltd., Nakhon-racharsima, Thailand) ที่แต่ละความดันเมื่อครบกำหนด 2 4 6 8 10 และ 12 วัน นำไข่ออกมาตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไข่ขาว ไข่แดง สำหรับการตรวจสอบความแข็งแรงเจลไข่ขาวจะแบ่งตัวอย่างไข่ออกมาจำนวน 10 ฟองนึ่งด้วยไอน้ำเป็นเวลา 20 นาที

2.3 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมี

2.3.1 ร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

กำหนดหมายเลขไข่เป็ดตัวอย่างจำนวน 10 ฟอง แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างไข่เป็ดสดก่อนการแช่สารละลายด่าง บันทึกค่าทศนิยม 2 ตำแหน่ง และเมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างไข่เป็ดชุดเดิมชั่งบันทึกน้ำหนักสุดท้ายที่ระดับความดัน 1 2 3 และ 4 bar แล้วคำนวณค่าดังสมการ (2)

$$W_{ad} = \frac{W_f - W_i}{W_f} \times 100\% \qquad (2)$$

W_{ad} คือร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น, W_i คือน้ำหนักไข่เป็ดก่อนการอัดความดัน (g), W_f คือน้ำหนักไข่เป็ดหลังการอัดความดัน (g)

2.3.2 ความถ่วงจำเพาะ

หาค่าความถ่วงจำเพาะโดยการแทนที่น้ำ (บัณฑิตและอุดมศักดิ์, 2547) ทำการชั่งน้ำหนักไขในอากาศแล้วบันทึกค่า จากนั้นนำไข่จุ่มลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 ml ภายในบรรจุน้ำเปล่า 900 ml โดยมีอุปกรณ์ช่วยพยุงไข่ไม่ให้จมลงก้นบีกเกอร์จากนั้นอ่านค่ามวลที่แทนที่น้ำแล้วจดบันทึกเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะ (S.G) ดังสมการ (3)

$$S.G = \frac{W_P}{W_T - W_B} \qquad (3)$$

W_p คือน้ำหนักของไข่ที่ชั่งในอากาศ (g), W_b คือน้ำหนักน้ำและบิ๊กเกอร์ก่อนจุ่มไข่ (g), W_T คือน้ำหนักรวมของน้ำ บิ๊กเกอร์และไข่ขณะจุ่ม (g)

2.3.3 วัดความเป็นกรดเบส

ค่า pH เป็นค่าที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของเจลไข่ขาวและไข่แดงในผลิตภัณฑ์ไข่เยี่ยวม้า วัดค่าโดยใช้เครื่อง pH meter ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น Specifications-S47-K seven Multi™ dual meter pH/conductivity (Kit version), UK

2.3.4 การหาค่าความแข็งแรงของเจลไข่เยี่ยวม้า

ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัสอาหาร (Texture analyser) รุ่น TA-XT plus (Stable micro systems, UK) ด้วยหัวกด Spherical probe part No. P/0.25S Crosshead speed 0.8 mm s^{-1} กดลงไปเป็นระยะ 70 mm (Li et al., 2010) บนตัวอย่างไข่เยี่ยวม้าที่เตรียมไว้บริเวณด้านแหลมของไข่เยี่ยวม้า ทำการบันทึกค่า F_{max} เป็นค่าความแข็งแรงเจลของไข่เยี่ยวม้า

2.3.5 การวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย

วัดค่าสีด้วยระบบวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย ทำการทดสอบความเข้มแสง ณ ตำแหน่งที่กำหนดจากนั้นปรับโหมดกล้องดิจิตอล (Olympus, รุ่น STYLUS XZ-2, Japan) ฟังก์ชั่น Macro มีค่ารูรับแสงที่ f = 1.8 speed 1/2000 ไม่มีการซูมภาพไม่ใช้แฟลช ความละเอียด 3968×2976 pixels จัดเก็บไฟล์ภาพในรูปแบบ JPEG และนำมาวิเคราะห์เชิงภาพถ่ายโดยใช้โปรแกรมอิมเมจเจ (ImageJ 1.42q, USA) ในรูปฮิสโตแกรมของสีที่แสดงในระบบ RGB จากนั้นแปลงค่าสีจากระบบ RGB ไปเป็นระบบ CIELAB; L*, a*, b* (color transformation) ซึ่งค่า L* คือความสว่าง (lightness) จากค่า +L* ที่แสดงสีขาวไปจนถึง –L* แสดงถึงสีดำ ค่า a* คือแกนสีจากสีเขียว (-a*) ไปเป็นสีแดง (+a*) ค่า b* คือ คือ แกนสีจากสีน้ำเงิน (-b*) ไปเหลือง (+b*) โดยใช้สมการ direct model ที่กำหนดโดย IEC 61966-2-1 (1999) และ International Telecommunication Union (Rec. ITU-R BT.709-5, 2002) ค่าสีที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าสีของไข่ขาวและไข่แดงของไข่เยี่ยวม้าที่วางจำหน่ายแบบมีเครื่องหมายการค้าในรูปของความแตกต่างค่าสีดังสมการ (4)

$$\Delta E = \sqrt{(L_p^* - L_0^*)^2 + (a_p^* - a_0^*)^2 + (b_p^* - b_0^*)^2} \qquad (4)$$

เมื่อ ΔE คือค่าความแตกต่างของสี, L_p^*, a_p^*, b_p^* คือค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่ได้จากกระบวนการผลิตภายใต้ความดัน และ L_0^*, a_0^*, b_0^* คือค่าสีของไข่เยี่ยวม้าในท้องตลาดซึ่งมีเครื่องหมายการค้า

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ภายหลังจากกระบวนการตรวจวัดค่าคุณสมบัติของไข่เยี่ยวม้าแล้วจากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Two way ANOVA โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS statistics 20 ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงพหุคูณแบบ Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ไข่เป็ดสด

จากการตรวจสอบคุณภาพของไข่เป็ดสดพบว่าไข่เป็ดที่ใช้ในการทดสอบมีค่าฮอกยูนิตเฉลี่ยอยู่ที่ 76.04 ± 6.7 จากการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อเปรียบค่าเฉลี่ยพบว่าไข่เป็ดที่นำมาใช้ในการทดสอบในทุกการทดลองไม่แตกต่างทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Table 1) แสดงให้เห็นว่าระดับความสดของไข่เป็ดที่นำมาใช้อยู่ในเกณฑ์เดียวกันเนื่องจากความสดของไข่ส่งผลกระทบต่อการเป็นไข่เยี่ยวม้า (พยุงศักดิ์, 2542) สำหรับค่าน้ำหนักของไข่เป็ดสดเฉลี่ยที่นำมาทดลองถึงแม้จะซื้อไข่เบอร์เดียวกันแต่ก็มีความแปรปรวนของน้ำหนักไข่

Table 1 The Averange of initial properties of fresh duck eggs.

Experiment Condition	HU*	Weight(g)*
1bar2day	79.07^{a}	60.50^{ab}
1bar4day	74.21^{a}	60.18^{a}
1bar6day	73.42^{a}	73.52^{k}
1bar8day	80.93^{a}	70.70^{jk}
1bar10day	79.71^{a}	61.24^{abc}
1bar12day	75.46^{a}	62.11^{abcde}
2bar2day	80.02^{a}	64.38^{cdefg}
2bar4day	73.68^{a}	66.71^{fghi}
2bar6day	75.45^{a}	65.50^{efgh}
2bar8day	73.10^{a}	68.38^{hij}
2bar10day	73.64^{a}	61.69^{abcd}

Experiment Condition	HU*	Weight(g)*
2bar12day	79.37^{a}	62.95^{abcdef}
3bar2day	72.77^{a}	63.53^{abcdef}
3bar4day	78.91^{a}	63.85^{abcdef}
3bar6day	78.70^{a}	65.37^{defgh}
3bar8day	76.85^{a}	64.84^{cdefgh}
3bar10day	72.89^{a}	65.20^{defgh}
3bar12day	78.19^{a}	65.62^{efgh}
4bar2day	80.84^{a}	64.05^{bcdefg}
4bar4day	71.39^{a}	67.73^{ghij}
4bar6day	70.07^{a}	69.33^{ij}
4bar8day	74.17^{a}	65.77^{efghi}
4bar10day	78.73^{a}	65.93^{efghi}
4bar12day	73.46^{a}	63.38^{abcdef}
mean±SD	76.42±3.17	65.10±4.14

*Different letters in the same column indicate significate differences ($p<0.05$)

3.2 สมบัติทางกายภาพและเคมี

3.2.1 ปริมาณร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาปริมาณร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของไข่เยี่ยวม้าในระหว่างกระบวนการผลิตพบว่าทั้งความดันและระยะเวลาในการแช่ไข่เยี่ยวม้าในสารละลายด่างมีผลต่อปริมาณร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของไข่ทั้งนี้เนื่องจากความดันมีส่วนในการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับอนุภาคของสารละลายด่างทำให้เกิดการแพร่ผ่านผิวเปลือกไข่ได้ดีขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาจาก Figure 1 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันขึ้นค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันเมื่อเพิ่มจำนวนวันในการแช่สารละลายด่าง ค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของไข่ก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

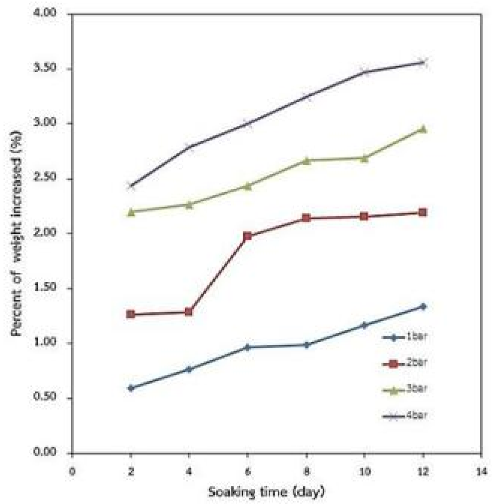


Figure 1 The influence of pressure and soaking time on weight increase of egg.

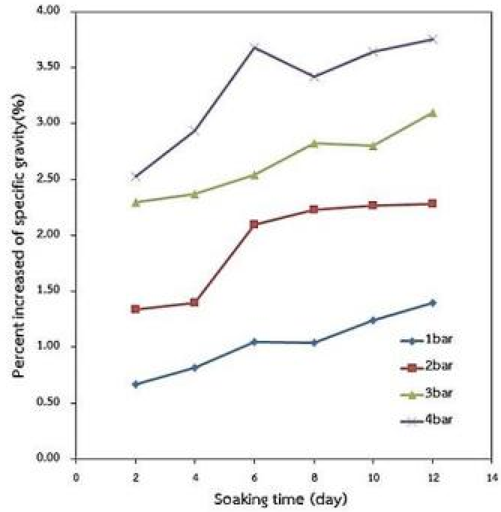


Figure 2 The influence of pressure and soaking time on specific gravity increased of egg.

3.2.2 ความถ่วงจำเพาะ

เมื่อทำการหาค่าความถ่วงจำเพาะของไข่ก่อนและหลังการแช่สารละลายด่างที่ความดันและจำนวนวันที่แช่ต่างๆกันแล้วคำนวณเป็นร้อยละของค่าความถ่วงจำเพาะที่เพิ่มขึ้นพบว่าร้อยละถ่วงจำเพาะที่เพิ่มขึ้นของไข่เยี่ยวม้าในระหว่างกระบวนผลิตแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความดันและเวลาในการแช่สารละลายเพิ่มขึ้น (Figure 2) ซึ่งลักษณะการเพิ่มขึ้นนี้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าความดันและระยะเวลาในการแช่ส่งผลต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นโดยไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรไข่

3.2.3 ความเป็นกรดเบส

เมื่อทำการวัดค่าความเป็นกรดเบสของไข่ขาวและไข่แดงโดยใช้ pH มิเตอร์พบว่าค่า pH ของไข่ขาวที่ความดันเดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณวันที่แช่ และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของความดันพบว่าการเพิ่มขึ้นของความดันส่งผลให้ค่า pH มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (Figure 3) ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นกับไข่แดง (Figure 4) เช่นเดียวกันโดยค่า pH ของไข่แดงจะมีค่าต่ำกว่า pH ของไข่ขาว ซึ่งสอดคล้องกับค่า pH ของไข่เยี่ยวม้าจากท้องตลาดและจากของงานวิจัยที่ผ่านมา (เบญจวรรณและเทวรัตน์, 2558; สุมนทา, 2550) ค่า pH เป็นค่าที่สำคัญต่อการเกิดเจลของไข่เยี่ยวม้าโดยค่า pH ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 11.00 - 11.6 จากรายงานวารุณีและคณะ (2532) พบว่าถ้าปรับ pH ของไข่ขาวให้เท่ากับ 11.9 หรือสูงกว่าไข่ขาวจะเปลี่ยนสภาพจากเจลใสในระยะหนึ่งแล้วเกิดการคืนตัวกลายเป็นของเหลว ดังนั้นจึงควรควบคุมให้ค่า pH ของไข่ขาวไม่เกิน 11.9 ซึ่งเมื่อพิจารณาจาก Figure 3 จะเห็นว่าที่ความดัน 2 bar ระยะเวลาในการแช่ 8 วันนั้นเป็นระยะเวลาที่ทำให้ไข่ขาวเปลี่ยนสภาพเป็นเจลได้ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายตามที่กำหนดถ้าหากเพิ่มความดันเป็น 3 bar นั้นจะใช้เวลาลดลงเหลือ 6 วัน และไม่ควรแช่ทิ้งไว้นานเกิน 8 วัน

เนื่องจากจะทำให้เกิดการคืนตัวเป็นของเหลว และหากความดันสูงขึ้นเป็น 4 bar ควรแช่สารละลายทิ้งไว้ไม่เกิน 6 วัน

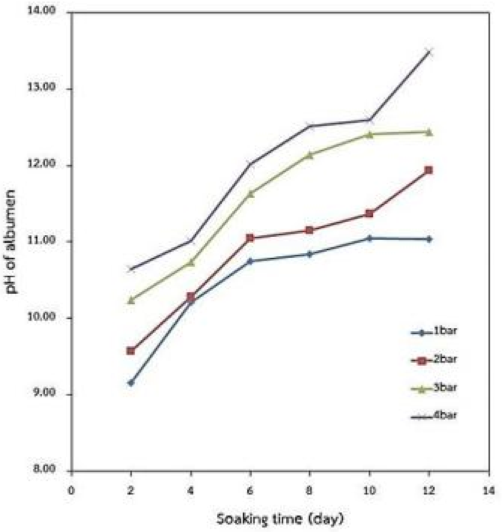


Figure 3 The influence of pressure and soaking time on pH of albumen.

สำหรับในไข่แดง สุมนทา (2550) ได้แสดงให้เห็นว่าค่า pH ที่ทำให้ไข่แดงเกิดการแข็งตัวมีค่าตั้งแต่ 9.3 เป็นต้นไปซึ่งเมื่อพิจารณา Figure 4 พบว่าการแช่ไข่ในสารละลายด่างที่สภาวะ 2 bar 8 วัน 3 bar 2 วัน และ 4 bar 2 วัน นั้นสามารถทำให้ไข่แดงเกิดการแข็งตัวได้ ดังนั้นหากต้องการให้เกิดการแข็งตัวของไข่ขาวและไข่แดงจึงควรแช่สารละลายด่างที่สภาวะ 2 bar 8 วัน เพราะจะทำให้เกิดการแข็งตัวที่สมบูรณ์ของทั้งไข่แดงและไข่ขาว นอกจากนี้เมื่อพิจารณา Figure 3 ร่วมกับ Figure 4 พบว่าที่ความดัน 2 bar นั้นจะให้ค่า pH ที่เหมาะสมต่อการผลิตไข่เยี่ยวม้า มากกว่าที่ความดันอื่นๆ เพราะค่า pH ในไข่ขาวยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการแข็งตัวของเจลไข่ขาว ส่วนที่ความดัน 3 และ 4 bar นั้นหากแช่ไข่ในสารละลายนานเกินไปจะทำให้โปรตีนในไข่ขาวเปลี่ยนจากเจลใสแข็งกลายเป็นของเหลวใส ซึ่งหากต้องการใช้ความดันสูงเพื่อเร่งการปรับค่า pH อาจทำได้โดยใช้เวลาในการแช่สารละลายด่างที่ความดัน 3 bar 5 วัน และ 4 bar 4 วัน จากนั้นนำขึ้นจากด่างมาบ่มทิ้งไว้นอกถังเพื่อให้เกิดเปลี่ยนแปลงเป็นไข่เยี่ยวม้าที่สมบูรณ์ทั้งด้านเนื้อสัมผัสและสี เนื่องจากหากนำขึ้นมาจากสารละลายด่างแล้วทำการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำในเนื้อไข่แล้วจะทำให้ค่า pH ของไข่มีความคงที่และเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ความดันที่สูงจะส่งผลต่อเยื่อหุ้มไข่แดงและการควบคุมความดัน

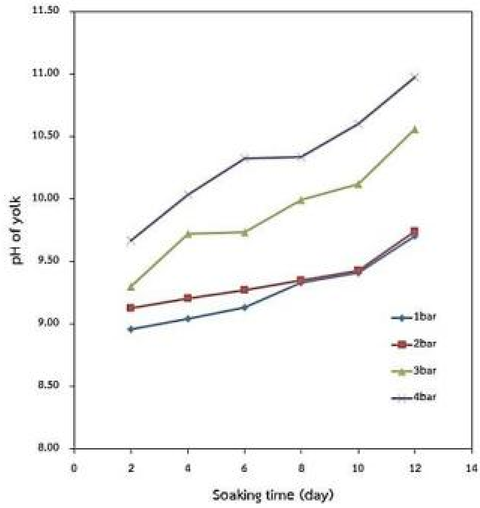


Figure 4 The influence of pressure and soaking time on pH of yolk.

3.2.4 ค่าความแข็งแรงเจลไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า

ค่าความแข็งแรงเจลไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้าที่ผ่านการนึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการแช่สารละลายด่างเพิ่มขึ้นที่ความดัน 2 3 และ 4 bar ส่วนที่ความดัน 1 bar ไม่ปรากฏแนวโน้มที่ชัดเจนมากนัก (Figure 5) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้นและระยะเวลาในการแช่เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่า pH ของไข่ขาวมีค่ามากขึ้นจึงเกิดการเปลี่ยนสภาพของไข่ขาวโดย สุมนทา (2550) ได้ศึกษาการเปลี่ยนสภาพของไข่ขาวที่ค่า pH ต่างๆ กัน พบว่าที่ pH เกินกว่า 8.6 ไข่ขาวจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสภาพมีความข้นหนืดมากขึ้น และมีลักษณะเป็นก้อนเมื่อ pH เท่ากับ 11 และเมื่อ pH สูงกว่า 11.6 ลักษณะของก้อนเจลจะเกิดการคลายตัวเป็นเจลเหลว โดยปกติไข่ขาวที่ไม่มีการปรับสภาพด้วยด่างจะแข็งตัวเมื่อโดนความร้อน แต่ในการศึกษานี้พบว่าไข่ขาวที่ถูกปรับสภาพด้วยด่างจนค่า pH สูงเกินกว่า 11.6 มีการสลายตัวของก้อนเจล เมื่อให้ความร้อนที่เท่ากันการแข็งตัวของไข่จะเป็นไปได้ยากกว่าซึ่งสอดคล้องกับที่รุจี (2530) ได้รายงานว่า ถ้าให้ pH สูงกว่า 11.7 จะทำให้ไข่ขาวที่แข็งตัวกลายเป็นของเหลวและเมื่อนำไปให้ความร้อน 100°C ก็ไม่สามารถทำให้ไข่ขาวแข็งตัวได้อีกเนื่องจาก pH สูงเกินไปทำให้เกิดการย่อยสลายโปรตีน

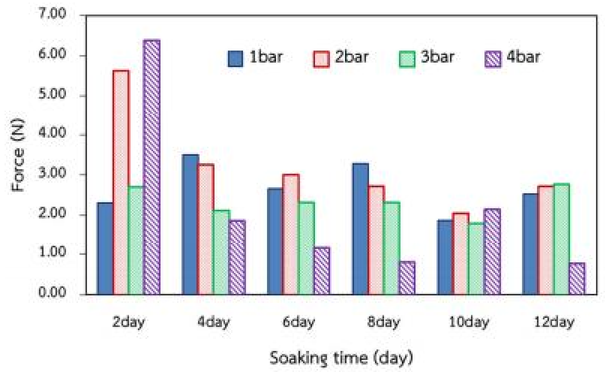


Figure 5 The influence of pressure and soaking time on hardness of albumen.

3.2.5 ผลการวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย

ลักษณะปรากฏของไข่เยี่ยวม้าดิบที่ความดันต่างๆ แสดงใน Figure 6 จะพบว่าการเพิ่มความดันนั้นจะช่วยเร่งให้ไข่เกิดการเซ็ตตัวเป็นเจลแข็งได้เร็วขึ้นโดยที่ความดัน 1 และ 2 bar ใช้เวลา 6 วันไข่ขาวมีลักษณะเป็นเจลใสสีน้ำตาล ไข่แดงแข็งมีสีส้มที่ความดัน 1 bar และมีสีเขียวอมเทาเมื่อใช้ความดัน 2 bar ส่วนที่ความดัน 3 และ 4 bar นั้นจะเริ่มมองเห็นการสลายตัวของเจลไข่ขาวที่เวลาในการแช่ 6 วัน เมื่อพิจารณาจากลักษณะปรากฏและค่า pH ของไข่ขาวและไข่แดงแล้วพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไข่เยี่ยวม้าจะอยู่ที่ความดัน 2 bar และระยะเวลาแช่สารละลายด่าง 6 วัน คือให้ค่าเฉลี่ย pH อยู่ที่ 11.05 และ 9.27 สำหรับไข่ขาวและไข่แดงตามลำดับ ซึ่งค่าเฉลี่ยของ pH ไข่แดงมีค่าต่ำกว่าของสุมนทา (2550) แต่เมื่อพิจารณาช่วงในการทดลองของสุมนทา (2550) แล้วพบว่าได้ทำการทดลองที่ค่า pH 6.0 9.3 9.5 และ10.5 จึงอาจเป็นไปได้ว่าการแข็งตัวของไข่แดงอาจเกิดขึ้นได้ก่อนค่า pH 9.3 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการผลิตไข่เยี่ยวม้าทั่วไปจะต้องใช้เวลาในการแช่สารละลายด่างเป็นเวลานานถึง 28 วัน (พยุงศักดิ์, 2542)

สำหรับการตรวจสอบคุณภาพด้านสีโดยเทียบกับผลิตภัณฑ์ไข่เยี่ยวม้าที่ระบุเครื่องหมายการค้าในท้องตลาดจำนวน 3 ผลิตภัณฑ์ (MK1, MK2, MK3) พบว่ามีค่าความแตกต่างด้านสีของไข่ขาวและไข่แดง (Table 2) โดยที่ระดับความดัน 2 bar มีค่าความแตกต่างของสีไข่ขาวน้อยกว่าที่ความดันอื่นๆ ซึ่งค่าความแตกต่างสีน้อยที่สุดอยู่ที่วันที่ 12 ส่วนไข่แดงนั้นที่ความดัน1bar มีค่าความแตกต่างจาก MK1 น้อยที่สุดเนื่องจากลักษณะของไข่แดงมีสีออกส้มเช่นกันซึ่งสีของไข่แดงของไข่เยี่ยวม้าในท้องตลาดก็จะมีความแตกต่างกัน (Figure 6) แต่เมื่อพิจารณาค่าต่างๆ ร่วมกับลักษณะปรากฏแล้วจะพบว่าเมื่อแช่ไข่นานถึง 10 วันเจลไข่ขาวจะเกิดการสลายตัวกลับเป็นของเหลวหนืดอีกครั้ง ดังนั้นระยะเวลาในการแช่ที่เหมาะสมจึงเป็น 6 วันและ 8 วัน ซึ่งเป้าหมายของงานวิจัยต้องการลดระยะเวลาในการแช่สารละลายด่างดังนั้นที่สภาวะ 2 bar 6 วัน จึงเป็นสภาวะที่เหมาะ

Table 2 Comparison of color difference of albumen from various tradmark with test samples

Experiment Conditions	MK1		MK2		MK3	
	Al	Yk	Al	Yk	Al	Yk
1bar4day	49.63	27.72	57.46	35.82	61.70	41.83
1bar6day	37.12	6.51	41.35	15.09	44.70	23.57
1bar8day	29.99	23.23	32.05	29.82	34.88	34.64
1bar10day	28.54	7.35	32.82	16.86	36.28	25.13
1bar12day	28.62	11.27	33.19	19.66	36.74	28.14
2bar4day	19.31	22.67	27.09	28.94	31.13	37.10
2bar6day	11.85	27.23	17.40	30.35	21.34	37.20
2bar8day	17.95	26.56	20.71	28.54	23.97	34.90
2bar10day	13.17	19.21	14.20	20.88	17.19	27.50
2bar12day	13.69	18.72	11.18	20.35	13.42	26.95
3bar4day	31.22	14.94	38.32	23.92	42.46	32.15
3bar6day	35.40	4.29	39.89	9.21	43.39	17.75
3bar8day	35.58	3.01	39.52	11.20	42.86	19.68
3bar10day	26.86	24.65	26.32	25.40	28.29	31.25
3bar12day	24.65	26.48	23.64	27.00	25.54	32.65
4bar4day	37.58	25.14	45.30	34.32	49.45	42.39
4bar6day	26.70	16.98	25.06	25.53	25.84	34.05
4bar8day	28.18	20.11	28.72	19.95	31.06	25.71
4bar10day	37.14	23.04	34.14	25.96	34.20	32.91
4bar12day	31.49	36.87	25.36	39.90	24.35	46.38

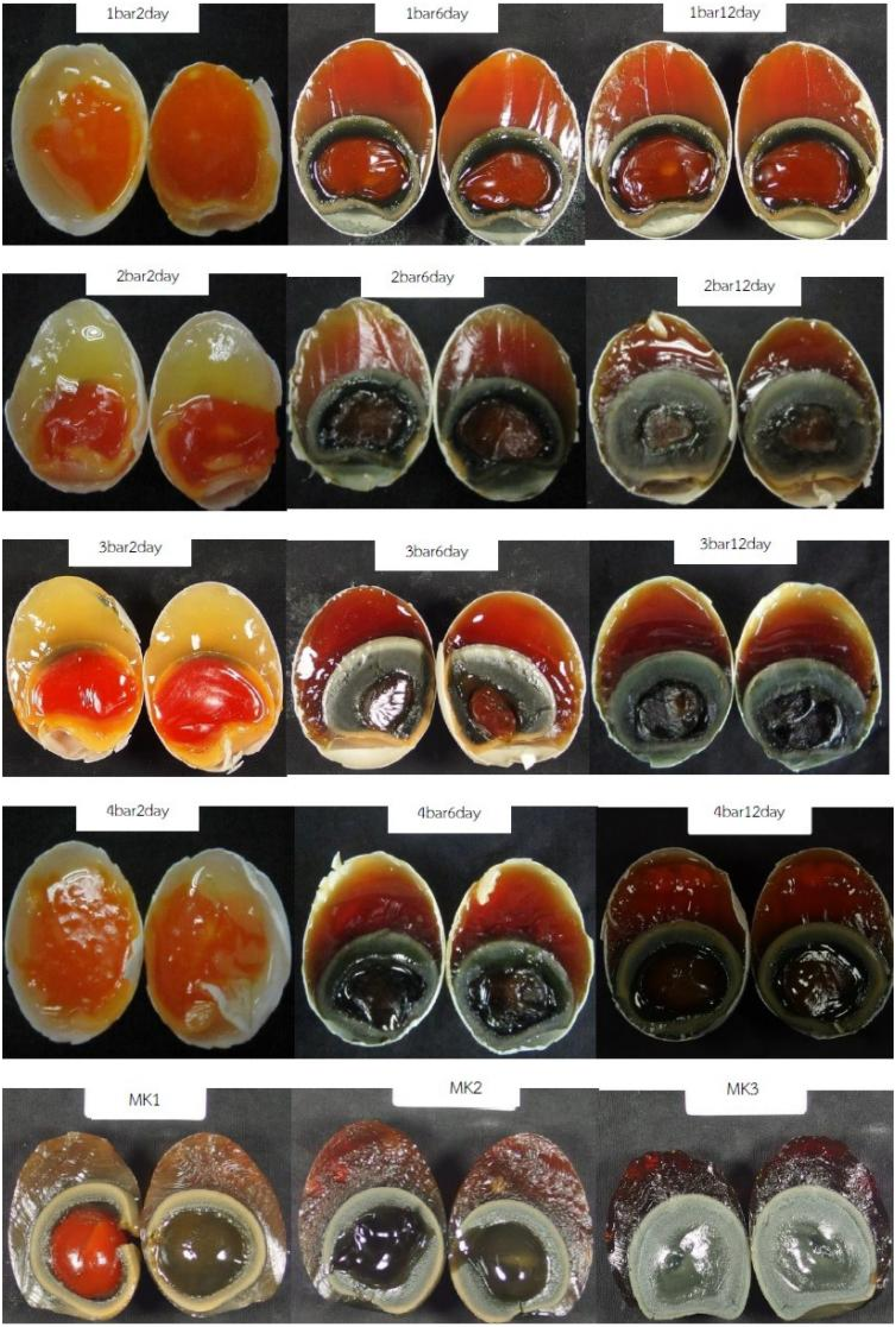


Figure 6 The color of century egg under pressure and soaking time compare with trademark samples.

4 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงภายในของไข่เยี่ยวม้าในระหว่างกระบวนการผลิตภายใต้ความดันพบว่าความดันและระยะเวลามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของไข่โดยมีค่าร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่า pH เพิ่มขึ้นตามความดันและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า

ความแข็งแรงเจลไข่ขาวมีแนวโน้มลดลง เจลไข่ขาวมีสีน้ำตาลเข้มขึ้นที่ทุกความดันเมื่อระยะเวลาในการแช่เพิ่มขึ้นโดยสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไข่เยี่ยวม้าภายใต้ความดันคือ 2 bar 6 วัน

5 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนวิจัย และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

6 เอกสารอ้างอิง

ณัฐดนัย ตัณฑวิรุฬห์, และสุวรรณ หอมหวน. 2554. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับเร่งกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าในระดับอุตสาหกรรม, การประชุมวิชาการ.วารสารวิทยาสารกำแพงแสน 9,1: 27-40.

ทรงพล รัตนพันธ์, ทิพยา ปาณะโตษะ, วารุณี เสนสุภา. 2332. การผลิตไข่เยี่ยวม้าให้ปราศจากสารตะกั่ว. วารสารอาหาร, ปีที่ 19(4), 225-238.

เบญจวรรณ วานมนตรี, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. 2558. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงภายในไข่เยี่ยวม้าที่ผลิตภายใต้สภาวะความดันสูงเทียบกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16, 17-19 มีนาคม 255 ณ ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทคบางนา, กรุงเทพมหานคร, หน้า 475-479.

บัณฑิต จริโมภาส, อุดมศักดิ์ กิจทวี. 2547. ระบบเครื่องมือวัดหาความถ่งจำเพาะและปริมาตรผลไม้อัตโนมัติ. วารสารวิทยาสารกำแพงแสน, ปีที่ 2(3), 137-143.

ประเวทย์ ตุ้ยเต็มวงศ์, ปวีณา จิตปลื้ม, พรรณชินา เอี่ยมโสภณกุล, กิตติมา ชวาลรติกุล. 2544. การผลิตไข่เยี่ยวม้าโดยการใช้ความดันไฮโดรสแตติก. ปัญหาพิเศษ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 3 หน้า.

พยุงศักดิ์ มโนชัย. 2542. การผลิตไข่เยี่ยวม้าโดยไม่ใช้โลหะหนัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 101 หน้า.

รุจี วานิชยาการ. 2530. ไข่เยี่ยวม้า. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่3(1), 7-13.

สุมนทา วาจาบัณฑิตย์. 2550. การใช้เทคนิคทางเคมีพัฒนากระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าไร้สารตะกั่ว. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, 63 หน้า.

IEC 61966-2-1. 1999. Multimedia systems and equipment Colour measurements and management–Part 2-1: Colour management–Default RGB color space–sRGB'. International Electrotechnical Commiss-ion, Geneva, 51p.

Li, C., Shi, P., Xu, C., Xu, X., Zhou, G. 2010. Tracing processes of rigor mortis and subsequent resolution of chicken breast muscle using a texture analyzer. J. Food Engineering. 100: 388–391.

Rec. ITU-R BT.709-5. 2002. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange (1990, revised 2002). International Telecommunication Union, 1211 Geneva 20, Switzerland.

Suppakul, P., Jutakorn, K, Bangchokedee, Y. (2010). Efficacy of cellulose-based coating on enhancing the shelf life of fresh eggs. Journal of Food Engineering, Vol. 98(2), 207-213.

Torrico, D. D., Wardy, W., Carabante, K. M., Pujols, K. D., Xu, Z., No, H. K., Prinyawiwatkul, W. 2014. Quality of eggs coated with oilechitosan emulsion: Combined effects of emulsifier types, initial albumen quality, and storage. LWT-Food Science and Technology, Vol. 57(1), 35-41.

Wardy,W., Torrico D. D., Jirangrat W., No H. K., Saalia F. K., Prinyawiwatkul W. 2011. Chitosan-soybean oil emulsion coating affects physico-functional and sensory quality of eggs during storage. LWT-Food Science and Technology, Vol. 44(10), 2349-2355.

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 (2560) 44-51
Available online at www.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ

บทความวิจัย

ISSN 1685-408X

องค์ประกอบทางเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในผลิตภัณฑ์ชาย่านางแดง ที่ย่างด้วยเครื่องย่างแบบสองสายพานลำเลียง

Chemical Compositions and Antioxidant Capacities of *Bauhinia strychnifolia* Craib : Grilling with a Double Belt Conveyor Dryer

รัชนี นามมาตย์[1]*, ชลธี โพธิ์ทอง[2]
Rachanee Nammatra[1]*, Chonlatee Photong[2]

[1]ห้องปฏิบัติการทดสอบ ผลิต และควบคุมคุณภาพชาสมุนไพร หน่วยวิจัยความหลากหลายทางชีวภาพและการอนุรักษ์ สถาบันวิจัยวลัยรุกขเวช มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, อำเภอกันทรวิชัย, จังหวัดมหาสารคาม, 44150
[1]Production and Quality Control of Herbal Tea Laboratory, Research Unit of Biodiversity and Conservation, Walai Rukhavej Botanical Research Institute, Mahasarakham University, Kantarawichai District, Maha Sarakham 44150
[2]หน่วยวิจัยรังสีอาทิตย์และแหล่งพลังงานสำรอง คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, อำเภอกันทรวิชัย, จังหวัดมหาสารคาม, 44150
[2]Solar Energy and Energy Resources Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai District, Maha Sarakham 44150
*Corresponding author: Tel: +66-6-19965554, Fax: +66-43-754407, E-mail: rachanee.n@msu.ac.th

บทคัดย่อ

การผลิตชาใบย่านางแดง สามารถผลิตได้ด้วยการย่างแบบดั้งเดิมโดยใช้เตาถ่าน ซึ่งต้องใช้แรงงานคน ระยะเวลานาน และไม่สามารถควบคุมความร้อนได้อย่างแม่นยำและสม่ำเสมอ ซึ่งอาจเป็นอุปสรรคในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ดังนั้นการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในชาย่านางแดงด้วยเครื่องย่างแบบสองสายพานลำเลียงและการย่างโดยใช้เตาถ่าน จากการทดลองพบว่า เครื่องย่างนี้สามารถทำได้ที่ช่วงอุณหภูมิ 80-120°C ช่วงเวลา 2-4 mins ได้ใบชาสมุนไพรระหว่าง 11.52-19.2 kg h^{-1} เมื่อวิเคราะห์เพื่อทดสอบปริมาณสารสำคัญด้วยวิธี High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) และการวิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด โดยใช้ (+)-catechin เป็นสารมาตรฐาน พร้อมทั้งทดสอบฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยสาร 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ในใบของย่านางแดงที่ผลิตด้วยเครื่องย่างทั้งสองแบบที่อุณหภูมิและเวลาที่ต่างกัน พบว่า สารสำคัญของย่านางแดงที่ได้มีค่าสูงกว่าเมื่อใช้เครื่องย่างแบบสองสายพานลำเลียง แสดงว่า เครื่องนี้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีย่างแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: ชาใบย่านาง, สารสำคัญ, เครื่องย่างแบบสองสายพาน, ผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ

Abstract

Yanang Daeng leaf tea is produced traditionally by grilling *Bauhinia strychnifolia* leaves with a charcoal stove. This method requires labor and time. Moreover, the heat cannot be controlled precisely and consistently which hinders industrial-scale production. We compare the chemical compositions and antioxidant activity in Yanang Daeng tea using grilling with the double belt conveyor dryer method (DBCD) and the charcoal stove method (CS). DBCD may be used effectively at temperatures of 80-120°C over a period of 2-4 mins producing herbal tea leaves between 11.52-19.2 kg h^{-1}. The phenolic acid and flavonoid contents using HPLC after grilling with DBCD are generally higher than when using the conventional CS process. Total flavonoid contents (TFC) using (+) - catechin as a standard substance is higher when using DBCD than using CS. The antioxidant activity as tested using 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH), revealed by both DBCD and CS are similar, showing that DBCD may be used effectively in place of CS.

Keywords: Yanang Daeng tea, Chemical compounds, Double-belts Conveyor Dryer, Natural product

1 บทนำ

การพัฒนาชาหลากชนิดจากสมุนไพรไทย ที่มีสารออกฤทธิ์สำคัญในปริมาณสูง มีสรรพคุณในการรักษาสุขภาพทั้งยังให้รสชาติและกลิ่นหอมชวนดื่ม พร้อมทั้งมีกรรมวิธีผลิตที่ดีและมีข้อมูลเกี่ยวกับสารออกฤทธิ์สำคัญของสมุนไพรที่ใช้เป็นวัตถุดิบผลิต ในตำรับชาหลายชนิด เช่น ชาขับพิษที่ต้องใช้ใบย่านางแดง เป็นส่วนผ

สมที่สำคัญนั้น จะต้องใช้วิธีการย่างเพื่อให้ได้ใบชาที่มีกลิ่นหอมจากการย่างและรสชาติที่ดีเป็นเอกลักษณ์สวยทั้งใบแห้งและน้ำชาเป็นที่ต้องการของตลาดทั้งในและต่างประเทศ โดยต้องมีการทดสอบสรรพคุณสมุนไพรแต่ละชนิดเพื่อนำมาใช้ช่วยในการสร้างมูลค่าเพิ่มและความแตกต่างให้กับผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี เพื่อให้ได้รับความนิยมสำหรับผู้ที่สนใจเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ

การผลิตชาสมุนไพรรูปแบบใหม่นี้ พบปัญหาอุปสรรคในการผลิตในปริมาณมาก เนื่องจากการทำชาที่ดีบางชนิดจะมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน พืชแต่ละชนิดจะมีกรรมวิธีการผลิตที่แตกต่างกัน บางชนิดไม่สามารถทำได้ด้วยเครื่องอบแห้งธรรมดาหรือการคั่ว นวด โดยใช้แรงงานคน การทำชาที่มีคุณภาพบางประเภท ต้องใช้วิธีการย่างเพื่อให้ได้ชาที่มีกลิ่นหอม และมีคุณค่าของสารสำคัญในปริมาณสูง การย่างแบบดั้งเดิมโดยใช้เตาถ่านต้องใช้แรงงานคนสูงมากและทำได้ในปริมาณน้อย ไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด และยังไม่มีเครื่องจักรที่ช่วยในการผลิต ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิตด้วยเครื่องจักรใหม่ที่มีกำลังการผลิตสูงขึ้น สามารถปรับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ทำการย่างได้อย่างเหมาะสมได้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ใบชาสมุนไพรที่มีกลิ่นหอมและให้รสชาติน้ำชาดีที่สุด คงคุณค่าสารสำคัญที่มีประโยชน์ที่เสริมสร้างสุขภาพที่ดีและมีประโยชน์ต่อร่างกาย เครื่องจักรที่ผลิตได้นี้ ควรผลิตใบชาสมุนไพรที่มีปริมาณสารสำคัญ หรือสารต้านอนุมูลอิสระใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และอำนวยความสะดวกในการผลิตโดยมีผลผลิตอย่างน้อย 10 kg สมุนไพรสดต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 180-200°C เพื่อให้ทันกับตลาดที่รองรับในประเทศไทยและสากล

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและจัดสร้างเตาย่างใบพืชสมุนไพร ด้วยกำลังการผลิต 10 kg สมุนไพรสดต่อชั่วโมง และได้ชาสมุนไพรที่ยังสามารถรักษาคุณภาพได้ และเพื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงคุณภาพของชาสมุนไพร ด้วยวิธี High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) ตรวจหาสารสำคัญหรือสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 พืชที่ใช้ในการวิจัย

ย่านางแดง ชื่อวิทยาศาสตร์ *Bauhinia strychnifolia* Craib. อยู่ในวงศ์ Fabaceae ไม้เถาเลื้อยขนาดใหญ่มีเหง้าหัวใต้ดิน เถามีมือม้วนเป็นคู่ ๆ ตรงข้ามกันสำหรับเกาะยึด ใบเดี่ยวออกเรียงสลับใบรูปขอบขนานหรือรูปไข่มนรี ขนาดกว้าง 3-6 cm ยาว 6-12 cm ผิวใบเกลี้ยงและเป็นมันสีเขียว (Figure 1(a)) ใบยอดอ่อนสีออกแดง ดอกเป็นช่อยาวเรียวตามปลายกิ่งมีลักษณะเป็นหลอดกลวงโค้งเล็กน้อย มีจำนวนมาก ดอกลู่มาทางโคนช่อแผ่ออก 2 ข้างของก้านช่อกลีบรองดอกสีแดง โคนกลีบเชื่อมติดกันเป็นกรวย ปลายแยกเป็นแฉกแหลมๆ 5 แฉก กลีบดอกสีแดงคล้ำ (Figure 1(b)) ฝักเป็นฝักแบนๆ มีขนสีน้ำตาลนุ่มคล้ายฝักฝางสีเขียวอ่อน (พีระพล และคณะ, 2558) สรรพคุณของย่านางแดง ได้แก่ เหง้าฝนกับน้ำหรือน้ำซาวข้าวหรือต้มดื่ม ใช้กระทุ้งพิษไข้ กินพิษยาเบื่อเมา ยาสั่ง ยาสำแดง ถอนพิษ และแก้พิษไข้ทั้งปวง (Bunluepuech et al., 2013) ขับพิษโลหิตและน้ำเหลือง แก้ท้องผูก เถา ใช้ดับพิษร้อน ถอนพิษไข้ แก้พิษทั้งปวง พิษเบื่อเมา ถอนพิษผิดสำแดง แก้ไข้พิษ ไข้กาฬ ไข้หัว ไข้เชื่องซึม ไข้สุกใส ไข้ป่าเรื้อรัง ไข้ทับระดู ไข้กลับไข้ซ้ำ (Wutthitham-mavet, 1997) ใบและเถา ชงเป็นชาล้างสารพิษได้ แก้สารตกค้างจากยาฆ่าแมลง และเกิดอาการแพ้ต่างๆ โดยใช้ใบ หรือ ใช้เถาต้มดื่มเป็นประจำ จะช่วยลดอาการดังกล่าวได้ หรือกินแทนน้ำ (รัชนี และไชยา, 2556)

(a) ใบย่านางแดง

(b) ดอกย่านางแดง

Figure 1 *Bauhinia strychnifolia* Craib.

2.2 เครื่องย่างแบบสองสายพานลำเลียง (Double belt conveyor dryer)

เครื่องย่างใบชาสมุนไพรถูกออกแบบเป็นระบบสองสายพานที่ไหลต่อเนื่อง สามารถปรับความเร็วในการลำเลียงใบชาเพื่อย่างชาสมุนไพรสดได้ที่อัตราการผลิตไม่น้อยกว่า 10 kg h^{-1} ดังแสดงใน Figure 2 โดยมีองค์ประกอบดังนี้

2.2.1 สายพานลำเลียง

สายพานลำเลียงที่เลือกใช้คือ สายพานลวดสแตนเลส ซึ่งใช้สำหรับงานลำเลียงวัสดุไปตามแนวที่ต้องการได้ ทั้งในระยะทางใกล้และระยะทางไกล เหมาะสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรมเบา เช่น ลำเลียงแก้วและเซรามิก ฯลฯ ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ใช้ในการลำเลียงบอร์ดและชิ้นส่วนอื่นๆ อีกทั้งยังสามารถลำเลียงวัสดุผ่านความร้อนเข้าตู้อบได้อีกด้วย

2.2.2 มอเตอร์และชุดควบคุม

ใช้มอเตอร์ AC ยี่ห้อ Suntech รุ่น DC05GU 150 ที่มีกำลัง 150 วัตต์ แรงดัน 24 โวลต์ ความเร็วสูงสุด 1800 รอบต่อนาที และมีกระแส 0.9 แอมป์ ทำหน้าที่เคลื่อนที่สายพานตะแกรงเข้าสู่เครื่องย่างโดยมีชุดควบคุมเป็นตัวควบคุมความเร็วของการหมุนของสายพาน และสามารถบอกเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของถาดวัสดุออกจากเครื่องย่างได้ด้วยเช่นกัน โดยใช้มอเตอร์ 1 ตัว และชุดควบคุม 1 ชุด ในระบบลำเลียงแบบสองสายพาน

2.2.3 สแตนเลส

สแตนเลสที่ใช้ในการสร้างเป็นโครงตัวถังของเครื่องย่างใบชา มี 2 แบบ คือ แบบสแตนเลสแผ่น และแบบสแตนเลสฉาก ในส่วนแบบสแตนเลสแผ่นใช้ สแตนเลสเบอร์ 301S ที่มีขนาด ยาว 3,048 mm x กว้าง 1,219 mm x หนา 3 mm เนื่องจากสแตนเลสเบอร์ 301S เป็นวัสดุที่สามารถทนความร้อนได้สูง ประมาณ 1,150°C ซึ่งเหมาะกับงานประเภท เตาอบ เตาหลอม และเตาย่าง

2.2.4 ฉนวนกันความร้อน

ฉนวนกันความร้อนใช้เพื่อป้องกันความร้อนออกจากตัวเครื่องเป็นฉนวนใยแก้วกันความร้อน ที่สามารถทนความร้อนได้ถึง 540°C และมีความยืดหยุ่นจึงสามารถคืนตัวได้ดี หลังการกดทับจึงไม่สูญเสียความเป็นฉนวน และยังมีวัสดุปิดผิวกันความชื้นเมื่อเลือกความหนาแน่นที่เหมาะสมจะไม่เกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอก สามารถคงความสภาพการเป็นฉนวนได้ยาวนาน และไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์

2.2.5 ถาดตะแกรง

ถาดตะแกรงทำหน้าที่ในการวางวัสดุหรือชิ้นงานที่เราต้องการย่างก่อนที่จะนำไปวางในสายพานลำเลียง ถาดตะแกรงจะทำให้วัสดุหรือชินงานรับความร้อนได้ทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งถาดตะแกรงที่ใช้ทำมาจากสแตนเลสเนื่องจากมีคุณสมบัติทนความร้อนได้ดี และไม่ก่อให้เกิดสนิม และเพื่อความปลอดภัยและความสะอาดของวัสดุหรือชิ้นงาน ซึ่งจะมีขาดความกว้าง 50 cm และความยาว 50 cm

2.2.6 ชุดรางล้อเลื่อน

ชุดรางล้อเลื่อนทำหน้าที่ในการลำเลียงถาดวัสดุเข้าไปเก็บในชั้นวางถาดเพื่อให้ถาดคลายคลายความร้อนได้ง่ายขึ้น ซึ่งเมื่อถาดวัสดุออกจากเตาย่างแล้วจะสามารถเลื่อนออกออกจากเตาย่างเข้าไปเก็บในชั้นได้เองโดยมีชุดรางล้อเลื่อนในการลำเลียง

2.2.7 ชั้นวางถาด

ชั้นวางถาดจะทำหน้าที่เก็บถาดวัสดุเมื่อถาดลำเลียงออกจากเตาย่าง โดยถาดจะเข้าไปเก็บในชั้นถาดเองอัตโนมัติ โดยไม่ต้องให้คนจับถาดไปวางเนื่องจากถาดจะยังมีความร้อนอยู่ โดยจะมีชุดล้อเลื่อนช่วยในการเก็บถาดด้วย ทั้งยังมีล้อที่ขาของชั้นวางถาดเพื่อให้เคลื่อนย้ายชั้นวางถาดได้สะดวกและใช้จำนวนคนน้อยลง โครงสร้างของชั้นวางถาดผลิตจากสแตนเลส เนื่องจากสแตนเลสสามารถทนความร้อนได้ดี และไม่ก่อให้เกิดสนิม

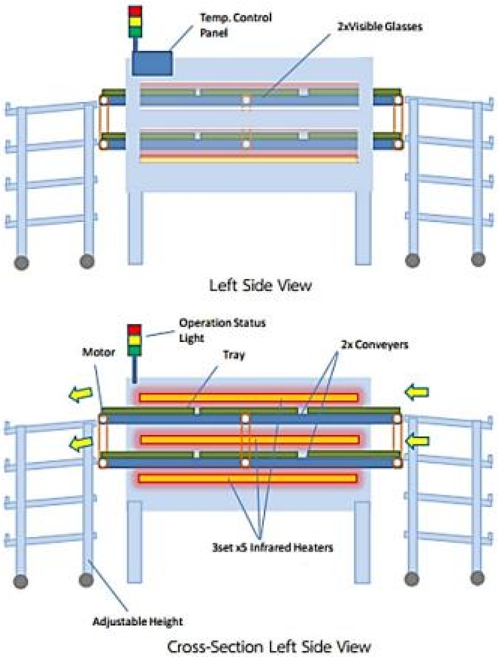


Figure 2 Structure of Infrared double belt conveyor dryer.

Figure 3 Grilling with Charcoal stove.

2.3 *การทดสอบปริมาณสารสำคัญ*

*การ*วิเคราะห์ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบฟีโนลิกและฟลาโวนอยด์บางชนิด ที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพของชาสมุนไพรด้วยวิธี High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) ตามวิธีของ Jorjong et al. (2015) โดยการนำสารสกัดสมุนไพรมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-DAD system (Shimadzu, Japan) ที่ประกอบด้วยปั๊มรุ่น LC-20AC และตัวตรวจวัดรุ่น SPDM20A และใช้คอลัมน์ คอลัมน์ Inertsil ODS-3 (GL Science Inc., Japan) (4.6 mm x 250 mm, 5µm) ใช้ส่วนป้องกันคอลัมน์ Inertsil ODS-3 (GL Science Inc., Japan) (4 mm x 10 mm, 5µm) ตั้งปริมาตรฉีดที่ 20 µl สารละลายของเฟสเคลื่อนที่ของสารฟลาโวนอยด์คือ อะซิโตรไนไตร์-น้ำปราศจากไอออน (2: 97.8 ปริมาตรต่อปริมาตร) ซึ่งประกอบด้วย 0.2% กรดฟอสฟอริก (สารละลาย A) และอะซิโตรไนไตร์-น้ำปราศจากไอออน (97.8: 2 ปริมาตรต่อปริมาตร) ซึ่งประกอบด้วย 0.2% กรดฟอสฟอริก (สารละลาย B) ตั้งอัตราการไหลที่ 0.6 ml/min อุณหภูมิคอลัมน์ 40°C โดยตรวจวัดด้วยเครื่อง diode array detector ที่ความยาวคลื่นที่ 254 nm ใช้ระบบการชะแบบเกรเดียนดังนี้ เริ่มที่ 20% ของสารละลาย B จนถึง 50% ของสารละลาย B ในเวลา 30 นาที, และ 60% ของสารละลาย B ในนาทีที่ 35 และ 20% ของสารละลาย B ในนาทีที่ 40 หลังจากนั้นใช้ความเข้มข้นคงที่ที่ 20% ของสารละลาย B จนถึงนาทีที่ 55 หาปริมาณสารโดยเทียบกับสารมาตรฐานโดยใช้สภาวะเดียวกัน

การวิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดโดยนำตัวอย่างพืชสกัดที่ทราบความเข้มข้นมา 0.5 ml เติมสารละลาย $NaNO_2$ (7%) ปริมาณ 0.15 ml ผสมให้เข้ากันบ่มเป็นเวลา 6 นาที แล้วเติม $AlCl_3$ (10%) ปริมาณ 0.3 ml รอ 5 mins แล้วเติมสารละลาย 1 M ของ NaOH ปริมาณ 1 ml ผสมให้เข้ากันก่อนนำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 nm ดัดแปลงจากวิธีการของ Wanyo et al. (2011) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ สารมาตรฐานที่ใช้ทำกราฟปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดคำนวณโดยใช้ (+)-catechin เตรียมที่ความเข้มข้น 0-400 µg ml-1เป็นสารมาตรฐาน แสดงผลในหน่วย mg CE ($10g^{-1}$ DW)

ทดสอบฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากตัวอย่างด้วยสาร 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ตามวิธีการของ Kaisoon et al. (2005) แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 nm ด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer (UV-1700, Shimudzu, Japan) คำนวณประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระ (% Inhibition) โดยใช้สูตรดังนี้

$$\text{Inhibition (\%)} = [\,(A_{DPPH} - A_{sample}) / A_{DPPH}] \times 100.$$

เมื่อ A_{DPPH} = ค่าดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH

A_{sample} = ค่าดูดกลืนแสงของตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย DPPH

2.4 *การวิเคราะห์ทางสถิติ*

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารสำคัญอย่างน้อย 3 ซ้ำ แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Windows SPSS แสดงผลด้วย ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ (P value < 0.05) โดยใช้ Duncan's new multiple range test

3 ผลและวิจารณ์

เครื่องย่างใบชาสมุนไพรที่ทำการออกแบบสามารถย่างชาสมุนไพรสดได้ปริมาณที่เพียงพอกับการผลิตที่ 10 kg ต่อชั่วโมง เครื่องย่างใบชาสมุนไพรได้ถูกออกแบบเป็นระบบสองสายพานที่ไหลต่อเนื่อง สามารถปรับความเร็วในการลำเลียงใบชาได้ (Figure 4) สายพานแต่ละตัวมีพื้นที่วางใบชาสมุนไพรขนาด 60 cm x 120 cm=7,200 cm^2 ดังนั้นจะมีพื้นที่วางใบชาสมุนไพรรวมเป็น

14,400 cm^2 ใบย่านางแดงสด แต่ละใบมีขนาดพื้นที่และน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 15 cm^2 และ 1 g ตามลำดับ จะได้ว่า ในหนึ่งรอบการทำงานของเครื่องสามารถจุใบพืชได้ประมาณ 960 ใบ คิดเป็น 0.96 kg ซึ่งจากการทดสอบใบย่านางแดงดังกล่าวสามารถย่างสุกกรอบได้ภายในเวลาไม่เกิน 5 mins ที่ระดับอุณหภูมิแหล่งความร้อนประมาณ 80 – 100°C หรือในหนึ่งชั่วโมงจะสามารถย่างใบย่านางแดงสดได้ 11.52 kg และหากเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 120-150°C เครื่องจะสามารถย่างใบย่านางแดงให้สุกกรอบได้ด้วยเวลาไม่เกิน 3 mins ดังนั้นในหนึ่งชั่วโมงก็จะสามารถย่างใบย่านางแดงสดได้คิดเป็น 19.2 kg ต่อชั่วโมงโดยประมาณ ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้

Figure 4 Double belt conveyor dryer: อนุสิทธิบัตร เลขที่ 10845 (ชลธี และรัชนี, 2558).

จาก Table 1 ผลการทดลองย่างใบย่านางแดงด้วยเครื่องย่างแบบสองสายพาน (Figure 4) เทียบอุณหภูมิน้ำหนักของวัตถุดิบและเวลา พบว่า ที่อุณหภูมิ 80°C น้ำหนักของวัตถุดิบ 50g เวลาในการย่างที่เหมาะสม อยู่ในระยะเวลาประมาณ 3-4 mins ที่อุณหภูมิ 90°C น้ำหนักของวัตถุดิบ 50g เวลาในการย่างที่เหมาะสม อยู่ในระยะเวลาประมาณ 3 mins ที่อุณหภูมิ 100°C น้ำหนักของวัตถุดิบ 50g เวลาในการย่างที่เหมาะสม อยู่ในระยะเวลาประมาณ 2-3 mins ที่อุณหภูมิ 110°C น้ำหนักของวัตถุดิบ 50g เวลาในการย่างที่เหมาะสม อยู่ในระยะเวลา 2 mins ที่อุณหภูมิ 120°C น้ำหนักของวัตถุดิบ 50g เวลาในการย่างที่เหมาะสม อยู่ในระยะเวลา 2 mins เมื่อเทียบกับการย่างด้วยเครื่องเตาถ่านธรรมดา (Figure 3) น้ำหนักวัตถุดิบจำนวน 50g สามารถวัดอุณหภูมิการย่างได้ 112°C โดยใช้เวลานานถึง 20 นาที

Table 1 *B. strychnifolia* 50 g grilling with double belt conveyor dryer (DBCD: test 1-6) and charcoal stove (CS: test 7) at different temperatures (°C) and times (mins).

Test [a]	Grilling with	Temperature (°C)	Time (mins)
1	DBCD	80	3
			4
2	DBCD	90	3
3	DBCD	100	2
4	DBCD	110	2
5	DBCD	112	2
6	DBCD	120	2
7	CS	112	20

[a] *B. strychnifolia* grilling with double belt conveyor dryer (Figure 4) and charcoal stove (Figure 3) for tea product

จาก Table 2 พบว่า สารสำคัญประเภท Gallic acid จะมีปริมาณสูงเมื่อทำผลิตย่านางแดงด้วยการย่างด้วยเครื่องย่างแบบสองสายพานด้วยอุณหภูมิสูง และใช้เวลาสั้นกว่า เช่น การย่างด้วยเครื่องย่าง ที่อุณหภูมิ 110-112°C เป็นเวลา 2 mins และให้ผลใกล้เคียงกับการย่างด้วยเครื่องย่างที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3 mins สารสำคัญประเภท Syringic acid และ P-cumaric acid จะมีค่าสูงกว่าเมื่อทำการย่างย่านางแดง อุณหภูมิต่ำกว่าคือ 80°C.

Table 2 Comparison of Phenolic acid content (mg (10g1) DW) of B. strychnifolia using HPLC after grilling with double belt conveyor dryer (DBCD) and charcoal stove (CS) at different temperatures (°C) and times (mins).

Process	Phenolic acid content [a] (mg/10g DW)		
	Gallic acid	Syringic acid	P-cumaric acid
DBCD 80°C, 3 mins	5.17±0.12b	1.01±0.60b	2.21±0.33c
DBCD 80°C, 4 mins	4.18±0.05d	.97±0.09b	3.89±0.06a
DBCD 90°C, 3 mins	5.13±0.28b	.61±0.14bc	2.24±0.27c
DBCD100°C, 2 mins	2.97±0.06e	.71±0.34bc	3.27±0.13b
DBCD 110°C, 2 mins	5.22±0.25b	.67±0.06bc	3.56±0.31ab
DBCD 112°C, 2 mins	5.13±0.18b	.51±0.01c	1.34±0.12d
DBCD 120°C, 2 mins	4.48±0.02c	.60±0.03bc	2.30±0.28c
CS 112°C, 20 mins	4.75±0.25c	.92±0.03bc	3.30±0.16b

[a] Values are means± SD (n=3).Values in the columns with different letters are significantly different ($P < 0.05$), according to Duncan's multiple range test

Table 3 Comparison of Flavonoid constituents of *B. strychnifolia* using HPLC after grilling with double belt conveyor dryer (DBCD) and charcoal stove (CS) at different temperatures (°C) and times (mins)

process	Flavonoid constituents [a] (mg CE /10g DW)			
	(+)-Catechin	Myricentin	Quercetin	Kaempferol
DBCD 80°C, 3 mins	13.42±3.27cd	136.40±0.71c	ND	ND
DBCD 80°C, 4 mins	16.82±0.12b	206.81±1.57a	ND	ND
DBCD 90°C, 3 mins	10.17±2.13e	122.01±3.27d	ND	ND
DBCD100°C, 2 mins	5.03±1.05d	203.96±3.66a	ND	ND
DBCD110°C, 2 mins	4.82±0.45d	200.29±1.88a	ND	ND
DBCD112°C, 2 mins	14.98±0.99bc	94.32±0.90e	ND	ND
DBCD120°C, 2 mins	11.87±0.82e	162.73±13.27b	ND	ND
CS 112°C, 20 mins	17.54±0.20b	56.29±1.67f	ND	ND

[a] Values are means± SD (n=3) ; ND, not detected. Values in the columns with different letters are significantly different ($P < 0.05$), according to Duncan's multiple range test.

จาก Table 3 พบว่า สารสำคัญประเภท (+)-Catechin จะมีปริมาณสูงเมื่อทำผลิตย่านางแดงด้วยอุณหภูมิสูง และใช้เวลาสั้น เช่น การย่างที่อุณหภูมิ 112°C เป็นเวลา 2 mins และให้ผลใกล้เคียงกับการย่างที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า คือ 80°C ในเวลาที่นานกว่าเล็กน้อย คือ 4 mins สารสำคัญประเภท Myricetin จะมีค่าสูงกว่าเมื่อทำการย่างย่านางแดงที่อุณหภูมิต่ำกว่าคือ 80°C เป็นเวลา 4 mins และที่อุณหภูมิ 100-110°C เป็นเวลา 2 mins สารสำคัญประเภท Quercetin และ Kaempferol ตรวจไม่พบในใบย่านางแดงเมื่อใช้วิธีการวัดด้วยเครื่อง HPLC

จาก Table 4 พบว่า การตรวจวัดปริมาณฟลาโวนอยด์โดยรวม จะมีปริมาณสูงกว่าเมื่อย่างย่านางแดงด้วยเครื่องย่างแบบสองสายพานลำเลียงที่อุณหภูมิสูง และใช้เวลาสั้น เช่น การย่างที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 mins และให้ผลใกล้เคียงกับการย่างที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า คือ 80°C ในเวลาที่นานกว่าเล็กน้อย คือ 4 mins ซึ่งมีค่า 77.91 และ 71.45 mgCE/100g DW

ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปริมาณฟลาโวนอยด์ของใบย่านางแดงที่ได้จากการอบด้วยตู้อบลมร้อน มีค่าเท่ากับ 122.10 mgCE-/100g DW (Kaeothaisong et al., 2016)

Table 4 Comparison of total flavonoid content (TFC) and antioxidant activity (VCEAC) of *B. strychnifolia* grilling with double belts conveyor dryer (DBCD) and charcoal stove (CS) at different temperatures (°C) and times (mins)

process	TFC (mgCE/100g DW)	VCEAC (mmolVCEAC/g DW)
DBCD 80°C, 3 mins	54.26±4.02bc	93.43±0.24a
DBCD 80°C, 4 mins	71.45±5.59ab	93.72±0.57a
DBCD 90°C, 3 mins	65.61±4.20b	93.50±0.16a
DBCD100°C, 2 mins	65.51±1.26b	94.00±0.24a
DBCD110°C, 2 mins	67.59±9.41b	93.91±0.29a
DBCD112°C, 2 mins	51.86±2.62c	92.43±0.14b
DBCD120°C, 2 mins	77.91±10.22a	93.59±0.25a
CS 112°C, 20 mins	63.43±4.16bc	93.87±0.43a

[a] Values are means± SD (n=3) ; ND, not detected. Values in the columns with different letters are significantly different ($P < 0.05$), according to Duncan's multiple range test.

สารต้านอนุมูลอิสระเมื่อวัดด้วยวิธี VCEAC จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อทำการย่างย่านางที่อุณหภูมิระหว่าง 80-120°C เป็นเวลา 2-4 mins และใกล้เคียงกับการย่างย่านางแดงด้วยอุณหภูมิ 112°C เป็นเวลา 20 mins แสดงว่า การผลิตชาสมุนไพรย่านางแดง การย่างด้วยเครื่องย่างแบบสองสายพานลำเลียงมีคุณภาพในการต้านสารอนุมูลอิสระ ใกล้เคียงกับวิธีย่างด้วยเตาถ่าน

4 สรุป

เครื่องย่างแบบสองสายพานทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในอุณหภูมิที่สอดคล้องกับระยะเวลาในการย่างที่ใช้เวลาน้อย เมื่อใช้เครื่องที่อุณหภูมิ 110°C ใช้เวลา 2 mins ปริมาณวัตถุดิบ 50 g จะได้ใบย่านางแดงที่กรอบทั่วทั้งใบ ให้กลิ่นหอมได้ดีที่สุด และในระยะเวลา 2 mins โดยความเร็วรอบของมอเตอร์อยู่ที่ 3.16 rpm ต่อวินาที ในการย่างใบย่านางแดงนี้ด้วยระบบลำเลียงแบบสองสายพานที่ได้ออกแบบไว้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาทั้งหมด 200 g เมื่อคิดเป็นชั่วโมงจะได้ผลิตภัณฑ์ถึง 6 kg ต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ คือ สามารถผลิตได้มากกว่า 10 kg ต่อวัน

เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม เครื่องย่างแบบสองสายพานลำเลียง สามารถให้ค่าขององค์ประกอบทางเคมีสูงกว่าและสารต้านอนุมูลอิสระใกล้เคียงกันกับการย่างด้วยเตาถ่าน ดังนั้น เครื่องย่างสองสายพานจึงเป็นเครื่องย่างที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความร่วมมือและความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ขอขอบพระคุณแหล่งทุนวิจัยทุนอุดหนุนโครงการวิจัยในการบ่มเพาะธุรกิจวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรม ขอขอบคุณศูนย์ความร่วมมือกับภาคอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และผู้บริหาร และบุคลากรของศูนย์ความร่วมมือกับภาคอุตสาหกรรมทุกท่าน ขอขอบคุณ บริษัท เดอะ กีฟวิ่ง ที จำกัดและขอขอบคุณผู้บริหาร และ บุคลากรสถาบันวิจัยวลัยรุกขเวช ศูนย์เครื่องมือกลาง ศูนย์นวัตกรรมไหม ที่ได้มีส่วนร่วมในการวิจัย และการให้การอำนวยความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6 เอกสารอ้างอิง

ชลธี โพธิ์ทอง และ รัชนี นามมาตย์. (2558). อนุสิทธิบัตร เลขที่ 10845. เครื่องย่างแบบปรับอุณหภูมิได้ด้วยหลอดอินฟราเรดที่มีสองสายพาน. กรุงเทพฯ: กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์.

พีระพล ใสสะอาด, วรรณชัย ชาแท่น สุธิรา มณีฉาย. 2015. ความหลากหลายของพืชสกุลชงโค (Buahinia L.) ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย. วารสารวิจัย มสด สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 8(2), 87-116.

รัชนี นามมาตย์ และไชยา สนิท. (2556). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชาสมุนไพรจากสมุนไพรพื้นบ้านในผลิตภัณฑ์ชาเพื่อสุขภาพ (รายงานผลการวิจัย). มหาสารคาม: ศูนย์ความร่วมมือกับภาคอุตสาหกรรม.

Bunluepuech, K., Wattanapiromsakul, C., Madaka, F., Tewtrakul, S. 2013. Anti-HIV-1 and anti-allergic activities of Bauhinia strychnifolia. Songklanakarin Journal of Science and.Technology. 35(6), 659-664.

Jorjong, S., Butkhup, L., Samappito, S. 2015. Phytochemicals and antioxidant capacities of Mao-Luang (Antidesma bunius L.) cultivars from Northeastern Thailand. Food Chemistry 181, 248-255.

Kaisoon, O., Siriamornpun, S., Weerapreeyakul, N., Meeso, N. 2011. Phenolic compounds and antioxidant activities of edible flowers from Thailand. Journal of Funtional Foods 3, 88-99.

Kaeothaisong, N., Nam-Matra, R. and Khammuang, S. 2016. Pancreatic Lipase Inhibitory Activity of Selected Herbal infusions. In: Moongngam, A., Ruangwittayanusorn, K., Butkhup, L., Duangkhamchan, W., Keewduangta, W., Thaimuangphol, W., Sutthi, N. (Eds). Proceedings of the Third International Postgraduate Symposium on Food Agriculuture & Biotechnology, 103-114. Faculty of Technology, Mahasarakham University: IPSFAB International. 7–8 September 2016, Maha Sarakham, Thailand.

Wanyo, P., Siriamornpun, S., Meeso, N. 2011. Improvement of quality and antioxidant properties of dried mulberry leaves with combined far-infrared radiation and air convection in Thai tea process. Food and Bioproducts Processing 89, 22-30.

Wutthithammavet, W. 1997. Thai Traditional Medicine. Odean Store Press. Bangkok.

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 (2560) 52-58
Available online at www.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ

บทความวิจัย

ISSN 1685-408X

เครื่องล้างทำความสะอาดอ้อยสำหรับทำอ้อยคั้นน้ำ

A Sugar Cane Washing Machine for Fresh Juice Production

พิมพ์พรรณ ปรืองาม[1*], นงลักษณ์ เล็กรุ่งเรืองกิจ[1], ภวินท์ ธัญภัทรานนท์[1]

Pimpan Pruengam[1*], Nonglak Lekrungroenggid[1], Pawin Thanpattranon[1]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

[1]Department of Agricultural Engineering, Kasetsart University -Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

*Corresponding author: Tel: +66-8-6504-5685, Fax: +66- 34-261-062, E-mail: fengpppn@ku.ac.th

บทคัดย่อ

เครื่องล้างทำความสะอาดอ้อยสำหรับอ้อยคั้นน้ำ เป็นเครื่องที่สร้างขึ้นมาเพื่อรองรับกระบวนการล้างท่อนอ้อยที่ผ่านการปอกเปลือกหรือการขัดผิวมาแล้ว เพื่อเพิ่มความสะอาดในกระบวนการล้างให้มีประสิทธิภาพและความสะอาดให้อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ โดยออกแบบแปรงล้างที่ทำงานพร้อมกับน้ำที่ฉีดผ่านด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่ง วางแนวการทำงานของแปรงล้างตามแนวขวางของท่อนอ้อย และพัฒนาชุดลำเลียงเพื่อให้ท่อนอ้อยเข้าสู่ชุดแปรงล้างอย่างต่อเนื่อง การทดลองกำหนดความเร็วรอบชุดป้อนให้คงที่ คือ 16 rpm ความเร็วรอบของชุดแปรงล้าง 3 ระดับ คือ 720, 864 และ 960 rpm ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำ 3 ระดับ คือ 5, 7.5 และ 10 lpm จากผลการทดลอง พบว่า ความเร็วรอบของชุดแปรงล้าง 864 rpm ที่อัตราการไหลของน้ำ 5 lpm เป็นชุดการทำงานที่ดีที่สุด เพราะอ้อยมีความสะอาดมากที่สุด แม้จะใช้น้ำน้อยลงก็ยังสามารถทำความสะอาดท่อนอ้อยได้ใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง นอกจากนี้ ยังมีอัตราการทำงานที่สูงกว่าการล้างด้วยแรงงานคนถึง 3 เท่า

คำสำคัญ: ชุดแปรงล้าง, อัตราการไหลของน้ำ, ปริมาณของแข็งทั้งหมด, ปริมาณการใช้น้ำ

Abstract

A sugar cane washing machine for fresh juice production was developed. It was cabable of washing peeled or polished sugar cane. The objective of this work was to improve the effectiveness of the washing process such that the level of cleanliness was satisfactorily achieved. The brush units that operated along the circumference of sugar cane were designed to work with water injection flow rates over a certain value. The feeding units sent sugar canes into the brush units continuously. The speed of the feeding units was fixed at 16 rpm, the speeds of the brush unit were 720, 864 and 960 rpm in conjunction with three water flow rates of 5, 7.5, and 10 lpm, respectively. The optimum rotational speed of the brush units of 864 rpm and the water flow rate of 5 lpm resulted in the highest cleanliness based on the number of total solids in water. At a lower water usage rate, the sugar cane still maintained a level of cleanliness similar to that of the reference sugar cane. Furthermore, the washing capacity from machine yielded substantially was about 3 times higher than human labors.

Keywords: Brush unit, Water flow rate, Total Solid, Water Usage

1 บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอ้อยคั้นน้ำเป็นอุตสาหกรรมที่น่าสนใจและมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว แต่ยังคงใช้แรงงานคนมาก ทำให้การเพิ่มกำลังการผลิตทำได้ยาก ในกระบวนการผลิตน้ำอ้อยหลังจากปอกเปลือกอ้อยโดยใช้แรงงานคนปอกแล้วต้องอาศัยแรงงานในการล้างอ้อยให้สะอาด ก่อนที่จะนำอ้อยไปคั้นน้ำด้วยเครื่องคั้นน้ำอ้อย ในขั้นตอนนี้ใช้ปริมาณน้ำในการล้างเป็นจำนวนมากทำให้ต้นทุนการผลิตสูง นอกจากนั้นการต้องพึ่งพาแรงงานเป็นจำนวนมากทำให้มีปัญหาในการจัดการแรงงานโดยเฉพาะในช่วงที่แรงงานขาดแคลน จากปัญหาดังกล่าวนี้จึงมีการศึกษาและพัฒนาเครื่องล้างทำความสะอาดอ้อยสำหรับทำน้ำอ้อยคั้นเพื่อให้อ้อยมีความสะอาดก่อนที่จะนำมาคั้น

จากงานวิจัยของ Tilby et al. (1992) ได้ทำการออกแบบเครื่องล้างอ้อย ภายในถังล้างมีหัวฉีดพ่นน้ำแรงดันสูงตลอดความยาวถัง ถังล้างหมุนด้วยมอเตอร์ทำให้อ้อยถูกล้างอย่างทั่วถึง สามารถทำงานได้ต่อเนื่อง เมื่อผ่านการล้างแล้วทั้งอ้อยและน้ำจะไหลออกทางด้านท้ายถังเนื่องจากถังมีความเอียง จากลักษณะการทำงานของเครื่องดังกล่าว อ้อยจะถูกตัดเป็นท่อนสั้นๆ ก่อนจะนำไปล้าง ซึ่งไม่เหมาะกับเครื่องคั้นน้ำซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการคั้นตลอดความยาวลำอ้อย

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2547) ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องล้างผักผลไม้ไฮเทค โดยอาศัยหลักการของระบบต่อเนื่องแบบโรตารีดรัม ภายในท่อล้างจะมีขนแปรงพลาสติกสำหรับใช้ทำความสะอาดให้สิ่งสกปรกที่ติดอยู่กับวัตถุดิบถูกขจัดออก ระยะเวลาการล้างวัตถุดิบหลังจากป้อนเข้าผ่านระบบท่อหมุนและสเปรย์ฉีดพ่นน้ำ เครื่องล้างผักไฮเทคนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับวัตถุดิบหลากหลายชนิด เช่น ข่า ขิง หอม กระเทียม มะกรูด มันสำปะหลัง แครอท เผือก และมัน เป็นต้น มีกำลังการผลิต 500-900 kg h-1 ต่อมาสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2555) ได้ออกแบบคิดค้นเครื่องล้างมะนาว มีประสิทธิภาพประมาณ 20,000 fruit h^{-1} ด้วยหลักการทำงานที่มีน้ำฉีดพ่นและหมุนเวียนเป็นองค์ประกอบสำคัญในการทำความสะอาด หมุนขับด้วยระบบเฟืองโซ่ใช้มอเตอร์เกียร์ สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง การทำงานของเครื่องล้างมะนาว เริ่มจากนำผลมะนาวลงในถังรับซึ่งผสมน้ำยาคลอรีนหรือน้ำยาฆ่าเชื้อราจากนั้นสายพานลำเลียงจะส่งผลมะนาวไปยังลูกกลิ้งแปรง ซึ่งมีน้ำฉีดพ่นมาที่ผลมะนาวใช้ระบบหัวฉีดพ่น ถอดประกอบง่ายแบบ clip eyelet nozzle เป็นตัวพ่นลงมาเนื่องจากสามารถถอดล้างได้ง่ายจึงลดปัญหาการอุดตันจากตะกอน

จากรายงานผลการศึกษาของนักวิจัยหลายคนได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการล้าง มีหลักการทำงานความคล้ายคลึงกันและเหมาะกับวัตถุดิบรูปร่างเป็นก้อนและไม่ยาว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบเครื่องล้างอ้อยสำหรับอ้อยท่อนยาวที่ทำการปอกเปลือกหรือขัดผิวแล้ว โดยศึกษาความเร็วรอบของชุดแปรงล้าง และอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อความสะอาดของท่อนอ้อยที่เหมาะสม นอกจากนี้อุตสาหกรรมการผลิตน้ำอ้อยคั้นในบางแห่งไม่ปอกเปลือกอ้อยมีเพียงขั้นตอนการล้างท่อนอ้อยก่อนคั้นเท่านั้น (Kehinde et al, 2015; Salit, 2014) ซึ่งสามารถนำเครื่องล้างไปใช้ประโยชน์ได้

2 หลักการออกแบบเครื่องล้าง

หลักการออกแบบ คือ อัตราการทำงานต้องมากกว่าการล้างด้วยแรงงานคน ลักษณะการล้างทำความสะอาดจะมีแปรงพลาสติกจะขัดตามแนวยาวของท่อนอ้อยและมีน้ำชะล้างตลอดเวลา อาศัยผู้ปฏิบัติงานเพียงคนเดียว ซึ่งจะจับตอนเริ่มต้นป้อนอ้อยเข้าสู่เครื่องทีละหลายลำและหลังจากนั้นอ้อยสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องได้เองโดยไม่ต้องอาศัยผู้ปฏิบัติงาน ช่วยลดความเมื่อยล้าในการทำงาน อ้อยที่ผ่านการล้างแล้วต้องสะอาดและประหยัดน้ำ

เครื่องประกอบด้วยส่วนสำคัญๆ 3 ส่วนคือ ชุดลำเลียงอ้อย แปรงขัดพลาสติก และหัวฉีดน้ำ ดังแสดงใน Figure 1 ลักษณะการทำงานของเครื่อง คือ เมื่อชุดลำเลียงป้อนอ้อยเข้าสู่เครื่องล้าง แปรงขัดพลาสติกหมุนเพื่อขัดทำความสะอาดรอบๆ ลำอ้อย ขณะเดียวกันหัวฉีดจะพ่นน้ำออกมาทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกได้ง่ายและทั่วถึงมากยิ่งขึ้น อ้อยที่ผ่านการล้างแล้วจะออกทางด้านท้ายเครื่อง

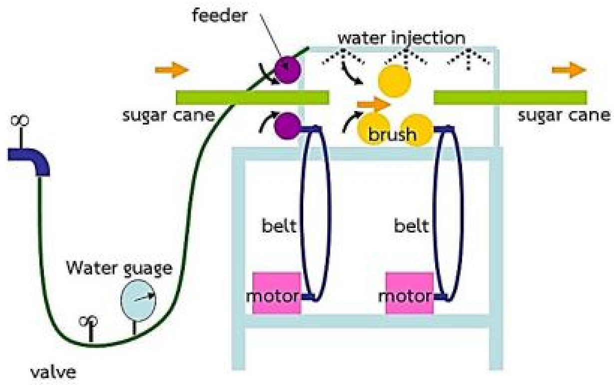


Figure 1 Components of the sugar cane washing machine.

2.1 *ชุดลำเลียงอ้อย (Feeder)*

ชุดลำเลียงอ้อยจะอยู่ด้านหน้าสุด เพื่อที่จะเป็นตัวดึงอ้อยเข้าไปยังชุดแปรงล้าง (Brush) เมื่อมองจากทางด้านขวาของเครื่อง ชุดลำเลียงตัวล่างจะหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา ส่วนชุดลำเลียงตัวบนจะถูกออกแบบให้กดท่อนอ้อยและหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา การใช้ชุดลำเลียงจะสามารถประคองอ้อยและควบคุมความเร็วอ้อยที่เข้าสู่เครื่องได้อย่างต่อเนื่อง

ชุดลำเลียงประกอบด้วยท่อ PVC (PVC pipe) ทำหน้าที่ลูกกลิ้งจำนวน 2 ตัว ซึ่งมีแผ่นโค้งที่ทำจากท่อ PVC (PVC curved plate) ตัดเป็นเส้นยาวยึดติดอยู่กับตัวท่อ มีแหวนยึดติดบริเวณหัวท้ายแล้วเจาะรูสำหรับสวมเพลา ดังแสดงใน Figure 2

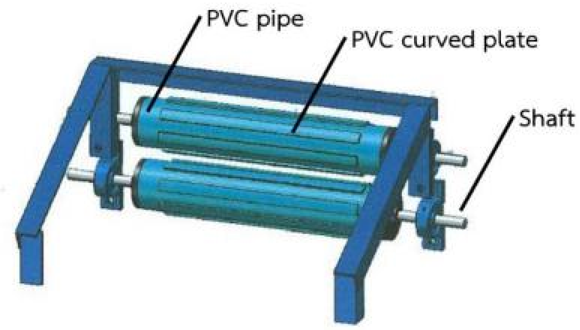


Figure 2 Components of the feeding units.

ชุดลำเลียงทำงานได้โดยมอเตอร์ซึ่งส่งกำลังไปยังเกียร์ทดเพื่อทดรอบให้เหลือ 48 รอบต่อนาที (พิมพ์พรรณ, 2551) และส่งกำลังไปยังเพลาชุดลำเลียงตัวล่าง ในขณะที่ชุดลำเลียงตัวบนจะหมุนอิสระ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประคองอ้อยเข้าสู่ชุดแปรงขัดพลาสติก

2.2 ชุดแปรงล้าง

ออกแบบลักษณะการขัดให้เป็นแบบตามแนวยาวซึ่งเป็นการขัดแบบตามเส้นใย ชุดแปรงล้างประกอบด้วยแปรงพลาสติก 3 ชุด ซึ่งแปรงล้าง 2 ชุดล่างจะหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา และแปรงล้างชุดบนจะหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ชุดแปรงล้างทำจากท่อ PVC เจาะรูรอบท่อแล้วใส่ขนแปรงตามรูที่เจาะ ทำแหวนยึดติดกับท่อ PVC แล้วใช้สกรูเป็นตัวยึดติด เจาะรูสำหรับสวมเพลา ดังแสดงใน Figure 3

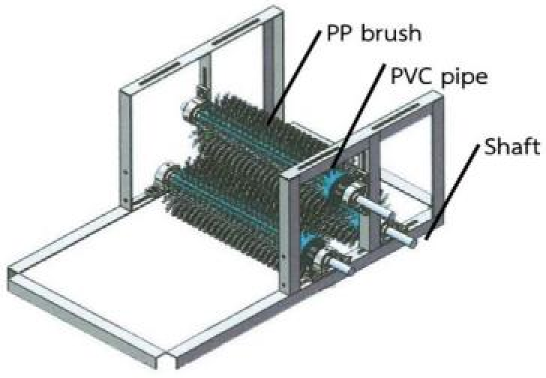


Figure 3 Components of the brush units.

2.3 หัวฉีดพ่นน้ำ

หัวฉีดที่ใช้คือหัวฉีดน้ำแบบแรงปะทะ ซึ่งเป็นหัวที่มีแรงดันต่ำจำนวน 2 แถว แถวละ 3 หัวฉีดจะเรียงแถวอยู่ด้านบนของตัวเครื่อง ขณะล้างหัวฉีดจะพ่นน้ำออกมา สามารถปรับอัตราการไหลของน้ำได้โดยใช้วาล์ว และน้ำที่ผ่านการล้างจะไหลลงทางด้านข้างซึ่งจะมีแผ่นกั้น เพื่อป้องกันมอเตอร์และสายไฟเสียหายจากน้ำ

หัวฉีดพ่นน้ำหนึ่งแถวจะประกอบด้วยหัวฉีด 3 หัว ยาว 10cm เชื่อมติดกับก้านฉีดยาว 50cm โดยเว้นระยะห่างระหว่างหัวฉีด 17cm ดังแสดงใน Figure 4 ขณะเครื่องล้างทำความสะอาดหัวฉีดจะพ่นน้ำลงมายังแปรงล้าง เพื่อเป็นตัวช่วยชะล้างทำความสะอาดอ้อย

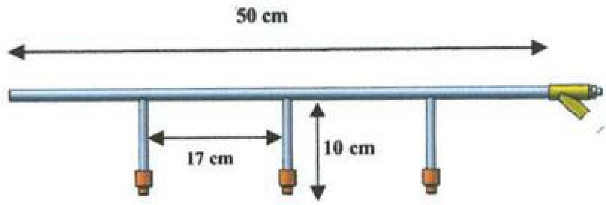


Figure 4 Water injection units of the sugar cane washing machine.

2.4 ระบบส่งกำลัง

ระบบส่งกำลังใช้ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟส 220 V ขนาด 0.75 kW ส่งกำลังด้วยสายพานลิ่มร่อง B (ล้อสายพานร่องคู่) ไปยังเพลาส่งกำลังของแปรงพลาสติกแต่ละชุดด้วยอัตราทดที่แตกต่างกันไปตามขนาดล้อสายพาน

2.5 โครงสร้างเครื่องและลักษณะการทำงานของเครื่อง

โครงสร้างจะใช้เหล็กฉาก 40×40×4 mm เหล็กเพลาขนาด 25.4 mm และแผ่นเหล็กหนา 2 mm เมื่อประกอบส่วนต่างๆ สมบูรณ์แล้ว ดังแสดงใน Figure 5 โครงสร้างมีขนาด 880 × 1,350 ×1,200 mm

Figure 5 The completed sugar cane washing machine.

3 อุปกรณ์และวิธีการ

อ้อยที่ใช้ในการทดลองคืออ้อยพันธุ์สุพรรณบุรี 50 และมีอายุประมาณ 7–8 เดือน ทำการคัดเลือกอ้อยที่มีขนาดต่างๆ จำนวน 600 ลำ จากนั้นนำมาตัดให้ยาว 150 cm นำไปขัดผิวด้วยเครื่องขัดผิวท่อนอ้อยแบบป้อนต่อเนื่อง (พิมพ์พรรณ, 2551)

3.1 การศึกษาเงื่อนไขการล้างที่เหมาะสม

นำท่อนอ้อยที่ผ่านการขัดผิวไปชั่งน้ำหนักก่อนทดลอง ป้อนอ้อยเข้าสู่ชุดป้อนของเครื่องล้าง ชุดแปรงล้างทำงานโดยได้รับกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 hp ความเร็วรอบ 1,440 rpm เปลี่ยนขนาดล้อสายพาน เพื่อให้ได้ความเร็วรอบของแปรงล้างที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 720, 864 และ 960 rpm (พิมพ์พรรณ, 2551) และในการปฏิบัติงานจริงล้างด้วยน้ำ 10 lpm ดังนั้นจึงปรับวาล์วที่ส่งน้ำเข้าหัวฉีดเพื่อให้ได้อัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 5, 7.5 และ 10 lpm ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

ขณะเครื่องล้างทำความสะอาดอ้อย บันทึกเวลารวมที่ใช้ในการทำงานแต่ละครั้งตั้งแต่อ้อยป้อนเข้าสู่ชุดป้อนจนกระทั่งออกจากชุดแปรงล้าง เพื่อหาอัตราการทำงานและอัตราการไหลของน้ำทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบดังสมการ (1) และ (2)

$$\text{อัตราการทำงาน (kg h}^{-1}) = \frac{\text{น้ำหนักของท่อนอ้อยก่อนล้าง (kg)}}{\text{เวลาที่ใช้ในการล้าง (h)}} \quad (1)$$

$$\text{ปริมาณน้ำที่ใช้ } (l) = \text{อัตราการไหลของน้ำจากหัวฉีด (lpm)} \times \text{เวลาที่ใช้ในการล้าง (min)} \quad (2)$$

3.2 การวัดความสะอาดของท่อนอ้อย

ความสะอาดของอ้อยพิจารณาจากความพึงพอใจของผู้ประกอบการ ซึ่งกำหนดให้ความสะอาดแปรตามปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids) ในน้ำที่ได้จากการล้าง ในที่นี้ปริมาณของแข็งทั้งหมด หมายถึงวัตถุที่เหลืออยู่หลังจากทำให้แห้งจนมีน้ำหนักคงที่ (สันติ์, 2527)

นำน้ำที่ล้างท่อนอ้อย ใส่ถ้วยอลูมิเนียม 20 กระป๋อง ถ้วยละ 10ml อบในเตาอบด้วยอุณหภูมิ 103°C นาน 60 min ชั่งน้ำหนักของแข็งทั้งหมดที่เหลืออยู่ในถ้วย คำนวณหาปริมาณของแข็งทั้งหมด ดังสมการ (3)

$$\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg l-1)} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็งที่เหลือหลังอบ(mg)}}{\text{ปริมาณน้ำที่นำมาอบ (l)}} \quad (3)$$

ความสะอาดของท่อนอ้อยหลังการล้างด้วยเครื่องนำมาเปรียบเทียบกับความสะอาดของท่อนอ้อยอ้างอิง ที่ล้างด้วยผู้ปฏิบัติการซึ่งใช้น้ำ 10 l และขัดด้วยแปรงจนกระทั่งสะอาด (ผู้ประกอบการพึงพอใจ)

3.3 การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

3.3.1 การประเมินค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

ต้นทุนในการใช้เครื่องล้างทำความสะอาดอ้อย นั้นประกอบด้วย (1) ค่าใช้จ่ายคงที่ (Fixed Cost) และ (2) ค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable Cost)

ค่าใช้จ่ายคงที่ (ต้นทุนคงที่) เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในระยะเวลาที่กำหนด ไม่ขึ้นกับปริมาณการใช้เครื่องจักร ประกอบด้วย ดอกเบี้ยจากการลงทุนสร้างเครื่องจักร และค่าเสื่อมราคา การคิดค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรง (Straight-Line Depreciation) เป็นวิธีที่นิยมใช้เพราะคำนวณง่าย

$$\text{ค่าเสื่อมราคาเครื่องแบบเส้นตรง (Bath year}^{-1}) = \frac{P - L}{N} \quad (4)$$

โดย P = ราคาซื้อเครื่องจักร (Baht)

L = ราคาซากเครื่องจักร (Baht)

N = อายุการใช้งาน (year)

$$\text{ค่าดอกเบี้ยในการลงทุน (Bath year}^{-1}) = \frac{P + L}{2} \times \frac{i}{100} \quad (5)$$

โดย i = อัตราดอกเบี้ยต่อปี (%)

FC = ค่าเสื่อมราคาเครื่อง + ค่าดอกเบี้ยในการลงทุน (6)

โดย FC = ต้นทุนคงที่รวม (Baht year^{-1})

ค่าใช้จ่ายผันแปร (ต้นทุนผันแปร) เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตามปริมาณการใช้งานประกอบด้วยค่าบำรุงรักษา ค่าไฟฟ้า ค่าจ้างแรงงาน และค่าน้ำประปา

ค่าบำรุงรักษา (Bath year^{-1}) = ราคาเครื่อง × ค่าซ่อมแซม (7)

โดย อายุการใช้งานของเครื่องจักรกลเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว 10 year ค่าซ่อมแซมประมาณ 120% ของราคาเครื่อง วันทำงาน 1 year หยุดเสาร์-อาทิตย์ ทำงาน 260 day

ค่าจ้างแรงงาน (Bath year^{-1}) = อัตราค่าจ้าง × วันทำงาน (8)

โดย อัตราค่าจ้างแรงงานวันละ 310 Baht (ค่าแรงขั้นต่ำนครปฐม 1 มกราคม 2560 กระทรวงแรงงาน) แรงงานทำงาน 1 คน

ค่าไฟฟ้า (Bath year^{-1}) =
จำนวนหน่วยไฟฟ้า × ค่าหน่วยไฟฟ้า × วันทำงาน (9)

จำนวนหน่วยไฟฟ้า (unit day^{-1}) =
ความสิ้นเปลืองไฟฟ้า×ชั่วโมงทำงาน (10)

โดย ความสิ้นเปลืองไฟฟ้า 0.727 kW ใน 1 day ทำงาน 8 h
ค่าหน่วยไฟฟ้า 3 Baht unit-1

ค่าน้ำประปา $(\text{Bath year}^{-1}) =$
อัตราค่าน้ำประปา x สิ้นเปลืองน้ำ (11)

โดย อัตราค่าน้ำประปาพื้นที่การประปาส่วนภูมิภาคเขต 3
สิ้นเปลืองน้ำ 72 l ต่อเดือน

VC =ค่าบำรุงรักษา+ค่าจ้างแรงงาน+ค่าไฟฟ้า+ค่าน้ำประปา (12)

โดย VC = ต้นทุนผันแปรรวม (Baht year^{-1})

AC = FC + VC (13)

โดย AC = ต้นทุนรวมทั้งหมด (Baht year^{-1})

3.3.2 *จุดคุ้มทุน (Break Even Point)*

จุดซึ่งรายได้จากการลงทุนคุ้มกับค่าลงทุน หรืออีกนัยหนึ่งหมายถึง จุดที่แสดงค่าใช้จ่ายกับรายรับเท่ากัน ซึ่งมีความหมายว่าเป็นจุดซึ่งมีกำไรเป็นศูนย์นั่นเอง ทั้งนี้เครื่องสามารถทำงานได้ 1,259 kg h^{-1}

$$BEP = \frac{FC}{p - vc} \quad (14)$$

โดย BEP = จุดคุ้มทุน (ton year-1)
Vc = ค่าใช้จ่ายผันแปรต่อหน่วย (Baht year-1)
P = ค่ารับจ้างเครื่องล้างอ้อย (Baht kg-1)

3.3.3 *ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)*

ระยะเวลาคืนทุน คือ เวลาที่ต้องการเพื่อให้การลงทุนเริ่มต้นได้รับการคืนทุน โดยไม่คำนึงถึงค่าของเงินที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$PBP = \frac{CF_0}{YCF} \quad (15)$$

$$YCF = R - AC \quad (16)$$

โดย CF_0 = ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการสร้างเครื่องล้าง (Baht)
YCF = กำไร (Baht year^{-1})
R = รายได้ (Baht year^{-1})
AC = ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นในการล้างอ้อย (Baht)

ค่ารับจ้างเครื่องล้างท่อนอ้อยพิจารณาในช่วงเท่ากับ 0.05 – 0.5 Baht kg^{-1}

3.4 *การวิเคราะห์ผลทางสถิติ*

วิเคราะห์ความแปรปรวนผลของระดับความเร็วรอบชุดแปรงล้างและอัตราการไหลของน้ำจากหัวฉีดต่ออัตราการทำงาน ปริมาณของแข็งทั้งหมด และอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละวิธีโดยใช้การทดสอบแบบดันแคน (Ducan multiple range test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \le 0.05$)

4 ผลและวิจารณ์

4.1 *ผลทดลองการทำงาน*

อ้อยที่นำมาทดสอบผ่านการขัดผิวแล้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 28.16 mm จากผลการทดลองทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างอ้อยสำหรับคั้นน้ำที่ความเร็วรอบชุดป้อนคงที่ 16 rpm ใช้ความเร็วรอบแปรงล้าง 720, 864 และ 960 rpm และปรับวาล์วที่ส่งน้ำเข้าหัวฉีดเพื่อให้ได้อัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.5, 7.5 และ 10 lpm ผลของความเร็วรอบแปรงล้างและอัตราการไหลของน้ำที่มีผลต่อการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

จากการทดสอบทำการวัดความสะอาดของอ้อยหลังผ่านการล้างด้วยเครื่องที่ระดับการทดลองต่างๆ ดังแสดงใน Table 1 พบว่า ที่ความเร็วรอบแปรงล้าง 864 rpm และ อัตราการไหลของน้ำจากหัวฉีด 5 lpm มีความสะอาดของอ้อยสูงสุด คือ 1,890±26 mg l^{-1} ซึ่งพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมด และมีความสะอาดใกล้เคียงกับการล้างด้วยผู้ปฏิบัติการ (1,928±38 mg l^{-1}) มากที่สุด

Table 1 Total solid (mg l^{-1}).

Water flow	Brush units speed (rpm)		
rate (lpm)	720	864	960
5	1,887±46^{Ba}	1,890±26^{Aa}	1,377±39^{Ca}
7.5	1,201±47^{Bc}	1,483±35^{Ac}	1,271±43^{Cc}
10	1,503±33^{Bb}	1,721±22^{Ab}	1,228±51^{Cb}

Means followed by different capital letters in the same column and different small letters in the same row are statistically different by the test of Ducan ($p \le 0.05$)

เมื่อพิจารณาอัตราการทำงานดังแสดงใน Table 2 พบว่า ที่ความเร็วรอบแปรงล้าง 864 rpm และ อัตราการไหลของน้ำจากหัวฉีด 10 lpm มีอัตราการทำงานสูงสุดคือ 1,717±12 kg h^{-1} แต่ให้ความสะอาดต่ำว่าอ้อยอ้างอิง ในขณะที่ความเร็วรอบแปรงล้าง 864 rpm และ อัตราการไหลของน้ำจากหัวฉีด 5 lpm ที่ให้ความสะอาดสูงสุดมีอัตราการทำงาน 1,259±16 kg h^{-1} ซึ่งสูงกว่าการล้างด้วยผู้ปฏิบัติการ (440±29 kg h^{-1}) ถึง 3 เท่า หรือสามารถล้างอ้อยได้ประมาณ 2,600 ton year^{-1} และจากการปอกเปลือกด้วยแรงงานจะเสียเนื้ออ้อยไปกับเปลือก 15-20% (พิมพ์พรรณ, 2550) ด้วยอัตราการทำงานนี้จะเพียงพอกับโรงงานผลิตอ้อยคั้นน้ำที่มีกำลังการผลิต 3,000 ton วัตถุดิบ year^{-1} นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการทำงานมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเร็วรอบชุดแปรงล้างที่เพิ่มขึ้น

Table 2 Working capacity (kg h^{-1}).

Water flow rate (lpm)	Brush units speed (rpm)		
	720	864	960
5	$1,183\pm33^{Cb}$	$1,259\pm16^{Bb}$	$1,621\pm29^{Ab}$
7.5	884 ± 38^{Cc}	$1,121\pm35^{Bc}$	$1,164\pm33^{Ac}$
10	$1,547\pm27^{Ca}$	$1,717\pm12^{Ba}$	$1,503\pm33^{Aa}$

Means followed by different capital letters in the same column and different small letters in the same row are statistically different by the test of Ducan ($p\leq0.05$)

ในการวัดอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ ดังแสดงใน Table 3 พบว่า ที่ความเร็วรอบแปรงล้าง 960 rpm และ อัตราการไหลของน้ำจากหัวฉีด 5 lpm มีการใช้น้ำในการล้างน้อยที่สุด แต่มีความสะอาดของอ้อยต่ำกว่าอ้อยอ้างอิง เมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบแปรงล้าง 864 rpm และ อัตราการไหลของน้ำจากหัวฉีด 5 lpm ใช้น้ำเพียง 3.6 l แต่ให้ความสะอาดใกล้เคียงกับอ้อยอ้างอิง ซึ่งผู้ปฏิบัติการใช้น้ำในการล้าง 10 l

Table 3 Water usage (l).

Water flow rate (lpm)	Brush units speed (rpm)		
	720	864	960
5	4.2 ± 0.2^{Ac}	3.6 ± 0.2^{Bc}	3.1 ± 0.3^{Bc}
7.5	6.8 ± 0.2^{Ab}	5.9 ± 0.4^{Bb}	5.1 ± 0.2^{Bb}
10	7.6 ± 0.3^{Aa}	6.9 ± 0.3^{Ba}	7.8 ± 0.3^{Ba}

Means followed by different capital letters in the same column and different small letters in the same row are statistically different by the test of Ducan ($p\leq0.05$)

4.2 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

หลังจากได้ทดสอบการทำงานขอเครื่องล้างทำความสะอาดอ้อยแล้ว ในขั้นตอนต่อไป ได้ทำการวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม กำหนดให้ต้นทุนในการสร้างต้นแบบมีราคา 28,000 Baht อายุการใช้งานของเครื่องล้างทำความสะอาดอ้อย พิจารณาที่ 10 year ค่าเสื่อมราคาของเครื่องล้าง 2,520 Baht $year^{-1}$ อัตราดอกเบี้ยเท่ากับ 7.625% คิดเป็นค่าใช้จ่ายคงที่หรือต้นทุนคงที่ เท่ากับ 3,684 Baht $year^{-1}$ จากการทดสอบโดยใช้แรงงานปฏิบัติงาน 1 คน สามารถล้างอ้อยแบบต่อเนื่องได้เฉลี่ย 1,259 kg h^{-1} มีความสิ้นเปลืองพลังงานประมาณ 0.727 kW h^{-1} โดยพิจารณาใช้เครื่องทำงานวันละ 8 h ปีละ 260 day อัตราการรับจ้างพิจารณาจากค่าแรงขั้นต่ำเท่ากับ 310 Baht day^{-1} หรือเท่ากับ 80,600 Baht $year^{-1}$ ค่าไฟฟ้า 4,536.48 Baht $year^{-1}$ และค่าน้ำประปา 17,203.2 Baht $year^{-1}$ คิดเป็นค่าใช้จ่ายผันแปรหรือต้นทุนผันแปร 104,744.68 Baht $year^{-1}$ ดังนั้นต้นทุนรวมของเครื่องทั้งหมด 108,428.68 Baht $year^{-1}$ เมื่อพิจารณาจุดคุ้มทุน พบว่า ค่าใช้จ่ายผันแปรต่อหน่วยเท่ากับ 0.0014 Baht kg^{-1} กำหนดให้ค่ารับจ้างเครื่องล้างท่อนอ้อยเท่ากับ 0.05–0.5 Baht kg^{-1} จะได้จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุน ดังแสดงใน Figure 6

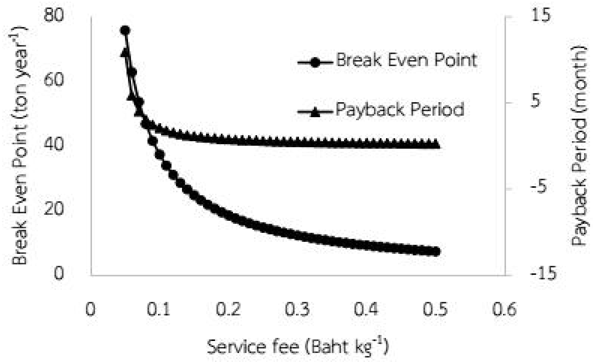


Figure 6 Break even point and payback period.

ผลการวิเคราะห์พบว่า ถ้าคิดค่ารับจ้างล้างอ้อยด้วยเครื่องล้าง 0.07 Baht kg^{-1} จะมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 4 เดือน และจุดคุ้มทุนเท่ากับ 53.7 ton $year^{-1}$

5 สรุป

จากผลการทดลอง จะได้ค่าปริมาณของแข็งที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ รวมถึงค่าอ้างอิง เมื่อพิจารณาอัตราการทำงาน ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด และอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ทดสอบแต่ละความเร็วรอบมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง พบว่า ที่ความเร็วรอบแปรงล้าง 864 rpm อัตราการไหลของน้ำ 5 lpm มีค่าปริมาณของแข็งใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงมากที่สุด แต่ใช้น้ำน้อยกว่าและมีอัตราการทำงานที่ 1,259 kg h^{-1} ซึ่งสูงกว่าใช้แรงงานคน จากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม พบว่าใน 1 year ใช้เครื่องล้างทำความสะอาดอ้อยทำงาน 2,080 hr มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของเครื่อง 108,428.68 Baht $year^{-1}$ ระยะเวลาคืนทุน 4 เดือน และการใช้งานที่จุดคุ้มทุน 53.7 ton $year^{-1}$ สามารถที่จะพัฒนาเครื่องต้นแบบเพื่อใช้ทดแทนแรงงานคนได้ต่อไป

6 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม รหัสโครงการ I252A08031

7 เอกสารอ้างอิง

พิมพ์พรรณ ปรืองาม. 2550. การพัฒนาและทดสอบเครื่องขัดผิวท่อนอ้อยแบบป้อนต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต. กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์.

พิมพ์พรรณ ปรืองาม, มงคล กวางวโรภาส. 2551. การออกแบบและสร้างเครื่องขัดผิวท่อนอ้อยชนิดขัดตามแนวเส้นรอบวงลำอ้อย. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา 19(2), 73-79.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2547. เครื่องล้างผัก ผลไม้ไฮเทค. แหล่งข้อมูล: http://www.clinictech.most.go.th/online/pages/techlist_display.asp?tid=764. เข้าถึงเมื่อ 27 กุมภาพันธ์ 2560.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2555. เครื่องล้างมะนาว. แหล่งข้อมูล: http://www.tistr.or.th/tistrblog/?p=2404. เข้าถึงเมื่อ27 กุมภาพันธ์ 2560.

สันติ์ ฉายตระกูล. 2527. คู่มือการวิเคราะห์อ้อยและน้ำตาลทราย. บริษัทน้ำตาลมิตรผลและบริษัทในเครือ.

Kehinde, A.A., Michael, T.A., Robinson, A. 2015. Development of a sugarcane juice extractor for small scale industries. Journal of Multidisciplinary Engin-eering Science and Technology 2(5), 1169–1173.

Salit, M.S. 2014. Tropical natural fibre composites, engineering materials. Engineering Materials (pp. 15-38). Singapore: Springer.

Tilby, S. E., “Apparatus for washing sugarcane billets,” U. S. Patent 5173122, December 22, 1992.

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย **บทความวิจัย**
ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 (2560) 59-67
Available online at www.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ **ISSN 1685-408X**

การศึกษาศักยภาพของฟางข้าวในการกำจัดโซเดียมคลอไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์

A study of removal potential of NaCl in Synthetic Wastewater Using Rice Straw

ปราโมทย์ มณีโชติ, ประสันต์ ชุ่มใจหาญ*
Pramote Maneechote, Prasan Choomjaihan*

หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 10520
Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520
*Corresponding author: Tel: 02-329-8337, E-mail: prasan.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การปนเปื้อนของน้ำเสียโดยเฉพาะอย่างยิ่งการปนเปื้อนของสาละลายเกลือลงสู่สิ่งแวดล้อมก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมอย่างมาก การทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้วัสดุดูดซับชีวภาพจากฟางข้าวในการกำจัด NaCl ออกจากสารละลาย และหาศักยภาพการกำจัด NaCl และหาสัดส่วนเถ้าโดยใช้ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 20 และ 35 g/l ทำการศึกษาอุณหภูมิสารละลายแตกต่างกัน 3 ระดับได้แก่ ที่อุณหภูมิห้อง, ที่อุณหภูมิคงที่ 90°C และที่อุณหภูมิลดลงจาก 90°C สัดส่วนวัสดุดูดซับต่อปริมาตรของสารละลาย 0.01, 0.03 และ 0.05 g/ml และที่ระยะเวลาในการดูดซับตั้งแต่ 0 ถึง 150 min จากการทดลองพบว่าศักยภาพการกำจัดเกลือของฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ดีกว่าฟางข้าวที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ และที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ 90°C มีศักยภาพในการกำจัด NaCl ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ ที่สภาวะอุณหภูมิลดลงจาก 90°C และที่อุณหภูมิห้องมีศักยภาพการกำจัด NaCl ต่ำที่สุด การกำจัด NaCl ด้วยอุณหภูมิสารละลายคงที่ 90°C และแบบอุณหภูมิสารละลายแบบลดลงจาก 90°C สามารถกำจัด NaCl ได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเริ่มลดลงเมื่อเวลาผ่านไปนานกว่า 60 และ 100 min ตามลำดับ จากการทดลองทำให้เห็นมิติใหม่ของการใช้ฟางข้าว และวิธีการในการจัดการสารละลาย NaCl ได้ในอนาคต

คำสำคัญ: การกำจัดเกลือ, โซเดียมคลอไรด์, ฟางข้าว, ฟางข้าวปรับสภาพ

Abstract

The contamination of water; particularly, salt solution, has been distributed to the environment which affects the living animals and surround environment. This experiment aims to use the bio-absorber from rice straw to remove the NaCl from the salt solution and to examine the percentage of removal (% RE) of salt from solution with non-treated and NaOH treated rice straw at the 20 and 35 g/l of salt concentration. The experiment was performed at three different conditions of solution temperatures, ambient temperature, constant temperature at 90°C and gradually decreasing temperature from 90°C, respectively. The ratios of bio-absorber to volume of salt solution were 0.01, 0.03 and 0.05 g/ml, respectively, and the soaking periods were 0 to 150 min. The results showed that constant temperature at 90°C gave higher potential of NaCl removal, following by of gradually decreasing temperature from 90°C, and ambient temperature resulted lowest NaCl removal. The NaCl removal of constant temperature at 90°C and gradually decreasing temperature from 90°C were progressively removed in first 60 and 100 min; after that the NaCl removal were decreased. This experiment demonstrated the new application of using bio-absorber for water purification.

Keywords: Salt Removal, NaCl, Rice Straw, Modified Rice Straw

1 บทนำ

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจในปัจจุบันทำให้มีการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมทั้งทางดิน ทางน้ำ และทางอากาศ ซึ่งปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อมนุษย์จนยากจะแก้ไข หนึ่งในปัญหาเหล่านี้คือการปนเปื้อนของเกลือ (NaCl) ในแหล่งน้ำ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศต่างๆ แหล่งที่มาของเกลือมีได้หลายทางได้แก่โรงงานฟอกย้อม พื้นที่การผลิตเกลือแกง น้ำทิ้งจากกระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร รวมทั้งการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล

ปัจจุบันมีหลายวิธีที่ใช้ในการกำจัดสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้แก่ วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน การออกซิไดส์ด้วยโอโซน เทคโนโลยีเมมเบรน การดูดซับด้วยถ่านคาร์บอน/ถ่านกัมมันต์ ซึ่งวิธีการเหล่านี้เป็นวิธีการยุ่งยากและใช้ต้นทุนสูง (จรรยาลักษณ์ ปาปะโพธิ์ และอุรา ทิพราช, 2549) วิธีการล่าสุดที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้แก่ การใช้วิธีทางชีวภาพซึ่งจะมีแม้ผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อย แต่ยังไม่ประสบผลสำเร็จถึงขั้นนำมาใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากต้องใช้กับระบบที่มีความสมบูรณ์ทางธรรมชาติสูง อีกหนึ่งทางเลือกที่เป็นที่สนใจในการนำมาใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียคือการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาเป็นวัสดุดูดซับต้นทุนต่ำเนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นสารดูดซับที่มีอยู่ในปริมาณมากและราคาถูก (Tarley and Arruda, 2004)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการเพาะปลูกข้าวเป็นอันดับ 1 ของประเทศ ส่งผลให้มีฟางข้าวเหลือใช้ประมาณ 25.64 ล้านตันต่อปี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2552) ฟางข้าวประกอบไปด้วย เซลลูโลส 37.4% เฮมิเซลลูโลส 44.9% ลิกนิน 4.9% silicon ash (13.1%) (Hills and Roberts,1981) อีกทั้งในฟางข้าวมีรูพรุนและเส้นใยเพื่อใช้ในการดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออออนกับโลหะหนักที่อยู่ในรูปสารละลายได้ (นพวรรณ ขจรกีรติกุล และคณะ, 2548) (สุพรรษา มีถาวร, 2556)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และประสิทธิภาพในการนำฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นตัวดูดซับเกลือจากสารละลายเกลือแกง

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมฟางข้าว

เก็บฟางข้าวจากนาแห่งหนึ่งในเขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร โดยเลือกเฉพาะส่วนของลำต้น ตัดให้มีขนาด 1-2 cm จากนั้นนำไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออนจน pH ของน้ำล้างประมาณ 6-7 นำเข้าเตาอบลดความชื้นที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลานาน 24 h แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วนำไปเก็บไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท

2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 3 molar

นำ NaOH ปริมาณ 120 g ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml เติมน้ำปราศจากไอออน 150 ml ผสมให้ NaOH ละลาย ก่อนถ่ายเทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 ml เติมน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดวัดปริมาตรแล้วเขย่า ก็จะได้สารละลายมาตรฐาน NaOH ความเข้มข้นประมาณ 3 molar

2.3 การปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลาย NaOH

นำฟางข้าวขนาด 1-2 cm ปริมาณ 100 g ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 2,000 ml จากนั้นนำสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 3 molar ปริมาณ 1,000 ml เติมลงไป แช่ทิ้งไว้ 24 h กรองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ และล้างทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออนจน pH ของน้ำล้างมีค่าประมาณ 6-7 นำไปเข้าเตาอบลดความชื้นที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 24 h แล้วนำมาไว้ในโถดูดความชื้นจนเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นเก็บไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท

2.4 การทดลองการดูดซับเกลือแกงโดยใช้ฟางข้าว

2.4.1 การทดลองการดูดซับเกลือแกงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 g/l ที่สถานะอุณหภูมิห้อง

นำสารละลายเกลือแกงความเข้มข้น 20 g/l ปริมาณ 100 ml เติมลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml นำไปวางที่อุณหภูมิห้อง แล้วใส่ฟางข้าวที่ยังไม่ได้ทำการปรับสภาพปริมาณ 1 3 และ 5g ลงไปในบีกเกอร์ กรองสารละลายผ่านตะแกรงที่เวลาต่างๆ ได้แก่ 0 10 30 60 100 และ 150 min แล้วเก็บไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง โดยนำฟางข้าวที่ผ่านการทดลองไปอบลดความชื้นที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 24 h แล้วนำมาไว้ในโถดูดความชื้นจนเย็นตัวถึงอุณหภูมิ ห้องเก็บไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท จากนั้นทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนเป็นฟางข้าวปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.4.2 การทดลองการดูดซับเกลือแกงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 g/l ที่สถานะ 90°C

นำสารละลายเกลือแกงความเข้มข้น 20 g/l ปริมาณ 100 ml เติมลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 100°C รอจนสารละลายในบีกเกอร์มีอุณหภูมิ 90°C จึงใส่ฟางข้าวที่ยังไม่ได้ทำการปรับสภาพปริมาณ 1 3 และ 5g ลงไปในบีกเกอร์ จากนั้นจึงนำบีกเกอร์ออกจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่เวลาต่าง ๆได้แก่ 0 10 30 60 100 และ 150 min กรองสารละลายผ่านตะแกรง แล้วเก็บไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง โดยนำฟางข้าวที่ผ่านการทดลองไปอบลดความชื้นที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 24 h แล้วนำมาไว้ในโถดูดความชื้นจนเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง เก็บไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท จากนั้นทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนเป็นฟางข้าวปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.4.3 การทดลองการดูดซับเกลือแกงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 g/l ที่สถานะอุณหภูมิลดลงจาก 90°C

นำสารละลายเกลือแกงความเข้มข้น 20g/l ปริมาณ 100 ml เติมลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 100°C รอจนสารละลายในบีกเกอร์มีอุณหภูมิ 90°C จึงใส่ฟางข้าวที่ยังไม่ได้ทำการปรับสภาพปริมาณ 1 3 และ 5g ลงไปในบีกเกอร์ จากนั้นจึงนำบีกเกอร์ทั้งหมดออกจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง กรองสารละลายผ่านตะแกรงที่เวลาต่างๆ ได้แก่ 0 10 30 60 100 และ 150 min แล้วเก็บไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง โดยนำฟางข้าวที่ผ่านการทดลองไปอบลดความชื้นที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 24 h แล้วนำมาไว้ในโถดูดความชื้นจนเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง เก็บไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท จากนั้นทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนเป็นฟางข้าวปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.4.4 การทดลองการดูดซับเกลือแกงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 35 g/l ที่สถานะอุณหภูมิห้อง

นำสารละลายเกลือแกงความเข้มข้น 35 g/l ปริมาณ 100 ml เติมลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml นำไปวางที่อุณหภูมิห้องแล้วใส่ฟางข้าวที่ยังไม่ได้ทำการปรับสภาพปริมาณ 1 3 และ 5g ลงไปในบีกเกอร์ กรองสารละลายผ่านตะแกรงที่เวลาต่าง ๆได้แก่ 0 10 30 60 100 และ 150 min แล้วเก็บไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง โดยนำฟางข้าวที่ผ่านการทดลองไปอบลดความชื้นที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 24 h แล้วนำมาไว้ในโถดูดความชื้นจนเย็นตัวถึงอุณหภูมิ ห้องเก็บไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท จากนั้นทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนเป็นฟางข้าวปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.4.5 การทดลองการดูดซับเกลือแกงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 35 g/l ที่สถานะอุณหภูมิคงที่ 90°C

นำสารละลายเกลือแกงความเข้มข้น 35 g/l ปริมาณ 100 ml เติมลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 100°C รอจนสารละลายในบีกเกอร์มีอุณหภูมิ 90°C จึงใส่ฟางข้าวที่ยังไม่ได้ทำการปรับสภาพปริมาณ 1 3 และ 5g ลงไปในบีกเกอร์ จากนั้นจึงนำบีกเกอร์ออกจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่เวลาต่างๆ ได้แก่ 0 10 30 60 100 และ 150 min กรองสารละลายผ่านตะแกรง แล้วเก็บไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง โดยนำฟางข้าวที่ผ่านการทดลองไปอบลดความชื้นที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 24 h แล้วนำมาไว้ในโถดูดความชื้นจนเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง เก็บไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท จากนั้นทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนเป็นฟางข้าวปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.4.6 การทดลองการดูดซับเกลือแกงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 35 g/l ที่สถานะอุณหภูมิลดลงจาก 90°C

นำสารละลายเกลือแกงความเข้มข้น 35g/l ปริมาณ 100 ml เติมลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 100°C รอจนสารละลายในบีกเกอร์มีอุณหภูมิ 90°C จึงใส่ฟางข้าวที่ยังไม่ได้ทำการปรับสภาพปริมาณ 1 3 และ 5 g ลงไปในบีกเกอร์ จากนั้นจึงนำบีกเกอร์ทั้งหมดออกจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง กรองสารละลายผ่านตะแกรงที่เวลาต่างๆ ได้แก่ 0 10 30 60 100 และ 150 min แล้วเก็บไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง โดยนำฟางข้าวที่ผ่านการทดลองไปอบลดความชื้นที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 24 h แล้วนำมาไว้ในโถดูดความชื้นจนเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง เก็บไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท จากนั้นทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนเป็นฟางข้าวปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเกลือแกงจากสารละลาย

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเกลือแกงออกจากสารละลายโดยใช้วัสดุดูดซับสามารถศึกษาได้จาก 2 ส่วน คือ ส่วนแรกการศึกษาปริมาณเกลือแกงที่เหลืออยู่ในสารละลาย สำหรับส่วนที่สองคือศึกษาจากปริมาณเกลือแกงที่ถูกดูดซับไว้ในวัสดุดูดซับโดยตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าในวัสดุดูดซับ

2.5.1 การศึกษาปริมาณการกำจัดเกลือแกงออกจากสารละลาย

การหาค่าการกำจัดเกลือแกงโดยนำสารละลายมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายเกลือแกงที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง Auto-Titrator อ้างอิงตามวิธีของ สกาว พงษ์ขวัญ. (2558) โดยนำถ้วยพลาสติกเปล่ามาแล้วชั่งสารละลายเกลือแกงที่ผ่านการดูดซับ เติมน้ำกลั่นปริมาณ 40-60 ml จากนั้นนำมาวัดค่าปริมาณโซเดียมคลอไรด์โดยเครื่อง Auto-Titrator โดยการไตเตรทด้วยซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$) เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับ Cl^- ตกตะกอนเป็นซิลเวอร์กับคลอไรด์ (AgCl) เครื่องจะทำการหยดสารซิลเวอร์ไนเตรทลงในตัวอย่างโดยอัตโนมัติ จากนั้นเครื่องทำการหาจุดยุติจากกราฟ (ซิลเวอร์อิออนทำปฏิกิริยาพอดีกับคลอไรด์อิออน) และนำปริมาณซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้มาคำนวณหาร้อยละของโซเดียมคลอไรด์ต่อน้ำหนักตัวอย่าง แล้วจดบันทึกค่าที่แสดงที่หน้าจอ จากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกำจัดตามสมการที่ (1)

$$\%Removal = 100 - \left(\left(\frac{C_0-C_t}{C_0}\right)\times 100\right) \qquad (1)$$

C_0 คือ ความเข้มข้นเกลือแกงเริ่มต้น

C_t คือ ความเข้มข้นเกลือแกงที่เวลาใดๆ

2.5.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าของฟางที่ผ่านการดูดซับ

การหาค่าปริมาณเถ้าอ้างอิงตามวิธีของสุพรรษา มีถาวร (2556) โดยนำฟางอบลดความชื้นที่ผ่านการทดลองใส่ในถ้วยกระเบื้องชั่งน้ำหนักถ้วยและฟางข้าวก่อนเผา จากนั้นนำไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffer furnace) ยี่ห้อ JSR รุ่น JSMF-45T ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 10 hr แล้วนำมาเก็บไว้ในในโถดูดความชื้นรอให้เย็นตัว จากนั้นชั่งน้ำหนักหลังการเผา เพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักฟางข้าวก่อนและหลังการเผา

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของฟางข้าว

การศึกษาลักษณะทางกายภาพช่วยอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากผลของการเตรียมฟางข้าวเป็นวัสดุดูดซับและฟางข้าวที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH แสดงใน Figure 1 พิจารณาจากภาพถ่ายจะเห็นได้ว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีการเกาะยึดกันระหว่างเส้นใยอย่างเป็นระเบียบมีช่องว่าง

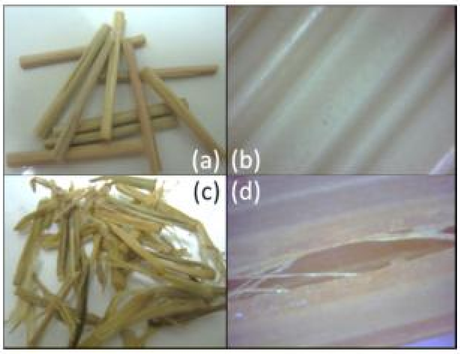


Figure 1 Non-treated rice straw (a), Non-treated rice straw under microscope (x500) (b), NaOH treated rice straw (c) and NaOH treated rice straw under microscope (x500) (d).

น้อยแต่ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH มีลักษณะพื้นผิวหยาบไม่เป็นมันเงาและมีรอยแตกโดยทั่วไปบนพื้นผิว ลักษณะเช่นนี้เกิดจากสารละลาย NaOH กำจัดสารประเภทลิกนินและซิลิคอนซึ่งเป็นสารเคลือบผิวออกจากผิวของฟางข้าว ทำให้ผิวของฟางข้าวหยาบขึ้นและขาดความเป็นมันเงา (Sagnik et al, 2011) ทำให้เกิดช่องว่างภายในหรือความพรุนเพิ่มขึ้น

3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเกลือแกงจากสารละลาย

3.2.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเกลือแกงจากสารละลายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 และ 35 g/

Figure 2 แสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเกลือแกงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 และ 35 g/l ทีสถานะอุณหภูมิ ห้อง พบว่าตลอดช่วงระยะเวลาการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดเกลือแกงที่น้อยมากททั้งฟางข้าวที่ปรับสภาพและฟางข้าวที่ไม่ปรับสภาพ ถึงแม้ปริมาณฟางข้าวที่เพิ่มขึ้นก็ไม่ได้ส่งผลกระทบทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นตามไปด้วย

Figure 3 แสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเกลือแกงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 และ 35 g/l ที่สถานะอุณหภูมิคงที่ 90°C พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเกลือแกงของทั้งสองสภาวะสอดคล้องกัน คือพบว่ามีอัตราการกำจัดที่สูงตลอดระยะเวลาการทดลองทั้งฟางข้าวที่ไม่ปรับสภาพและฟางข้าวที่ปรับสภาพ เนื่องจากการให้ความร้อนจะช่วยกระตุ้นการดูดซับได้ดีขึ้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ (Toson, et al., 2012) ที่อธิบายว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงขึ้นด้วย และประสิทธิภาพการกำจัดจะเริ่มลดลงเมื่อถึงเวลา 100 min โดยเมื่อฟางข้าวมีปริมาณเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นด้วย (Nasuha et al., 2010), (Yousefi et al., 2011) และพบว่าฟางข้าวที่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่ปรับสภาพตลอดทุกช่วงเวลาการทดลอง สอดคล้องกับผลการทดลองของ อัญชลี นันดี (2558) ที่อธิบายไว้ว่าเปลือกส้มและชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย NaOH และ $CaCl_2$ มีประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและนิกเกิลสูงกว่าเปลือกส้มและชานอ้อยที่ไม่ปรับสภาพ โดยอธิบายว่า NaOH จะเข้าไปกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส

สำหรับ Figure 4 แสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเกลือแกงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 และ 35 g/l ที่สถานะอุณหภูมิลดลงจาก 90°C พบว่าในช่วงแรกมีประสิทธิภาพการกำจัดเกลือแกงในอัตราที่สูงทั้งฟางข้าวที่ไม่ปรับสภาพและฟางข้าวที่ปรับสภาพจนถึงเวลา 60 minประสิทธิภาพการกำจัดเกลือแกงจะเริ่มมีอัตราที่ลดลง (Yahaya et al., 2011) เนื่องจากในช่วงแรกพื้นที่ในการดูดซับมีมากทำให้การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแต่เมื่อเวลาผ่านไป NaCl จะเข้าไปเกาะบนพื้นที่ผิวของฟางข้าวทำให้การดูดซับใหม่เป็นไปได้ยากขึ้น(ธิดาพร ฤทธิศร และคณะ, 2556) และพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณฟางข้าวเพิ่มขึ้น (Guo, et al., 2016) เนื่องจากมีพื้นที่ในการสัมผัสเพิ่มขึ้น และฟางข้าวที่ปรับสภาพก็ยังมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่ปรับสภาพตลอดทุกช่วงเวลาการทดลอง (Wang et al., 2001) ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ (Zhu et al., 2007) ที่ระบุว่าประสิทธิภาพการดูดซับของต้นถั่วเหลืองที่ปรับสภาพสูงกว่าต้นถั่วเหลืองที่ไม่ปรับสภาพ

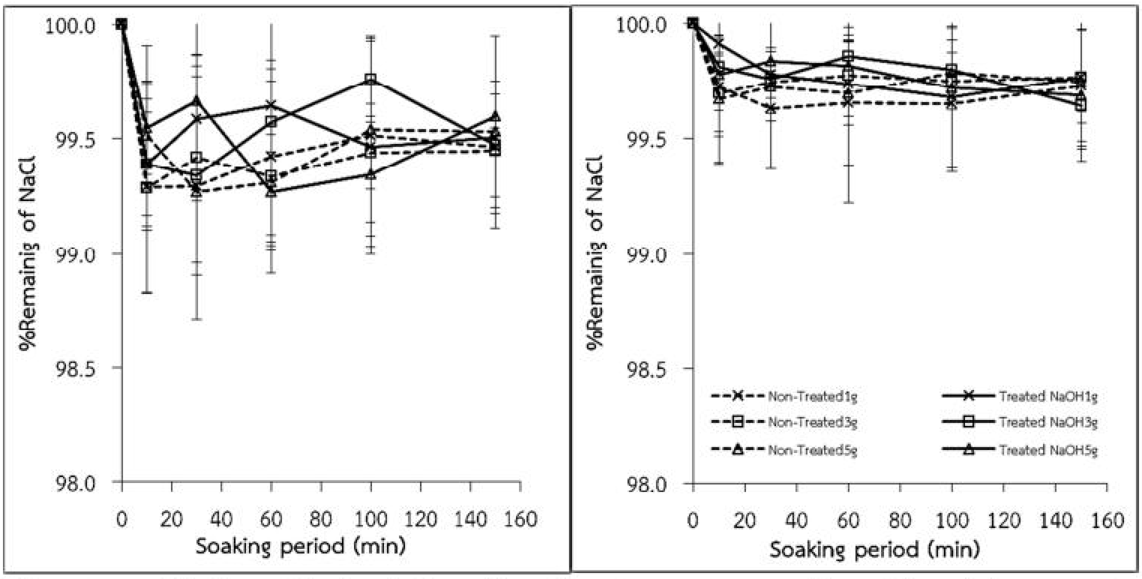


Figure 2 Percentage of NaCl remaining in solution with ambient temperature condition at the solution concentration of 20g.l (left) and 35g/l (right).

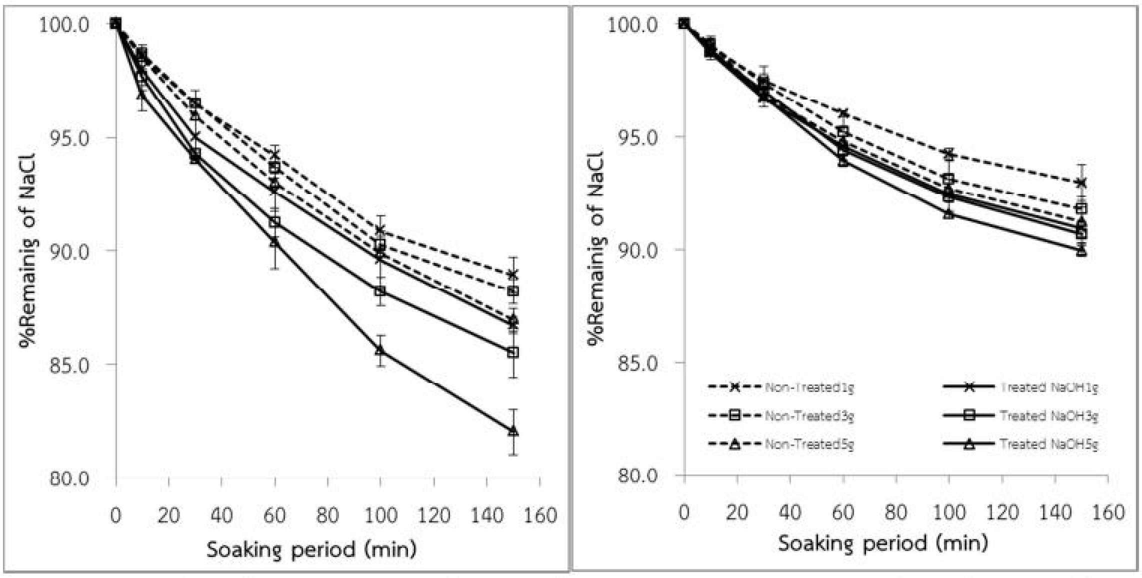


Figure 3 Percentage of NaCl remaining in solution with constant temperature 90°C condition at the solution concentration of 20g/l (left) and 35g/l (right).

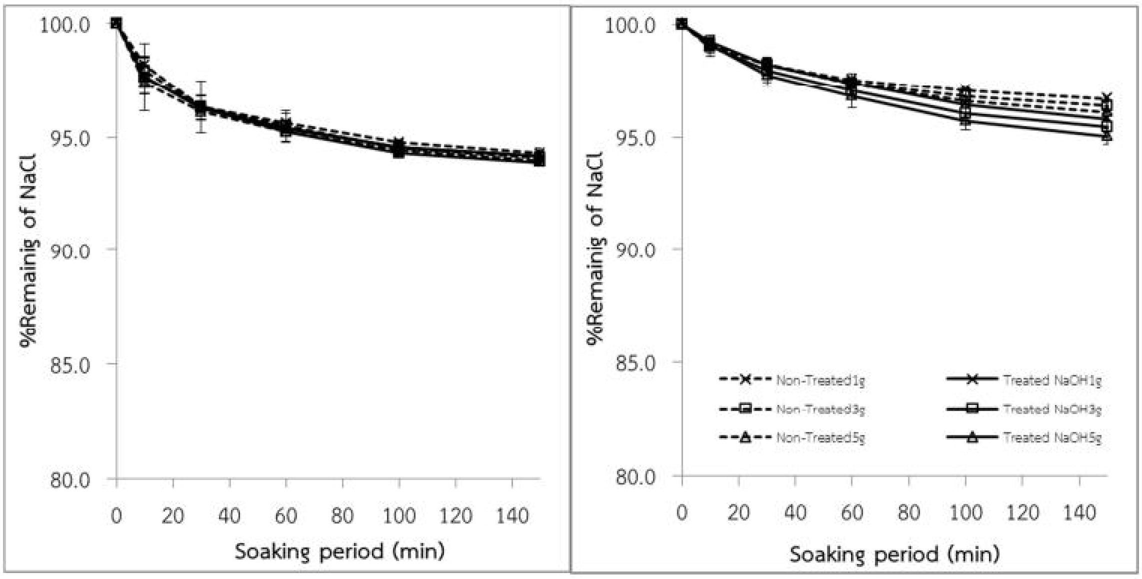


Figure 4 Percentage of NaCl remaining in solution with gradually decreasing temperature from 90°C condition at the solution concentration of 20g/l (left) and 35g/l (right).

3.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าของฟางที่ผ่านการดูดซับ

3.3.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าของฟางที่ผ่านการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 และ 35g/l

การเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าของวัสดุดูดซับแสดงถึงการถ่ายเทมวลสารของเกลือแกงจากสารละลายไปสู่วัสดุดูดซับ โดยเฉลี่ยฟางข้าวมีสัดส่วนของปริมาณเถ้าเฉลี่ย 0.132 g/น้ำหนักฟางแห้ง (g).

Figure 5 แสดงผลการศึกษาค่าสัดส่วนปริมาณเถ้า จากการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 และ 35g/l ที่สถานะอุณหภูมิห้องพบว่าตลอดช่วงระยะเวลาการทดลองมีค่าสัดส่วนปริมาณเถ้าที่ต่ำและใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาการทดลองทั้งฟางข้าวที่ปรับสภาพและฟางข้าวที่ไม่ปรับสภาพ รวมทั้งปริมาณฟางข้าวที่เพิ่มขึ้นก็ไม่ได้ส่งผลทำให้สัดส่วนปริมาณเถ้าสูงขึ้นตามไปด้วย

จากกราฟที่แสดงใน Figure 4 (left) และ 5 (right) แสดงผลการศึกษาค่าสัดส่วนปริมาณเถ้า จากการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 และ 35 g/l ที่สถานะอุณหภูมิลดลงจาก 90°C พบว่าในช่วงแรกมีค่าสัดส่วนของปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งฟางข้าวที่ไม่ปรับสภาพและฟางข้าวที่ปรับสภาพจนถึงเวลา 100 min จะเริ่มมีอัตราที่ลดลง เนื่องจากในช่วงแรกพื้นที่ในการดูดซับมีมากทำให้การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแต่พบว่าเมื่อปริมาณสารดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้นแต่ค่าการดูดซับต่อหน่วยลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าฟางข้าวที่ปรับสภาพมีสัดส่วนปริมาณเถ้าสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่ปรับสภาพตลอดระยะเวลาการดูดซับเนื่องจากฟางข้าวที่ปรับสภาพจะมีพื้นที่หรือช่องว่างในการดูดซับสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่ปรับสภาพ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ(สุพรรษา มีถาวร, 2556)

Figure 6 แสดงผลการศึกษาสัดส่วนปริมาณเถ้าจากการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 และ 35g/l จากกราฟการทดลองที่อุณหภูมิคงที่ 90°C พบว่าสัดส่วนของปริมาณเถ้ามีอัตราที่สูงตลอดระยะเวลาการดูดซับทั้งฟางข้าวที่ไม่ปรับสภาพและฟางข้าวที่ปรับสภาพ เนื่องจากการให้ความร้อนจะช่วยกระตุ้นการดูดซับให้สูงขึ้น และสัดส่วนของปริมาณเถ้าจะเริ่มลดลงเมื่อถึงเวลา 100 min พบว่าเมื่อปริมาณฟางข้าวเพิ่มขึ้นจะมีผลให้สัดส่วนเถ้าลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณฟางข้าวเพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนระหว่างฟางข้าวต่อสารละลายมีค่าลดลง (Gong, et al., 2005)โดยเมื่อฟางข้าวมีปริมาณเพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของปริมาณเถ้าลดลงด้วย และพบว่าฟางข้าวที่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่ปรับสภาพตลอดทุกช่วงเวลาการทดลองให้การดูดซับใหม่เป็นไปได้ยากขึ้นและพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณฟางข้าวจะมีผลให้สัดส่วนเถ้าลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณฟางข้าวเพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนของสารละลายต่อวัสดุดูดซับมีค่าลดลง

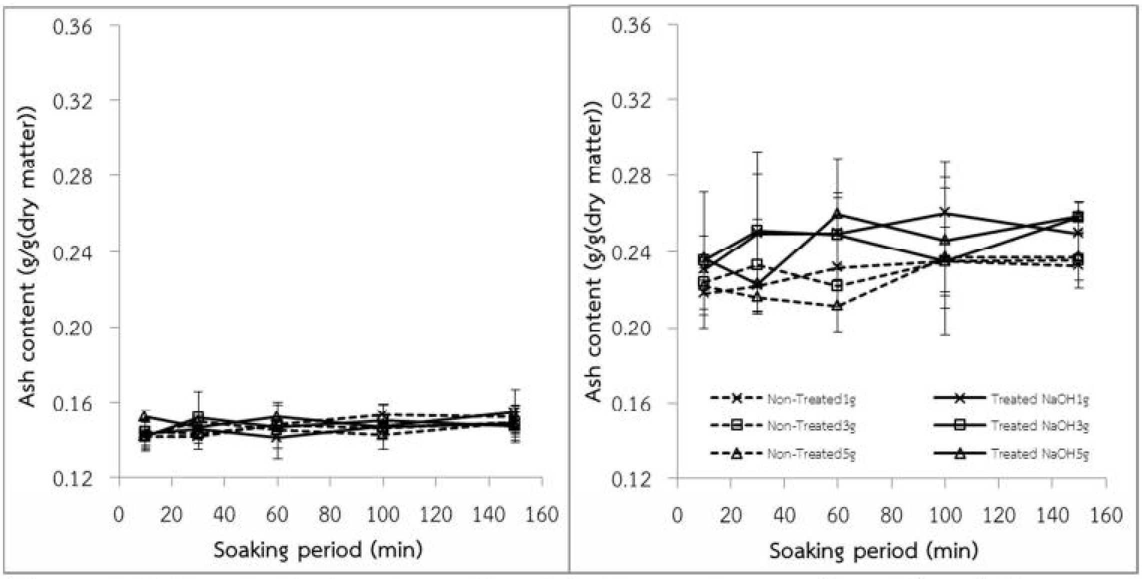


Figure 5 Amount of ash content in rice straw under ambient temperature condition at the solution concentration of 20g.l (left) and 35g/l (right).

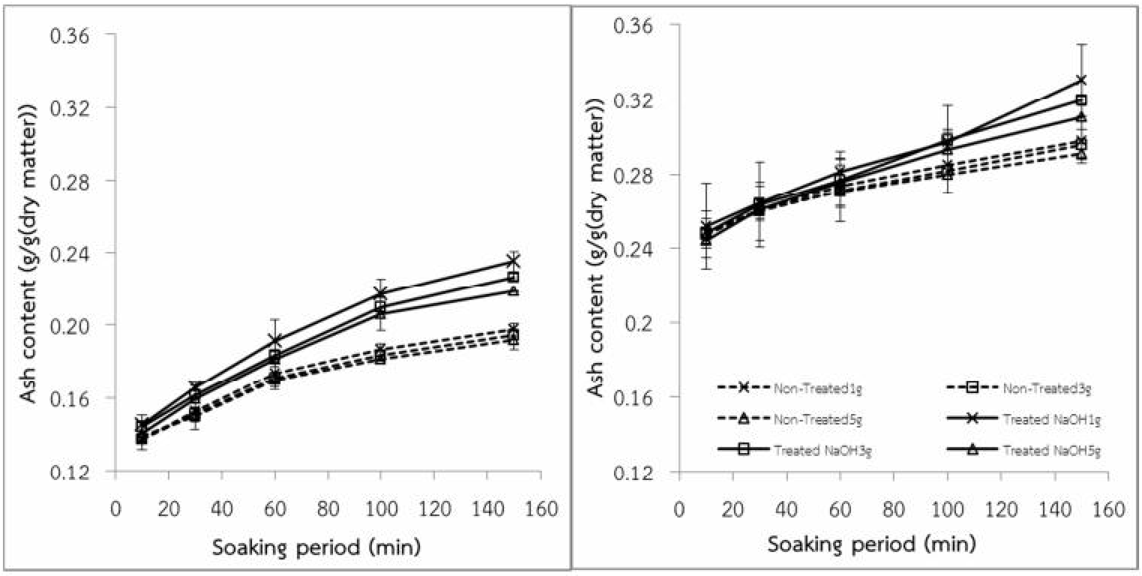


Figure 6 Amount of ash content in rice straw under constant temperature 90°C condition at the solution concentration of 20g.l (left) and 35g/l (right).

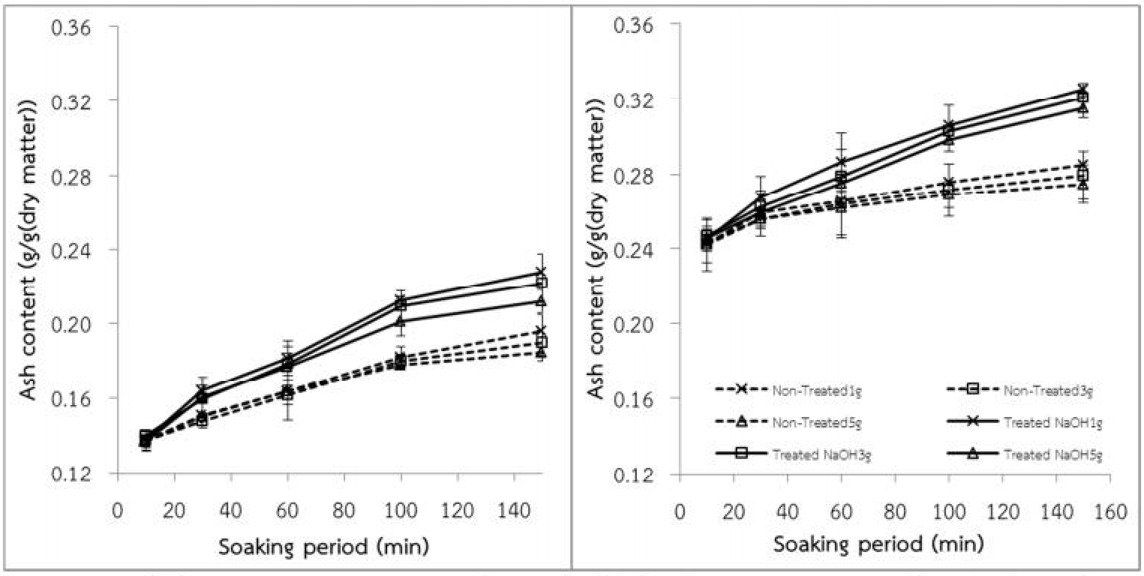


Figure 7 Amount of ash content in rice straw under gradually decreasing temperature from 90°C condition at the solution concentration of 20g.l (left) and 35g/l (right).

4 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเกลือแกงโดยการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในสารละลายและปริมาณเถ้าในวัสดุดูดซับพบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเกลือแกงมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20g/l และ 35g/l รวมทั้งเมื่อปริมาณฟางข้าว (dose) เพิ่มขึ้นจาก 1-5g ก็มีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้นตามไปด้วย และที่สถาวะอุณหภูมิ 90°C และแบบอุณหภูมิลดลงจาก 90°C เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่สถาวะอุณหภูมิห้อง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นไม่ได้มีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนั้นยังพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเกลือแกงของฟางข้าวที่ปรับสภาพมีค่าสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

จากการศึกษาสัดส่วนปริมาณเถ้าพบว่าเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นวัสดุดูดซับจะมีปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นแสดงว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราการดูดซับมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาปริมาณวัสดุดูดซับพบว่าเมื่อปริมาณวัสดุดูดซับ (dose)เพิ่มขึ้นปริมาณเถ้าในวัสดุดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสัดส่วนของสารละลายต่อวัสดุดูดซับมีค่าลดลง โดยที่สถาวะอุณหภูมิลดลงจาก 90°C และ อุณหภูมิคงที่ 90°C จะพบว่ามีค่าสัดส่วนเถ้าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ยกเว้นที่สถาวะอุณหภูมิห้องเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลทำให้ค่าสัดส่วนปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และจากการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปริมาณเถ้าในวัสดุดูดซับฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH มีค่าสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพรจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อวัสดุ อุปกรณ์และสถานที่สำหรับการทดลอง

6 เอกสารอ้างอิง

จรรยาลักษณ์ ปาปะโพธิ์ และอุรา ทิพราช. (2549). ประสิทธิภาพของแกลบเผาและกะลามะพร้าวเผาในการดูดซับโลหะหนักน้ำย้อมสีเสื่อกกบ้านแพง จ.มหาสารคาม.วิทยาศาสตร์บัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

นพวรรณ ขจรกีรติกุล, ปาริชาต บรรลิขิต และวรรณวรางค์ ชูประเสริฐ. (2548). การดูดซับโลหะตะกั่วโดยใช้ฟางข้าว. ปริญญาวิศวกรรมศาตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

สกาว พงษ์ขวัญ. (2558). การวิเคราะห์ปริมาณเกลือของปลาซาร์ดีนในน้ำเกลือในอุตสาหกรรมผลิตปลาซาร์ดีนกระป๋องด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.ปริญญาวิศวกรรมศาตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ

สุพรรษา มีถาวร. (2556). การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีของฟางข้าวในระหว่างการย้อมผ้า.ปริญญาวิศวกรรมศาตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ

ธิดาพร ฤทธิศร์, เบญจวรรณ จิตรพวน, แสงสุรีย์ ศรีสะอาด. (2556). การดูดซับทองแดงโดยใช้ขี้เลื่อยยูคาลิปตัสปรับปรุงด้วยโซเดยมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์. ปริญญาวิทยาศาตรบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ

อัญชลี นันดี. (2558). ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและนิกเกิลไอออนในน้ำเสีย โดยใช้เปลือกส้มและชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl2. ปริญญาวิทยาศาตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารกระบัง, กรุงเทพฯ

Ding, Y., Jing, D., Gong, H., Yang, X. (2012). Biosorption of aquatic cadmium (II) by unmodified rice straw. Bioresource Technology 114, 20–25.

Gong, R., Li, M., Yang, C., Sun, Y., Chen, J. (2005) Removal of cationic dyes from aqueous solution by adsorption on peanut hull. Journal of Hazardous Materials.121, 247–250.

Guo, Y., Zhu, W., Li, G., Wang, X., Zhu, L. (2016). Effect of Alkali Treatment of Wheat Straw on Adsorption of Cu (II) under Acidic Condition. Journal of Chemistry, 1-1.

Hills, D.I., Roberts, D.W. (1981). Anaerobic digestion of dairy manure and field crop residues. Journal of Agricultural Wastes. 3, 179-189.

Nasuha, N., Hameed, B.H., Azam T., Din, M. (2010). Rejected tea as a potential low-cost adsorbent for the removal of methylene blue. Journal of Hazardous Materials. 175, 126–132.

Sagnik C., Shamik C., Papita D. S., (2011). Adsorption of crystal violet from aqueous solution onto NaOH-modified rice husk. Journal of Carbohydrate polymer. 86, 1533-1541.

Tarley C. R. T., Arruda M. A. Z. (2004). Biosorption of heavy metals using rice milling by-products Characterisation and application for removal of metals from aqueous effluents. Journal of Chemosphere. 54, 987-995.

Toson, A., Akçelik, Ö., Balbaşı, M., Ergun, M. (2012). Adsorption of Cadmium from Aqueous Solutions onto Coffee Grounds and Wheat Straw: Equilibrium and Kinetic Study. Gazi University Journal of science. 25, 783-791.

Wang, X., Xia, L., Tan, K., Zheng, W. (2001). Studies on Adsorption of Uranium (VI) from Aqueous Solution by Wheat Straw, Environmental Progress & Sustainable Energy. 31, 566-577.

Yahaya, N.E.M., Pakir, M.F., Latiffa, M., Abustana, I., Bellob, O.S., Ahmad, M.A. (2011). Adsorptive Removal of Cu (II) Using Activated Carbon Prepared From Rice Husk by ZnCl2 Activation and Subsequent Gasification with CO2. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS 11, 164-168.

Yousefi, N., Fatehizadeh, A., Azizi, E., Ahmadian., M Ahmadi, A., Rajabizadeh, A., Toolabi, A. (2011) Adsorption of Reactive Black 5 Dye onto Modified Wheat Straw : Isotherm and Kinetics Study. Sacha. Journal of Environmental Studies.1, 81-91.

Zhu, B., Fan, T., Zhang, D. (2007). Adsorption of copper ions from aqueous solution by citric acid modified soybean straw. Journal of Hazardous Materials .153, 300–308.

TSAE JOURNAL

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

ISSN 1685-408X