

การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบโรตารีสำหรับอบแห้งพืชเมล็ดหลายชนิด

Development of Rotary Dryer for Several Grain drying

เวียง อากรชี^{1/} พิมล วุฒิสินธุ์^{2/} วิบูลย์ เทเพนทร์^{2/} นิตัสน์ ตั้งพินิจกุล^{2/}
ปรีชา อนันท์รัตนกุล^{2/} ยงยุทธ คงชำน^{2/} อุทัย ธานี^{1/}
Weang Arekornchee^{1/} Pimol wutisin^{2/} Viboon Thepent^{2/} Nitat Tangpinijkul^{2/}
Preecha Ananrattanakul^{2/} Yongyuit Kongzan^{2/} Uthai Thanee^{1/}

ABSTRACT

The objective of this study was to design and develop a rotary dryer for drying coffee beans. The designed dryer has two sizes with the holding capacity of 400 and 800 kgs. A dryer composes of 3 main parts; (i) the horizontal rotating octagonal drum instead of a spherical drum (ii) a forward curved blade centrifugal fan powered by electric motor and (iii) a LPG burner to generate hot air equipped with temperature control equipment. This dryer can decrease 55% initial moisture content of coffee beans to 12% final moisture content took within 18-22 hours. The initial drying air temperature was 100 degree celsius and gradually decreased with drying time by controlling the coffee temperature not to exceed 45 degree celsius. The heat utilization efficiency was approximately 82%. The developed rotary dryer can be used also for chilli, pepper and cocoa etc.

Key words: Rotary Dryer, Cubical Drum , Octagonal drying drum

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบโรตารีสำหรับอบลดความชื้นเมล็ดกาแฟ โดยเครื่องอบแห้งที่ออกแบบมี 2 ขนาดบรรจุ คือ จุได้ครั้งละ 400 และ 800 กิโลกรัม ตัวเครื่องอบประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ 1) ถังอบแห้งรูปทรงกระบอกแปดเหลี่ยม ขับเคลื่อนการหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เดิมถังอบเป็นรูปทรงกระบอกกลมเปลี่ยนมาเป็นรูปทรงกระบอกเหลี่ยม เพื่อให้สามารถสร้างถังอบและติดตั้งระบบขับเคลื่อนการหมุนถังอบได้แข็งแรงทนทานขึ้น และประสิทธิภาพการอบแห้งดีกว่าเดิม 2) พัดลมเป็นแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางใบโค้งหน้า ดันกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้า 3) ชุดหัวพ่นแก๊สหุงต้มกำเนิดลมร้อนพร้อมอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

^{1/} ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมจันทบุรี 27 ม.1 ต.พลับพลา อ.เมือง จ.จันทบุรี 22000 โทรศัพท์ 039-451222

^{1/} Chanthaburi Agricultural engineering center, 27 M.1 T. pluppa A.Meuang Chanthaburi province 22000 Tel. 039-451222

^{2/} กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว ม.13 ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทรศัพท์ 02-5290663-4

^{2/} Postharvest engineering research group, M.13 T.Klongluang A.Klong 1 Phathumthani province 12120 Tel. 02-5290663-4

ผลการทดสอบอบแห้งกาแฟที่อุณหภูมิเริ่มต้น 100 องศาเซลเซียส และลดลงตามอุณหภูมิเมล็ดที่สูงขึ้นโดยอุณหภูมิเมล็ดไม่ควรเกิน 45 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบแห้งแต่ละครั้ง ประมาณ 18-22 ชั่วโมง ที่ความชื้นเมล็ดกาแฟเริ่มต้น 55 % ลดลงเหลือ 12% มีค่าประสิทธิภาพความร้อนประมาณ 82% นอกจากนี้ยังได้นำเครื่องอบแห้งแบบโรตารีไปทดสอบอบแห้งกับพืชเมล็ดชนิดอื่นๆ ได้แก่ พริก, พริกไทย และ โกโก้

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งแบบโรตารี ถังอบแห้งทรงเหลี่ยม ถังอบแห้งทรงแปดเหลี่ยม

คำนำ

กาแฟเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยชนิดหนึ่ง กาแฟพันธุ์โรบัสต้า มีพื้นที่การปลูกส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้ โดยเฉพาะ จังหวัดชุมพร ระนอง จะมีการปลูกกันมากกว่าบริเวณอื่นๆ ส่วนกาแฟพันธุ์อาราบิก้า มีพื้นที่ปลูกส่วนใหญ่อยู่ทางภาคเหนือมีมากใน จังหวัดเชียงราย เชียงใหม่ น่าน ความสูงของพื้นที่ปลูกต้องอยู่เหนือระดับน้ำทะเล 800 เมตร ขึ้นไป วิธีการทำแห้งกาแฟพันธุ์โรบัสตาดำนิยมผลิตโดยอบแห้งทั้งเปลือก ส่วนกาแฟพันธุ์อาราบิก้าเป็นกาแฟที่มีรสชาติดี กลิ่นหอม และราคาสูงกว่าพันธุ์โรบัสต้า ด้วยเหตุผลนี้จึงมีกรรมวิธีการผลิตที่ละเอียดอ่อนกว่าพันธุ์โรบัสต้า โดยมีการลอกเปลือกสดออกก่อนแล้วนำไปตากได้เป็นกาแฟกะลา (parchment method) ซึ่งทั้ง 2 วิธีการผลิตต้องมีขั้นตอนการทำแห้งเพื่อลดความชื้นกาแฟจากความชื้นเริ่มต้นลดลงเหลือต่ำกว่า 13% มาตรฐานเปียก แล้วนำไปสีได้สารกาแฟ เพื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ต่อไป แต่จากสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศของภาคใต้ จะมีฝนตกชุกเกือบตลอดทั้งปีสร้างปัญหาในการผลิตในขั้นตอนการทำแห้งโดยวิธีการตากกลางแจ้งเป็นอย่างมากใช้เวลานานตั้งแต่ประมาณ 10 วัน ถึง 1 เดือน ส่งผลกระทบต่อคุณภาพสารกาแฟเป็นอย่างยิ่ง เพราะเกิดกระบวนการหมักในระหว่างการตากมีเชื้อราที่เป็นพิษเกิดขึ้น รสชาติและกลิ่นไม่ได้มาตรฐาน ส่งผลโดยตรงต่อราคาในการจำหน่าย ส่วนทางภาคเหนือจะมีปัญหาเรื่องน้ำค้าง และมีฝนบ้างเป็นบางช่วง การพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว ในขั้นตอนการทำแห้งหรือลดความชื้นกาแฟจึงมีความจำเป็นมาก เพื่อช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว สำหรับประเทศไทยยังขาดเทคโนโลยีด้านเครื่องอบแห้งกาแฟที่เหมาะสม เครื่องอบแห้งแบบโรตารี (Rotary Dryer) เป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้กันมากในประเทศที่ผลิตกาแฟชั้นนำเช่น บราซิล เป็นต้น จากการศึกษาวิจัยของเวียงและคณะ (2540,2542) ในการพัฒนาเครื่องอบแห้งกาแฟแบบโรตารีพบประเด็นปัญหาของเครื่องอบแห้งแบบโรตารีที่สำคัญคือ 1) การสร้างหรือมีวนขึ้นรูปถังอบแห้งทรงกระบอกกลมขนาดใหญ่ทำได้ยากและไม่ได้มาตรฐาน 2) การสูญเสียประสิทธิภาพในการอบลดความชื้น เนื่องจากการยุบตัวของเมล็ดพืชเมื่อความชื้นลดลง 3) การซ่อมบำรุงหรือเปลี่ยนถังอบมีความสิ้นเปลืองสูง จากปัญหาที่กล่าวมาจึงเป็นวัตถุประสงค์ของการวิจัยพัฒนาออกแบบการสร้างเครื่องอบแห้งแบบโรตารีที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในส่วนของถังอบแห้งให้สามารถสร้างได้ง่ายแข็งแรง ควบคุมประสิทธิภาพการลดความชื้นได้ดี และที่สำคัญสามารถประยุกต์ใช้กับพืชเมล็ดได้หลากหลายชนิด

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุ ใช้สร้างเครื่องอบแห้งแบบโรตารีที่ออกแบบขึ้น
2. เมล็ดพืชใช้ทดสอบอบแห้ง เช่น เมล็ดกาแฟกะลา พริก พริกไทย และโกโก้ เป็นต้น
3. เครื่องชั่งน้ำหนักพิกัดโหลด 100 กิโลกรัม
4. เครื่องมือวัดความชื้นเมล็ดกาแฟแบบอินฟราเรด
5. เครื่องวัดความเร็วรอบ
6. นาฬิกาจับเวลา 1 เรือน
7. เทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้ง
8. กล้องถ่ายรูป
9. เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า
10. ภาชนะรองรับและกระสอบสำหรับใส่กาแฟ

วิธีการ

1. คำนวณออกแบบเครื่องอบแห้งแบบโรตารีต้นแบบ 2 ขนาดถึงอบแห้งด้วยกันคือความจุ 400 และ 800 กิโลกรัม โดยเน้นส่วนสำคัญคือ ส่วนถึงอบแห้ง ให้สามารถสร้างได้ง่าย และแข็งแรง
2. ทดสอบอบแห้งกาแฟกะลา โดยเครื่องอบแห้งแบบโรตารีทั้งสองขนาดที่ออกแบบไว้โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้
 - 2.1) ชั่งน้ำหนักกาแฟกะลาบรรจุใส่ลงถึงอบแห้ง สุ่มตัวอย่างไปวัดความชื้นเริ่มต้น
 - 2.2) เปิดเครื่องหมุนถึงอบแห้ง เปิดแก๊สกำเนิดความร้อนตั้งค่าอุณหภูมิความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง เปิดพัดลมเป่าลมร้อนเข้าถึงอบ ตั้งค่าอุณหภูมิความร้อนเข้าเริ่มต้นประมาณ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นลดอุณหภูมิลงเรื่อยๆ โดยดูอุณหภูมิเมล็ดกาแฟเป็นหลัก ไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส
 - 2.3) ดำเนินการอบแห้งไปจนกว่าปริมาณความชื้นเมล็ดพืชจะลดลงถึงจุดที่ต้องการ ซึ่งในระหว่างทำการอบแห้งนี้ทำการเก็บบันทึกข้อมูลการทดลองทุกๆ 1 ชั่วโมง โดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่างเมล็ดพืชมาวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ด บันทึกค่าที่เกี่ยวข้องได้แก่ อุณหภูมิความร้อนเข้า อุณหภูมิความร้อนออก อุณหภูมิและความชื้นแวดล้อม ค่าการใช้พลังงานต่างๆได้แก่ ปริมาณการใช้แก๊สหุงต้ม พลังงานการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าต้นกำลังสำหรับพัดลมเป่าลมร้อนและมอเตอร์ไฟฟ้าต้นกำลังขับเคลื่อนการหมุนถึงอบแห้ง
3. วิเคราะห์ผล และประเมินผลการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบโรตารีต้นแบบ และการวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์
4. สรุปผลการทดลอง และเผยแพร่ข้อมูล
5. ทดลองอบแห้งเมล็ดพืชชนิดอื่นๆด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารีความจุ 400 กิโลกรัม (เมล็ดกาแฟ) เพื่อเก็บข้อมูล วิเคราะห์ผลการทดลอง ได้แก่ พริกไทย พริก และโกโก้ เป็นต้น

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ตุลาคม 2551- 30 กันยายน 2553

รวม 2 ปี

สถานที่ดำเนินการ

- ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมจันทบุรี
- กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว หมู่ 13 ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี
- ศูนย์วิจัยพืชสวนชุมพร และกลุ่มเกษตรกรชาวสวนกาแฟ อ.สวี จ.ชุมพร
- พื้นที่เกษตรกรทำสวนกาแฟ

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการศึกษาข้อมูลจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นข้อมูลและแนวทางในการออกแบบสร้างเครื่องต้นแบบ ได้ข้อมูลดังนี้ เครื่องอบแห้งแบบโรตารี (Rotary dryer) เป็นเครื่องมือสำหรับการอบลดความชื้นวัสดุขึ้นได้มากมายหลากหลายชนิด เป็นที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย มีองค์ประกอบโครงสร้างหลัก 5 ส่วน ได้แก่ 1) โครงร่างหลัก (main body) เป็นรูปทรงกระบอกมักจะทำด้วยเหล็กแผ่น เหล็กไร้สนิม (Stainless steel) และเหล็กหล่อ 2) Flights มีไว้เพื่อแบ่งกระจายวัสดุอบแห้งให้ทั่วผนังทรงกระบอก และเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างลมร้อนและวัสดุอบแห้ง 3) ล้อและลูกกลิ้ง เป็นชิ้นส่วนที่รองรับการหมุนเวียนของเครื่องหรือถังอบ 4) Driving gears กรณีที่ต้องใช้กำลังไม่มากอาจขับเคลื่อนแกนของลูกกลิ้งเพื่อหมุนตัวเครื่องโดยแรงเสียดทานกับล้อ เมื่อต้องการกำลังเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจะขับเคลื่อนโดยใช้เฟืองและโซ่ สำหรับเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่จะใช้ driving gear เนื่องจากชุดของมอเตอร์ เฟืองทด เกียร์เปลี่ยนความเร็ว เป็นต้น กะทัดรัดหาได้ง่าย 5) Air seals ณ ตำแหน่งที่ตัวเครื่องหมุนพบกับส่วนที่อยู่นิ่งเพื่อป้องกันการรั่วไหลของลมร้อน และแทรกซึมของอากาศจากข้างนอก ใบกวน (Flights) แผ่นยก (Lifters) ในกรณีของเครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดรับความร้อนโดยตรง Flights มีไว้เพื่อแบ่งกระจายวัสดุให้ทั่วผนังของกระบอก และเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างลมร้อนและวัสดุอบแห้ง (วิวัฒน์, 2529) (Figure 1)

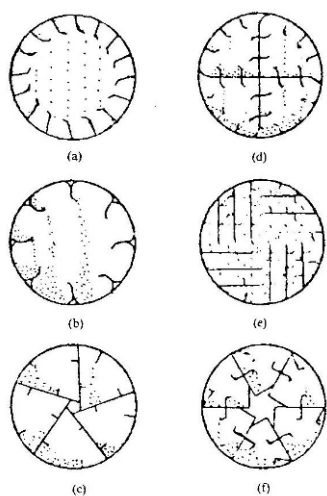


Figure 1. Flights and Lifters of Rotary Drum

จากการศึกษาข้อมูลการสร้างและออกแบบเครื่องอบแห้งแบบโรตารี พบว่าเครื่องอบแห้งแบบโรตารีขนาดใหญ่จะมีรูปทรงของถังอบแห้งเป็นทรงกระบอก ความแข็งแรงของถังอบขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของวัสดุในการทำถังกระบอก และต้องใช้เทคโนโลยีในการสร้างที่มีมาตรฐานสูงและส่งผลให้ราคาค้นทุนการสร้างสูงมากตามขึ้นไปด้วย (Figure 2)



Figure 2. Industry Rotary Dryer

จากงานวิจัยของเวียง และคณะ (2540,2542) สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ได้ทำการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบโรตารีสำหรับการอบแห้งกาแฟโดยนำหลักการเบื้องต้นมาจากเครื่องอบแห้งแบบโรตารีสำหรับกาแฟอาราบิก้าของบริษัทเนสเล่ท์ จำกัด (Figure 3) ดังนั้น ในปี 2540 ได้ทำวิจัยเรื่องการศึกษาและพัฒนาเครื่องอบกาแฟที่มีประสิทธิภาพราคาถูก ขนาดความจุ 280 กิโลกรัม (Figure 4) และในปี 2542 ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องอบลดความชื้นกาแฟอาราบิก้าแบบถังทรงกระบอกหมุนในแนวนอนขนาดความจุ 800 กิโลกรัมต่อครั้งการอบ และในปีเดียวกันได้วิจัยศึกษาและพัฒนาเครื่องอบลดความชื้นกาแฟโรบัสต้าแบบถังทรงกระบอกหมุนในแนวนอนขนาด 1,500 กิโลกรัมต่อครั้งการอบ (Figure 5-6) โดยที่ทั้ง 3 แบบที่วิจัยมีหลักการทำงานลักษณะเดียวกัน และมีส่วนประกอบหลักของเครื่องอบคล้ายๆกันคือประกอบด้วย ถังบรรจุเมล็ดพืชสำหรับอบแห้ง ระบบขับเคลื่อนการหมุนถังอบ พัดลมเป่าอัดความร้อนเข้ากลางถังเป็นชนิดใบพัดแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง หรือพัดลมหอยโข่ง แหล่งกำเนิดความร้อน ใช้แก๊สหุงต้ม เป็นเชื้อเพลิง มีชุดหัวพ่นกำเนิดความร้อน พร้อมอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และมีการเวียนลมร้อนบางส่วนกลับมาใช้ใหม่ และจากงานวิจัยของเวียง และคณะได้พบประเด็นปัญหาที่สำคัญสำหรับการสร้างและใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารีกล่าวคือ การสร้างหรือม้วนขึ้นรูปถังอบแห้งทรงกระบอกกลมต้องใช้เหล็กตะแกรงที่มีความหนาพอสมควร ทั้งนี้ ต้องการความแข็งแรงของผนังถังอบเป็นโครงสร้างด้วย เมื่อต้องการสร้างถังที่มีขนาดใหญ่ จำเป็นต้องสร้างให้มีความแม่นยำสูงมิฉะนั้นจะส่งผลต่อระบบขับเคลื่อนการหมุน จึงต้องใช้เครื่องมือที่มีคุณภาพสูงหรือจ้างทำในราคาแพงมาก ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงไปด้วย การสูญเสียประสิทธิภาพในการลดความชื้น เนื่องจากการยุบตัวลงของเมล็ดพืชเมื่อความชื้นลดลง ทำให้ลมร้อนส่วนใหญ่หนีออกด้านบนของท่อลมร้อนและออกนอกถังอบไปได้ง่ายเพราะผนังถังอบเป็นการม้วนขึ้นรูปมาจากตะแกรงรูปกลม ทำให้ลมร้อนไม่แทรกผ่านชั้นเมล็ดพืชเหมือนตอนเริ่มอบซึ่งเมล็ดพืชท่วมท่อลมร้อนอยู่



Figure 3. Rotary Dryer of Nestle company



Figure 4. Rotary Dryer capacity 280 kgs



Figure 5. Rotary Dryer capacity 800 kgs



Figure 6. Rotary Dryer capacity 1,500 kgs

1. การคำนวณออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบโรตารีต้นแบบ

การคำนวณหาปริมาณความจุถังอบแห้งสำหรับเมล็ดกาแฟ 400 และ 800 กิโลกรัม

จากการทดสอบเก็บข้อมูลหาค่า น้ำหนัก/ปริมาตร (Bulk Density) ของเมล็ดกาแฟ พบว่าน้ำหนักกาแฟ 640 กิโลกรัม มีปริมาตร 1 ลบ.ม. ที่ความชื้นเมล็ดกาแฟ ประมาณ 55 %

- ที่น้ำหนักกาแฟ 400 กิโลกรัม จะมีปริมาตร = $400/640 = 0.625$ ลบ.ม.

พื้นที่ว่างในการโรยตัว 1/3 ของปริมาตรทั้งหมด ∴ ปริมาตรถังอบ = $0.625 \times 3/2 = 0.94$ ลบ.ม.

- ที่น้ำหนักกาแฟ 800 กิโลกรัม จะมีปริมาตร = $800/640 = 1.25$ ลบ.ม.

พื้นที่ว่างในการโรยตัว 1/3 ของปริมาตรทั้งหมด ∴ ปริมาตรถังอบ = $1.25 \times 3/2 = 1.88$ ลบ.ม.

ดังนั้นปริมาตรที่ใช้สำหรับกาแฟ 400 กิโลกรัม = 0.95 ลบ.ม. และ 800 กิโลกรัม = 1.90 ลบ.ม.

การหาปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งเมล็ดกาแฟ

ทำการหาค่าปริมาณน้ำที่จะต้องระเหยออกโดยใช้สมการคือ $W_1 (100 - M_1) = W_2 (100 - M_2)$

โดยที่กำหนดให้ W_1 = น้ำหนักเมล็ดกาแฟก่อนอบแห้ง, กิโลกรัม

M_1 = ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดกาแฟ, % w.b.

(ได้จากการวัดค่าความชื้นเมล็ดกาแฟก่อนเข้าเครื่องอบ)

W_2 = น้ำหนักเมล็ดกาแฟหลังอบ, กิโลกรัม

M_2 = ปริมาณความชื้นหลังอบเมล็ดกาแฟ, % w.b.

- ต้องการอบเมล็ดกาแฟ 400 กิโลกรัม ที่ความชื้นเริ่มต้น 55 % ให้เหลือความชื้น 12%
 ดังนั้น $W_1 = 400$ ก.ก. , $M_1 = 55\%$, $M_2 = 12\%$

$$\text{จากสมการ } W_1 (100 - M_1) = W_2 (100 - M_2)$$

$$W_2 = 400 (100 - 55) / (100 - 12) = 205 \quad \text{กิโลกรัม}$$

$$\therefore \text{ปริมาณน้ำที่ต้องการระเหย} = 400 - 205 = 195 \quad \text{กิโลกรัม}$$

หาค่าปริมาณความร้อนที่จะใช้สำหรับการระเหยน้ำ 195 กิโลกรัม

$$\text{จากค่าความร้อนแฝงของน้ำ} = 2,326 \quad \text{kJ / kg}$$

$$\therefore \text{ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ระเหยน้ำ} = 195 \times 2,326 \text{ kg} \times \text{kJ/kg} = 453,570 \quad \text{kJ}$$

- ต้องการอบเมล็ดกาแฟ 800 กิโลกรัม ที่ความชื้นเริ่มต้น 55 % ให้เหลือความชื้น 12%
 ดังนั้น $W_1 = 800$ ก.ก. , $M_1 = 55\%$, $M_2 = 12\%$, $W_2 = ?$

$$\text{จากสมการ } W_1 (100 - M_1) = W_2 (100 - M_2)$$

$$W_2 = 800 (100 - 55) / (100 - 12) = 410 \quad \text{กิโลกรัม}$$

$$\therefore \text{ปริมาณน้ำที่ต้องการระเหย} = 800 - 410 = 390 \quad \text{กิโลกรัม}$$

หาค่าปริมาณความร้อนที่จะใช้สำหรับการระเหยน้ำ 390 กิโลกรัม

$$\text{จากค่าความร้อนแฝงของน้ำ} = 2,326 \quad \text{kJ / kg}$$

$$\therefore \text{ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ระเหยน้ำ} = 390 \times 2,326 \text{ kg} \times \text{kJ/kg} = 907,140 \quad \text{kJ}$$

ประมาณการจากการคำนวณปริมาณความร้อนที่จะใช้ในการอบแห้งเมล็ดกาแฟ ปริมาณ 400 กิโลกรัม ใช้ 453,570 กิโลจูล และ 800 กิโลกรัม ใช้ 907,140 กิโลจูล

การหาปริมาณลมเพื่อเลือกพัดลม

จากปริมาณลมร้อนที่ใช้ในการลดความชื้นกาแฟ 500 กก.สด ใช้ลม 1000 cfm (28.32 CMM)
 ที่แรงดัน 1 นิ้วน้ำ (ไมตรี แนวพนิชและคณะ, 2539) สามารถคำนวณปริมาณลมและแรงดันที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเลือกขนาดพัดลมได้ ดังนี้

- เมล็ดกาแฟ 400 กิโลกรัม ใช้พัดลมที่ปริมาณลม = $(1000 \times 400) / 500 = 800$ cfm แรงดัน 1 นิ้วน้ำ

- เมล็ดกาแฟ 800 กิโลกรัม ใช้พัดลมที่ปริมาณลม = $(1000 \times 800) / 500 = 1,600$ cfm แรงดัน 1 นิ้วน้ำ

การออกแบบถังอบแห้งเมล็ดพืช ในงานวิจัยนี้ออกแบบไว้ 2 ขนาด คือ ขนาดปริมาตรถังอบแห้ง 0.95 ลูกบาศก์เมตร มีขนาดถังอบแห้งเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 เมตร ยาว 1.20 เมตร เพื่อบรรจุเมล็ดกาแฟ 400 กิโลกรัม และขนาดความจุปริมาตร 1.90 ลูกบาศก์เมตร มีขนาดถังอบแห้งเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.80 เมตร ยาว 1.20 เมตร เพื่อบรรจุเมล็ดกาแฟ 800 กิโลกรัม เมื่อบรรจุกาแฟจะใส่ได้ประมาณ 2 ใน 3 ของปริมาตรถัง ถังอบแห้งที่ออกแบบพัฒนาขึ้นมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเปิดเหลี่ยมมีส่วนกลมเฉพาะส่วนที่กลิ้งบนลูกกลิ้งรับถังอบแห้งซึ่งการออกแบบลักษณะนี้จะสามารถสร้างส่วนโครงสร้างได้ง่ายและแข็งแรง ใช้วัสดุทำผนังถังอบแห้งบางลง การซ่อมบำรุงส่วนผนังทำได้ง่าย การออกแบบช่องระบายความชื้นทำได้สะดวกและที่สำคัญราคาการสร้างถังอบแห้งทรงกระบอก

แปดเหลี่ยมแบ่งเป็น 2 ชั้น เพื่อบรรจุเมล็ดกาแฟระหว่างผนังชั้นนอกของถังกับผนังชั้นในซึ่งเป็นท่อลมร้อนหมุนด้วยเหล็กแผ่นตะแกรงรูกลมเส้นผ่านศูนย์กลางรูตะแกรง 3 มิลลิเมตร มีใบกวนคลุกเคล้าเมล็ดกาแฟ 4 ใบ การควบคุมการกระจายลมร้อนและการระบายความชื้นทำได้สะดวกช่วยให้ประสิทธิภาพการอบแห้งดีขึ้นสม่ำเสมอขึ้นกว่าแบบเดิม ที่สำคัญช่องตะแกรงระบายความชื้นนี้สามารถถอดเปลี่ยนขนาดรูตะแกรงให้เหมาะสมกับขนาดเมล็ดพืชที่นำมาอบแห้ง มีห้องกักเก็บความร้อนครบถึงอบเพื่อหมุนเวียนความร้อนกลับมาใช้บางส่วนในช่วงเมล็ดกาแฟความชื้นลดต่ำลงเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงความร้อน (Figure 7-8)

การออกแบบชุดขับเคลื่อนการหมุนถึงอบแห้ง ออกแบบโดยใช้โซ่เบอร์ 100 พันติดแน่นรอบถึงอบและใช้เฟืองขับโซ่เพื่อหมุนถึงโดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าต้นกำลังขนาด 1.50 แรงม้า สำหรับขนาดถึงอบจุเมล็ดกาแฟ 400 กิโลกรัม และ ขนาด 3.00 แรงม้า สำหรับขนาดถึงอบจุเมล็ดกาแฟ 800 กิโลกรัม (ซึ่งขนาดมอเตอร์ต้นกำลังนี้ได้จากการทดสอบการทำงานจริง) มีชุดเกียร์ทดและเฟืองทดรอบให้ถึงอบหมุนประมาณ 1.5 รอบ/นาทิต และได้ออกแบบอุปกรณ์การตั้งเวลา การหยุด-การหมุน ของถึงอบแห้งเพื่อให้เหมาะสมกับการอบแห้งพืชเมล็ดแต่ละชนิด ปรับปรุงลูกกลิ้งรับถึงให้มีการรับน้ำหนักดีขึ้น โดยเปลี่ยนพื้นล้อลูกกลิ้งรับถึงจากเหล็กเส้นกลมมาเป็นเหล็กแบนหน้าสัมผัสเรียบและกว้างมากขึ้น (Figure 9-10)

การออกแบบพัดลมเป่าอัดลมร้อนเข้าถึงอบแห้ง เลือกพัดลมเป็นแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางใบโค้งหน้าเพราะพัดลมชนิดนี้ออกแบบส่วนของมอเตอร์ต้นกำลังแยกออกจากส่วนของเพลาลำโพงพัดลมป้องกันความร้อนมายังมอเตอร์ต้นกำลัง การเลือกขนาดพัดลมให้เหมาะสมตามปริมาณลมและแรงดันที่ได้คำนวณไว้แล้วเลือกจากตารางคู่มือการใช้งานพัดลม ซึ่งลักษณะการเป่าอัดลมร้อนเข้าถึงอบจะมีท่อลมร้อนสำหรับเป่าอัดลมร้อนอยู่กลางถึงอบให้ผ่านเมล็ดพืชแล้วระบายความชื้นออกทางช่องระบายความชื้นทั้งสี่ด้าน (Figure 11-12)

ชุดกำเนิดความร้อน ใช้เชื้อเพลิงจากแก๊สหุงต้มหรือแก๊ส LPG โดยมีชุดหัวพ่นแก๊สและอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิสามารถตั้งอุณหภูมิได้ตามต้องการใช้งาน มีอุปกรณ์ตัดการจ่ายแก๊สกรณีหัวล่อจุดแก๊สดับเพื่อป้องกันอุบัติเหตุ และได้มีการพัฒนาแหล่งกำเนิดความร้อนแบบชุดแลกเปลี่ยนความร้อนจากเตาเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้แหล่งความร้อนร่วม (Figure13)

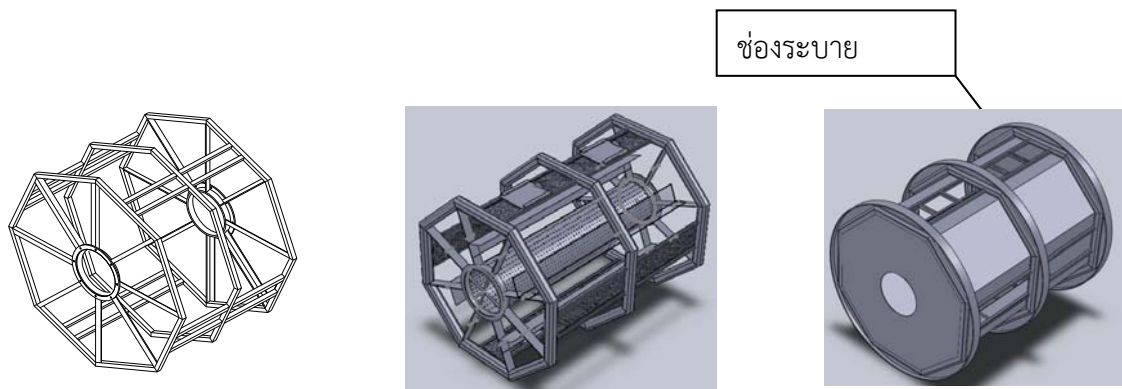


Figure 7. Drawing of Octagonal drying drum



Figure 8. Fabrication of Octagonal drying drum



Figure 9. Roller and Driving Rotary Drum

Figure 10. Rotating drum controlled by timer

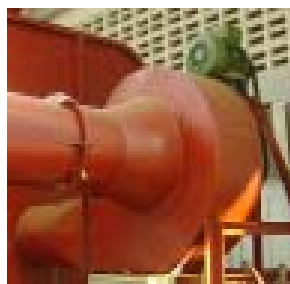


Figure 11. Centrifugal Fan

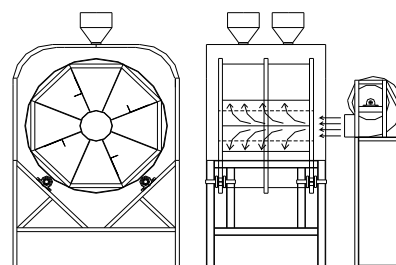


Figure 12. Hot air forced of rotary dryer



Figure 13. Gas burner together with temperature controller and heat exchanger of biomass furnace

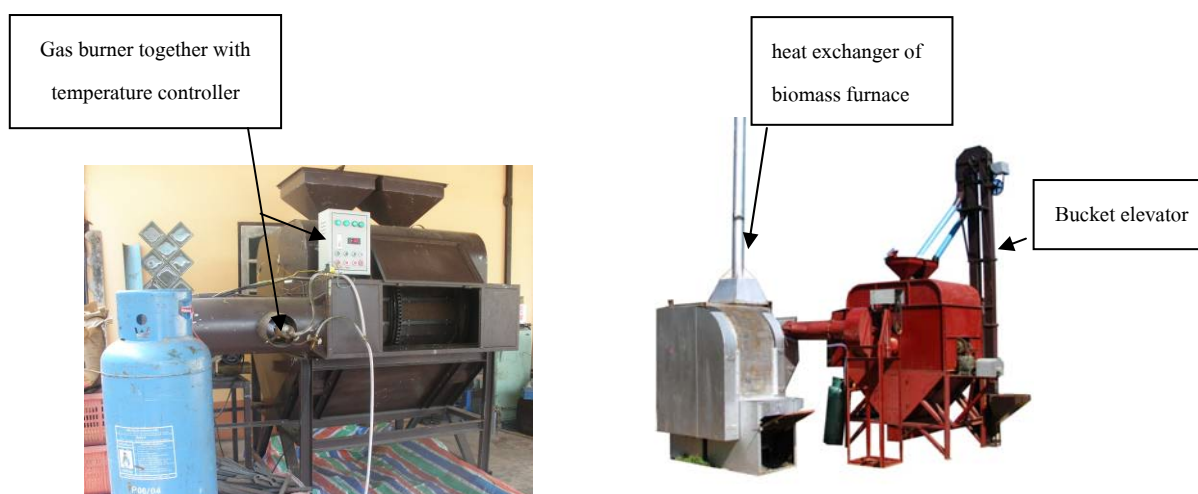


Figure 14. Rotary coffee dryer 400 kgs of capacity

Figure 15. Rotary coffee dryer 800kgs of capacity

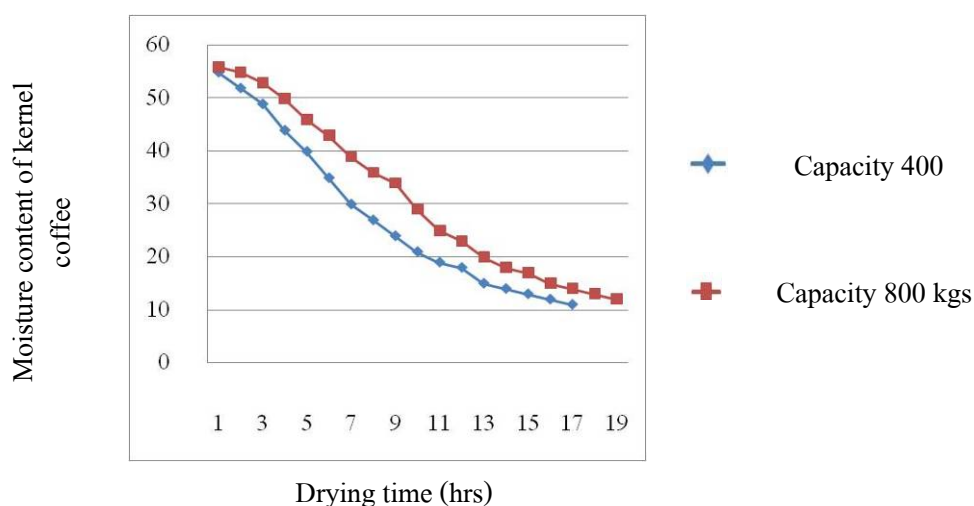


Figure 16. Moisture content of coffee beans variation with drying time using the developed rotary dryer having capacity 400 and 800 kgs

3. การทดลองอบแห้งกาแฟกะลา

เมื่อสร้างเครื่องอบแห้งแบบโรตารีต้นแบบเสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยมี 2 ขนาดบรรจุคือ ขนาด 0.95 ลูกบาศก์เมตร สำหรับปริมาณเมล็ดกาแฟ 400 กิโลกรัม ใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงความร้อน (Figure 14) และขนาดความจุ 1.90 ลูกบาศก์เมตร สำหรับปริมาณกาแฟ 800 กิโลกรัม ใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับชุดเตาแลกเปลี่ยนความร้อนชีวมวล (Figure 15) ทำการทดสอบอบแห้งเมล็ดกาแฟเก็บข้อมูลซึ่งได้ผลอัตราการลดความชื้นสรุปได้ดังกราฟ (Figure 16)

จาก Figure 16 แสดงอัตราการลดความชื้นจากการทดสอบอบแห้งกาแฟกะลาด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารีที่ปรับปรุงขึ้นทั้งสองขนาดบรรจุ พบว่าอัตราการลดความชื้นของเมล็ดกาแฟในช่วงเริ่มต้นจะช้าเนื่องจากเป็นช่วงที่ความร้อนนำไปใช้ในการทำให้อุณหภูมิของน้ำที่ผิวของเมล็ดกาแฟสูงขึ้นเพื่อให้ระเหยกลายเป็นไอน้ำได้ จากนั้นปริมาณความชื้นในเมล็ดกาแฟจะลดลงได้เร็วขึ้น (ดูจากความชันของกราฟที่สูงขึ้น) เนื่องจากความชื้นที่ผิวของเมล็ดกาแฟสามารถลดได้ง่าย ในช่วงนี้สามารถใช้อุณหภูมิความร้อนในการอบแห้งได้สูงเพราะว่าความชื้นในเมล็ดกาแฟมีค่าสูงหรือมีปริมาณน้ำมาก ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปกับการระเหยน้ำออกจากเมล็ดกาแฟ อุณหภูมิเมล็ดกาแฟจึงยังไม่สูงขึ้น จากนั้นอัตราการลดความชื้นจะเริ่มน้อยลงเมื่อความชื้นในเมล็ดกาแฟน้อยซึ่งเป็นผลจากความชื้นในเมล็ดออกช้าลงด้วยซึ่งก็เป็นไปตามหลักการลดความชื้นพืชผลเกษตรทั่วไป และเนื่องจากพืชกาแฟมีข้อจำกัดเรื่องการรักษากลิ่นและรสชาติ จึงต้องควบคุมไม่ให้อุณหภูมิเมล็ดกาแฟสูงเกินกว่า 45 องศาเซลเซียส มิฉะนั้นกลิ่นและรสชาติของกาแฟจะเสียไป การวัดอุณหภูมิเมล็ดกาแฟได้โดยการนำเทอร์โมมิเตอร์จุ่มไปในกองเมล็ดกาแฟที่สุ่มเก็บตัวอย่างมาขณะทำการลดความชื้น ดังนั้นสามารถใช้อุณหภูมิความร้อนสูงในการอบแห้งช่วงเริ่มต้นได้ แต่เมื่อความชื้นในเมล็ดกาแฟลดลงจะส่งผลให้อุณหภูมิในเมล็ดกาแฟเริ่มสูงขึ้น จึงจำเป็นต้องปรับอุณหภูมิความร้อนให้ลดลงสัมพันธ์กับอุณหภูมิเมล็ดกาแฟเพื่อไม่ให้เกิน 45 องศาเซลเซียส

การทดสอบนำต้นแบบเครื่องลดความชื้นแบบโรตารีที่พัฒนาขึ้นขนาดความจุ 0.95 และ 1.90 ลบ.ม. ไปอบเมล็ดกาแฟกะลา สรุปผลใน Table 1

จาก Table 1 เป็นการสรุปข้อมูลการทดสอบอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารีทั้ง 2 ขนาดบรรจุ ทำให้รู้ถึงระยะเวลาที่จะใช้ในการอบแห้ง วิธีการอบแห้งแบบปรับลดอุณหภูมิความร้อนให้เหมาะสม ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแก๊สหุงต้มเป็นแหล่งพลังงานกำเนิดความร้อน ซึ่งจะใช้ข้อมูลนี้ในการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง และใช้ประกอบการแนะนำเป็นคู่มือในการใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารีที่จะเผยแพร่ต่อไป

4. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ แบ่งต้นทุนเป็น 2 แบบ คือ ต้นทุนคงที่ ได้แก่ ค่าเครื่องจักรมูลค่าการเสื่อมราคาของตัวเครื่องที่ใช้ไปในแต่ละปี ต้นทุนผันแปรได้แก่ ค่าวัสดุเกษตรค่าจ้างแรงงาน ค่าไฟฟ้า ค่าเชื้อเพลิงแก๊สหุงต้มกำเนิดความร้อน และค่าซ่อมบำรุง เป็นต้น (วันชัย และช่อม, 2539)

จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของการใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารีทั้ง 2 ขนาด ไปใช้รับจ้างอบแห้งเมล็ดกาแฟ ได้ผลสรุปดัง Table 2

Table 1. The test result of coffee beans drying using rotary dryer for both size capacity, 0.95 and 1.90 m³ - (400 and 800 kgs)

Topic of test	Volume 0.95 m ³	Volume 1.90 m ³
Weight of fresh product (kg)	400	800
Initial moisture conten (% w.b.)	55	56
Final moisture conten (% w.b.)	12	12
Drying Time (hr)	18	20-22
Drying air temperature (°C)	Started at 100 reduce to 50	Started at 100 reduce to 50
Avg. LPG Consumption (kg/hr)	0.8	1.75
Heat utilization efficiency (%)	85	82

Table 2. Economic analysis of coffee bean drying using rotary dryer for both size capacity, 0.95 and 1.90 m³ - (400 and 800 kgs)

Economic analysis	Volume 0.95 m ³	Volume 1.90 m ³
Price of rotary dryer (bath)	75,000	125,000
Term of using dryer (year)	7	7
Unit cost of coffee bean drying (bath/kg)	3.13	2.72
- Fixed cost	0.74	0.62
-Variable costs	2.39	2.10
Rent of coffee bean drying (bath/kg)	4.50	4.50
Break even point (kg/year)	9,729	12,480
Time of return (year)	3.04	1.95
Determination of rate of return (%)	32.88	51.26

จาก Table 2 ผลสรุปการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์การใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารีสำหรับรับจ้างอบแห้งเมล็ดกาแฟจะช่วยให้พิจารณาการตัดสินใจในการเลือกใช้ได้โดยดูจากราคาเครื่องอบแห้ง อายุการใช้งาน จุดคุ้มทุน ระยะเวลาคืนทุน และอัตราผลตอบแทนเงินลงทุน เป็นสำคัญ แต่ข้อสรุปเหล่านี้ยังไม่รวมผลประโยชน์ทั้งหมดที่จะได้รับทั้งนี้เพราะการคิดผลตอบแทนหรือความคุ้มค่าในการลงทุนใช้เครื่องอบแห้งจะพิจารณาถึงการใช้เครื่องอบแห้งเพื่อแก้ปัญหาในช่วงเวลาที่มีฝน

ตกชุกซึ่งเครื่องอบแห้งกาแฟจะเข้ามามีบทบาทมากเพื่อลดปัญหาการเสียดคุณภาพของกาแฟจากการตากไม่ได้ และเครื่องอบแห้งทำให้ขั้นตอนการลดความชื้นกาแฟทำได้ต่อเนื่องทั้งช่วงที่มีฝนตกและไม่มีฝนตก หรือทำการลดความชื้นกาแฟสลับกับการตากแดด เป็นต้น

5. การทดสอบอบแห้งพืชเมล็ดชนิดอื่นๆ

เครื่องอบแห้งโรตารีต้นแบบที่พัฒนาขึ้นขนาดความจุ 0.95 ลูกบาศก์เมตร ได้นำไปทดลองใช้ในการลดความชื้นพริก พริกไทย และโกโก้ พบว่าสามารถใช้งานได้ดีดังแสดงใน table 2 ในการใช้งานอบแห้งกับพืชหลายชนิด สิ่งสำคัญคือต้องรู้คุณสมบัติของพืชที่จะนำมาอบแห้งเป็นอย่างดี จึงจะใช้เครื่องอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือการอบแห้งพริกต้องไม่ใช้อุณหภูมิสูงมากเนื่องจากพริกจะมีสีคล้ำ อุณหภูมิความร้อนไม่ควรเกิน 55 องศาเซลเซียส ถ้ามีการหมุนของถังอบตลอดเวลาขณะอบจะทำให้ข้าวพริกหลุด ดังนั้นในทางปฏิบัติจะหมุนถังอบ 2 นาที (ถังจะหมุนประมาณ 3 รอบ) หยุด 15 นาที สลับกันไปตลอดการอบแห้งโดยมีอุปกรณ์ในการตั้งเวลาควบคุมการหมุนตามต้องการ

การอบพริกไทยก็เช่นเดียวกันต้องระวังเรื่องผิวเสีย ควรใช้อุณหภูมิความร้อนประมาณ 50-55 องศาเซลเซียส และหมุนถังอบ 1 นาที (1.5 รอบ) หยุด 10 นาที สลับกันไปตลอดการอบแห้ง

การอบแห้งโกโก้สามารถอบได้ผลเป็นอย่างดี โดยได้รับการยืนยันจากบริษัทสยามโกโก้ จำกัด ข้อควรระวังในการอบแห้งโกโก้จะต้องระวังเรื่องความชื้นไม่ให้ต่ำเกินไปจะทำให้เสียน้ำหนักในการขาย ความชื้นที่เหมาะสมประมาณ 7-9 %

Table 3. The test result of the developed rotary dryer having capacity 0.95 m³ volume to dry chilli, pepper and cocoa

Topic of test	Chili	Pepper	Cocoa
Weight of fresh product (kg)	200	400	240
Initial moisture conten (% w.b.)	65	50	51
Weight of dried product (kg)	79.50	227	126
Final moisture conten (% w.b.)	12	12	7
Drying Time (hr)	18	18	16
Drying air temperature (°C)	55	60	70
Avg. LPG Consumption (kg/hr)	0.61	0.83	0.95

ผลการทดสอบอบแห้งลดความชื้นพืชเมล็ดชนิดต่างๆตามที่แสดงไว้ใน Table 3 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและสมรรถนะที่ดีของเครื่องอบแห้งแบบถังหมุน (โรตารี) ที่สามารถประยุกต์ใช้ในการอบแห้งกับพืชหลายชนิดด้วยกัน

สรุปผลการทดลองและคำแนะนำ

เครื่องอบแห้งแบบโรตารีที่ออกแบบมี 2 ขนาดบรรจุ คือ 0.95 ลูกบาศก์เมตรสามารถจุเมล็ดกาแฟได้ 400 กิโลกรัม และความจุ 1.90 ลูกบาศก์เมตร สามารถจุเมล็ดกาแฟได้ 800 กิโลกรัม ตัวเครื่องอบประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ 1) ถังอบแห้งรูปทรงกระบอกเปิดเหลี่ยมที่สามารถสร้างได้ง่ายแข็งแรงทนทาน และประสิทธิภาพการอบแห้งดี 2) พัฒนาระบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางใบโค้งหน้า 3) ชุดกำเนิดความร้อนจากหัวพันแก๊สชุดพร้อมอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และชุดเตาแลกเปลี่ยนความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล และได้มีการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์กำหนดเวลาการหมุนและหยุดของถังอบช่วยให้การปรับใช้ถังอบแห้งเหมาะสมกับพืชชนิดต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น จากผลการทดสอบอบแห้งเมล็ดกาแฟใช้เวลาอบแห้งแต่ละครั้งประมาณ 18-22 ชั่วโมง ที่ความชื้นเมล็ดกาแฟเริ่มต้น 55 % ลดลงเหลือ 12% และจากการนำเครื่องอบแห้งแบบโรตารีไปทดสอบอบแห้งกับพืชเมล็ดชนิดอื่นๆ ได้แก่ พริก, พริกไทย และ โกโก้ สามารถใช้ถังอบแห้งได้ผลเป็นอย่างดี โดยพิจารณาจากความสม่ำเสมอของการลดความชื้น ระยะเวลาการลดความชื้น



Figure 17. Coffee beans drying using sun dry and mechanical dryer



Figure 18. Product of drying Test of chili, pepper and cocoa



Figure 19. Drying test of cocoa **Figure 20.** Using of large scale rotary dryer for biomass drying

คำแนะนำในการลงทุนใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารีควรศึกษาความเหมาะสมทั้งด้านประสิทธิภาพของเครื่องและการตลาดควบคู่กันไปด้วย และที่สำคัญต้องวางแผนการจัดการใช้เครื่องอย่างมีประสิทธิภาพ

สูงสุดจึงจะได้ผลตอบแทนเต็มที่ เช่น มีการรวมกลุ่มสมาชิกเกษตรกรเพื่อรวบรวมปริมาณผลผลิตมาใช้เครื่องอบได้เต็มเวลา และตั้งผู้ควบคุมดูแลเครื่องอบที่มีความชำนาญ เป็นต้น

การนำไปใช้ประโยชน์

- วิทยาลัยชุมชนกลุ่มแปรรูปกาแฟ สวนยาหลวง ต.ผาทอง อ.ท่าวังผา จ.น่าน ประสบปัญหาในการตากแห้งกาแฟโดยใช้ลานตาก เนื่องจากฝนตกและสภาวะอากาศที่มีหมอกลงมาก จึงได้นำเครื่องอบแห้งขนาดบรรจุ 800 กิโลกรัมไปร่วมทดสอบและให้ทดลองใช้ (Figure 17)
- การอบแห้งเมล็ดโกโก้ ของสหกรณ์การเกษตรแหลมสิงห์ จำกัด อ.แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี เนื่องจากเป็นจังหวัดที่มีฝนตกชุกแทบทั้งปี มีปัญหาจากการตากแห้งด้วยแสงแดด จึงได้นำเครื่องอบแห้งขนาดความจุ 400 กิโลกรัมไปทดสอบอบแห้ง ซึ่งได้ผลเป็นที่พอใจมาก (Figure 19)
- อบเชือเพลิงชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง (Figure 20)

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมจันทบุรี เจ้าหน้าที่กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม ที่สนับสนุนการสร้างและทดสอบเครื่องอบ และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยพืชสวน จ.ชุมพร ที่สนับสนุนเมล็ดกาแฟในการทดสอบ วิทยาลัยชุมชนกลุ่มแปรรูปกาแฟ สวนยาหลวง ต.ผาทอง อ.ท่าวังผา จ.น่าน ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และกาแฟกลาที่ใช้ในการทดสอบ สหกรณ์การเกษตรแหลมสิงห์ จำกัด ที่อนุเคราะห์เมล็ดโกโก้ใช้ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- ไมตรี แนวพนิช และคณะ. 2539. คู่มือการใช้และบำรุงรักษาเครื่องลดความชื้นเมล็ดพืช. กองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร
- วันชัย ธีรวัณิช และช่อม พลอยมีค่า. 2539. เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 350 หน้า
- วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล. 2529. อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม. โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) พิมพ์ครั้งที่ 3. บริษัทซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด. กรุงเทพฯ.
- เวียง อากรชี พิมพ์ วุฒิสินธ์ และสุภัทร หนูสวัสดิ์. 2540. การศึกษาและพัฒนาเครื่องอบกาแฟที่มีประสิทธิภาพราคาถูก. เอกสารรายงานผลการวิจัยฉบับเต็ม, สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม.
- เวียง อากรชี พิมพ์ วุฒิสินธ์ และสุภัทร หนูสวัสดิ์. 2542. การพัฒนาเครื่องอบลดความชื้นกาแฟ โรบัสต้าแบบถักกลมทรงกระบอกหมุนในแนวนอน. เอกสารรายงานผลการวิจัยฉบับเต็ม, สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม.