ST-17

# การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งเข่าคลอนด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

# Mathematical Modeling for Dregea Volubilis Drying by Heat Pump Dryer

วีรชัย แผ่นอุไร[1] ศราวุธ รัตนวงษ์[2] เจริญ เบ้าทอง[3] และจิรวัฒน์ วรุณโรจน์[4]

Wirachai Phaenurai[1], Sarawut Rattanawong1[2], Chareon Baothong[3] and Jirawut Waroonroj[4]

[1,2,3,4] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

อีเมล: vvwee2000@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

เข่าคลอนเป็นสมุนไพรจากธรรมชาติที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่นในประเทศไทย มีสรรพคุณแก้อาการปวดเมื่อย ปวดตามข้อ เหน็บชา แก้ข้อเข่าเสื่อม แต่ยังต้องใช้วิธีการเก็บรักษาให้เหมาะสมเพื่อรักษาคุณภาพ และฤทธิ์ทางการรักษาของสมุนไพรไว้ งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องอบแห้งเข่าคลอนแบบปั๊มความร้อน โดยนำเข่าคลอนที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 67% มาตรฐานเปียก มาอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งภายในเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิอบแห้ง 3 ระดับ คือ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ที่ส่งผลต่อความชื้นของเข่าคลอน ซึ่งเปรียบเทียบผลการทดลองกับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล ผลการวิจัยพบว่า อุณหภูมิอบแห้งสูงส่งผลให้ความชื้นและอัตราส่วนความชื้นลดลงเป็นเส้นโค้งแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเข่าคลอน คือ Wang and Singh เนื่องจากมีค่า $R^2$ มีค่าลู่เข้าหาค่า 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.999 และค่า RMSE ต่ำ อยู่ในช่วง 0.0061 - 0.0083 ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด

**คำหลัก**: การอบแห้ง, เข่าคลอน, อัตราส่วนความชื้น, เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

**Abstract**

Dregea volubilis is a natural herb that is readily available locally in Thailand. It has properties to relieve aches, pain in the joints, numbness, cure osteoarthritis of the knee. But still have to use proper storage methods to maintain quality and the therapeutic effect of herbs. This research has an idea to build a heat pump dryer. The procedure began by drying dregea volubilis at an average initial of 67 % w.b. within 8 hours to study 3-level results of drying temperature at 50°C, 55°C and 60°C affecting the moisture of dregea volubilis. The results of the experiment were compared with analysis by mathematical model of empirical drying equation. The research results were found that high drying temperature reduced moisture and moisture ratio as an exponential function curve. The most appropriate mathematical model of the drying equation was Wang and Singh's drying equation because $R^2$ converged with 1, which is 0.999, and the low RMSE value was in the range of ในช่วง 0.0061 - 0.0083 which was most similar to the results of the experiment.

**Keywords:** drying, dregea volubilis, moisture ratio, heat pump drier

**บทนำ**

พืชสมุนไพรเป็นผลผลิตจากธรรมชาติที่มนุษย์รู้จักนำมาใช้เป็นประโยชน์ เพื่อการรักษาโรคภัยไข้เจ็บตั้งแต่โบราณกาล แล้วสามารถรักษาโรคบางชนิดได้โดยไม่ต้องใช้ยาแผนปัจจุบัน สมุนไพรนั้นสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่นเพราะส่วนใหญ่ได้จากพืชซึ่งมีอยู่ทั่วไป โดยนำส่วนต่าง ๆ ของพืชชนิดเดียวหรือหลายชนิด นำมาผลิตเป็นยารักษาโรคในหลายลักษณะ เช่น ใช้ภายในครอบครัว วิสาหกิจชุมชน และในเชิงอุตสาหกรรม วิธีการเก็บรักษาพืชสมุนไพรมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการรักษาคุณภาพ และฤทธิ์ทางการรักษาของสมุนไพรไว้ อีกทั้งยังสามารถยืดอายุของสมุนไพรให้ใช้ได้นานขึ้น โดยปกติหลังการเก็บพืชสมุนไพร เกษตรกรจะนำมาตากแดดเพื่อลดความชื้น ซึ่งถือเป็นวิธีทางธรรมชาติที่จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของแหล่งพลังงานและไม่ยุ่งยาก แต่มีข้อจำกัดในด้านแรงงานคน เวลา และสภาพอากาศภายนอกซึ่งต้องอาศัยแสงแดดในแต่ละวันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูฝน นอกจากนี้สมุนไพรบางชนิด เช่น กวาวเครือขาว กวาวเครือแดง และเข่าคลอน เป็นต้น ยังไม่สามารถตากแดดได้มากกว่าหนึ่งวัน เพราะหากข้ามคืนไปแล้วจะทำให้เกิดการขึ้นรา ทำให้ยาสมุนไพรเสื่อมคุณภาพ การออกฤทธิ์ยาในการบำบัดรักษาลดลง และสูญเสียฤทธิ์ของยา ดังนั้น การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง (Artificial drying) จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการเก็บรักษาสมุนไพร เพื่อนำความชื้นออกโดยการระเหยน้ำภายในสมุนไพร ทำให้ลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถใช้งานได้ทุกสภาวะอากาศ สามารถควบคุมความชื้นได้ตามระดับที่ต้องการมากกว่าการตากแดด

ปัจจุบันการอบแห้งวิธีการอบแห้งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยสุญญากาศ การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน เป็นต้น โดยแต่ละวิธีมีทั้งข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งวิธีการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนนั้นเป็นอีกวิธีการที่สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดี (เทวรัตน์ ทิพยวิมลม, 2555) เนื่องจากเป็นการอบแห้งในระบบปิดลดการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานความร้อนเหลือทิ้งได้อีกด้วย งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องอบแห้งเข่าคลอน สำหรับเกษตรกรภาคครัวเรือนหรือวิสาหกิจชุมชนขนาดเล็ก ในส่วนของการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งเข่าคลอน ซึ่งมีตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิ พื้นที่ที่ใช้อบแห้ง ความเร็วลมร้อน และความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้น (กิตติ สถาพรประสาธน์ และ โพธิ์ทอง ประณีตพลกรัง, 2560) สำหรับการอบแห้งเข่าคลอนด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน โดยมุ่งเน้นการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบที่สำคัญต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง ที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัลที่เหมาะสม เพื่อใช้ประมาณค่าผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการอบแห้ง

**วัตถุประสงค์**

เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้นสำหรับการอบแห้งเข่าคลอนด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

**วิธีดำเนินการวิจัย**

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

ใช้สมุนไพรเข่าคลอนหรือกระทุงหมาบ้าซึ่งจัดเป็นพรรณไม้เลื้อยเนื้อแข็ง ยาวได้ถึง 10 เมตร เถาจะพาดพันตามต้นไม้ใหญ่ ลำต้นมีลักษณะเป็นเถากลม เปลือกเถาอ่อนเป็นสีเขียว ส่วนเถาแก่เป็นสีน้ำตาลถึงสีน้ำตาลอ่อน ตามผิวกิ่งตะปุ่มตะป่ำและมีช่องอากาศ ขยายพันธุ์ด้วยวิธีการปักชำ เจริญเติบโตได้ดีในดินร่วน ระบายน้ำดี ชอบที่ชื้น ทนแล้งได้ดี พบได้ตามป่าดิบ ป่าราบหรือบริเวณชายป่าทั่วทุกภาคของประเทศ มีสรรพคุณแก้อาการปวดเมื่อย ปวดตามข้อ เหน็บชา แก้ข้อเข่าเสื่อม ต้านการอักเสบของข้อเข่า

2. เงื่อนไขในการทดลองการอบแห้งเข่าคลอน มีดังนี้

2.1 อุณหภูมิการอบแห้งเข่าคลอนมี 3 ระดับคือ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส

2.2 ควบคุมความเร็วลมร้อนเข้าสู่ห้องอบ 2 เมตร/วินาที คงที่

2.3 ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 67% มาตรฐานเปียก และใช้เวลาการอบแห้ง 8 ชั่วโมง

3. วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องอบแห้งแบบแบบปั๊มความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

3.1 ห้องอบแห้ง (Drying Room) มีขนาดกว้าง 70 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร และสูง 130 เซนติเมตร ถาดบรรจุเข่าคลอน มีขนาดกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร และขอบสูง 1 เซนติเมตร และระยะห่างจากขอบถาดถึงก้นถาดชั้นถัดไป 14 เซนติเมตรจำนวน 5 ถาด สำหรับตัวอย่างเข่าคลอนหั่นประมาณ 5 กิโลกรัมต่อการทดลอง

3.2 พัดลม (Blower) ขนาด 50 วัตต์ ทำหน้าที่ป้อนลมร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง

3.3 เครื่องทำระเหย (Evaporator) ขนาด 2.6376 kW (9000 BTU/hr)

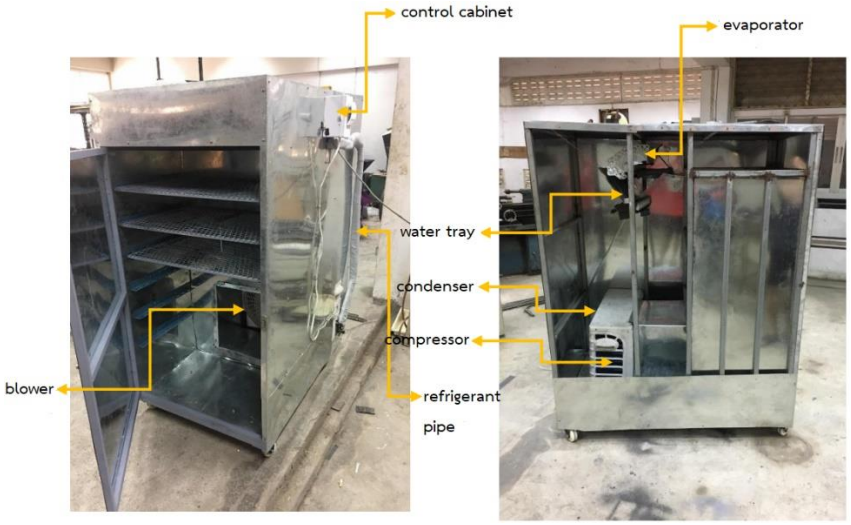
3.4 เครื่องอัดไอแบบลูกสูบสำหรับสารทำความเย็น R-22 ขนาด 0.5 hp (0.37 kW)

3.5 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared Thermometer)

3.6 อุปกรณ์วัดความเร็วลม (Hot wire anemometer)

3.7 ตู้อบลมร้อน (Oven) ยี่ห้อ Memmert ทำหน้าที่อบเข่าคลอนเพื่อวัดหาค่าความชื้น

3.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ SUNFORD รุ่น FEH300 ค่าความละเอียด 0.01 กรัม




**ภาพที่ 1** เครื่องอบแห้งเข่าคลอนด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

4. การวิเคราะห์ผล

4.1 ความชื้นในวัสดุ (Moisture Content) คือ ค่าที่บ่งชี้ปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ ความชื้นในวัสดุแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis, Mw) และความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis, Md) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ความชื้นมาตรฐานเปียกในการวิเคราะห์ (สมพจน์ คำแก้ว, 2564) โดยความชื้นมาตรฐานเปียกสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$M_w(\%) = \frac{(w-d)}{w} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ Mw คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.), w คือ มวลเปียกของวัสดุ (กิโลกรัม) และ d คือ มวลแห้งของวัสดุ (กิโลกรัม)

4.2 อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเมื่อเทียบความชื้นเริ่มต้น เมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินต่อไปในเวลาใดๆ (อีลีหย๊ะ สนิโซ และคณะ, 2555) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$MR = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_0 - M_{eq})} \qquad (2)$$

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมุติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบค่าความชื้นเริ่มต้น ($M_{eq} \ll M_0$) และค่าความชื้นที่เวลาใดๆ ($M_{eq} \ll M_t$) จึงสามารถเขียนสมการที่ (2) ใหม่ ดังนี้

$$MR = \frac{(M_t)}{(M_0)} \qquad (3)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, $M_t$ คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (% d.b.), $M_0$ คือ ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.) และ $M_{eq}$ คือ ความชื้นสมดุล (% d.b.)

4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล

สมการอบแห้งแบบเอมพิริคัลคือ สมการที่สร้างจากข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุที่ใช้อบแห้งเพื่อใช้สำหรับทำนายอัตราการอบแห้ง โดยรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งสมุนไพรเข่าคลอนด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกสมการที่นิยมใช้ทางงานด้านอบแห้ง 5 สมการ แล้วนำมาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis) โดยรูปแบบสมการมีดังตารางต่อไปนี้

**ตารางที่ 1** แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Aviara et al., 2016)

| Model name | Model equation | Equation no. |
|---|---|---|
| Aghbashlo et al. | MR = exp(-kt) | (4) |
| Henderson and Pabis | MR = a exp(-kt) | (5) |
| Logarithmic ชื่อหัวเรื่องใหญ่ | MR = a exp(-kt) + b | (6) |
| Page การอ้างอิงในเนื้อเรื่อง | MR = exp(-$kt^n$) | (7) |
| Wang and Singh | MR = 1 + at + $bt^2$ | (8) |

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาที) และ k, n, a และ b คือ ค่าคงที่ใดๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนว่าแบบจำลองที่สร้างมานั้นมีความแม่นยำและใกล้เคียงกับผลการทดลองเพียงใด โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R2) (Aviara et al., 2016) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) (กิตติ สถาพรประสาธน์ และโพธิ์ทอง ประณีตพลกรัง, 2560) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (9) - (10) ตามลำดับ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(MR_{pred,i} - MR_{exp,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\overline{MR}_{exp} - MR_{exp,i}\right)^2} \quad (9)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(MR_{pred,i} - MR_{exp,i}\right)^2\right]^{1/2} \quad (10)$$

เมื่อ $MR_{pred,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

$MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

$\overline{MR}_{exp}$ คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทดลอง

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ใช้วิเคราะห์

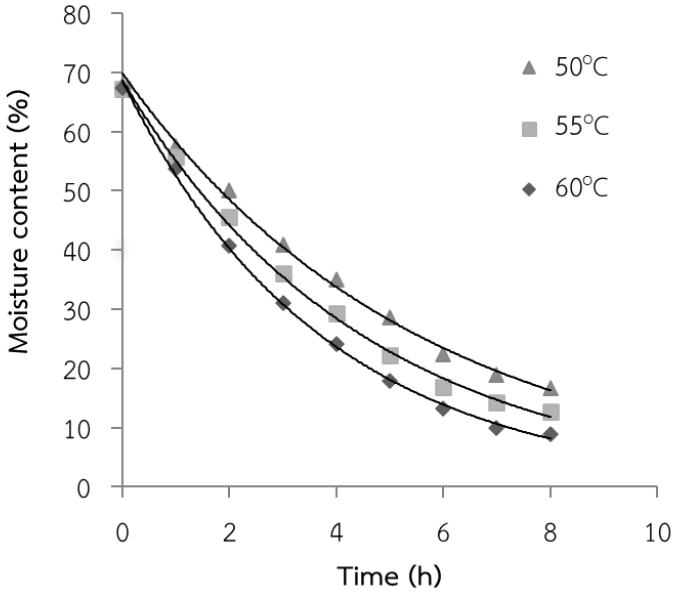
5. วิธีการทดลอง

เริ่มต้นจากการเตรียมตัวอย่างสมุนไพรเข่าคลอน จำนวน 5 กิโลกรัม เข้าห้องอบแห้ง เพื่อทำการอบแห้ง นำตัวอย่างเข่าคลอนส่วนหนึ่งบรรจุใส่ถ้วยตัวอย่างแล้วปิดฝาและนำไปชั่งหามวลเปียกก่อนอบแห้ง จากนั้นเริ่มทำการอบแห้งโดยตั้งความเร็วและอุณหภูมิของลมร้อนที่เข้าห้องอบแห้งที่ 2 เมตร/วินาที และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ระหว่างทำการอบแห้งจะทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างเข่าคลอนใส่ถ้วยตัวอย่างแล้วปิดฝาและชั่งหาน้ำหนักขณะนั้น ทำจนครบ 8 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างที่เก็บจากการทดลองทั้งหมดเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วทำการชั่งน้ำหนักหลังการอบเพื่อคำนวนหาความชื้นของเข่าคลอนตัวอย่างที่การอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน AOAC (AOAC., 1995) จากนั้นจึงทำการทดลองในลักษณะเดียวกันที่อุณหภูมิ 55 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับต่อไป

**ผลการวิจัย**

จลพลศาสตร์ของการอบแห้งเข่าคลอน

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 , 55 และ 60 องศาเซลเซียส โดยความชื้นเริ่มต้น 67% (w.b.) และใช้เวลาการอบแห้ง 8 ชั่วโมง จากผลการทดลอง ดังภาพที่ 2 พบว่าปริมาณความชื้นของเข่าคลอนจะมีลักษณะที่ลดลงเป็นเส้นโค้งแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล โดยในช่วงต้นของการอบ ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเข่าคลอนมีความชื้นสูง อีกทั้งผลต่างระหว่างอุณหภูมิของเข่าคลอนและอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบสูง จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดี ส่งผลต่อการถ่ายเทมวลของน้ำภายในเข่าคลอนมายังผิวนอกเป็นไปอย่างรวดเร็ว และเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นอัตราเร็วในการถ่ายเทมวลของน้ำจะค่อยๆลดลงทำให้ความชื้นของเข่าคลอนลดลงอย่างช้าๆ และจากผลการทดลองยังพบอีกว่า การอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงปริมาณความชื้นจะลดลงมากกว่าการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ปริมาณการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนกับผิวนอกของเข่าคลอนจะสูงกว่า ดังนั้น ถ้าพิจารณาระยะเวลาในการอบแห้งที่ปริมาณความชื้นสุดท้ายเดียวกัน การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ




**ภาพที่ 2** ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นกับเวลาในการอบแห้งเข่าคลอนที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล

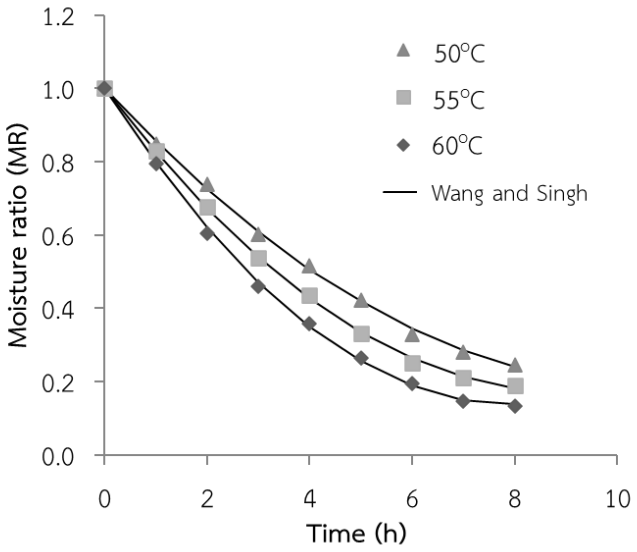
เมื่อนำข้อมูลปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดลองการอบแห้งเข่าคลอนที่สภาวะต่างๆ มาหาค่าอัตราส่วนความชื้นที่เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับปริมาณความชื้นเริ่มต้น แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าคงที่และค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล โดยเลือกสมการที่นิยมใช้ทางงานด้านอบแห้ง 5 สมการ มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งจะได้ค่าคงที่และค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ดังตารางที่ 2 และการเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ($R^2$) ที่มีค่าสูงที่สุด และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุด

**ตารางที่ 2** แสดงค่าคงที่และค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล

| Model name | Temperature | Model Constants | $R^2$ | RMSE |
|---|---|---|---|---|
| Aghbashlo et al. | 50°C | k = 0.1568, a = -0.0181 | 0.998 | 0.0100 |
| | 55°C | k = 0.1964, a = -0.0159 | 0.998 | 0.0126 |
| | 60°C | k = 0.2452, a = -0.0124 | 0.999 | 0.0092 |
| Henderson and Pabis | 50°C | k = 0.1768, a = 1.0147 | 0.997 | 0.0140 |
| | 55°C | k = 0.2175, a = 1.0173 | 0.997 | 0.0145 |
| | 60°C | k = 0.2639, a = 1.0139 | 0.999 | 0.0106 |
| Logarithmic | 50°C | k = 0.1450, a = 1.1268, b = -0.1228 | 0.998 | 0.0107 |
| | 55°C | k = 0.1975, a = 1.0617, b = -0.0510 | 0.998 | 0.0132 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 60°C | k = 0.2499, a = 1.0347, b = -0.0253 | 0.999 | 0.0096 |
| Page | 50°C | k = 0.1512, n = 1.0872 | 0.998 | 0.0096 |
| | 55°C | k = 0.1883, n = 1.0829 | 0.998 | 0.0107 |
| | 60°C | k = 0.2388, n = 1.0608 | 0.999 | 0.0084 |
| Wang and Singh | 50°C | a = -0.1518, b = 0.0071 | 0.999 | 0.0083 |
| | 55°C | a = -0.1846, b = 0.0103 | 0.999 | 0.0061 |
| | 60°C | a = -0.2174, b = 0.0137 | 0.999 | 0.0076 |

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Wang and Singh มีค่า $R^2$ มากที่สุด และ RMSE น้อยที่สุด ดังนั้น จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า แบบจำลองของ Wang and Singh มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเข่าคลอนได้ดีที่สุด ดังแสดงโดยเส้นแนวโน้มของแบบจำลองของ Wang and Singh ในภาพที่ 3 ที่มีค่า $R^2$ เท่ากับ 0.999 และค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.0061 - 0.0083




**ภาพที่ 3** ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด (แบบจำลอง Wang and Singh)

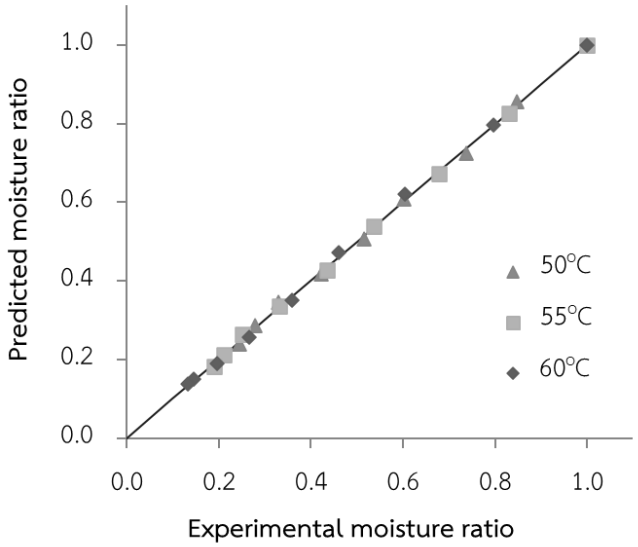
จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าคงที่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งพบว่า ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าคงที่ที่จะส่งผลต่อค่าอัตราส่วนความชื้น คือ อุณหภูมิ ดังนั้น เพื่อที่จะสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเข่าคลอนที่อุณหภูมิอื่นๆ ได้ จึงนำค่าคงที่ a และ b จากแบบจำลองของ Wang and Singh มาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ

สัมบูรณ์ ด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นตามรูปแบบสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) (Chakraborty et al., 2016) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังสมการต่อไปนี้

$$a = -21258.701\exp\left(-\frac{3825.635}{T_{abs}}\right) \quad ; \quad R^2 = 0.998$$

$$b = 35820.702\exp\left(-\frac{4941.658}{T_{abs}}\right) \quad ; \quad R^2 = 0.920$$

สำหรับความน่าเชื่อถือของแบบจำลองของ Wang and Singh สามารถพิจารณาจากค่า $R^2$ และ RMSE แล้ว ยังสามารถพิจารณาโดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากผลการทดลองและค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยการพิจารณาจากระยะห่างระหว่างจุดของอัตราส่วนความชื้นในแต่ละอุณหภูมิกับแนวเส้นตรง ถ้าค่า $R^2$ มีค่าลู่เข้าหาค่า 1 ระยะห่างระหว่างจุดกับแนวเส้นตรงจะน้อย แต่ถ้าค่า $R^2$ มีค่าห่างจากค่า 1 มาก ระยะห่างระหว่างจุดกับแนวเส้นตรงจะมาก จากผลการทดลองพบว่า จุดของอัตราส่วนความชื้นอยู่ใกล้แนวเส้นตรงมาก จึงแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Wang and Singh มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเข่าคลอน




**รูปที่ 4** การเปรียบเทียบระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลองและค่าอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

**สรุปและอภิปรายผลการวิจัย**

จากผลการทดลองการอบแห้งเข่าคลอนด้วยเครื่องอบแห้งแบบแบบปั๊มความร้อน โดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 67% มาตรฐานเปียก และใช้เวลาการอบแห้ง 8 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ค่าความชื้นและอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งจะลดลงเป็นเส้นโค้งแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งของ Wang and Singh เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเข่าคลอน เนื่องจากมีค่า $R^2$ มีค่าลู่เข้าหาค่า 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.999 และค่า RMSE ต่ำ อยู่ในช่วง 0.0061 - 0.0083 ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด

**ข้อเสนอแนะ**

ในส่วนของวิธีการทดลองพบว่า ในการวัดแต่ละครั้งมีโอกาสที่จะได้ค่าไม่เท่าเดิม สาเหตุหนึ่งมาจากค่าความชื้นของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าแตกต่างกันเกินไป เพื่อให้การวัดมีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือ จึงทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ในสภาพแวดล้อมและช่วงเวลาของการทดลองที่เหมือนกัน ดังนั้นการนำเสนอข้อมูลหรือค่าที่วัดได้จึงอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย (Mean) และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์จะพบว่า ค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล โดยพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ($R^2$) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (RMSE) ดังตารางที่ 2

**กิตติกรรมประกาศ**

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือและให้ความอนุเคราะห์สถานที่ที่ใช้ในการทำงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี

**เอกสารอ้างอิง**

กิตติ สถาพรประสาธน์ และ โพธิ์ทอง ประณีตพลกรัง. (2560). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด. *วิศวสารลาดกระบัง, 34*(4), 22-29

กิตติคุณ ปิตุพรหมพันธุ์. (2556). *การศึกษาร้อยละการงอกของเมล็ดพันธุ์หลังการอบแห้งและสมรรถนะของเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน*. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,มหาวิทยาลัยมหาวิทยาลัยมหาสารคาม).

นัฐราช แสนมีมา. (2556). *ประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนในระดับห้องปฏิบัติการที่ใช้ระบบปรับอากาศของรถยนต์*. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,มหาวิทยาลัยมหาวิทยาลัยมหาสารคาม).

สมพจน์ คำแก้ว. (2564). อุณหภูมิการอบแห้งแบบหมุนเวียนของข้าวเปลือกมีผลต่อสารหอม (2AP). *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, *16*(3), 1-9.

อีลีหย๊ะ สนิโซ, ฟามีรา สะอุดี และ รัชดาภรณ์ ฮานาฟี. (2555). สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ความสิ้นเปลืองพลังงาน และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งผลหมากด้วยพลังงานความร้อนร่วม. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 17*(1), 142-149.

AOAC. (1995). Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Washington D.C., USA.

Aviara, N.A., & Igbeka, J.C. (2016). Modeling for drying of thin layer of native cassava starch in tray dryer. *Journal of Biosystems Engineering, 41*(4), 342-356.

Biswas M. et al. (2009). In vitro Anti-Leishmanial and Anti-Tumour Activities of a Pentacyclic Triterpenoid Compound Isolated from the Fruits of Dregea volubilis Benth Asclepiadaceae. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research, 8*(2), 127-131.

Chakraborty, S., Sarma, M., Bora, J., Faisal, S., & Hazarika, M.K. (2016). Generalization of drying kinetics during thin layer drying of paddy. *Agricultural Engineering International, 18*(4), 177-189.