

เมื่อ D = สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของความชื้น (m^2/s)
 M = ความชื้น (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)
 r = รัศมี (m)
 t = เวลา (s)

โดยกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของความชื้นเปลี่ยนแปลงตามความชื้นของเมล็ดกาแฟดังสมการที่ (2)

$$D = a \exp(bM) \quad (2)$$

เมื่อ D = สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (m^2/s)
 M = ความชื้น (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)
 a, b = ค่าคงที่

แทนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สมการ (2) ลงในสมการ (1) จะได้ดังสมการ (3)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 (a \exp(bM)) \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (3)$$

เมื่อหาอนุพันธ์ของสมการที่ (3) จะได้ดังสมการ (4)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = a \exp(bM) \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) + a \left(\frac{\partial M}{\partial r} \right) \left(\frac{\partial (\exp(bM))}{\partial r} \right) \quad (4)$$

โดยสามารถกำหนดสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต ดังนี้

$$M(r, 0) = M_{in} \quad (5)$$

$$M(r_o, t) = M_{eq} \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial M}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \quad (7)$$

เมื่อ M_{in} = ความชื้นเริ่มต้น (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)
 M_{eq} = ความชื้นสมดุล (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

ดังนั้นจากสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตในสมการที่ (5) (6) และ (7) จะสามารถหาค่าความชื้นที่เวลาใดๆ ภายในเมล็ดกาแฟได้โดยวิธีทาง Numerical method [9] ในรูปแบบของ finite difference และใช้วิธี explicit solution มาแก้ปัญหา และค่าความชื้นที่ตำแหน่งผิวนอกสุด (M_{eq}) สามารถคำนวณได้จากสมการความชื้นสมดุลของเมล็ดกาแฟ [10] ดังสมการที่ (8)

$$M_{eq} = 1.1281[-\ln(1 - \varphi_e)/(T_e + 40.535)]^{0.5405} \quad (8)$$

เมื่อ M_{eq} = ความชื้นสมดุล (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)
 T_e = อุณหภูมิอากาศ (C)
 φ_e = ความชื้นสัมพัทธ์, $0 \leq \varphi_e \leq 1$

การหาค่าความชื้นเฉลี่ยทั้งเมล็ดที่เวลาใดๆ สามารถหาได้ดังสมการที่ (9)

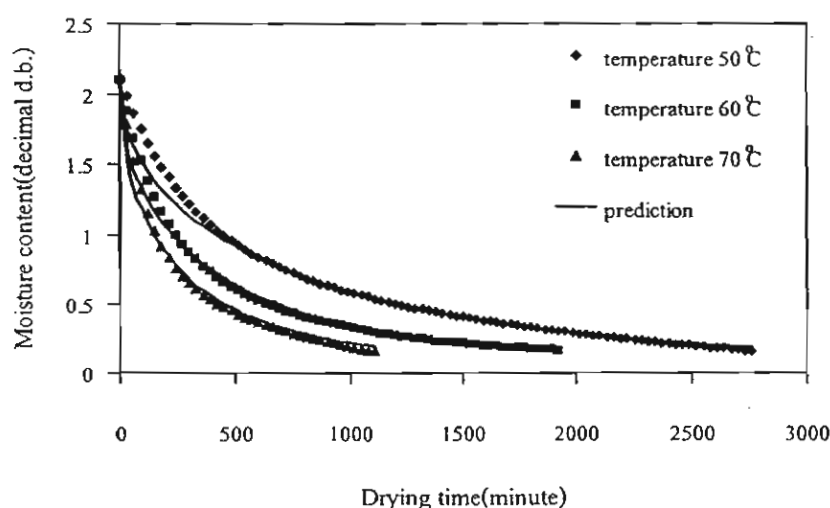
$$\bar{M}(t) = \frac{4\pi}{V_p} \int_0^r r^2 M(r, t) dr \quad (9)$$

เมื่อ $\bar{M}(t)$ = ความชื้นเฉลี่ยทั้งเมล็ดที่เวลาใดๆ
 V_p = ปริมาตรของเมล็ดกาแฟ

จากการกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีความสัมพันธ์กับความชื้นดังสมการที่ (2) และสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกาแฟจากเวลาเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดระยะเวลาอบแห้งได้ โดยในการคำนวณได้แบ่ง node ภายในเมล็ดกาแฟเป็น 100 node และใช้ time interval เท่ากับ 0.01 วินาที ซึ่งจากการคำนวณได้นำวิธีการสุ่มแบบ grid search มาใช้ในการหาค่าคงที่ของ a และ b โดยค่าที่ดีที่สุดที่สามารถบ่งบอกโดยวิธีกำลังสองต่ำสุด (R^2) ซึ่งวิธีกำลังสองต่ำสุดเป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นเฉลี่ยกับผลจากการทดลองโดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้ R^2 ควรมีค่ามากกว่า 0.98 จึงจะถือว่าเป็นคำตอบ

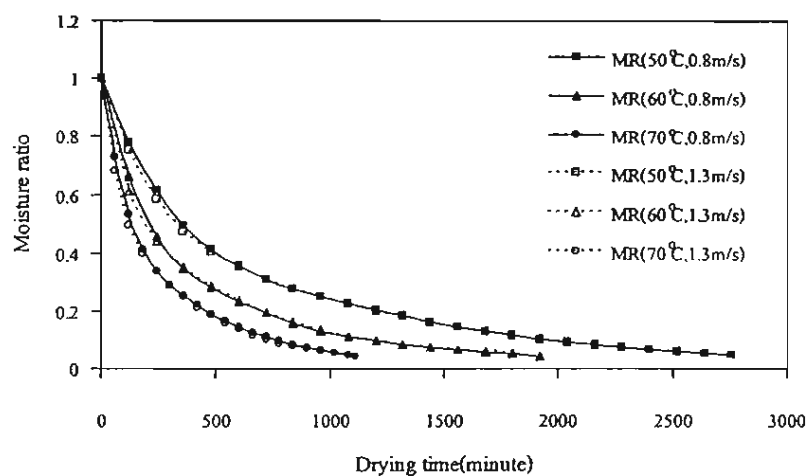
ผลการทดลองและวิจารณ์

การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกาแฟ



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกาแฟภายใต้อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ ที่ความเร็วอากาศ 0.8 m/s

รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกาแฟตามเวลาที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ ที่ความเร็วอากาศ 0.8 m/s ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกาแฟในช่วงแรกจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและช้าลงเรื่อยๆ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในช่วงแรกเป็นช่วงที่เมล็ดกาแฟยังมีความชื้นสูงอยู่โดยเฉพาะที่บริเวณผิว ดังนั้นการถ่ายเทมวลและความร้อนส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นที่บริเวณผิว ซึ่งการถ่ายเทมวลและความร้อนที่บริเวณผิวของเมล็ดกาแฟนั้นจะง่ายกว่าการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในเมล็ดกาแฟ ดังนั้นในช่วงแรกความชื้นของเมล็ดกาแฟจึงลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อความชื้นที่ผิวลดลงมากแล้ว การถ่ายเทมวลและความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในเมล็ดกาแฟซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในเมล็ดมาที่ผิวจะยากและช้ากว่าในช่วงแรกที่เมล็ดกาแฟมีความชื้นสูง ส่งผลให้ความชื้นของเมล็ดกาแฟลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงท้าย และจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่ออัตราการลดความชื้น โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของเมล็ดกาแฟได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผิวกลางและเมล็ดกาแฟมาก ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง เมล็ดกาแฟจึงได้รับความร้อนมาก และน้ำสามารถเคลื่อนที่ออกจากเมล็ดกาแฟได้ดี



รูปที่ 5 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเมล็ดกาแฟ ที่ความเร็วอากาศ 0.8 และ 1.3 m/s ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ

รูปที่ 5 แสดงการลดลงของความชื้นเปรียบเทียบระหว่างความเร็วอากาศ 0.8 และ 1.3 m/s ที่อุณหภูมิต่างๆ 50, 60 และ 70°C พบว่า ที่อุณหภูมิต่างๆ อัตราการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศที่ความเร็วอากาศทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน จึงไม่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งมากนัก

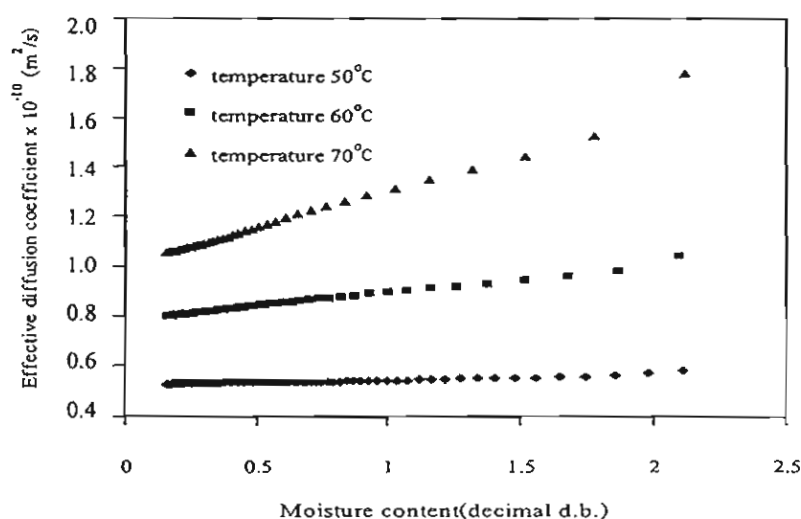
สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมล็ดกาแฟ

ค่าคงที่ a และ b ที่คำนวณได้สำหรับการทดลองต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1 จากตาราง พบว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ a และ b โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิค่าคงที่ที่ใดทั้งสองจะมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขณะที่ความเร็วของอากาศมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ทั้งสองน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่ a และ b และผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี Duncan พบว่าความเร็วอากาศไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ a และ b อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงสามารถนำค่าคงที่ a และ b มาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งได้ดังสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

อุณหภูมิอบแห้ง(°C)	ความเร็วอากาศ (m/s)	a	b	R ²	MRS
50	0.8	5.3×10^{-11} (a1)	$0.015^{(b1)}$	0.983	0.00342
50	1.3	5.3×10^{-11} (a1)	$0.01^{(b1)}$	0.988	0.00165
60	0.8	7.8×10^{-11} (a2)	$0.14^{(b2)}$	0.984	0.00296
60	1.3	7.8×10^{-11} (a2)	$0.14^{(b2)}$	0.985	0.002948
70	0.8	1×10^{-10} (a3)	$0.275^{(b3)}$	0.983	0.00367
70	1.3	1×10^{-10} (a3)	$0.275^{(b3)}$	0.984	0.002527

หมายเหตุ ตัวแปรที่มีตัวกำกับบนอักษรเหมือนกัน และอยู่ในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึง ความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจากการคำนวณ

$$a = -7.055 \times 10^{-10} + 2.35 \times 10^{-12} T \quad R^2 = 0.99 \quad (10)$$

$$b = -4.271 + 1.325 \times 10^{-2} T \quad R^2 = 0.99 \quad (11)$$

เมื่อ T = อุณหภูมิของอากาศเข้า, K

จากผลการคำนวณที่ได้แสดงให้เห็นว่า ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ได้มีค่าแปรตามอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 6 นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลยังแปรตามความชื้น โดยที่ความชื้นสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงและมีค่าลดลงเมื่อความชื้นมีค่าต่ำลง และจากสมการการแพร่ที่ได้เมื่อคำนวณย้อนกลับหาความชื้นของเมล็ดกาแฟที่ลดลงจากการอบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วต่างๆ พบว่าสามารถทำนายผลสอดคล้องกับการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงด้วยเส้นทึบ

สีของเมล็ดกาแฟหลังการอบแห้ง

จากการทดลองพบว่าในช่วงเริ่มต้นการอบแห้งค่า L, a และ b มีค่าอยู่ในช่วง 50.4 ถึง 52.05 -0.73 ถึง -0.76 และ 8.34 ถึง 9.10 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 หลังผ่านการอบแห้งค่า L มีค่าลดลง ค่า a มีค่าเพิ่มขึ้น และการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงการเปลี่ยนแปลงสีของค่า L และ a จะเปลี่ยนแปลงมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่า b ของเมล็ดกาแฟขณะอบแห้ง พบว่าค่า b ที่ทุกเงื่อนไขการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน และการเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ดกาแฟเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยป้อนความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ 50°C ความเร็วอากาศ 0.8 m/s พบว่าการเปลี่ยนแปลงสีมีลักษณะใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบสีของเมล็ดกาแฟก่อนและหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วอากาศร้อนต่างๆ พบว่าความเร็วของอากาศร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีน้อยกว่าผลของอุณหภูมิ

ปริมาณ Chlorogenic acid

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้น Chlorogenic acid ในเมล็ดกาแฟที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วอากาศต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าปริมาณความเข้มข้น Chlorogenic acid ในเมล็ดกาแฟมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิต่ำ 50°C รองลงมาคือ 60°C และที่อุณหภูมิ 70°C มีปริมาณความเข้มข้น Chlorogenic acid น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างสองความเร็วอากาศ พบว่าความเร็วของอากาศมีผลน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยป้อนความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ 50°C ความเร็วอากาศ 0.8 m/s พบว่าปริมาณ Chlorogenic acid ที่มีในเมล็ดกาแฟมีปริมาณเท่ากันทั้งสองกรณี

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณ Chlorogenic acid สีของเมล็ดกาแฟ และปริมาณของแข็งในกาแฟที่ละลายได้ด้วยน้ำ ในเมล็ดกาแฟ ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วต่างๆ

อุณหภูมิอบแห้ง (oC)	ความเร็วอากาศ (m/s)	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าห้องอบแห้ง(%)	เวลาในการอบแห้ง (h)	ค่าสีของเมล็ดกาแฟ			ปริมาณ Chlorogenic acid(ppm)	ปริมาณของแข็งในกาแฟที่ละลายด้วยน้ำ (%)
				L	a	b		
HP50	0.8	26	44	44.42	0.2	8.54	13.6 ^(a)	27.0 ^(a)
HA50	0.8	20	46	44.66	0.25	8.71	13.6 ^(a)	27.0 ^(a)
	1.3	21	45	44.58	0.28	8.67	13.5 ^(a)	27.0 ^(a)
HA60	0.8	12	32	42.98	0.21	9.02	12.9 ^(b)	26.9 ^(a)
	1.3	12	30	42.03	0.2	9.27	12.9 ^(b)	27.0 ^(a)
HA70	0.8	7	18.5	38.16	0.29	9.15	12.4 ^(c)	26.9 ^(a)
	1.3	7	17	37.98	0.2	9.15	12.3 ^(c)	27.0 ^(a)

หมายเหตุ HP คือ อบแห้งด้วยป้อนความร้อน, HA คือ อบแห้งด้วยลมร้อน ตัวแปรที่มีตัวกำกับบนอักษรเหมือนกันและอยู่ในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95

ปริมาณของแข็งในกาแฟที่ละลายได้ด้วยน้ำ

ผลจากการวิเคราะห์คุณภาพของเมล็ดกาแฟโดยการหาปริมาณของแข็งในกาแฟที่ละลายน้ำได้ แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าปริมาณของแข็งในกาแฟที่ละลายน้ำได้จากทุกเงื่อนไขการอบแห้งมีค่าประมาณ ร้อยละ 27 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี Duncan แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและความเร็วอากาศไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งในกาแฟที่ละลายได้ด้วยน้ำ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C ความเร็วอากาศ 0.8 m/s พบว่าปริมาณของแข็งในกาแฟที่ละลายได้ด้วยน้ำที่มีค่า 27% เท่ากัน

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองอบแห้งเมล็ดกาแฟพันธุ์โรบัสตา ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งและความเร็วอากาศต่างๆ พบว่าในการอบแห้งเมล็ดกาแฟพันธุ์โรบัสตาดังกล่าวที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C ที่ความเร็วอากาศร้อนเท่ากับ 0.8 และ 1.3 m/s การลดลงของความชื้นเมล็ดกาแฟอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนจะทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความเร็วของอากาศไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง การเคลื่อนที่ของน้ำในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงสามารถอธิบายได้ด้วยสมการการแพร่ จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในเมล็ดกาแฟมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความชื้นของเมล็ดกาแฟและอุณหภูมิอบแห้ง และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจากการอบแห้ง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในเมล็ดกาแฟจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่ามากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และมีค่าลดลงตามความชื้นของเมล็ดกาแฟ คุณภาพของเมล็ดกาแฟที่ได้จากการอบแห้ง พบว่า สีของเมล็ดกาแฟหลังการอบแห้งมีค่าของ L ลดลง a มีค่าเพิ่มขึ้น และ b มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากไม่ว่าจะอบแห้งที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C เมล็ดกาแฟจะมีสีเขียวยอมน้ำตาลเข้มกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C ซึ่งมีสีเขียวยอมน้ำตาลอ่อน

จากการวิเคราะห์ปริมาณ Chlorogenic acid และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในกาแฟ พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อการลดลงของปริมาณ Chlorogenic acid แต่ไม่มีผลต่อปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในกาแฟ โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงการลดลงของ Chlorogenic acid จะมีมากกว่าการอบแห้งเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนความเร็วอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งไม่มีผลต่อการลดลงของปริมาณ Chlorogenic acid และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในกาแฟ

ผลการเปรียบเทียบคุณภาพของเมล็ดกาแฟที่ได้จากการอบแห้งอุณหภูมิ 50°C ที่ความเร็วอากาศร้อน 0.8 m/s ด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน และเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน พบว่าคุณภาพของเมล็ดกาแฟที่ได้ใกล้เคียงกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

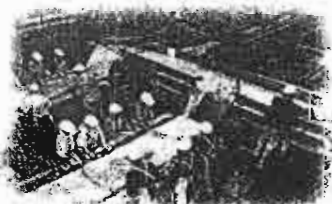
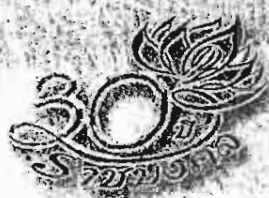
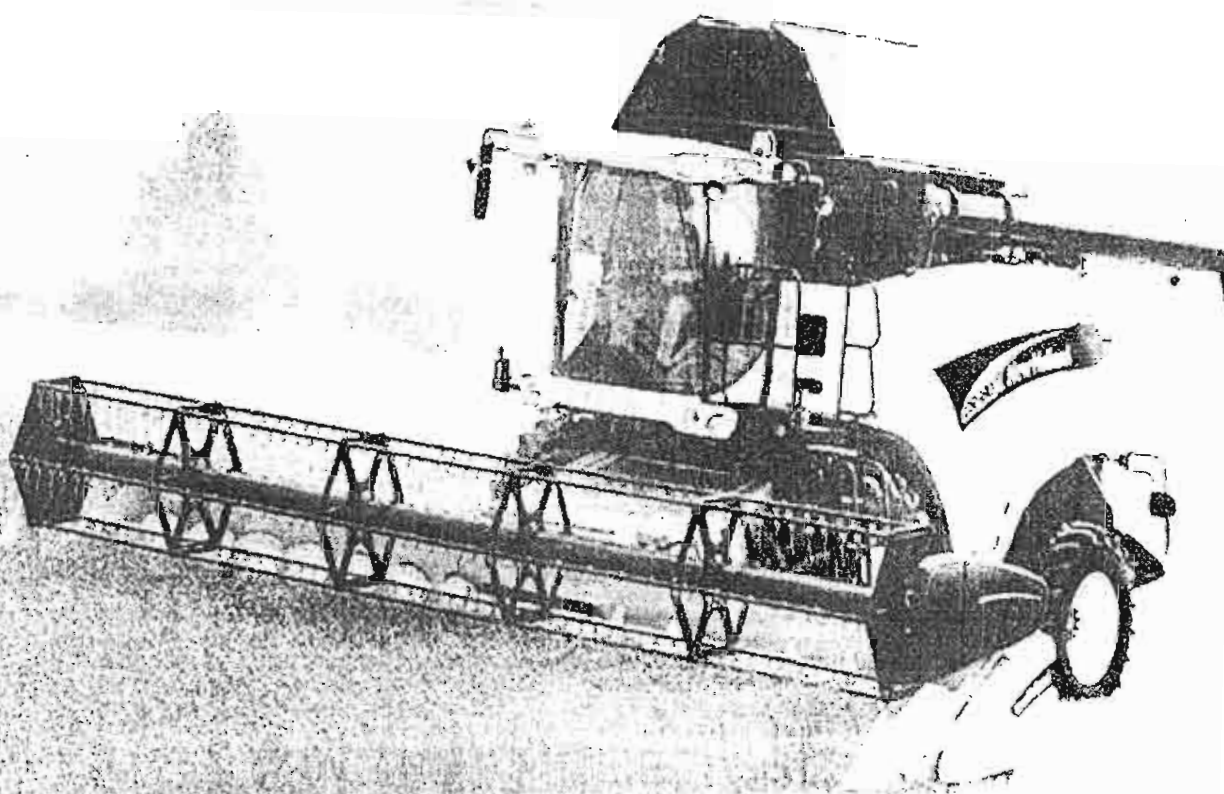
เอกสารอ้างอิง

1. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 585-2528. กาแฟเมล็ด. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 5.
2. Clarke, R.J. and Macrea, R.1985a. Coffee Volume 1 Chemistry. Elsevier, New York. 156-157.
3. Clarke, R.J. and Macrea, R.1985b. Coffee Volume 1 Chemistry. Elsevier, New York. 33.
4. Deshpande, S.N. and Aguilar, A.A. 1975. Effects of Roasting Temperatures and Gamma Irradiation on the Content of Chlorogenic Acid, Caffeic Acid and Soluble Carbohydrates of Coffee. Journal of Applied Radiation and Isotopes. 26: 656-661.
5. สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ, ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ และสมหมาย ตรีชัยยาพร. 2536. การคั่วกาแฟในแปลงทำสภาพของไหล. ประชุมราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์. 20 มกราคม 2536. ราชบัณฑิตยสถาน. 25-42.
6. Sarrazin, C., Quere, J.L, Gretsche, C. and Liardon, R. 1999. Representativeness of coffee aroma extracts:a comparison of different extraction methods. Journal of Food Chemistry. 70: 99-106.
7. Association of Official Analytical Chemists. 1995a. Chlorogenic Acid in Green Coffee. Official Methods of Analysis of AOAC International. Patricia Cunniff (Ed.). AOAC international suite. Arlington, Virginia 30-1.
8. Association of Official Analytical Chemists. 1995b. Solids (Soluble) in Roasted Coffee. Official Methods of Analysis of AOAC International. Patricia Cunniff (Ed.). AOAC international suite. Arlington, Virginia. 30-5.
9. Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion. Clarendon Press. Oxford. 137-149.
10. Berbert, P.A., Queriros, D.M., Silva, J.S. and Filho, J.B.P. 1995. Simulation of Coffee Drying in a fixed Bed with Periodic Airflow Reversal. Journal of Agricultural Engineering. 60: 167-173.



วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก

Toward Kitchen of the World by Agricultural Engineering



การประชุมวิชาการครั้งที่ 6 ประจำปี 2548

สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

30-31 มีนาคม 2548 คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การอบแห้งกล้วยหอมด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล

ฤทธิไกร งามขุ่ม¹ ธนิต สวัสดิ์เสวี^{2*} สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา³ สมชาติ โสภณธนฤทธิ⁴

บทคัดย่อ

การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดไกลมาใช้ควบคู่กับการอบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศ เพื่ออบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร มีความน่าสนใจเพราะการนำรังสีอินฟราเรดไกลมาใช้ทำให้มีการสูญเสียความร้อนน้อย โดยผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้รับการแผ่รังสีจะดูดซับรังสีโดยตรงและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนขึ้นข้างใน และเมื่ออบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศจะทำให้ น้ำมีจุดเดือดต่ำลงจึงทำให้น้ำสามารถระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ได้เร็ว และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ไม่สูงมากทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดี ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาการอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล โดยทำการอบแห้งกล้วยหอมสุกหั่นบางๆ ที่ความดันสุญญากาศ 5, 10, 15 กิโลปาสกาล อุณหภูมิควบคุมที่ผิวผลิตภัณฑ์ 50, 55, 60 °ซ. ขนาดความหนาของกล้วยหอมหั่นบางๆ 2, 3, 4 มม. เมื่อทำการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้น 300% มาตรฐานแห้ง จนได้ความชื้นสุดท้าย 7% มาตรฐานแห้ง จากการทดลองพบว่า การอบแห้งกล้วยหอมหั่นบางๆ ที่ความหนา 2 มม. ณ ความดันสุญญากาศ 5 กิโลปาสกาล อุณหภูมิ 60°ซ ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ผลของความดันคือการอบแห้งพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะลดลงตามความดันที่ลดลง กล้วยหอมที่มีความหนา 2 มม. มีการโป่งพองและความแข็งน้อยที่สุด สีของกล้วยหอมหั่นบางหลังการอบแห้งพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °ซ. จะให้สีที่มีคุณภาพดี คือมีสีเหลืองนวล

¹นักศึกษาระดับปริญญาตรี ²อาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ³ศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน

คณะพลังงานและวัสดุ ⁴ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

*ผู้รับผิดชอบบทความ โทร: 0-2470-8693 ต่อ 513; โทรสาร: 0-2470-8663; อีเมล: thanit.swa@kmutt.ac.th

CAVENDISH DRYING WITH FAR INFRARED-VACUUM DRYER

Rittigrai Ngamchum¹, Thanit Swasdisevi^{2*}, Sakkamon Thephaassadin Na Ayudtaya³, Somchart Soponronnarit⁴

ABSTRACT

The application of far-infrared (FIR) to vacuum dryer is interesting since the heat loss from FIR is quite low. The product is directly absorbed thermal radiation from FIR. Consequently, the thermal radiation is changed to be heat in the product. When the product is dried with vacuum condition, the boiling point of water is lower. Water inside the product can evaporate quickly and product temperature is not high. Therefore, the quality of product dried with vacuum is good. The objective of this research is to investigate the vacuum drying with FIR. The product used in this work is the slice Cavendish. The product is dried at the various vacuum pressures (5, 10, and 15 kPa), temperatures (50, 55, and 60°C) and thicknesses (2, 3, and 4 mm) with the initial moisture content 300 % db. until the final moisture content is 7 % db. The experiment revealed that the slice Cavendish dried at thickness 2 mm, vacuum pressure 5 kPa and temperature 60°C has shortening drying time. The drying time decreases with decreasing the vacuum pressure. The slice Cavendish with the thickness 2 mm is smallest swell and hardness. Drying temperature of the slice Cavendish at 50°C gives a good color (whitish yellow).

KEYWORDS: Dehydration, FIR, Fruit, Low pressure

¹Undergraduate student, ²Lecturer, Department of thermal technology, ⁴Professor, Department of Energy Technology, School of Energy and Materials, ³Assistant Professor, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

*Corresponding author. Tel.: 0-2470-8693 Ext. 513; Fax: 0-2470-8663; E-mail address: thanit.swa@kmutt.ac.th

บทนำ

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งเป็นวิธีการอย่างหนึ่งที่มีการใช้มายาวนานในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร โดยได้มีการพัฒนารูปแบบของการอบแห้งได้หลายรูปแบบเพื่อที่จะอบแห้งได้เร็วขึ้นรวมถึงสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารได้นานขึ้นและยังคงคุณสมบัติของสารอาหารได้ยังคงเดิม การอบแห้งที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่นั้นใช้หลักการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางของไหลไปยังวัสดุที่ขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกไปโดยการระเหย เช่นการอบแห้งด้วยลมร้อนทำให้มีการใช้พลังงานที่สูงในการให้ความร้อนกับตัวกลางของไหล (ลม) ก่อนและลมร้อนก็จะถ่ายเทความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์และของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเกิดการเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวโดย capillary flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงผิว (surface force) ส่วนไอน้ำในวัสดุจะเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น และความดันไอ ที่แตกต่างกันระหว่างไอน้ำในวัสดุกับอากาศร้อน การอบแห้งจะมีลักษณะแห้งจากภายนอกเข้าสู่ภายในทำให้เมื่ออบแห้งใกล้ถึงความชื้นที่ต้องการไอน้ำในเนื้อวัสดุข้างในจะมีการออกมาที่ผิวมากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างผิวที่ความพรุนลดน้อยลงจึงต้องใช้เวลานานในการอบแห้งมากขึ้นทำให้มีการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นจึงมีการพัฒนานำรังสีอินฟราเรดไกลมาใช้ควบคู่กับ การอบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศ เนื่องจากการนำรังสีอินฟราเรดไกลมาใช้ในการอบแห้งมีการสูญเสียความร้อนให้กับตัวกลางน้อยเพราะผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้รับการแผ่รังสีจะดูดซับรังสีโดยตรง ซึ่งผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่จะดูดซับรังสีอินฟราเรดได้ดีในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 2.5 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นช่วงของรังสีอินฟราเรดไกลซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสภาวะการสั่นสะเทือนของโมเลกุลน้ำในผลิตภัณฑ์ และกลายเป็นพลังงานความร้อนนำภายในผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความร้อนจะระเหยและกลายเป็นไอแพร่ออกไปที่ผิวของผลิตภัณฑ์ เมื่อนำรังสีอินฟราเรดมาใช้ร่วมกับการอบแห้งที่ความดันสุญญากาศที่ความดันในห้องอบแห้งประมาณ 5 กิโลปาสคาล ทำให้น้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์มีจุดเดือดที่ต่ำลงประมาณ 35°C. และความดันไภายในห้องอบแห้งที่ต่ำทำให้น้ำที่อยู่ในเนื้อวัสดุมีการแพร่ออกมาได้ง่ายขึ้น ทำให้สามารถลดเวลาในการอบแห้งลงและทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้นมีการสูญเสียสารอาหารน้อย Mongpraneel [1] et al. ได้ทำการอบแห้งหัวหอมด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลพบว่า ระยะที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ 10 ซม. และความเข้มข้นของรังสีมีผลต่ออัตราการอบแห้งหัวหอมอย่างชัดเจน Mousa and Farid [2] ทำการอบแห้งชิ้นกล้วยหอมด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีไมโครเวฟซึ่งพบว่าเมื่อลดความดันให้ต่ำลงอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น Emsi [3] et al. ทำการอบแห้งชิลิก้าเจลพบว่าเมื่อลดความดันและเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้นแต่ถ้าใช้อุณหภูมิที่สูงมากจะทำให้ชิลิก้าเจลมีสีเข้มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล โดยคิดค้นหลอดรังสีอินฟราเรดไกลในห้องอบสุญญากาศในระยะเวลาที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ ความดัน และความหนาของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลองคือกล้วยหอมทอง

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การเตรียมวัสดุ

นำกล้วยหอมทองสุกระดับ 5 (สุกตามธรรมชาติ) ซึ่งพิจารณาได้จากสีของเปลือกจะมีพื้นเป็นสีเหลืองส่วนใหญ่อมเขียวเล็กน้อย ส่วนปลายของลูกทั้ง 2 ด้านเป็นสีเขียวสดซึ่งกล้วยหอมสุกระดับ 5 นี้จะมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 75% มาตรฐานเปียก นำมาปอกเปลือกแล้วหั่นบางๆ ด้วยเครื่องหั่นที่สามารถกำหนดความหนาได้ ให้มีขนาดความหนาประมาณ 2, 3, 4 มม. จากนั้นนำเข้าไปจัดเรียงบนถาดที่จะทำการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ



การหาความชื้นของผลิตภัณฑ์

ทำการเก็บตัวอย่างทั้งก่อนอบแห้งและหลังอบแห้งเพื่อหาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้าย นำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล (อ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม) แล้วนำมาเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำออกจากตู้อบใส่ไว้ในเคสิเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความชื้น

การทดสอบสี

การทดสอบสีของกล้วยหอมหั่นบางทั้งก่อนและหลังการอบแห้งจะกระทำโดยอาศัยเครื่องวัดสี (Colorimeter) ยี่ห้อ Juki รุ่น JP 7100 (Japan) ในที่นี้จะทดสอบสีของกล้วยหอมหั่นบางในเทอมของความสว่าง (Lightness) หรือ L และความเป็นสีเหลือง (yellowness) หรือ b การเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยหอมหั่นบางหลังการอบแห้งเมื่อเทียบกับสีของกล้วยหอมหั่นบางก่อนอบแห้ง (กล้วยหอมสด) ในเทอมของความสว่างและความเป็นสีเหลืองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ตามลำดับ กล่าวคือ

$$\Delta L = \frac{L - L_i}{L_i} \quad (1)$$

$$\Delta b = \frac{b - b_i}{b_i} \quad (2)$$

เมื่อ L และ b คือ ความสว่างและความเป็นสีเหลืองของกล้วยหอมหั่นบางหลังการอบแห้ง ตามลำดับ

L_i และ b_i คือ ความสว่างและความเป็นสีเหลืองของกล้วยหอมหั่นบางก่อนอบแห้ง ตามลำดับ

การทดสอบการหดตัว (Shrinkage)

ปริมาตร (V_s) และความหนาแน่นปรากฏ (ρ_{app}) ของกล้วยหอมหั่นบางหลังการอบแห้งสามารถหาได้โดยอาศัยหลักการแทนที่ในของเหลว โดยในที่นี้จะใช้ n-heptene ซึ่งมีความหนาแน่น 0.684 กรัม/ซม.³ ปริมาตรและความหนาแน่นปรากฏของกล้วยหอมหั่นบางหลังการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) และสมการที่ (4) ตามลำดับ กล่าวคือ

$$V_s = \frac{m_h - m_{hs}}{\rho_h} \quad (3)$$

$$\rho_{app} = \frac{m_s}{V} \quad (4)$$

โดย m_h คือ มวลของภาชนะที่บรรจุด้วย n-heptene, g

m_{hs} คือ มวลของภาชนะที่บรรจุด้วย n-heptene และตัวอย่างกล้วยหอมหั่นบาง, กรัม

m_s คือ มวลของ ตัวอย่างกล้วยหอมหั่นบางที่ชั่งในอากาศ, กรัม

ρ_h คือ ความหนาแน่นของ n-heptene, กรัม/ซม.³

V_s คือ ปริมาตรของชิ้นกล้วยหอมหั่นบาง, ซม.³

การหดตัวของกล้วยหอมอบแห้งหั่นบางหลังการอบแห้งจะแสดงในเทอมของเปอร์เซ็นต์ (%) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของกล้วยหอมหั่นบางหลังอบแห้งเทียบกับปริมาตรกล้วยหอมหั่นบางก่อนอบแห้ง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) กล่าว คือ

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 "วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก"

30-31 มีนาคม 2548 ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ กรุงเทพฯ

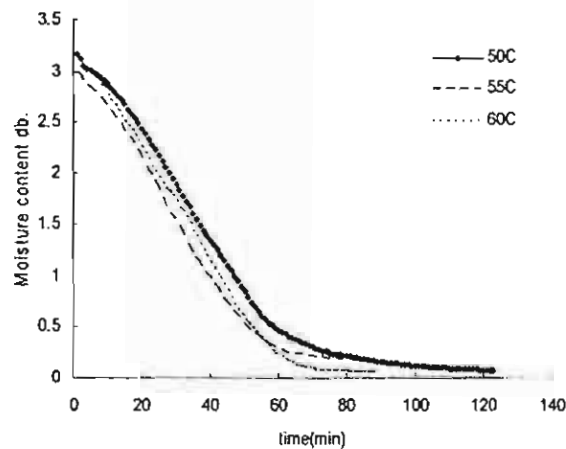
$$\text{Shrinkage} = \left(\frac{V_i - V}{V_i} \right) \times 100 \quad (5)$$

โดย V_i คือ ปริมาตรของกล้วยหอมหั่นบางก่อนอบแห้ง, ซม.³
 V คือ ปริมาตรของกล้วยหอมหั่นบางหลังอบแห้ง, ซม.³

ผลและวิจารณ์การทดลอง

1) ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการอบแห้งชิ้นกล้วยหอมหั่นบาง

อัตราการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์สามารถหาได้จาก น้ำหนักที่ลดลงโดยวัดจาก load cell ตลอดช่วงการอบแห้ง ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการอบแห้ง และอัตราส่วนความชื้นได้ แสดงดังรูปที่ 1



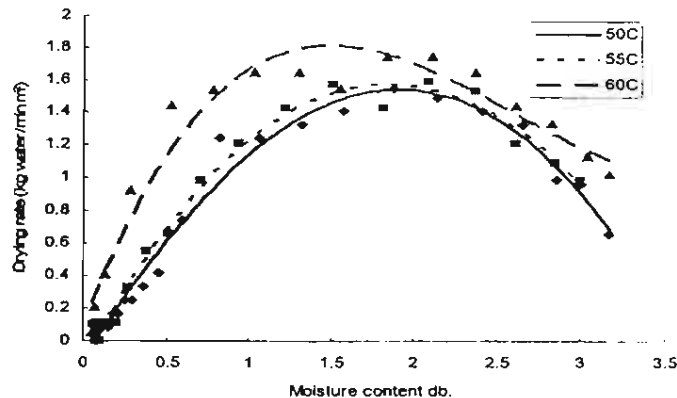
รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของชิ้นกล้วยขนาด 3 มม. ที่ความดัน 5 กิโลปาสกาล อุณหภูมิ 50 55 60 °ซ.

เมื่อเราได้กราฟความชื้นออกมาในแต่ละการทดลองแล้วเราสามารถหาอัตราการอบแห้งได้จากสมการ

$$R = -\frac{L_s}{A} \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

โดย R คือ drying rate, กิโลกรัมน้ำต่อพื้นที่, ม.²
 L_s คือ มวลแห้งของชิ้นกล้วย, กิโลกรัม
 A คือ พื้นที่ผิวของชิ้นกล้วยที่สัมผัสรังสีอินฟราเรดไกล, ม.²
 X คือ อัตราส่วนความชื้นในชิ้นกล้วย, มาตรฐานแห้ง
 T คือ เวลา, นาที

จากรูปที่ 1 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงเนื่องจากที่สภาวะอุณหภูมิ 5 กิโลปาสกาล น้ำจะมีจุดเดือดอยู่ที่ประมาณ 35°C. และการอบแห้งที่อุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำที่มีอยู่ในชั้นกล้วยนั้นจะทำให้ น้ำที่อยู่ภายในเกิดการเดือด และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก็เป็นการเพิ่มพลังงานให้กับน้ำที่มีอยู่ในชั้นกล้วยทำให้มีการเดือดที่รุนแรงมากขึ้นและก่อให้เกิดความดันไอที่สูงขึ้นในชั้นกล้วยทำให้น้ำสามารถที่จะแพร่ออกไปจากชั้นกล้วยได้อย่างรวดเร็วขึ้น

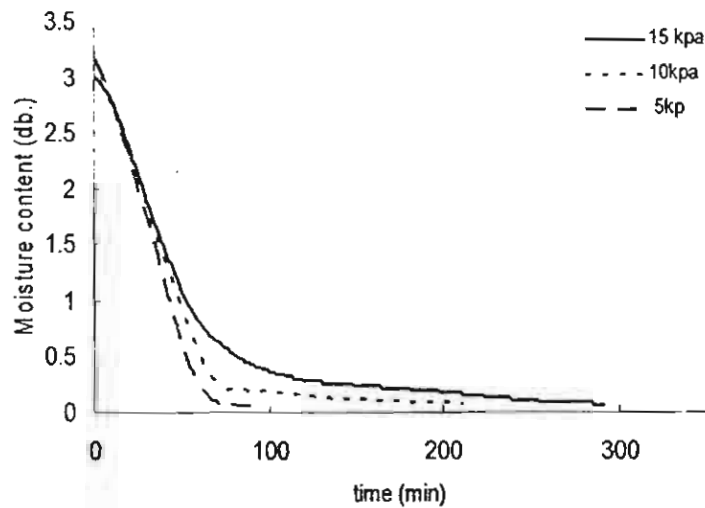


รูปที่ 2 อัตราการอบแห้งของชั้นกล้วยขนาดความหนา 3 มม. ที่ความดัน 5 กิโลปาสกาล อุณหภูมิ 50 55 60 °ซ.

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการอบแห้งทั้ง 3 อุณหภูมิ เส้นกราฟจะใกล้เคียงกันมีความชันของกราฟพุ่งขึ้นใกล้เคียงกันนั้นเป็นเพราะในช่วงแรกของการอบแห้งอุณหภูมิของชั้นกล้วยค่อยๆ เพิ่มขึ้นเหมือนกันทั้ง 3 อุณหภูมิ ในกรณีอุณหภูมิ 50°C. เมื่อถึงจุดอุณหภูมิความชื้นที่ผิวของชั้นกล้วย (50°C.) ณ จุดนี้เส้นกราฟอัตราการอบแห้งจะมีความชันเข้าใกล้ศูนย์ (ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่) ต่อจากนั้นอัตราการอบแห้งจะค่อยๆ ลดลง (ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง) ในขณะที่ในกรณีอุณหภูมิความชื้นที่ผิวของชั้นกล้วยที่ (60°C.) เส้นกราฟจะยังคงพุ่งขึ้นสูงอยู่ ก่อให้เกิดความแตกต่างของเส้นกราฟอัตราการอบแห้ง จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C. อัตราการอบแห้งจะสูงกว่าการอบแห้งที่ 55°C. และ 50°C. อย่างเห็นได้ชัดเจน

2) ผลของความดันต่อการอบแห้งชั้นกล้วยหอม

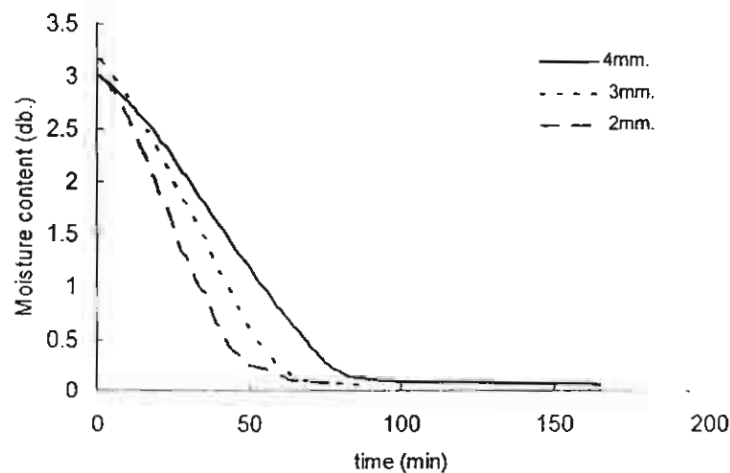
การอบแห้งชั้นกล้วยที่มีความหนาเดียวกันและ อุณหภูมิเดียวกัน ที่ความดัน 5 10 15 กิโลปาสกาล พบว่าเมื่อความดันลดลง เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะน้อยลงทั้งนี้เนื่องจากการลดความดันสุญญากาศในห้องอบแห้งลงนั้น ทำให้จุดเดือดของน้ำในชั้นกล้วยมีค่าลดลง เมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำในชั้นกล้วย การลดความดันจะส่งผลให้เกิดการเดือดพล่านของน้ำในชั้นกล้วยมากขึ้นทำให้น้ำในชั้นกล้วยระเหยออกมาได้เร็ว ในขณะที่ความดันสูงๆ (15 กิโลปาสกาล) นั้นจะมีจุดเดือดของน้ำอยู่ที่ 55°C. ถ้าทำการอบแห้งที่อุณหภูมิความชื้นที่ผิวต่ำกว่า 55°C. จะไม่เกิดการเดือดของน้ำในชั้นกล้วย ทำให้เกิดการแพร่ของไอน้ำได้มากจึงต้องใช้เวลาในการอบแห้งที่มากขึ้น



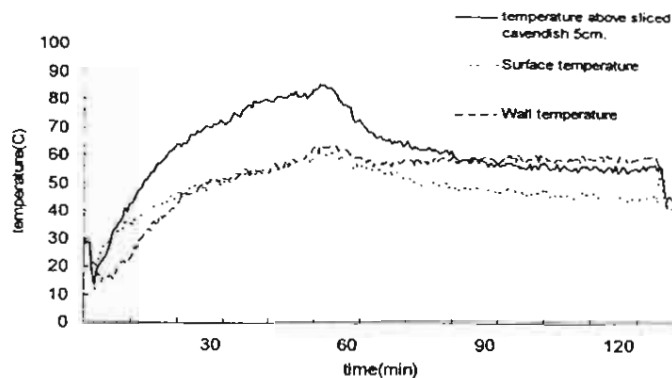
รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความชื้น(มาตรฐานแห้ง) ของซึ้นกล้วยขนาด 3 มม. ขณะทำการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 60 °ซ. ในแต่ละความดัน

3) ผลของความหนาของซึ้นกล้วยต่ออัตราการอบแห้ง

เมื่อความหนาของซึ้นกล้วยหอมเพิ่มขึ้นพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก การเพิ่มขนาดความหนาของซึ้นกล้วย เท้ากับการเพิ่มปริมาณน้ำในซึ้นกล้วยคั้งนั้นเมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน การเพิ่มขนาดความหนาของซึ้นกล้วยจึงเป็นการเพิ่มเวลาในการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4 ในรูปที่ 4 ความชื้นสุดท้ายของการอบแห้ง คือ 7% มาตรฐานแห้ง



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้น (มาตรฐานแห้ง) ของซึ้นกล้วยที่ความหนา 2 3 4 มม. อุณหภูมิ 60 °ซ. และความดัน 5 กิโลปาสกาล



รูปที่ 5 การกระจายของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของการอบชิ้นกล้วยขนาด 3 มม. อุณหภูมิ 60 °ซ.
ความดัน 5 กิโลปาสกาล

การวัดอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นกล้วยนั้นสามารถวัดได้โดยใช้สาย Thermo couple type K โดยนำปลายสายเทอร์โมคัปเปิลเสียบเข้าไปใต้ผิวชิ้นกล้วยเพียงเล็กน้อย เพราะรังสีอินฟราเรดสามารถเจาะทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ ทำให้อุณหภูมิประสิทธิภาพ (จุดที่ร้อนที่สุด) อยู่ลึกลงไปใต้ผิวชิ้นกล้วย อุณหภูมิที่ผิวจะถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID และหลอดรังสีอินฟราเรดจะถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ด้วยเช่นกัน

จากรูปที่ 5 ในช่วงเวลาเริ่มต้นการอบแห้งประมาณ 5-10 นาที หลอดรังสีอินฟราเรดยังถ่ายเทความร้อนได้ไม่เต็มที่ อุณหภูมิที่ผิวของชิ้นกล้วยจะมีการลดลงอย่างรวดเร็วเป็นเพราะชิ้นกล้วยมีปริมาณน้ำที่เคลือบผิวมาก น้ำที่ผิวที่ระเหยไปจะดูดความร้อนออกจากชิ้นกล้วยทำให้ผิวที่ชิ้นกล้วยมีอุณหภูมิที่ลดลง ค่อยจากนั้นอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นกล้วยค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ ค่อยจากนั้นอุณหภูมิของผนังห้องอบแห้งซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นกล้วยซึ่งค่อยๆ เพิ่มขึ้นและเมื่อถึงจุดหนึ่งอุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจาก ณ จุดนี้หลอดรังสีอินฟราเรดมีการปิดอยู่เกือบตลอดเวลาเนื่องจากอุณหภูมิควบคุมที่ผิวของชิ้นกล้วยอยู่จุดที่ต้องการแล้ว ซึ่งจะมีการเปิดหลอดรังสีอินฟราเรดบ้างเป็นบางช่วงเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิ อุณหภูมิที่จุดเหนือชิ้นกล้วย 5 ซม. จะมีลักษณะคล้ายกับอุณหภูมิของผนังห้องอบแห้งแต่จะมีระดับอุณหภูมิที่สูงกว่าแสดงถึงหากมีการเปลี่ยนตำแหน่งของชิ้นกล้วยโดยให้ระยะห่างของชิ้นกล้วยกับหลอดรังสีอินฟราเรดลดลงจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วกว่าเดิมเนื่องจากใกล้แหล่งพลังงานมากขึ้นทำให้ ความเข้มของรังสีที่แผ่ลงมาถึงที่ผิวชิ้นกล้วยเพิ่มมากขึ้น

4) คุณภาพของชิ้นกล้วยหอมหลังทำการอบแห้ง

การทดลองคุณภาพของกล้วยหอมหั่นบางหลังทำการอบแห้งทำโดย ทดสอบสีของชิ้นกล้วย เปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นกล้วย และความกรอบของชิ้นกล้วย

สีของชิ้นกล้วยก่อนทำการอบแห้งและหลังทำการอบแห้งทดสอบโดยการวัดค่าความสว่าง (L) และค่าความเหลือง (b) โดยใช้เครื่องทดสอบสี (Colorimeter) ยี่ห้อ Juki รุ่น JP 7100 (Japan) เป็นเครื่องระบบ hunter

ตารางที่ 1 ผลของการวัดคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์หลังทำการอบแห้ง

Pressure (kPa)	Temperature (°C)	Δb	ΔL
5	50	3.00	-4.75
	55	4.37	-6.28
	60	6.22	-8.90
10	50	3.03	-5.14
	55	4.30	-6.31
	60	6.26	-9.37
15	50	3.04	-5.18
	55	4.33	-6.30
	60	6.52	-9.06

จากตารางที่ 1 พบว่าการอบแห้งชิ้นกล้วยที่อุณหภูมิควบคุมที่ผิวสูงขึ้น ทำให้ชิ้นกล้วยมีค่าความสว่างลดลง และค่าความเหลืองเพิ่มขึ้นจากชิ้นกล้วยสดที่ความสุกระดับ 5 เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ชิ้นกล้วยมีความสว่างลดลงมากที่สุดและและมีค่าความเหลืองเพิ่มมากที่สุด ส่วนผลของความดันคือการเปลี่ยนแปลงของความสว่างและความเหลือง ในการอบแห้งพบว่าความดันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสว่างและความเหลือง

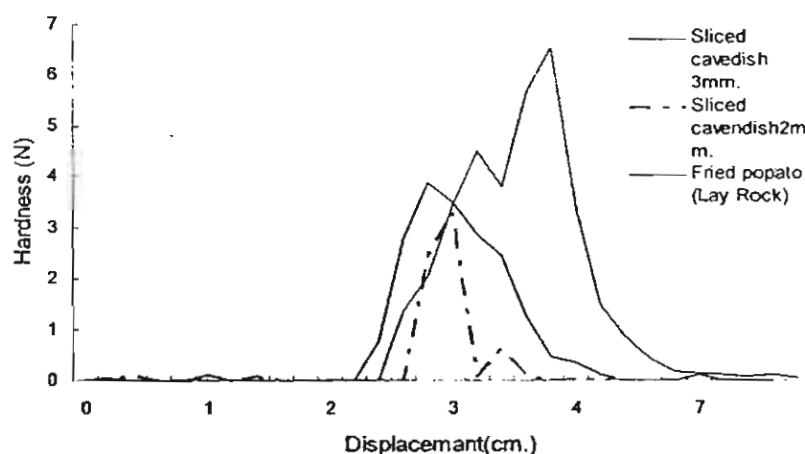
การวัดปริมาณของผลิตภัณฑ์ทั้งก่อนทำการอบแห้งและหลังทำการอบแห้งสามารถทำได้โดยหลักการแทนที่ในของเหลวเพื่อหาการหดรัดตัวของชิ้นกล้วยโดยใช้ n-heptane เป็นของเหลวที่ใช้ในการแทนที่เพื่อหาปริมาตร เนื่องจาก n-heptane จะไม่ซึมเข้าไปในเนื้อของชิ้นกล้วย(ผลิตภัณฑ์อาหาร)

จากตารางที่ 2 สามารถสรุปได้ว่าชิ้นกล้วยหลังทำการอบแห้งจะมีปริมาตรลดลงจากปริมาตรเดิมก่อนทำการอบแห้งโดย ชิ้นกล้วยที่ขนาดความหนาเท่ากันนั้น เมื่ออบแห้งภายใต้สภาวะความดัน และอุณหภูมิที่ใช้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่มากขึ้น (หดรัดมากขึ้น) ชิ้นกล้วยที่อบภายใต้สภาวะความดัน และอุณหภูมิ ที่ทำให้เกิดอัตราการอบแห้งที่รวดเร็วนั้น น้ำที่อยู่ผิวของชิ้นกล้วยจะระเหยไปอย่างรวดเร็วทำให้ผิวที่อยู่ข้างนอกนั้นแห้งเกิดการแข็งตัวที่ผิว ซึ่งการแข็งตัวที่ผิวนี้อาจช่วยรักษาสภาพรูปทรงและปริมาตรของชิ้นกล้วยไม่ให้เกิดการหดรัดมาก ดังนั้นชิ้นกล้วยที่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยจึงมีการหดรัดน้อยกว่าชิ้นกล้วยชิ้นกล้วยที่ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนาน

ตารางที่ 2 ผลการวัดเปรียบเทียบปริมาณซึ้นก๊วยหลังทำการอบแห้งที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ

Thickness (mm.)	Pressure(kPa)	Temp (C°)	Volume cm ³	%Shrinkage
2	5	50	0.919 + 0.0096	25.35
		55	0.932 + 0.0087	24.31
		60	0.957 + 0.017	22.25
	10	50	0.901 + 0.022	26.86
		55	0.929 + 0.012	24.58
		60	0.941 + 0.019	23.54
	15	50	0.863 + 0.054	29.88
		55	0.913 + 0.0074	25.82
		60	0.922 + 0.0087	25.11
3	5	50	1.092 + 0.032	40.86
		55	1.156 + 0.037	37.42
		60	1.207 + 0.034	34.67
	10	50	1.075 + 0.031	41.79
		55	1.109 + 0.052	39.98
		60	1.137 + 0.039	38.45
	15	50	1.038 + 0.033	43.82
		55	1.078 + 0.035	41.67
		60	1.106 + 0.038	40.15
4	5	50	1.32 + 0.021	46.39
		55	1.34 + 0.021	45.61
		60	1.364 + 0.025	44.64
	10	50	1.304 + 0.018	47.08
		55	1.329 + 0.016	46.04
		60	1.332 + 0.0106	45.92
	15	50	-	-
		55	-	-
		60	-	-

การทดสอบเนื้อสัมผัสของอาหารด้วยเครื่อง Texture analyzer โดยนำซึ้นก๊วยหอมหลังทำการอบแห้งไปทำการทดสอบนั้น เพื่อวิเคราะห์ถึงความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นขนมขบเคี้ยว โดยทำการเปรียบเทียบกับมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบที่วางขายในท้องตลาด เครื่องทดสอบจะมีลักษณะเป็นหัวเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. เคลื่อนที่ไปกดเจาะซึ้นก๊วย โดยจะพิจารณาถึงแรงต้านทานสูงสุด (Hardness) ก่อนซึ้นก๊วยจะแตกหัก และลักษณะของเส้นกราฟเปรียบเทียบกับมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบ



รูปที่ 6 การทดสอบเนื้อสัมผัสของซันกลัวย 2 3 มม. เปรียบเทียบกับมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบแผ่นหักยี่ห้อเลย์ (LAY)

จากรูปที่ 6 ลักษณะของกราฟของการทดสอบหาค่าแรงต้านทานสูงสุดนั้น (Hardness) ของซันกลัวย 2 3 มม. และมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบแผ่นหักยี่ห้อเลย์ (LAY) สามารถอธิบายได้ว่าคอนเริ่มดันที่หัวกดเริ่มเคลื่อนที่ แรงต้านทานเกือบเป็น 0 ไปจนเมื่อหัวกดได้เริ่มสัมผัสชั้นทดสอบแรงต้านจะพุ่งขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว เมื่อถึงจุดต้านทานแรงสูงสุดนั้นกราฟจะหักลงมาอย่างรวดเร็ว และเข้าค่าแรงต้านทานเป็น 0 อีกครั้ง จากลักษณะของกราฟพบว่าชั้นทดสอบมีความแข็ง แต่เพราะโดยเมื่อหัวกดไปกดเจาะที่ชั้นทดสอบแล้วนั้นชั้นทดสอบจะมีแรงต้านทานเล็กน้อยก่อนจะแตกหัก เมื่อวิเคราะห์ถึงแรงต้านทานสูงสุดแล้วนั้นซันกลัวยขนาด 2 มม. มีแรงต้านทานสูงสุดใกล้เคียงกับมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบแผ่นหักยี่ห้อเลย์ (LAY) ในขณะที่ซันกลัวยขนาด 3 มม. จะมีค่าแรงต้านทานสูงสุดสูงกว่ามาก นั่นหมายถึงแข็งกว่ามาก

สรุปผลการทดลอง

การอบแห้งกล้วยหอมหั่นบางด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศกับรังสีอินฟราเรดไกล พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงเมื่ออุณหภูมิของการอบแห้งสูงขึ้น แต่อุณหภูมิอบแห้งที่สูงมากกว่า 60°C. จะมีผลต่อคุณภาพของกล้วยหอม การอบแห้งโดยใช้ความดันที่ 5 กิโลปาสกาล จะทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนด้านความหนาของกล้วยหอมพบว่า เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นเวลาในการอบแห้งจะมากขึ้น โดยความหนาที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ 2 มม.

ในขณะที่เมื่อวิเคราะห์ถึงคุณภาพการลดเวลาในการอบแห้งลงนั้นจะช่วยรักษาปริมาณของซันกลัวยหลังทำการอบแห้งไม่ให้หดตัวลงมากได้แต่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะให้ซันกลัวยหลังทำการอบแห้งมีค่าความเหลืองเพิ่มขึ้นค่าความสว่างลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยสด จากการทดลองพบว่าในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C กล้วยจะมีคุณภาพดีมีสีเหลืองนวล ในขณะที่เนื้อสัมผัสของอาหารนั้นขนาดความหนาของซันกลัวยิ่งเพิ่มขึ้นแรงต้านทานสูงสุดก็จะเพิ่มมากขึ้น หากเปรียบเทียบกับมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบแผ่นหักยี่ห้อเลย์แล้ว นั้นซันกลัวยขนาด 2 มม. มีความเหมาะสมมากที่สุด เพราะให้แรงต้านทานสูงสุดที่ใกล้เคียง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนและขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือทดสอบทางอาหาร จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี .

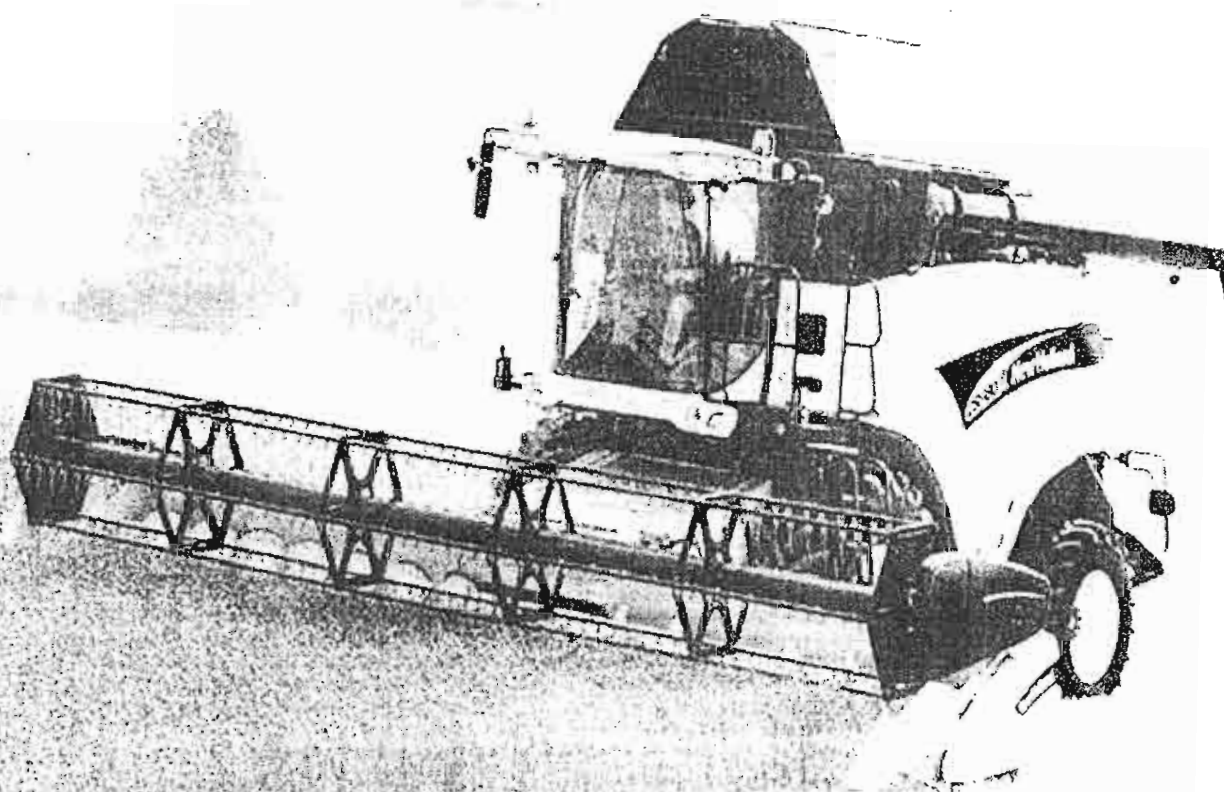
เอกสารอ้างอิง

1. Mongpraneet , S., Abe, T., Tsurusaki, T. 2002. Accelerated drying of welsh onion by far- infrared radiation under vacuum conditions. *Journal of Food Engineering*. 55: 147-156.
2. Mousa, N., Farid, M. 2002. Microwave vacuum drying of banana slices. *Drying Technology*. 20: 2055-2066.
3. Ernst, R.C., Ridgway, J.W. and Tiller, F.M. 1938. *Practical Vacuum Drying Industrial and engineering chemistry* 30:1122-1125.
4. Sandu, C. 1986. Infrared radiative drying in food engineering: process analysis. *Biotechnology Progress*. 2:109-119.
5. Ratti, C. and Mujumdar, A.S. 1995. Infrared drying in Majumdar A.S. (ed.) *Handbook of Industrial Drying*, Marcel Dekker Inc. New York. 567-588.
6. Abe, T. and Afal, T.M. 1997. Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. *J.Agic. Eng Res.* 67: 289-297.



วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก

Toward Kitchen of the World by Agricultural Engineering



การประชุมวิชาการครั้งที่ 6 ประจำปี 2548

สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

30-31 มีนาคม 2548 คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การอบแห้งเนื้อไก่ด้วยไอน้ำร้อนช่วยลดอุณหภูมิร่วมกับป้อนความร้อน

วรวิทย์ ทรัพย์ชัยกุล^{1*} อธิศักดิ์ นาดกรณกุล² และ สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคนิคการอบแห้งเนื้อไก่แบบ 2 ขั้นตอน คือ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนช่วยลดอุณหภูมิร่วมกับป้อนความร้อน (SSD/HPD) และการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนช่วยลดอุณหภูมิร่วมกับอากาศร้อน (SSD/AD) โดยเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนช่วยลดอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว โดยมีเงื่อนไขในการทดลองคือ อบแห้งเนื้อไก่ที่มีความชื้นเริ่มต้น 3.11% d.b. จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.11% d.b. อุณหภูมิไอน้ำร้อนช่วยลดอุณหภูมิเท่ากับ 120, 140, และ 160 °C อุณหภูมิของอากาศร้อนหรือป้อนความร้อนเท่ากับ 55°C ความชื้นเนื้อไก่หลังผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนช่วยลดอุณหภูมิเท่ากับ 30% และ 40% มาตรฐานเปียก ผลการทดลองพบว่า เนื้อไก่ที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนช่วยลดอุณหภูมิร่วมกับป้อนความร้อนมีการหาคำน้อย คุณภาพสี และการคืนตัวดีกว่าเนื้อไก่ที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนช่วยลดอุณหภูมิร่วมกับอากาศร้อนและไอน้ำร้อนช่วยลดอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว

¹นักศึกษา 'ผู้ช่วยศาสตราจารย์' ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

*ผู้รับผิดชอบบทความ โทร: 0-2470-8695 ต่อ 112; โทรสาร: 0-2470-8663; อีเมล: sir_lonk@yahoo.com

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 "วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก"

30-31 มีนาคม 2548 ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ กรุงเทพฯ

CHICKEN DRYING USING SUPERHEATED STEAM COMBINED WITH HEAT PUMP

Worawit Kraiwanichkul^{1*}, Adisak Nathakarakule² and Somchart Soponronarit³

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate two-stage drying technique for drying chicken meat, i.e. drying by superheated steam at the first stage and following by heat pump at the second stage (SSD/HPD), and drying by superheated steam at the first stage and following by hot air at the second stage (SSD/AD), and compared with the meat dried by one stage drying with superheated steam. The chicken meat was dried from an initial moisture content of 3.11 to 0.11 dry basis by using superheated steam temperature at 120, 140 and 160°C and following by heat pump or hot air at 55°C. The intermediate moisture content of the two-stage drying was 30% and 40%wb. The experimental results showed that the chicken meat dried by SSD/HPD has lower degree of shrinkage, better color and higher degree of rehydration than that dried by only superheated drying and SSD/AD.

KEYWORDS: Meat, Rehydration, Shrinkage

¹Graduate student, ²Associate Professor, ³Professor, School of Energy and Materials,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

*Corresponding author. Tel.: 0-24708695 Ext. 112; Fax: 0-24708663; E-mail address: sir_lonk@yahoo.com

บทนำ

ประเทศไทยมีความนิยมในการบริโภคเนื้อไก่ในชีวิตประจำวันเป็นปริมาณมาก เนื่องมาจากเป็นอาหารที่มีแหล่งโปรตีนสูง ในบางครั้งเนื้อไก่ที่ได้จากการผลิตและบริโภคอาจมีมากเกินไปจนเกิดความไม่ต้องการ การถนอมอาหารหรือแปรรูปผลิตภัณฑ์เพื่อการเก็บรักษา จึงเป็นวิธีที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย การถนอมอาหารที่ได้นั้น อาจช่วยให้ยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาและทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งคุณค่าทางอาหารไม่สูญเสียไป ปริมาณความนิยมในการบริโภคอาหารแห้ง, อาหารกึ่งสำเร็จรูป ภายในประเทศมีความต้องการในการบริโภคเพิ่มขึ้นอย่างมาก อาจเป็นเพราะความสะดวกสบายในการซื้อและจำหน่าย สามารถเก็บได้เป็นระยะเวลานานและยังประหยัดเวลาในการบริโภคด้วย การนำเนื้อไก่ที่ทำการแปรรูปโดยการอบแห้ง เพื่อไปใช้ในการผลิตอาหารแห้งและอาหารกึ่งสำเร็จรูป เช่น ขนมปังสำเร็จรูปและโจ๊กกึ่งสำเร็จรูปนั้น ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย

ในการแปรรูปอาหารที่ผ่านมานิยมใช้การอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งสามารถทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงกว่าการนำอาหาร ไปตากแห้งด้วยแสงแดดจะส่งผลให้คุณภาพและคุณค่าทางอาหารของเนื้อสัตว์สูญเสียไป การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยังคงมีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะเดียวกันจะพบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงมีอัตราการอบแห้งและคุณภาพหลังการอบแห้งที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน [1, 2] งานวิจัยนี้จึงศึกษาการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยังคงเป็นหลัก การอบแห้งเนื้อสัตว์ด้วยไอน้ำร้อนยังคงร่วมกับป้อนความร้อนเป็นเทคนิคในการอบแห้งแบบใหม่ ที่มีแนวโน้มที่จะรักษาคุณภาพในด้านต่างๆ และยังคงคุณค่าทางอาหารของเนื้อสัตว์หลังการอบแห้งเอาไว้ให้คงเดิมมากกว่าการอบแห้งแบบชั้นคอนเวเยอร์ [3]

งานวิจัยนี้นำเสนอการอบแห้งเนื้อไก่โดยใช้ไอน้ำร้อนยังคงร่วมกับป้อนความร้อน โดยศึกษาการเปรียบเทียบผลจากการใช้ไอน้ำร้อนยังคงในการอบแห้งเพียงอย่างเดียว กับการใช้ไอน้ำร้อนยังคงร่วมกับป้อนความร้อนมาอบแห้งเนื้อไก่ จึงเป็นการผสมผสานเทคโนโลยีอบแห้งในการอบแห้งเนื้อไก่ เพื่อให้ได้เนื้อไก่ที่มีคุณภาพดีขึ้น โดยศึกษาการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงร่วมกับป้อนความร้อนควบคู่ไปกับคุณภาพของเนื้อไก่หลังการอบแห้ง เพื่อเป็นแนวทางในการใช้งานและพัฒนาระบบการอบแห้งด้วยวิธีนี้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การเตรียมวัสดุ

นำเนื้ออกไก่สดทำการหั่นให้ มีขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร และมีความหนา 3 มิลลิเมตร โดยหั่นเนื้ออกไก่ตามยาวของสันไข โดยเนื้ออกไก่มีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 75% w.b. (หาค่าความชื้นโดยนำเนื้อไก่ก่อนการอบแห้งไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง)

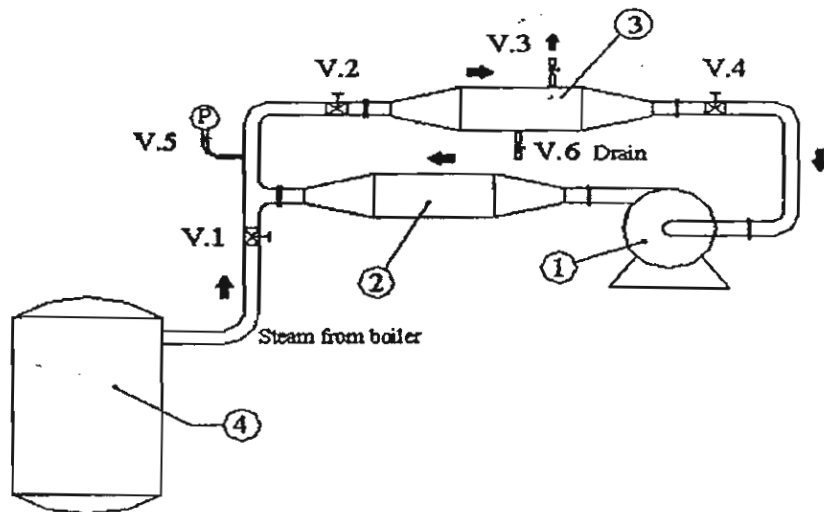
อุปกรณ์การทดลอง

กรณีแรกทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยังคงเพียงอย่างเดียว ห้องอบแห้งนี้เป็นห้องอบแห้งแบบถาดอยู่กับที่ (Fixed-Tray Dryer) โดยเป็นเครื่องอบแห้งแบบตู้ (Cabinet Dryer) ห้องอบแห้งมีขนาด 30x30x10 cm² มีอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ทำให้ไอน้ำร้อนกลายเป็นไอน้ำร้อนยังคงซึ่งมีขนาด 13.5 kW โดยควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมแบบ PID ที่มีความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ โดยลักษณะของเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงเป็นไปดังรูปที่ 1 แสดงระบบอบแห้งแบบไอน้ำร้อนยังคง ซึ่งมีประกอบด้วยอุปกรณ์หลักดังนี้

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 "วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก"

30-31 มีนาคม 2548 ณ โรงแรมมิลานทิลแกรนด์ กรุงเทพฯ

1. พัดลม (Blower)
 2. อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater)
 3. ห้องอบแห้งแบบงวด (Batch Dryer)
 4. เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler)
- และอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ตัวดักฝุ่น (Cyclone) วาล์วและมาตรวัดความดัน



รูปที่ 1 ระบบเครื่องอบแห้งแบบไอน้ำร้อนขวดชิง

สำหรับการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อน ใช้เครื่องอบแห้งระบบปิด โดยห้องอบมีขนาด $85 \times 85 \times 85 \text{ cm}^3$ และใช้สาร R-134a เป็นสารทำความเย็น นอกจากนี้ยังได้ทำการอบแห้งแบบสองขั้นตอน อบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดชิงในช่วงแรก แล้วตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนในขั้นตอนที่สอง โดยห้องอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นห้องอบแห้งแบบตู้ที่มีขนาด $38 \times 38 \times 38 \text{ cm}^3$

วิธีการทดลอง

ทำการอบแห้งเนื้ออกไก่ตามเงื่อนไขต่างๆ เนื้ออกไก่มีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 75% w.b. อบแห้งให้ความชื้นลดลงจนมีค่าความชื้นสุดท้ายประมาณ 10% w.b. โดยมีเงื่อนไขของการทดลองดังนี้คือ

1. อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดชิงเพียงอย่างเดียว

อบแห้งเนื้อไก่ด้วยไอน้ำร้อนขวดชิงแบบขั้นตอนเดียวที่ 3 อุณหภูมิคือที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C

2. อบแห้งแบบสองขั้นตอน

อบแห้งเนื้อไก่ด้วยไอน้ำร้อนขวดชิงช่วงแรกที่อุณหภูมิ 120, 140, 160°C จนกระทั่งได้ความชื้น 30-40% w.b. จากนั้นทำการอบขั้นตอนที่สองด้วยอากาศร้อนหรือบ่มความร้อนที่อุณหภูมิ 55°C

อบแห้งเนื้ออกไก่ด้วยเงื่อนไขข้างต้นจนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 10% w.b. หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้ไปทดสอบคุณภาพในด้านต่างๆ ดังนี้ คุณภาพด้านสี, การหดรัดและการคืนตัว ในการวัดอุณหภูมิของไอน้ำร้อนขวดชิงใช้ Data Logger ที่มีค่าความถูกต้อง $\pm 1^\circ\text{C}$

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของวัสดุ

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของวัสดุในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงเพียงอย่างเดียว พิจารณาจากสมการกรณีการแพร่ความชื้นในวัสดุแผ่นราบและยาวมาก (Infinite slab) ซึ่งเป็นไปตามสมการ [4]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{1}{(2m+1)^2} \exp \left[- (2m+1)^2 \pi^2 \frac{D \cdot t}{x^2} \right] \right)$$

การทดสอบคุณภาพในด้านสีของผลิตภัณฑ์

จะวัดด้วยเครื่องวัดสีอาหาร JUKI รุ่น JP7100 เป็นเครื่องวัดสีระบบ Hunter แสดงค่าในเทอมของค่าแปร L, a และ b โดยค่า L แสดงค่า brightness, a แสดงค่า สีแดงและสีเขียว, b แสดงค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน

การทดสอบคุณภาพในการหาค่าของผลิตภัณฑ์

ทดสอบคุณภาพด้านการหาค่าโดยใช้โทลูอีน (Toluene – $C_6H_5CH_3$) ด้วยวิธีการแทนที่หาปริมาตรก่อนและหลังการอบแห้ง [5] โดยคำนวณหาจากสมการ

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{V_0 - V}{V_0} \cdot 100$$

โดย V_0 คือ ปริมาตรของผลิตภัณฑ์เริ่มต้น

V คือ ปริมาตรของผลิตภัณฑ์หลังจากการอบแห้ง

การทดสอบคุณภาพในการคืนตัวของผลิตภัณฑ์

ทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัวของเนื้อไก่โดยการชั่งน้ำหนักเนื้อไก่ที่ทำการคืนตัวในน้ำร้อน อุณหภูมิประมาณ $90^\circ C$ ชั่งน้ำหนักเนื้อไก่หลังการอบแห้งที่คืนตัวในน้ำร้อนทุก 1 นาทีและทำการบันทึกค่าไว้ โดยระยะเวลาในการคืนตัวที่ทำการพิจารณา คือ 10 นาที โดยคำนวณหาจากสมการ [6]

$$\text{Rehydration} = \frac{W_t - W_d}{W_t} \cdot 100$$

โดย W_t คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ทำการคืนตัวที่เวลาใดๆ (g)

W_d คือ น้ำหนักมวลแห้งของผลิตภัณฑ์ (g)

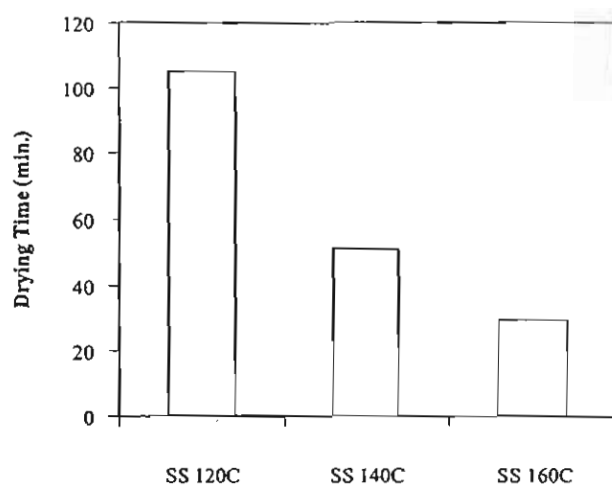
ผลการทดลอง

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของวัสดุในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดยิ่งเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของวัสดุในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดยิ่งเพียงอย่างเดียว ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนชาดยิ่งในการอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของ วัสดุมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนชาดยิ่งที่ต่ำกว่า โดยผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้นของวัสดุมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย [7]

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดยิ่งเพียงอย่างเดียว

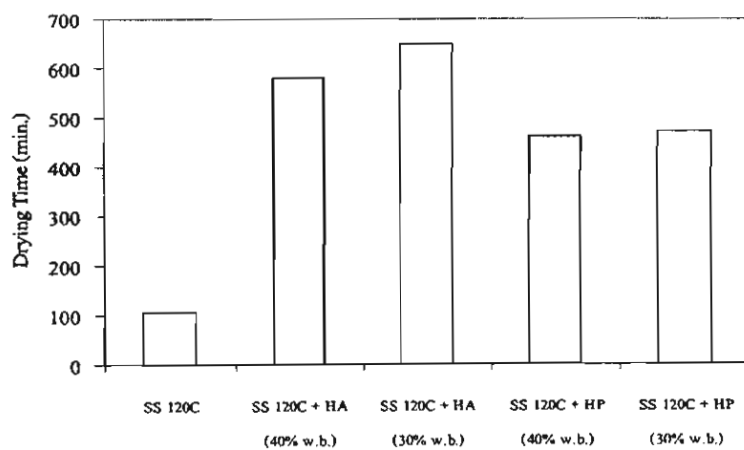
อุณหภูมิของไอน้ำร้อนชาดยิ่ง (°C)	D_{eff} (cm ² /min)
120	6.73×10^{-9}
140	11.7×10^{-9}
160	19.33×10^{-9}



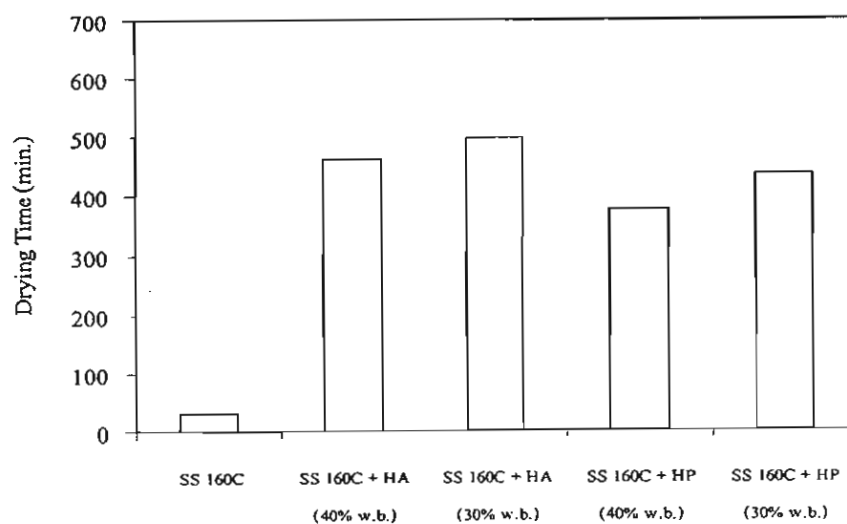
รูปที่ 2 ระยะเวลาการอบแห้งเนื้ออกไก่โดยใช้ไอน้ำร้อนชาดยิ่งเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความชื้น สดท้ายหลังการอบแห้งประมาณ 10% w.b.

รูปที่ 2 แสดงระยะเวลาในการอบแห้งเนื้ออกไก่โดยใช้ไอน้ำร้อนชาดยิ่งเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดยิ่งเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิสูง จะใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดยิ่งเพียง อย่างเดียวที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำซึ่งมีอุณหภูมิที่ใกล้กับจุดเดือดของน้ำมากกว่า ดังนั้นการอบแห้ง ด้วยไอน้ำร้อนชาดยิ่งเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาน้อยกว่ามาก

รูปที่ 3 แสดงระยะเวลาในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C แบบชั้นคอนเดิชาเทียบกับการอบแห้งแบบสองชั้นคอนที่อบแห้งในช่วงแรกด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C พบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งที่ไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 °C แบบชั้นคอนเดิชาจะใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งแบบสองชั้นคอนมาก ส่วนการอบแห้งแบบสองชั้นคอน ระยะเวลาในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งตามด้วยปั้มความร้อนจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งตามด้วยลมร้อน เป็นผลเนื่องมาจากค่าความชื้นสัมพัทธ์ของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3 ระยะเวลาในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C แบบชั้นคอนเดิชาเทียบกับการอบแห้งแบบสองชั้นคอนที่อบแห้งในช่วงแรกด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C



รูปที่ 4 ระยะเวลาในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 160 °C แบบชั้นคอนเดิชาเทียบกับการอบแห้งแบบสองชั้นคอนที่อบแห้งในช่วงแรกด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 160 °C

รูปที่ 4 แสดงระยะเวลาในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C แบบชั้นคอนเดิยวที่เทียบกับการอบแห้งแบบสองชั้นคอนที่อบแห้งในช่วงแรกด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C พบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งมีแนวโน้มคล้ายกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C แต่ระยะเวลาในการอบแห้งจะน้อยกว่า โดยระยะเวลาในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งแบบชั้นคอนเดิยวที่อุณหภูมิ 160°C จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดและการอบแห้งแบบสองชั้นคอนที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C ในชั้นคอนแรกจนมีค่าความชื้น 30% w.b. แล้วอบแห้งต่อในชั้นคอนที่สองด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 55°C จะใช้เวลาในการอบแห้งมากที่สุด

คุณภาพในด้านสีของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 2 แสดงผลจากการวัดคุณภาพด้านสีหลังจากการอบแห้งในกระบวนการต่างๆพบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งแบบชั้นคอนเดิยวที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง มีสีแดงมากกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งแบบชั้นคอนเดิยวที่อุณหภูมิต่ำ และการอบแห้งแบบชั้นคอนเดิยวเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบสองชั้นคอนที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนชนิดยิ่งเดียวกันแล้ว พบว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งแบบชั้นคอนเดิยวสีของผลิตภัณฑ์หลังจากการอบแห้งจะมีสีเข้มและแดงกว่าการอบแห้งแบบสองชั้นคอน เนื่องมาจากการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงที่ยาวนานกว่า ส่วนการอบแห้งแบบสองชั้นคอนพบว่าเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งตามด้วยอากาศร้อนกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งตามด้วยปั้มความร้อนนั้น สีของผลิตภัณฑ์จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งตามด้วยอากาศร้อนจะมีสีแดงมากกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งตามด้วยปั้มความร้อน

ตารางที่ 2 ผลจากการวัดคุณภาพด้านสีและคุณภาพด้านการหดตัวของ การอบแห้งเนื้ออกไก่ด้วยกระบวนการต่างๆ

Drying Process	คุณภาพด้านสี (ค่าสีแดง – Redness)	% Shrinkage
SS 120°C	5.97±0.45 ^c	51.0
SS 120°C + HA (40% w.b.)	2.38±0.17 ^{ab}	57.1
SS 120°C + HA (30% w.b.)	2.38±0.49 ^{ab}	56.7
SS 120°C + HP (40% w.b.)	2.08±0.07 ^a	55.1
SS 120°C + HP (30% w.b.)	2.06±0.39 ^a	54.8
SS 140°C	7.56±0.57 ^d	62.4
SS 140°C + HA (40% w.b.)	2.43±0.46 ^{ab}	68.1
SS 140°C + HA (30% w.b.)	2.37±0.10 ^{ab}	67.2
SS 140°C + HP (40% w.b.)	2.25±0.35 ^a	66.9
SS 140°C + HP (30% w.b.)	2.12±0.73 ^a	66.4
SS 160°C	10.95±0.91 ^e	65.2
SS 160°C + HA (40% w.b.)	2.45±0.12 ^{ab}	70.9
SS 160°C + HA (30% w.b.)	2.94±0.14 ^b	69.9
SS 160°C + HP (40% w.b.)	2.18±0.25 ^a	67.7
SS 160°C + HP (30% w.b.)	2.16±0.09 ^a	66.8

อักษรเหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$

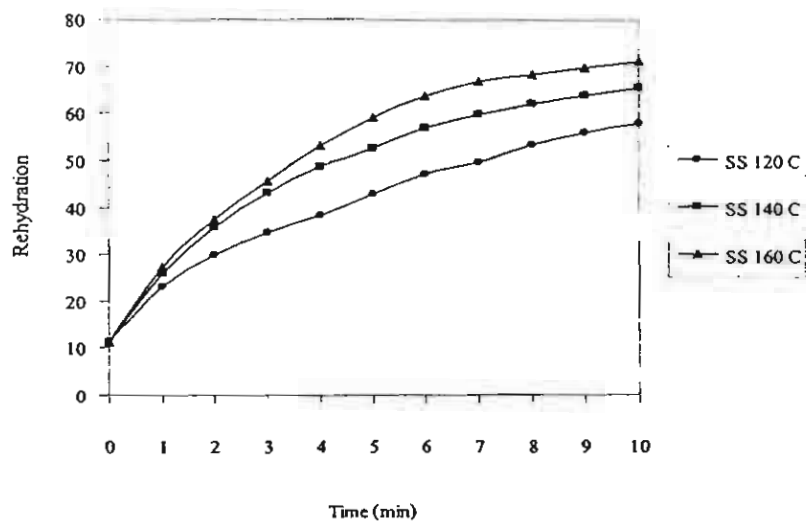
คุณภาพในการหัตถ์ของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 2 แสดงผลของคุณภาพด้านการหัตถ์ของผลิตภัณฑ์พบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นแบบชั้นคอนเดวที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง มีการหัตถ์มากกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นแบบชั้นคอนเดวที่อุณหภูมิต่ำ และการอบแห้งแบบชั้นคอนเดวเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบสองชั้นคอนที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนชื้นเดียวกันแล้วพบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นแบบชั้นคอนเดวจะมีการหัตถ์น้อยกว่าการอบแห้งแบบสองชั้นคอน เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งที่ยาวนานกว่า ส่วนการอบแห้งแบบสองชั้นคอน เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นตามด้วยลมร้อนกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นตามด้วยบีบความร้อนนั้น คุณภาพด้านการหัตถ์ของผลิตภัณฑ์จะมีการหัตถ์มากกว่าเพียงเล็กน้อย การหัตถ์ของเนื้ออกไก่ที่ทำการอบแห้ง พิจารณาที่ความชื้นสุดท้ายหลังจากการอบแห้งที่ 10% w.b. การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นแบบชั้นคอนเดวที่อุณหภูมิ 120°C จะมีการหัตถ์น้อยที่สุด ส่วนการอบแห้งอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 160°C ในชั้นคอนแรกจะมีค่าความชื้น 40% w.b. แล้วอบแห้งต่อด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 55°C จะมีการหัตถ์ของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งมากที่สุด อุณหภูมิของไอน้ำร้อนชื้นในชั้นคอนแรกที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อคุณภาพด้านการหัตถ์ของผลิตภัณฑ์มากกว่าการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งต่างๆ ในชั้นคอนที่สอง

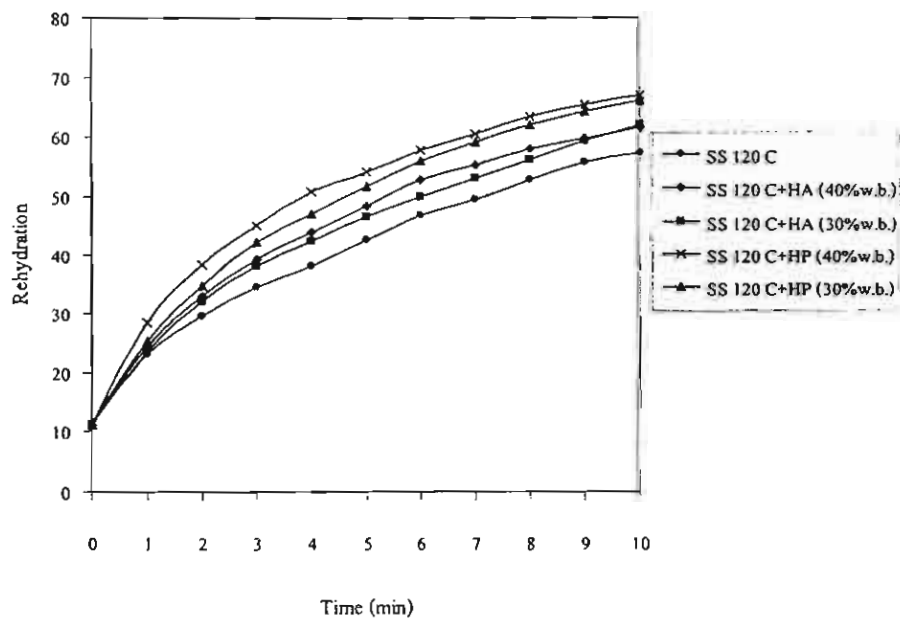
คุณภาพในการคืนตัวของผลิตภัณฑ์

รูปที่ 5 แสดงคุณภาพด้านการคืนตัวของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นแบบชั้นคอนเดวที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นแบบชั้นคอนเดวที่อุณหภูมิสูงจะมีการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นแบบชั้นคอนเดวที่อุณหภูมิต่ำ

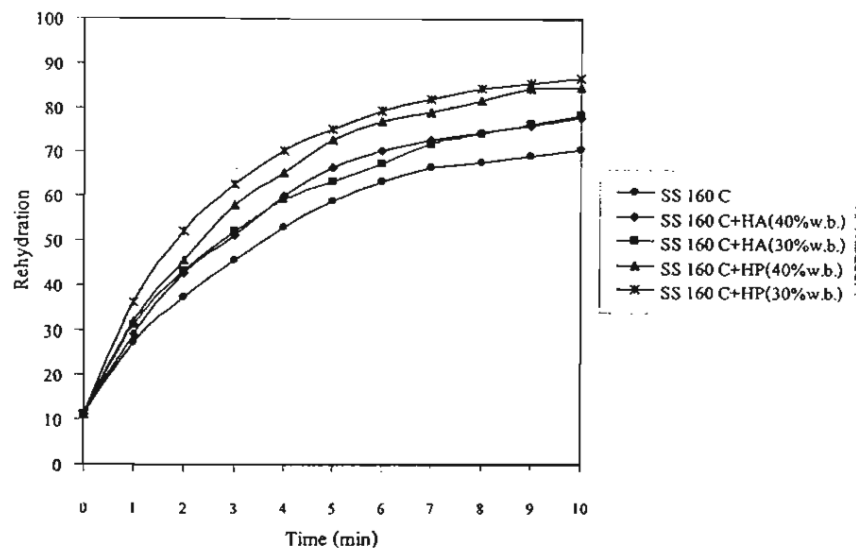
รูปที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงคุณภาพด้านการคืนตัวของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 120 และ 160°C ในกรณีต่างๆ พบว่าเมื่อพิจารณาที่การอบแห้งแบบชั้นคอนเดวเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบสองชั้นคอนที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนชื้นเดียวกัน การอบแห้งแบบสองชั้นคอนจะมีการคืนตัวที่มากกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นแบบชั้นคอนเดว ส่วนการอบแห้งแบบสองชั้นคอน การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นตามด้วยบีบความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นตามด้วยลมร้อนร้อนจะมีการคืนตัวที่ดีกว่า



รูปที่ 5 คุณภาพด้านการคืนตัวของกรอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแบบชั้นคอนเดิยวที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 6 คุณภาพด้านการคืนตัวของกรอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C ในกรณีต่างๆ



รูปที่ 7 คุณภาพด้านการคืนตัวของกรอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C ในกรณีต่างๆ

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาการอบแห้งเนื้ออกไก่ด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ เพื่อศึกษาระยะเวลาในการอบแห้ง คุณภาพในด้านสี การหดตัวและการคืนตัวหลังการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ที่ความชื้นสุดท้ายหลังจากการอบแห้งโดยมีค่าความชื้นสุดท้ายประมาณ 10% w.b. พบว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพียงแบบชั้นคอนเดียวที่อุณหภูมิสูงจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด ส่วนการอบแห้งแบบสองชั้นคอนนั้น การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยป้อนความร้อนจะใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยลมร้อน คุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์พบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแบบชั้นคอนเดียวจะให้สีของผลิตภัณฑ์ที่แดงและเข้มกว่าการอบแห้งแบบสองชั้นคอน คุณภาพด้านการหดตัวของผลิตภัณฑ์ การอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่ำจะมีการหดตัวน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง การอบแห้งแบบสองชั้นคอนจะมีการหดตัวมากกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแบบชั้นคอนเดียว ที่อุณหภูมิในการอบแห้งในชั้นคอนแรกเท่ากัน การคืนตัวของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิในการอบแห้งสูงจะมีการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ การอบแห้งแบบสองชั้นคอนจะมีการคืนตัวที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนเพียงอย่างเดียว ส่วนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยป้อนความร้อนจะมีการคืนตัวที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยลมร้อน คุณภาพในด้านต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในชั้นคอนแรกจนมีค่าความชื้น 40 และ 30% w.b. และไปอบแห้งต่อด้วยชั้นคอนที่สองด้วยกระบวนการอบแห้งเดียวกัน จะมีคุณภาพในด้านต่างๆ ที่ใกล้เคียงกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้เงินในการสนับสนุนในงานวิจัยนี้

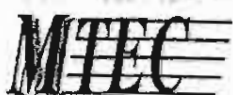
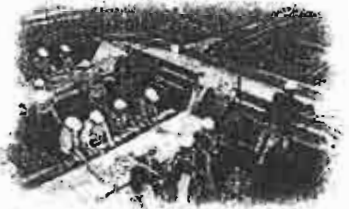
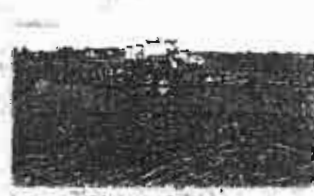
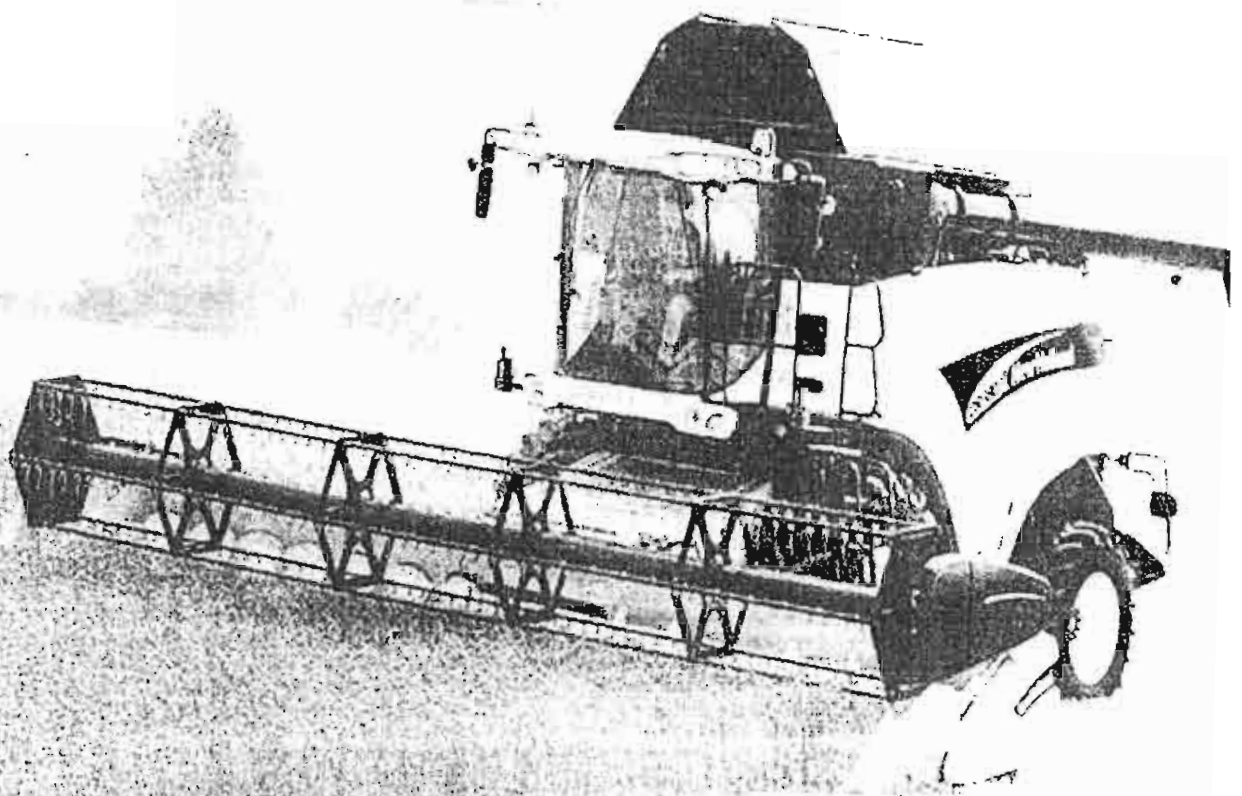
เอกสารอ้างอิง

1. Moreira, G.R., 2001. Impingement drying of foods using hot air and superheated steam. *Journal of Food Engineering*, 49: pp.291-295
2. Uengkimbuan, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S., and Nathkaranakule, A., 2003. Comparative study of pork dried using superheated steam and hot air, *Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Drying Conference*, Thailand, pp.679-691
3. Namsanguan, Y., Tia, W., Devahastin, S., and Soponronnarit, S., 2004. Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two-stage drying process, *Drying Technology*, 22(4): 759-778
4. สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540, การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท, พิมพ์ครั้งที่ 7, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 338 หน้า.
5. Mohsenin, N., 1980, *Physical Properties of Plant and Animal Materials*, 3rd ed., New York, Gordon and Breach Science, pp.51-65.
6. Maskan, M., 2000, Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during Hot Air and Microwave Drying, *Journal of Food Engineering*, Vol.48, No.2, pp. 177-182.
7. Doymaz, I., 2004, Drying Characteristics and kinetics of okra, *Journal of Food Engineering*, [article in press]



วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก

Toward Kitchen of the World by Agricultural Engineering



การประชุมวิชาการครั้งที่ 6 ประจำปี 2548

สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

30-31 มีนาคม 2548 คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลของการแช่น้ำต่อการลดลงของเอนไซม์ยูรีเอสและการละลายโปรตีนในถั่วเหลือง โดยใช้การอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยอากาศร้อน

วรุฒ ชูทรัพย์^{1*} สมชาติ โสภณธนฤทธิ์² และสมเกียรติ ปรัชญาวารการ³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการทดลองแช่น้ำและการต้มเปอรัง ต่อการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสและค่าการละลายโปรตีนในถั่วเหลือง ภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยอากาศร้อน ถั่วเหลืองแห้งถูกนำมาแช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิ 30°C และ 60°C เพื่อให้ได้ความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 19.5 มาตรฐานแห้งและอบแห้งที่อุณหภูมิ 135°C และ 150°C โดยมีทั้งการต้มเปอรังและไม่มีการต้มเปอรังก่อนการอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาต้มเปอรังและอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง จะมีอิทธิพลต่อการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสมากกว่าอุณหภูมิน้ำที่ใช้แช่เมล็ดถั่วเหลือง โดยเมื่อใช้เวลาในต้มเปอรังนานขึ้นและอุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นจะทำให้เอนไซม์ยูรีเอสเสื่อมสลายได้เร็วขึ้น สำหรับค่าการละลายของโปรตีนนั้นพบว่าเมล็ดถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30°C ต้มเปอรังเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 135°C จะให้ค่าการละลายของโปรตีนดีที่สุด

¹นักศึกษา²ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ³รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ. ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

*ผู้รับผิดชอบบทความ โทร: 0-2470-8695 คอ 112; โทรสาร: 0-2470-8663; อีเมล: y_warut@yahoo.com

EFFECT OF SOAKING ON UREASE INACTIVATION AND PROTEIN SOLUBILITY IN SOYBEAN DURING TREATMENT WITH HOT AIR FLUIDIZED BED DRYING

Warut Yuttachai^{1*}, Somchart Soponronnarit² and Somkiat Prachayawarakorn³

ABSTRACT

The effects of soaking and tempering on urease inactivation and protein solubility in soybean undergoing hot air fluidized bed drying were experimentally studied. Dry soybean was soaked in 30°C and 60°C water to reach the moisture content of 19.5% d.b. and was then dried at temperatures of 135°C and 150°C with and without prior tempering. The experimental results showed that the influences of tempering time and drying temperature on urease inactivation were more pronounced than the influence of soaking temperature. The longer tempering time and the higher drying temperature caused the faster urease inactivation. To receive the maximum protein solubility, the condition suggested for soybean treatment was soaking at 30°C, 1 hr-tempering and drying at 135°C.

KEYWORDS: Fluidization, Soybean, Soaking, Tempering, Urease

¹Postgraduate Student, ²Professor, School of Energy and Materials, ³Associate Professor,
Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

*Corresponding author. Tel.: 0-2470-8695 Ext. 112; Fax: 0-2470-8663; E-mail address: y_warut@yahoo.com

บทนำ

ถั่วเหลืองเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะสารอาหารประเภทโปรตีน ดังนั้นในอุตสาหกรรมจึงนิยมนำถั่วเหลืองมาใช้ในการเลี้ยงสัตว์ แต่อย่างไรก็ตามถั่วเหลืองดิบไม่สามารถนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ทันที เนื่องจากภายในเมล็ดถั่วเหลืองมีสารยับยั้งโภชนาการหลายชนิด โดยเฉพาะสารยับยั้งทริปซิน (Trypsin inhibitor) ที่มีผลต่อการเกิดการทำงานของตับอ่อน รวมไปถึงการทำให้สัตว์เกิดการระงับการเจริญเติบโต (Lyman et al., 1974) ดังนั้นเพื่อกำจัดสารยับยั้งดังกล่าวจึงต้องนำถั่วเหลืองไปผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยความร้อนที่สภาวะที่เหมาะสมก่อนจึงจะสามารถนำไปบริโภคได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารยับยั้งทริปซินจะมีอัตราการสลายตัวใกล้เคียงกับเอนไซม์ยูรีเอส (Urease enzyme) เมื่อเอนไซม์ยูรีเอสถูกทำลายหมดก็จะทำลายสารยับยั้งทริปซินหมดด้วยเช่นกัน ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงพิจารณาเลือกการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสแทนเนื่องจากวิธีการวัดไม่ซับซ้อน และง่ายกว่าการวัดสารยับยั้งทริปซิน (Albrecht et al. 1966)

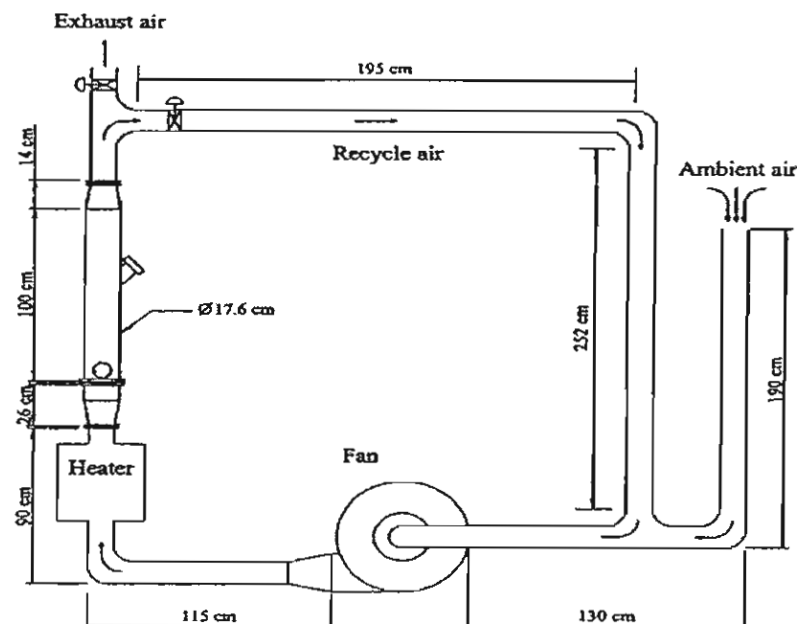
การให้ความร้อนกับถั่วเหลืองมีหลายวิธีด้วยกัน โดยวิธีหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization) ซึ่งเป็นวิธีการอบแห้งถั่วเหลืองโดยอาศัยการใช้ตัวกลางส่งผ่านความร้อนเข้าไปในถั่วเหลือง จากการทดลองอบแห้งถั่วเหลืองด้วยเทคนิคฟลูอิดิเซชัน โดยใช้ของไหลเป็นอากาศร้อนในช่วงอุณหภูมิ 100-140°C ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดถั่วเหลืองอยู่ในช่วง 14.3-33.3% d.b. (dry basis) พบว่าที่อุณหภูมิ 100 และ 110°C สามารถลดปริมาณสารยับยั้งทริปซินได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้นในทุกๆ ความชื้น เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งที่เกินกว่า 120°C สามารถกำจัดสารยับยั้งทริปซินได้มาก โดยเฉพาะที่ความชื้นสูง และต้องใช้เวลาที่ค่อนข้างนาน สำหรับที่อุณหภูมิ 130 และ 140°C สามารถลดปริมาณสารยับยั้งทริปซินอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับสำหรับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ (Soponronnarit et al. 2001; Osella et al. 1997) อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนกับถั่วเหลืองที่มากเกินไปอาจทำให้ถั่วเหลืองไหม้ และคุณภาพการละลายโปรตีนในถั่วเหลืองลดลง ดังนั้นการให้ความร้อนกับถั่วเหลืองจึงต้องมีเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม การอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงและใช้เวลาในการอบแห้งสั้น เป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่งที่จะเพิ่มคุณค่าทางอาหาร จากการทดลองของ McNaughton et al. (1981) ได้ศึกษาผลของการเพิ่มความชื้น และเวลาในการให้ความร้อนเพื่อผลลัพธ์ที่มีต่อสารยับยั้งทริปซิน และยูรีเอส (Urease) พบว่าเมื่อเพิ่มความชื้นให้กับเมล็ดถั่วเหลืองจะใช้เวลาในการให้ความร้อนสั้นกว่าเมล็ดถั่วเหลืองที่มีความชื้นต่ำในการลดสารยับยั้งทริปซิน และยูรีเอส ให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากการให้ความร้อน โดยการอบแห้งเพื่อใช้ในการลดปริมาณสารต้านโภชนาการกับเมล็ดถั่วเหลืองแล้ว การเพิ่มปริมาณความชื้นให้กับเมล็ดถั่วเหลืองก่อนนำไปให้ความร้อน จะสามารถลดปริมาณสารต้านโภชนาการได้มากกว่าถั่วเหลืองที่มีความชื้นต่ำ โดยการเพิ่มปริมาณความชื้นให้กับเมล็ดถั่วเหลืองด้วยวิธีการแช่น้ำเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่การแช่น้ำเมล็ดถั่วเหลืองในเวลาที่สั้น เพื่อให้ได้ความชื้นเริ่มต้นที่ต้องการนั้นจะทำให้ความชื้นอยู่บริเวณส่วนนอกของเมล็ดถั่วเหลืองเท่านั้น จึงต้องมีการเทมเปอร์เพื่อให้ความชื้นแพร่เข้าไปในเมล็ดก่อนนำไปอบแห้ง เพื่อให้ความชื้นเป็นตัวยกลางในการถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดถั่วเหลือง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ศึกษาผลของการนำเมล็ดถั่วเหลืองมาแช่น้ำเพื่อเพิ่มปริมาณความชื้น และระยะเวลาที่ใช้เทมเปอร์ โดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดิเซชันต่อคุณภาพถั่วเหลืองด้านต่างๆ ซึ่งจะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้ง ดังนี้ อุณหภูมิ น้ำแช่ เวลาเทมเปอร์ อุณหภูมิของอากาศตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลือง และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ที่เหมาะสมเพื่อให้คุณภาพของถั่วเหลืองด้านต่างๆ อันได้แก่ เอนไซม์ยูรีเอส ปริมาณโปรตีน และความชื้นสุดท้ายของถั่วเหลือง

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบวงวด โดยใช้ตัวกลางที่เป็นอากาศร้อน โคอะแกรมของอุปกรณ์ชุดนี้ได้แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงโคอะแกรมของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบวงวด

ซึ่งส่วนประกอบหลัก ๆ ประกอบด้วย ห้องอบแห้งรูปทรงกระบอกที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร สูง 140 เซนติเมตร มีตัวให้ความร้อนไฟฟ้าที่ควบคุมแยกจากกันจำนวน 3 ตัว ตัวละ 3 kW และพัดลมแบบเหวี่ยงชนิดใบพัดโค้งหลัง (Backward curve blade centrifugal fan) ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 1.5 kW มีตัวปรับความเร็วรอบเพื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศ ระบบอบแห้งหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วเพื่อลดการสูญเสียความร้อน อากาศบางส่วนที่ผ่านห้องอบแห้งแล้วจะถูกนำกลับมาผสมกับอากาศใหม่ที่เข้ามา และทำให้อากาศถึงอุณหภูมิที่ต้องการเพื่อใช้ในการอบแห้งต่อไป โดยควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบ PID Controller ความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$

วิธีการทดลอง

การทดลองแช่น้ำเมล็ดถั่วเหลืองจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกแช่น้ำโดยไม่มีการเทมเปอร์ริงทำได้โดยนำถั่วเหลืองมาแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 และ 60°C ให้ได้ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 19.5% d.b. เมื่อถึงเวลาตามที่กำหนดให้นำถั่วเหลืองมากำจัดน้ำที่บริเวณผิวออกจากรั้วนำไปอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิ 135 และ 150°C โดยใช้ความเร็วอากาศ 2.6 เมตรต่อวินาที และอากาศหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ 80% สำหรับส่วนที่เหลือจะนำไปเทมเปอร์ริงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

โดยจะเก็บไว้ในขวดแก้วที่ปิดสนิทที่อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิน้ำที่ใช้แช่ก่อนจะนำไปอบแห้ง การเตรียมถั่วเหลืองที่มีความชื้น 19.5% d.b. สม่่าเสมอทั้งเมล็ดทำได้โดยคำนวณปริมาณน้ำที่คิดเติมเข้าไปในถั่วเหลืองแห้งที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 13.5% d.b. ทำการพรมน้ำทั้งหมดลงในเมล็ดถั่วเหลือง จากนั้นนำไปเก็บไว้ในถังที่ปิดสนิท เก็บไว้ที่ห้องเย็นที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 4°C ในช่วงประมาณ 3-4 วันแรก นำถั่วเหลืองออกมาตากให้ความชื้นกระจายตัว แล้วนำกลับไปเก็บดังเดิมจนครบ 7 วัน และต้องปล่อยให้ถั่วเหลืองมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อมก่อนทำการอบแห้ง นำตัวอย่างถั่วเหลืองที่ได้จากการอบแห้งไปวิเคราะห์คุณภาพด้านต่าง ๆ สำหรับการหาความชื้นของถั่วเหลืองจะเก็บตัวอย่างครั้งละประมาณ 50 กรัม ไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (AOAC 1995) การวัดอุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกผล (รุ่น C8510 ช่วงวัดอุณหภูมิ -100 ถึง 1300°C ความละเอียด $\pm 0.2\%$) และการวัดความเร็วลมใช้ Hot-wire anemometer มีความละเอียด $\pm 0.1 \text{ m/s}$

การตรวจสอบคุณภาพถั่วเหลือง

1. ค่าการละลายของโปรตีน (Protein solubility) (Cheong 1997; AOCS 1999)

ค่าการละลายของโปรตีน (Protein solubility) คือ ร้อยละของปริมาณโปรตีนในถั่วเหลืองที่ละลายในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.2% ค่อบริมาณโปรตีนที่มีอยู่ในถั่วเหลืองทั้งหมด โดยการหาค่าการละลายของโปรตีนจะแบ่งเป็น 2 ส่วนสามารถหาได้ดังนี้ ส่วนแรกหาปริมาณโปรตีนในถั่วเหลืองที่ละลายในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำได้โดยชั่งตัวอย่างถั่วเหลืองบดละเอียด 0.5 กรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ใส่ในขวดชมพูเคม สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.2% ลงไป 75 มิลลิลิตร นำไปปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที กรองเก็บส่วนที่เป็นสารละลายใสด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 บีบอัดสารละลายใส 15 มิลลิลิตร (คือน้ำหนักตัวอย่างในการคำนวณหาปริมาณโปรตีนเป็น 1 ใน 5 ของน้ำหนักที่ชั่งได้) ใส่ลงในขวด Kjeldahl ที่แห้ง ส่วนที่สองหาปริมาณโปรตีนที่มีอยู่ในถั่วเหลืองทั้งหมด ทำได้โดยชั่งถั่วเหลืองประมาณ 0.1 กรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ใส่ลงในขวด Kjeldahl ที่แห้ง จากนั้นเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) 10 กรัม คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) 1 กรัม และกรดซัลฟูริกเข้มข้น 7 มิลลิลิตร ลงในขวด Kjeldahl ที่ใส่ตัวอย่างเตรียมไว้ทุกขวด และขวดที่ไม่ใส่ตัวอย่างอีกหนึ่งขวดเพื่อทำแบลนด์ นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 385 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้สารละลายสีสีเขียว รอให้สารเย็นตัวทำการกลั่นสารละลายลงในสารละลายกรดบอริกเข้มข้น 4% W/V 25 มิลลิลิตร ที่เติมอินดิเคเตอร์ผสมระหว่าง Methyl Red และ Methylene Blue จะเกิดการเปลี่ยนสีของสารจากสีม่วงเป็นสีเขียว และนำสารละลายที่ได้ไปไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน โดยการหาปริมาณโปรตีนในถั่วเหลืองที่ละลายในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.2% และปริมาณโปรตีนที่มีอยู่ในถั่วเหลืองทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\% \text{โปรตีน} = \frac{8B(x - y)}{A} \quad (1)$$

เมื่อ	A	คือ	น้ำหนักของถั่วเหลืองตัวอย่าง (กรัม)
	B	คือ	ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรต (โมลต่อลิตร)
	x	คือ	ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
	y	คือ	ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตแบลนด์ (มิลลิลิตร)

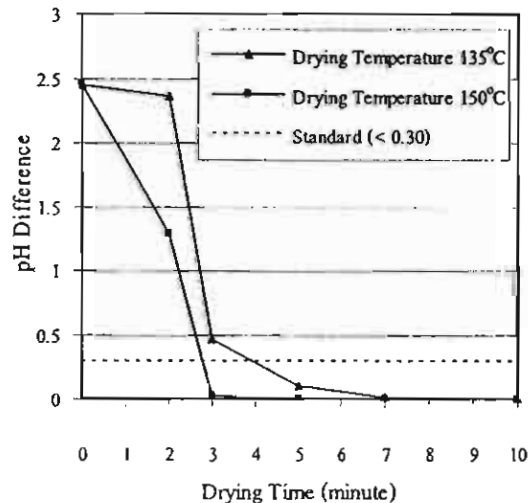
2. เอนไซม์ยูรีเอสที่มีในถั่วเหลือง (AOAC 1965)

ในการวัด Urease activity สามารถทำได้โดยนำถั่วเหลืองมาทำปฏิกิริยากับสารละลายบัฟเฟอร์ยูเรีย (มีค่าเป็นความเป็นกรดค่าเท่ากับ 7) ซึ่งทำให้เกิดแอมโมเนีย ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดค่า (ΔpH) โดยแอมโมเนียที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสที่มีในถั่วเหลือง วิธีการทดลองสามารถทำได้ดังนี้ เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร โดยใช้โคโทแทสเซียมไฮโดรฟอสเฟต (K_2HPO_4) 4.355 กรัม และโพแทสเซียมไดไฮโดรฟอสเฟต (KH_2PO_4) 3.403 กรัม ละลายในน้ำกลั่น จากนั้นผสมสารละลายทั้งสองเข้าด้วยกันปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรดค่าให้เป็น 7 แบ่งบัฟเฟอร์ฟอสเฟต 500 มิลลิลิตร นำยูเรีย 15 กรัม มาละลายเติมสารละลายไทลูอิน 5 มิลลิลิตร และปรับค่าความเป็นกรดค่าให้เป็น 7 จากนั้นชั่งถั่วเหลืองบดละเอียด 0.2 กรัม ลงในหลอดทดลองตัวอย่างละ 2 หลอด หลอดแรกเติมสารละลายบัฟเฟอร์ยูเรีย และหลอดที่สองเติมสารบัฟเฟอร์-ฟอสเฟต 10 มิลลิลิตร ความคุมอุณหภูมิไว้ที่ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้ Water Bath เขย่าหลอดทดลองทั้งสองทุก ๆ 5 นาที จนครบ 30 นาที แล้วจึงนำมาวัดค่าความเป็นกรดค่าของสารละลายโดยใช้ pH Meter โดยค่าความแตกต่างของค่าความเป็นกรดค่าที่ยอมรับอยู่ในช่วง 0.02-0.30 สำหรับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ (Ward 1996)

ผลการทดลองและวิจารณ์

การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส

1. อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อน



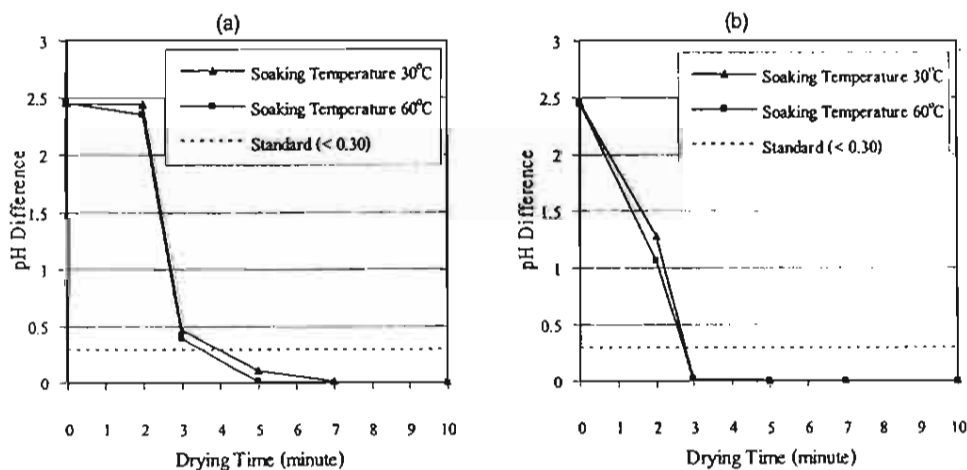
รูปที่ 2 การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลือง ที่ผ่านการแช่น้ำอุณหภูมิ 30°C

โดยไม่เทมเปอร์ และอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 135 และ 150°C

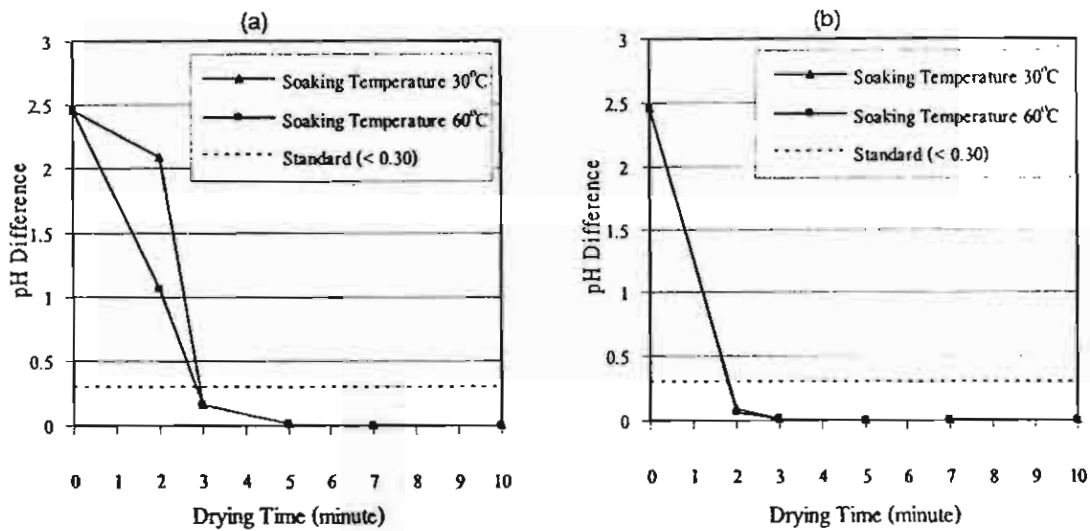
รูปที่ 2 แสดงการเสื่อมสลายของเอนไซม์ซูรีเอสในถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำอุณหภูมิ 30°C โดยไม่มีการเทมเปอร์ และอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 135 และ 150°C พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงสามารถทำให้เอนไซม์ซูรีเอสเสื่อมสลายจนถึงเกณฑ์ที่ยอมรับได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ โดยถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 135°C จะใช้เวลาอบแห้งประมาณ 5 นาที และที่อุณหภูมิอบแห้ง 150°C จะใช้เวลาอบแห้งประมาณ 3 นาที จึงจะทำให้เอนไซม์ซูรีเอสเสื่อมสลายจนถึงเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงทำให้เมล็ดถั่วเหลืองได้รับความร้อนมากขึ้น และมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้อัตราการเสื่อมสลายของเอนไซม์ซูรีเอสในเมล็ดถั่วเหลืองเร็วขึ้น ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจึงมีผลต่อการลดลงของเอนไซม์ซูรีเอสโดยตรง

2. อิทธิพลของอุณหภูมิน้ำแช่

รูปที่ 3a และ 3b แสดงการเสื่อมสลายของเอนไซม์ซูรีเอส ในถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 และ 60°C โดยไม่มีการเทมเปอร์ อบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 135 และ 150°C ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิน้ำแช่ที่ใช้เมล็ดถั่วเหลืองมีผลต่อการลดลงของเอนไซม์ซูรีเอสเล็กน้อย เพราะเวลาในการแช่น้ำถั่วเหลืองเพื่อให้ได้ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 19.5% d.b. ที่ต้องการนั้นสั้นมาก ประมาณ 1 นาที ทำให้ความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดไม่แตกต่างกันการเสื่อมสลายของเอนไซม์ซูรีเอสจึงใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 4a และ 4b แสดงการเสื่อมสลายของเอนไซม์ซูรีเอส ในถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 และ 60°C โดยมีการ เทมเปอร์ 1 ชั่วโมง อบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 135 และ 150°C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่เวลาอบแห้ง 2 นาทีที่อุณหภูมิอบแห้ง 135°C การเสื่อมสลายของเอนไซม์ซูรีเอสที่อุณหภูมิน้ำแช่ 60°C จะมากกว่าที่อุณหภูมิน้ำแช่ 30°C เป็นผลเนื่องมาจากการเทมเปอร์มากกว่าอุณหภูมิน้ำแช่ เพราะการเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะทำให้เมล็ดถั่วเหลืองมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการเสื่อมสลายของเอนไซม์ซูรีเอสเร็วขึ้น และที่เวลาอบแห้ง 2 นาที อุณหภูมิอบแห้ง 150°C การเสื่อมสลายของเอนไซม์ซูรีเอสที่อุณหภูมิน้ำแช่ 30 และ 60°C จะมีอัตราการเสื่อมสลายของเอนไซม์ซูรีเอสที่ใกล้เคียงกัน เป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิต่ำที่ใช้ในการอบแห้งที่สูง ทำให้เมล็ดถั่วเหลืองสามารถรับความร้อนได้มากกว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 135°C จึงมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเร็วกว่า และความชื้นในเมล็ดถั่วเหลืองที่เป็นตัวช่วยเร่งการเสื่อมสลายของเอนไซม์ซูรีเอส ส่งผลให้อัตราการเสื่อมสลายของเอนไซม์ซูรีเอสเร็วขึ้น



รูปที่ 3 การเสื่อมสลายของเอนไซม์ซูรีเอสในถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 และ 60°C โดยไม่เทมเปอร์ และอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 135 และ 150°C

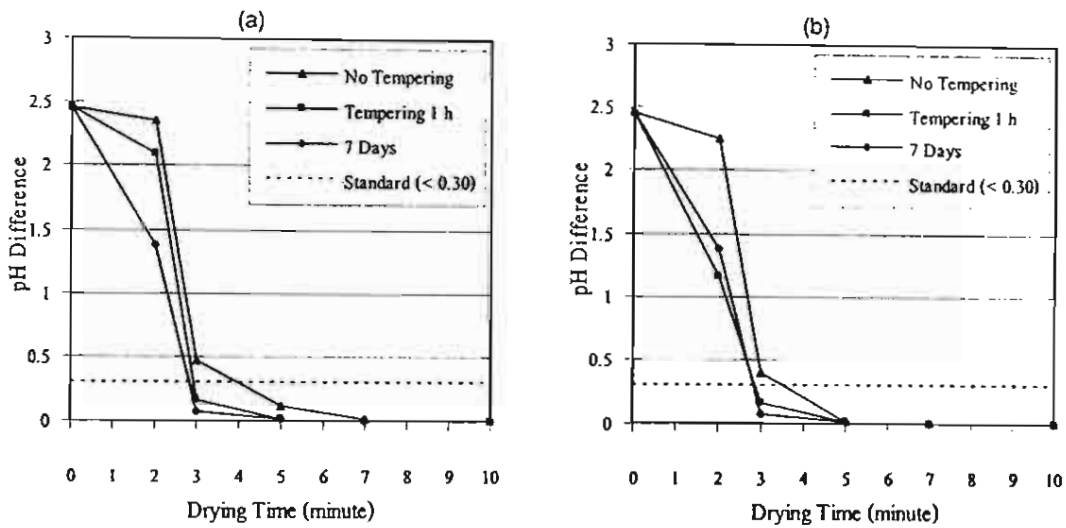


รูปที่ 4 การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 และ 60°C โดยเทมเปอร์เจอร์ไว้ 1 ชั่วโมง และอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 135 และ 150°C

3. อิทธิพลของระยะเวลาเทมเปอร์เจอร์

จากรูปที่ 5a และ 5b แสดงการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำอุณหภูมิ 30 และ 60°C ที่ระยะเวลาเทมเปอร์เจอร์ต่างๆ และอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 135°C พบว่าถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำและเทมเปอร์เจอร์ 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปอบแห้งจะสามารถทำให้เอนไซม์ยูรีเอสเสื่อมสลายได้เร็วกว่าถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำ และ ไม่มีการเทมเปอร์เจอร์ ทั้งที่อุณหภูมิแช่น้ำ 30 และ 60°C เพราะจากการเทมเปอร์เจอร์จะทำให้ความชื้นที่อยู่บริเวณผิวเมล็ดถั่วเหลืองแพร่เข้าไปภายในเมล็ดถั่วเหลือง โดยความชื้นที่แพร่เข้าไปจะช่วยเร่งให้เอนไซม์ยูรีเอสเกิดการเสื่อมสลายได้เร็วขึ้น ส่งผลให้อัตราการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสมีค่าสูงขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้น 19.52% d.b. สม่่าเสมอทั้งเมล็ด จะมีอัตราการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสที่สูงกว่าการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30°C และเทมเปอร์เจอร์ที่ 1 ชั่วโมง เพราะระยะเวลาเทมเปอร์เจอร์ที่ 1 ชั่วโมง ยังไม่สามารถทำให้ความชื้นแพร่เข้าไปภายในเมล็ดถั่วเหลืองได้สม่่าเสมอทั้งเมล็ด โดยการอบแห้งที่เวลา 2 นาที ที่อุณหภูมิแช่น้ำ 60°C และเทมเปอร์เจอร์ที่ 1 ชั่วโมง อัตราการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสจะเร็วกว่าถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้น 19.52% d.b. สม่่าเสมอทั้งเมล็ด เนื่องจากการเทมเปอร์เจอร์ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้เมล็ดถั่วเหลืองมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นก่อนที่จะนำไปอบแห้ง

โดยผลการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 135°C ถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำและเทมเปอร์เจอร์ไว้ 1 ชั่วโมง จะใช้เวลาอบแห้งประมาณ 3 นาที และถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำโดยไม่มีการเทมเปอร์เจอร์จะใช้เวลาอบแห้งประมาณ 5 นาที ส่วนที่อุณหภูมิอบแห้ง 150°C ถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำและเทมเปอร์เจอร์ไว้ 1 ชั่วโมง ใช้เวลาอบแห้งประมาณ 2 นาที และถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำโดยไม่มีการเทมเปอร์เจอร์จะใช้เวลาอบแห้งประมาณ 3 นาที จึงจะทำให้เอนไซม์ยูรีเอสเสื่อมสลายจนถึงเกณฑ์ที่ยอมรับได้



รูปที่ 5 การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 และ 60°C ที่ระยะเวลาเทมเปอร์ิงต่างๆ อบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 135°C

ค่าการละลายของโปรตีน (Protein solubility)

จากการทดลองนำถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่มีปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสที่เวลาต่างๆ จนกระทั่งถึงเวลาที่มีปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสผ่านเกณฑ์ มาวิเคราะห์การละลายของโปรตีน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 โดยถั่วเหลืองที่มีคุณภาพดีควรมีร้อยละของการละลายของโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 73-85 (Ward 1996)

จากตารางที่ 1 พบว่าถั่วเหลืองดิบที่ยังไม่ผ่านการอบแห้ง มีค่าการละลายของโปรตีนประมาณร้อยละ 95 สำหรับถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งพบว่ามีการละลายของโปรตีนลดลง เนื่องจากความร้อนที่ได้รับนานขึ้นทำให้อุณหภูมิที่เมล็ดถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น จึงเกิดการฟอร์มตัวเป็นกลุ่มโปรตีนขนาดใหญ่ และจะตกตะกอนเมื่อนำมาละลายน้ำ (Phillips and Finley 1989) ซึ่งโปรตีนลักษณะนี้ เมื่อบริโภคเข้าไปทำให้ การย่อยโปรตีนนำไปใช้ได้ยาก

จากการทดลองพบว่า ถั่วเหลืองแห้งที่มีความชื้นเริ่มต้น 13.20% d.b. อบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C จะมีค่าการละลายของโปรตีนมากกว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 135°C แต่เมื่อนำเมล็ดถั่วเหลืองไปเพิ่มความชื้นโดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 และ 60°C และอบแห้งที่อุณหภูมิ 135°C ทั้งกรณีที่มีการเทมเปอร์ิง และไม่มีการเทมเปอร์ิง จะทำให้ค่าการละลายของโปรตีนสูงขึ้นใกล้เคียงกับถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้น 13.20% d.b. ที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 150°C อย่างไรก็ตามในกรณีที่ถั่วเหลืองมีความชื้นเริ่มต้น 19.52% d.b. สมมติเสมอทั้งเมล็ด และถั่วเหลืองที่แช่น้ำอุณหภูมิ 30°C และมีการ เทมเปอร์ิงไว้ 1 ชั่วโมง จะให้ค่าการละลายของโปรตีนที่ได้สูงกว่ากรณีอื่น ซึ่งในการเทมเปอร์ิงอาจไม่มีความจำเป็นแต่จะต้องใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นเป็น 150°C ก็จะทำให้ได้ค่าการละลายของโปรตีนที่สูงกว่าร้อยละ 80 ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 1 ค่าการละลายของโปรตีนของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ

อุณหภูมิ อบแห้ง (°C)	อุณหภูมิ น้ำแช่ (°C)	ความชื้น เริ่มต้น (%d.b.)	เวลาในการ เทมเปอร์ริง	เวลาอบแห้ง (นาท)	ความชื้นหลัง การอบแห้ง (%d.b.)	pH	ค่าการละลาย ของโปรตีน (%)
ถั่วเหลืองดิบ						2.46	95.31±0.39
135	30	20.47	1 h	3	13.57	0.16	85.41 ^a ±0.29
		20.15	No	5	9.91	0.11	79.56 ^{bc} ±0.30
	60	20.89	1 h	5	13.14	0.01	78.59 ^b ±0.34
		20.66	No	5	10.98	0.02	79.89 ^{cd} ±0.07
	-	19.52*	-	5	12.85	0.01	82.37 ^c ±0.08
		13.20*	-	5	9.26	0.05	71.54 ^a ±0.43
150	30	20.47	1 h	3	12.94	0.02	80.31 ^d ±0.35
		20.15	No	3	10.86	0.03	83.86 ^f ±0.39
	60	20.89	1 h	3	14.36	0.01	79.75 ^{cd} ±0.24
		20.66	No	3	11.16	0.01	83.69 ^f ±0.08
	-	19.52*	-	3	13.63	0.01	78.78 ^{bc} ±0.54
		13.20*	-	2	10.70	0.13	80.15 ^d ±0.53

*หมายเหตุ ถั่วเหลืองที่มีความชื้นสม่ำเสมอทั้งเมล็ด

อักษรกำกับบนเหมือนกันในคอลัมน์ หมายถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาในการเทมเปอร์ริง และอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้งจะมีอิทธิพลต่อการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสมากกว่าอุณหภูมิน้ำที่ใช้แช่เมล็ดถั่วเหลือง โดยเมื่อใช้ระยะเวลาในการเทมเปอร์ริงและอุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นจะทำให้เอนไซม์ยูรีเอสเสื่อมสลายเร็วขึ้น สำหรับค่าการละลายของโปรตีนพบว่า เมล็ดถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการแช่น้ำ และการเทมเปอร์ริง เมื่อนำมาอบแห้งด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม จะได้ค่าการละลายของโปรตีนที่ดีกว่าเมล็ดถั่วเหลืองแห้งที่มีความชื้นเริ่มต้น 13.20%d.b. และอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C

กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้งบในการสนับสนุนในงานวิจัยนี้

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 "วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ระดับโลก"

30-31 มีนาคม 2548 ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ กรุงเทพฯ

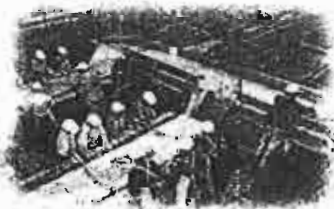
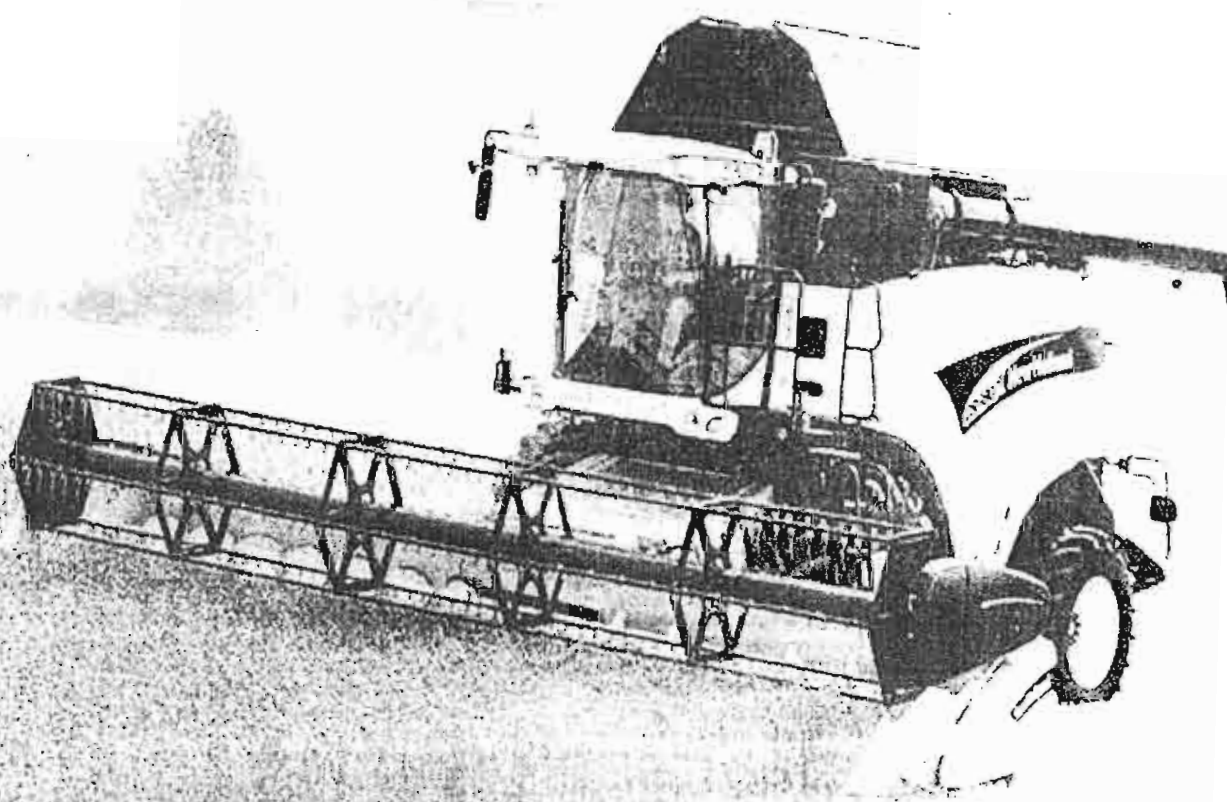
เอกสารอ้างอิง

- Albrecht, W.J., Mustakas, G.C. and McGhee, J.E. 1966. Rate Studies on Atmospheric Steaming and Immersion Cooking of Soybeans. *Cereal Chemistry*. 43:400-407.
- American Oil Chemists' Society (AOCS). 1999. Method BA 10-65. Official Methods and Recommended Practices of the AOCS - 5th edition. Champaign, Illinois.
- Association of Official Agricultural Chemists Method (AOAC Method). 1965. Method 22-90. Official Methods of Analysis. Washington, D.C.
- Association of Official Agricultural Chemists Method (AOAC Method). 1955. Official Methods of Analysis, 16th edition. Washington, D.C.
- Cheong, Y.L.. 1997. Fullfat Soybean Meal Production and Utilization. *Proceeding of the Fifth Regional ASA Feed Technology and Nutrition Workshop*. 25-29 may 1997. The Westin Chiangmai, 13 p.
- Lyman, R.C., Olds, B.A. and Green, G.M. 1974. Chymotrypsinogen in the Intestine of Rats Fed Soybean Trypsin Inhibitor and Its Inability to Suppress Pancreatic Enzyme Secretions. *Journal of Nutrition*. 104(1):105-110.
- McNaughton, J.L., Reece, F.N. and Deaton, J.W. 1981. Relationships Between Color, Trypsin Inhibitor Contents and Urease Index of Soybean Meal and Effects on broiler Performance. *Poultry Science*. 60:393-400.
- Osella, C.A., Gordo, N.A., Gonzalez, R.J., Tosi, E. and Re, E. 1997. Soybean Heat-treated Using a Fluidized Bed. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*. 30:676-680.
- Phillips, R.D. and Finley, J.W. 1989. Protein Quality and the Effect of Processing, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel: 1-7.
- Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Wetchacama, S. and Wutiwiwatchai, W. 2001. Fluidised Bed Drying of Soybeans. *Journal of Stored Products Research*. 37:133-151.
- Ward, N.E. 1996. Soybean Meal Quality for Animal Feeding. *Proceedings of the Second International Soybean Processing and Utilization Conference*. 8-13 January:454-465.



วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก

Toward Kitchen of the World by Agricultural Engineering



MTEC

การประชุมวิชาการครั้งที่ 6 ประจำปี 2548

สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

30-31 มีนาคม 2548 คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการอบแห้งและคุณภาพของกระเทียมกลีบ

สุทธิศักดิ์ แก้วนภ¹ สมเกียรติ ปรัชญาวารากร^{2*} อติศักดิ์ นาดกรณกุล³ และสมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการอบแห้งและคุณภาพของกระเทียมกลีบปอกเปลือกพันธุ์เชิงใหม่ โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 80 และ 90°C และความเร็วของอากาศร้อน 1.7 m/s ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 190-210% d.b. และ 5-7% d.b. คำนวณค่าดัชนี ผลการทดลอง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความชื้นของกระเทียมเป็นแบบอัตราการอบแห้งลดลงแบ่งได้เป็น 2 ช่วง โดยทั้งสองช่วงนี้จะถูกแบ่งด้วยความชื้นวิกฤติและอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของทั้งสองช่วงด้วยสมการการแพร่ของน้ำในเนื้อกระเทียม ซึ่งสัมพันธ์กับการแพร่ของกระเทียมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้ การหดตัวน้อยลง การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมสูงขึ้น และอัตราการลดลงของวิตามินซี น้ำมันหอมระเหย และ Pyruvic acid เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

¹นักศึกษา ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ³ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ ⁴รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

*ผู้รับผิดชอบบทความ โทร: 0-2470-9220-30 ต่อ 206; โทรสาร: 0-2428-3534; อีเมล: Somkiat.Pra@kmutt.ac.th

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 "วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก"

30-31 มีนาคม 2548 ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ กรุงเทพฯ

EFFECTS OF TEMPERATURE ON DRYING CHARACTERISTICS AND QUALITY OF GARLIC CLOVE

Suttisak Kaewnok¹, Somkiat Prachayawarakorn^{2*}, Adisak Nathakaranakule³ and Somchart Soponronnarit⁴

ABSTRACT

This research is a study of garlic peel cloves drying using hot air. The influences of temperature on drying kinetic and product qualities were carried out at the drying temperatures of 70, 80, and 90°C and air velocity of 1.7 m/s. The initial and final moisture contents were in range of 190-210 and 5-7% d.b. respectively. The experimental results showed that moisture decrease of garlic peel clove could be divided into two falling rate periods. The two falling rate periods were separated by the critical moisture content and their moisture changes could be described by moisture diffusion equation. Diffusion coefficients of garlic peel cloves were increased with increase in temperature. Furthermore, it was found that higher temperature drying provided the product with lower degree of shrinkage, higher total difference color, and faster decreasing rates of vitamin C, volatile oil, and pyruvic acid than lower temperature drying.

KEYWORDS: Diffusion, Garlic, Vitamin C, Volatile oil

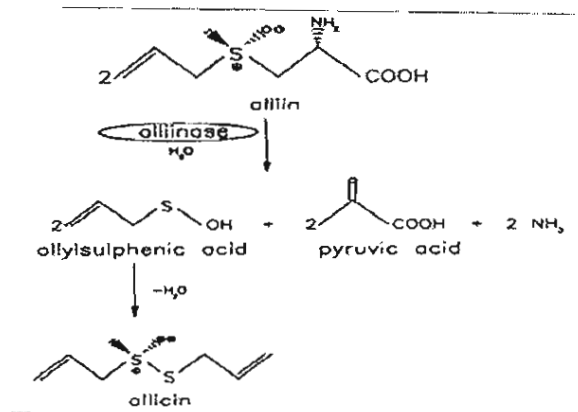
¹Graduate Student, ³Assistant Professor, ⁴Professor, School of Energy and Materials, ²Associate Professor, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

*Corresponding author. Tel.: 0-2470-9220-30 Ext. 206; Fax: 0-2428-3534; E-mail address: Somkiat.Pra@kmutt.ac.th

บทนำ

กระเทียมจัดเป็นพืชเศรษฐกิจพืชหลักของประเทศ ในการปรุงอาหารชาวไทยใช้กระเทียมเป็นเครื่องปรุงรส ในอาหารเกือบทุกชนิด เพื่อช่วยให้อาหารนั้นมีรสชาติดีขึ้น และจากการค้นคว้าวิจัยทางวิทยาศาสตร์การแพทย์พบว่า กระเทียม ยังเป็นพืชสมุนไพรที่ใช้เป็นยารักษาโรคได้หลายชนิดนอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องสำอาง กระเทียมจึง จัดว่ามีบทบาทในสังคมไทยมาก ในประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกกระเทียมประมาณ 150,000-190,000 ไร่ ในทุกๆ ปีนอกจากจะมีการส่งออกกระเทียมสดแช่เย็นแล้วยังมีการส่งออกกระเทียมแห้งเป็นผง และกระเทียมแห้งไม่เป็นผงอีกด้วย

กระเทียมมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า (*Allium Sativum* L.) ได้ถูกใช้เป็นส่วนผสมอาหารมาตั้งแต่สมัยโบราณ ทั้งยังใช้เป็นยารักษาโรคต่างๆ ได้ เช่น โรคเรื้อรังในกระเพาะอาหาร และถ้าใส่ใหญ่ อหิวาตกโรค ฯลฯ ได้มีความพยายามที่จะสกัดเอาสารที่เป็นส่วนสำคัญ (Active Compound) ออกมา ค่อนข้างพบว่าส่วนประกอบสำคัญของกระเทียมที่มีผลก็คือ Allicin, Allylsulfinyl, Allylsulfide ($\text{CH}_2=\text{CH}.\text{CH}_2-\text{SO}.\text{S}.\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$) สาร Allicin จะเป็นตัวป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อโรคที่เป็นสาเหตุ ของการเกิดโรคเรื้อรังดังกล่าว อย่างไรก็ตามความสามารถในการป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อโรคของ Allicin นี้จะมีค่าเพียงประมาณหนึ่งในร้อยของเพนิซิลลิน (Penicillin) และการทำ Allicin ให้บริสุทธิ์จะทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพของตัวมันขึ้น ซึ่งเป็นตัวชี้ให้เห็นว่าทำไมไม่มีการเคี้ยวมันลงในถ้วย เป็นที่น่าสนใจว่ากลิ่นและรสชาติของกระเทียมเป็นสมบัติประจำตัวของ Allicin ซึ่งสารประกอบนี้จะไม่สามารถพบได้ในกระเทียมที่ยังไม่ได้การทุบ (Intact garlic) ซึ่งเป็นความจริงที่ว่าเราจะได้กลิ่น (Odour) ค่อนข้างเมื่อเราทำการทุบกระเทียม เพราะกระเทียมประกอบไปด้วย กรดอะมิโน (Complex amino acid) , Alliin (S-(2-propenyl)-L-cysteine sulphoxide) ซึ่งมีอยู่ 1.4%ของน้ำหนักกระเทียมสด เมื่อกระเทียม ถูกบดกระแทกเอ็นไซม์ คือ Allinase เข้าย่อยสลาย Alliin ทำให้มันแตกออกเป็น Allicin, Pyruvic acid และแอมโมเนีย ทำให้กลิ่นของมันจะเริ่มเกิดขึ้น ดังรูปที่ 1 เนื่องจากความไม่เสถียรภาพของ Allicin ถ้าทำการแยกโดยการกลั่นด้วยไอน้ำ ยกเว้นที่ความดันลดลงต่ำๆ การกลั่นด้วยไอน้ำที่สภาวะปกติจะทำให้ตัวมันเปลี่ยนแปลง (Decompose) และเกิดเป็นสาร Diallyl Disulfide และสารประกอบ Sulfides อื่น ๆ ทำให้น้ำมันหอมระเหยที่ได้จากกระเทียมมีกลิ่นฉุนรุนแรงมากขึ้น



รูปที่ 1 การเกิด Allylsulphenic acid, pyruvic acid และแอมโมเนียในกระเทียม

ณรงค์ศักดิ์ แก้วนิล [1] การอบแห้งกระเทียมกลีบแบบปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือกด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C แล้ววิเคราะห์คุณภาพด้านต่างๆ เช่น ปริมาณวิตามินซี น้ำมันหอมระเหย การหาคั่วและการเปลี่ยนแปลงสีของกระเทียม ซึ่งผลการทดลองอบแห้ง พบว่า ที่อุณหภูมิ 70°C ของกระเทียมกลีบปอกเปลือก คุณภาพของกระเทียมให้ผลที่ดีกว่าการอบแห้งกระเทียมกลีบแบบไม่ปอกเปลือก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาการอบแห้งกระเทียมกลีบแบบปอกเปลือกและอุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณภาพของกระเทียมและหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งกระเทียม เพื่อประโยชน์ในการใช้เป็นแนวทางในการอบแห้งเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้ง

ในการอบแห้งกระเทียมกลีบปอกเปลือกใช้เครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อน ซึ่งประกอบด้วย ขดลวดทำความร้อนขนาด 1000 วัตต์ พัดลมหลักเป็นแบบชนิดแรงเหวี่ยงใบโค้งหน้าโซลิดโรเตอร์ขนาด 746 วัตต์ ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ปรับความเร็วของอากาศร้อนอยู่ที่ 1.7 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70, 80 และ 90°C ซึ่งควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิมีความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ และวัดอุณหภูมิของอากาศและเนื้อกระเทียมโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K บันทึกข้อมูลด้วย data logger มีความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$

วิธีการหาปริมาณสารหอมระเหย

การวิเคราะห์สารประกอบน้ำมันหอมระเหยที่มีอยู่ในกระเทียมที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ตามแบบของ Shankaranarayana และคณะ [4]

วิธีการหาปริมาณ Pyruvic acid

ในการหาปริมาณ Pyruvic acid ที่เกิดจากทำปฏิกิริยาของเอ็นไซม์ในกระเทียมสามารถหาจากค่าแตกต่างของสองวิธี ตามวิธีการของ Freeman and Mossadeghi [2] และ Schwimmer and Weston [3]

วิธีการหาปริมาณวิตามินซี

การวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินซีที่มีอยู่ในกระเทียมสดและตามช่วงเวลาต่างๆ ของการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามแบบมาตรฐาน AOAC Official Method [5] ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธี Titrimetric Method

สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเนื้อกระเทียม

กระเทียมมีลักษณะรูปทรงไม่แน่นอน วิธีการหาค่าการอบแห้งโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำเป็นต้องทราบลักษณะรูปทรงของกระเทียม ดังนั้นจึงสมมุติให้กระเทียมมีลักษณะเป็นทรงกลม เพื่อสามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของกระเทียมได้ งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการลดลงของความชื้นสำหรับกระเทียมแบบปอกเปลือก ซึ่งจากการทดลองพบว่าการลดลงของความชื้นอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเพียงอย่างเดียว โดยในช่วงนี้สามารถแบ่งช่วงอัตราการอบแห้งช่วงลดลงออกเป็นสองช่วงคือช่วงแรก (first falling rate period)

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 "วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก"

30-31 มีนาคม 2548 ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ กรุงเทพฯ

และช่วงที่สอง (second falling rate period) โดยการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรกนั้นการแพร่ของน้ำส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ผิวของวัสดุ โดยอัตราการระเหยของน้ำจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับกลไกการพามวลระหว่างพื้นที่ผิวของกระเทียมกับอากาศที่ใช้ในการอบแห้งกระเทียม สำหรับในช่วงที่สองนั้นการเคลื่อนที่ของน้ำจะถูกควบคุมโดยการแพร่แต่เพียงอย่างเดียวและในกรณีนี้ถือว่าความต้านทานของการถ่ายเทมวลที่ผิวมีค่าน้อยมาก ดังนั้นความชื้นที่ผิวจะเข้าสู่สมดุลกับอากาศแวดล้อมที่ใช้ในการอบแห้ง ในงานวิจัยนี้สมมติว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงทั้งสองช่วงนี้มีค่าคงที่และสามารถอธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำโดยใช้กฎข้อที่สองของ Fick ดังสมการ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \left(\frac{\partial M}{\partial r} \right) \right]$$

เมื่อ M = ความชื้น(%d.b.), D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้น(m^2/h), r = รัศมี(m), t = เวลา(h)

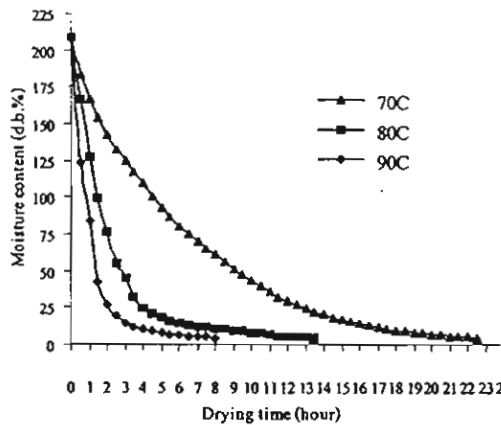
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการอบแห้งกระเทียมในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรกนั้นกระเทียมมีความชื้นค่อนข้างสูงทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำจากผิวของกระเทียมสู่อากาศจึงขึ้นอยู่กับกลไกการพามวลระหว่างน้ำที่ผิวของกระเทียม และความชื้นในอากาศเป็นคว้ต้านทานอีกคว้หนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งนอกเหนือจากความต้านทานภายในเนื้อกระเทียม ดังนั้นเราสามารถคำนวณอัตราการแพร่ของความชื้นได้จากสมการที่เป็นสมการของสภาวะขอบเขตที่บ่งบอกถึงการระเหยของความชื้นที่เป็นผลเนื่องจากการพามวลโดยมีค่าเท่ากับอัตราการแพร่ของความชื้นที่ออกจากวัสดุ ดังสมการ

$$-D \frac{\partial M}{\partial r} \bigg|_{r=R} = k (M_s - M_\infty)$$

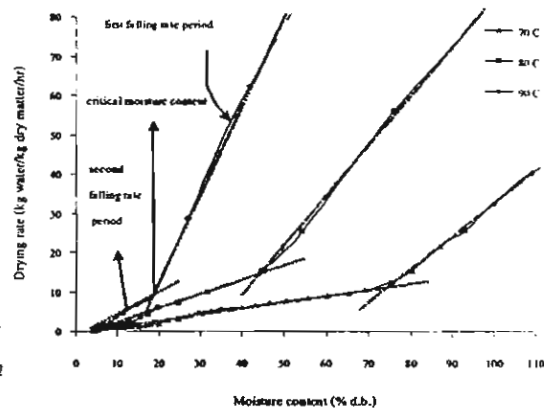
เมื่อ k = ค่าคงที่ของการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรก (เมตรต่อชั่วโมง), M_s = ความชื้นที่ผิวบนสุดของกระเทียม (ร้อยละมาตรฐานแห้ง), M_∞ = ความชื้นสมดุล (ร้อยละมาตรฐานแห้ง) ส่วนในการคำนวณในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่สอง (second falling rate period) ซึ่งในช่วงที่สองนี้เงื่อนไขขอบเขตที่ผิวจะแตกต่างกับช่วงแรก คือ $M(R,t) = M_\infty$

ผลการทดลองและวิจารณ์

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งและคุณภาพต่างๆ ของกระเทียม โดยรายละเอียดของเนื้อหาที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้ ประกอบไปด้วย การเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระเทียมที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90°C โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อกระเทียมกลีบปอกเปลือกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 10.25-11.50 mm. ความชื้นเริ่มต้นของกระเทียมที่นำมาอบแห้งอยู่ที่ 180-208% d.b. กระเทียมที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะเหลือความชื้นอยู่ประมาณ 5% d.b.



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นกระเทียมกลีบ
ปอกเปลือกอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 70, 80 และ 90 °C



รูปที่ 3 แสดงอัตราการอบแห้งของกระเทียมกลีบ
ปอกเปลือกที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 °C

รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระเทียมกลีบปอกเปลือกตามเวลาสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 °C จากรูปที่ 1 ได้พบว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C อัตราการลดลงของความชื้นจะช้ากว่าอุณหภูมิอื่น จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาการอบแห้งที่ 3-4 ชั่วโมงแรก ที่อุณหภูมิอบแห้ง 80 และ 90 °C ความชื้นช่วงนี้จะมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วก่อนที่จะลดลงจนเกือบคงที่ในช่วงที่เหลือ ซึ่งต่างกับที่อุณหภูมิ 70 °C ที่มีอัตราการลดลงช้าๆ อย่างต่อเนื่องและใช้เวลานานกว่าที่ความชื้นจะเริ่มคงที่

รูปที่ 3 แสดงอัตราการอบแห้งของกระเทียมกลีบปอกเปลือก ค่าความชื้นวิกฤติที่แยกนี้จะแบ่งช่วงระหว่างอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรกและช่วงที่สอง เมื่อพิจารณาจากรูปพบว่าอุณหภูมิการอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นวิกฤติที่แยกในระหว่างสองช่วงอัตราการอบแห้ง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงความชื้นวิกฤติที่แยกมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกระเทียมกลีบปอกเปลือก

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Diffusion coefficient m^2/h
70	9.64×10^{-8}
80	2.92×10^{-7}
90	5.56×10^{-7}

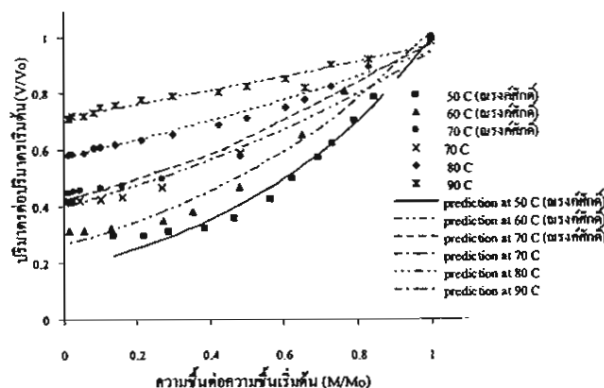
จากตารางที่ 1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในกระเทียมที่อุณหภูมิ 90 °C จะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 80 และ 70 °C แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงความดันไอที่เกิดขึ้นภายในเนื้อกระเทียมจะสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำทำให้อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่าสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

การหดตัวของเนื้อกระเทียมกลีบเปลือก

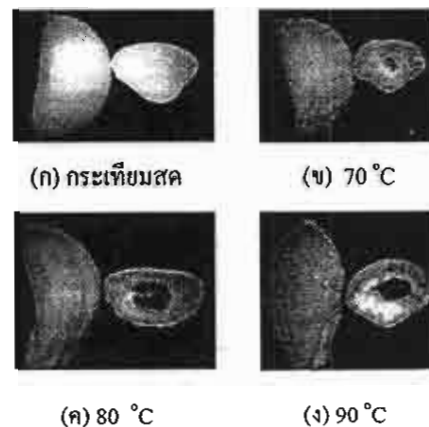
ผลของการหดตัวของเนื้อกระเทียมกลีบเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90°C ปรากฏว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสัดส่วนของการหดตัวของเนื้อกระเทียมจะหดตัวได้น้อยกว่าในกรณีที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่าผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4 สำหรับผลการหดตัวที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C ซึ่งได้รวบรวมผลการทดลองของ ณรงค์ศักดิ์ แก้วนิล [1]

สาเหตุที่ทำให้การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเกิดการหดตัวได้น้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากในช่วงการอบแห้งช่วงแรกการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารที่ผิวของเนื้อนั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ผิวของเนื้อกระเทียมเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ผิวของเนื้อจึงมีการหดตัวน้อยแต่ผิวข้างในเมื่อมีการถ่ายเทมวลสารออกมาทำให้เนื้อกระเทียมหดตัวในลักษณะที่บีบตัวเข้าหาผิวของเนื้อทำให้เกิดเป็นโพรงช่องว่างเกิดขึ้นที่ตรงกลางของเนื้อกระเทียมกลีบดังรูปที่ 5 (ค) และ (ง) ซึ่งต่างจากรูป 5 (ข) ที่แสดงเนื้อกระเทียมที่ผ่านการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 70°C จะสังเกตเห็นว่าการหดตัวเมื่อพิจารณาจากรูปทรงภายนอกจะมีมากกว่า

จากผลการทดลองของการหดตัวของเนื้อกระเทียมกลีบเปลือกพบว่าสัดส่วนการหดตัว (ปริมาตรต่อปริมาตรเริ่มต้น) มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนความชื้น (ความชื้นต่อความชื้นเริ่มต้น) เป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล และอุณหภูมิที่ใช้



รูปที่ 4 แสดงการหดตัวของเนื้อกระเทียมกลีบเปลือกที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน (ผลของ ณรงค์ศักดิ์ แก้วนิล ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70, 80 และ 90 °C



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการหดตัวและการเกิดโพรงตรงกลางของเนื้อกระเทียมกลีบ

ในการอบแห้งเป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการหดตัวของเนื้อกระเทียม การหดตัวของเนื้อกระเทียมกลีบเปลือกที่เกิดจากการอบแห้งด้วยอุณหภูมิคงที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$V_t / V_{in} = a \cdot \exp(-b \cdot (M / M_{in}))$$

เมื่อ V_t = ปริมาตรของกระเทียมที่เวลาใดๆ (m^3), V_{in} = ปริมาตรเริ่มต้นของกระเทียม (m^3), M = ความชื้นของกระเทียม (% d.b.), M_{in} = ความชื้นเริ่มต้นของกระเทียม (% d.b.), a, b = ค่าคงที่ โดยค่าคงที่ a และ b มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังสมการต่อไปนี้

$$a = 684172 \cdot \exp(-4908/T)$$

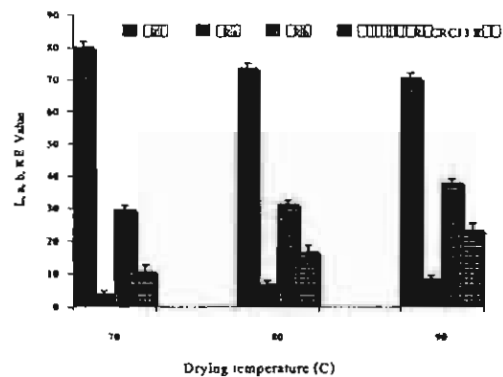
$$R^2 = 0.997 \quad \text{MRS} = 0.0000225$$

$$b = 0.044 \cdot T - 15.96$$

$$R^2 = 0.9845 \quad \text{MRS} = 0.000868$$

เมื่อ T = อุณหภูมิกระเทียม, (K)

การเปลี่ยนแปลงสีของกระเทียม

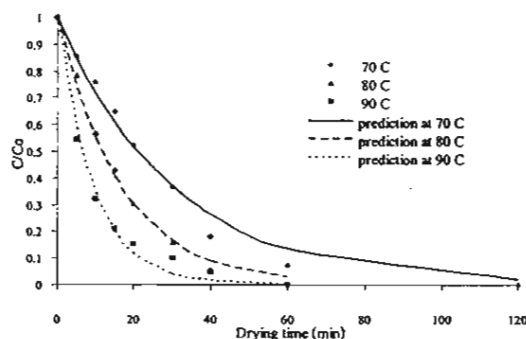


รูปที่ 6 แสดงค่า L, a, b และ ΔE ของกระเทียมกลีบปอกเปลือก (ค่า L, a, b เริ่มต้นมีค่า 83.31, -3.52 และ 22.54)

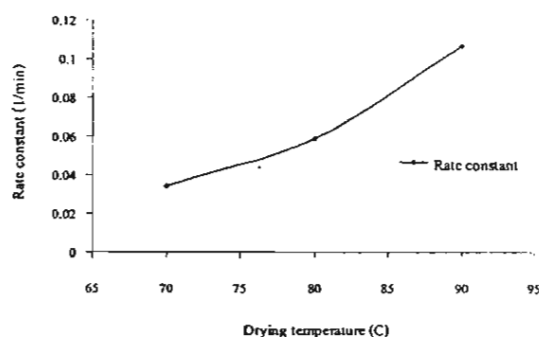
รูปที่ 6 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงสีของกระเทียมกลีบปอกเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90°C ซึ่งพบว่าเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงค่า L จะลดลงมากกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ทั้งนี้สาเหตุหนึ่งอาจเนื่องมาจาก เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดเป็นสีน้ำตาลมากขึ้น ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงค่า L จะลดลงได้มากกว่าเช่นเดียวกันอุณหภูมิในการอบแห้งนั้นมีผลต่อค่า a และค่า b ด้วย คือ เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงการเปลี่ยนแปลงสีแดง (a) และสีเหลือง (b) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

การสูญเสียวิตามินซี (Ascorbic acid)

จากการทดลองอบแห้งกระเทียมกลีบปอกเปลือกพบว่า ปริมาณวิตามินซีนั้นมีอัตราการสูญเสียที่เร็วมาก อันเนื่องมาจากสมบัติทางกายภาพของวิตามินซีที่สูญเสียได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับความร้อนและแสง ผลจากการทดลองยังพบว่า เมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิ 90°C ปริมาณวิตามินซีจะลดลงเร็วกว่า อบแห้งที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C ดังรูปที่ 7 คือ จากปริมาณเริ่มต้นของกระเทียมสดก่อนอบแห้งจะมีประมาณ 20-23 mg/100 g dry matter ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70°C วิตามินซีจะลดลงเหลือน้อยกว่า 1 mg/100 g dry matter ใช้เวลา 2 ชั่วโมง ขณะที่อุณหภูมิอบแห้ง 80 และ 90°C ใช้เวลาอบแห้งแค่ประมาณ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 7 แสดงการสูญเสียวิตามินซีของกระเทียมกลีบปอกเปลือก

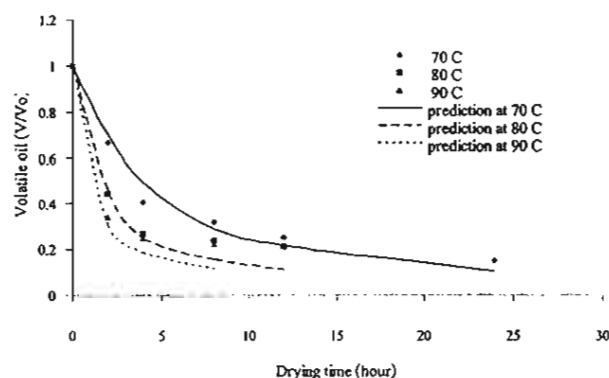


รูปที่ 8 แสดงค่าคงที่ของปฏิกิริยาในการอบแห้งกระเทียมกลีบปอกเปลือก

ใช้ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First order reaction) และสมการของ อาร์เรเนียส มาทำนายการลดลงของวิตามินซีได้ คือ $C/C_0 = \exp \{- [0.032975 \exp(-7297.227/(1/T - (1/(273+70))))] \cdot t\}$, $R^2 = 0.989$, T = อุณหภูมิที่ใช้ออบแห้ง (K)

การสูญเสียสารประกอบน้ำมันหอมระเหย

ผลของการอบแห้งกระเทียมกลีบปอกเปลือกที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90°C เมื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่เวลาต่างๆ ของการอบแห้ง พบว่าปริมาณน้ำมันหอมระเหยเริ่มต้นมีค่าประมาณ 8mg (oil)/g dry matter จากรูปที่ 9 จะเห็นว่า ที่อุณหภูมิอบแห้งทั้งสามอุณหภูมิ เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาอบแห้งเดียวกัน ที่ 70 องศาเซลเซียส อัตราการสูญเสียสารประกอบน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุด รองลงมา คือ 80°C และที่อุณหภูมิ 90°C มีอัตราการสูญเสียสารประกอบน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด แต่เมื่ออบแห้งจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ 5% d.b. ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน คือ มีค่าประมาณ 1.2 – 1.6 mg (oil)/g dry matter

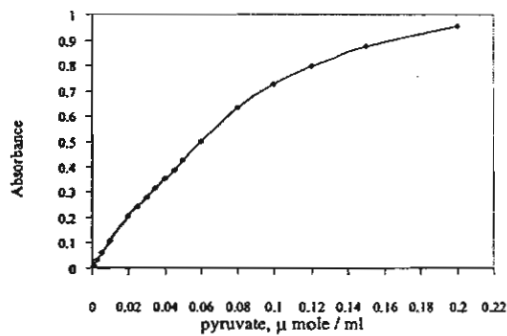


รูปที่ 9 แสดงปริมาณน้ำมันหอมระเหยของกระเทียมกลีบปอกเปลือกอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90°C (ปริมาณเริ่มต้นประมาณ 8 mg (oil)/g dry matter)

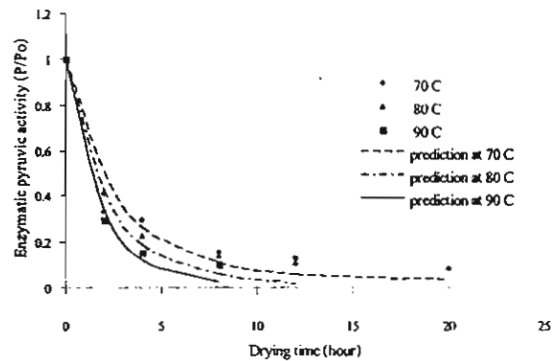
จากจลนศาสตร์ของน้ำมันหอมระเหยเราสามารถอธิบายได้ด้วย ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First order reaction) และสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) โดยค่าคงที่ของการเสื่อมสลายเป็นไปตามสมการของอาร์เรเนียส

$$\text{Volatile oil}(V/V_o) = \exp\{- [838922.2 \exp(-5237.2/(1/T - (1/(273+70))))] \cdot t\}, R^2 = 0.987$$

การสูญเสีย Pyruvic acid



รูปที่ 10 แสดงกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ในการหาความเข้มข้นของ Pyruvic acid



รูปที่ 11 แสดงการเสื่อมสลายของเอนไซม์ Pyruvic acid ของกระเทียมกลีบปอกเปลือก

ในการทดลองจะใช้วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 420 nm โดยค่าดูดกลืนแสงที่วัดได้จะนำมาเปรียบเทียบกับหาความเข้มข้นของ Pyruvic acid ด้วยกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ดังรูปที่ 10 จากผลการทดลองปริมาณ Pyruvic acid ที่เกิดจากเอนไซม์ activity เริ่มต้นของกระเทียมสดมีค่าประมาณ 16-18.5 $\mu\text{mole/g dry matter}$ และปริมาณเริ่มต้นของ Pyruvic acid ที่มีอยู่เดิมในกระเทียมสดมีค่า 3.5-4 $\mu\text{mole/g dry matter}$ ผลการทดลองเมื่อกระเทียมกลีบปอกเปลือกผ่านการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียของเอนไซม์ activity มากกว่าอุณหภูมิ 80 และ 70 °C และเอนไซม์ activity จะมีอัตราการลดลงตามเวลาในการอบแห้ง เมื่อหาผลต่างของการทดลองทั้งสองวิธี ก็จะได้ปริมาณที่สูญเสียไปของ Pyruvic acid ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ ดังรูปที่ 11 จากรูปเห็นได้ว่าเมื่ออบแห้งกระเทียมด้วยอากาศร้อน อุณหภูมิอบแห้งจะมีผลต่อ Pyruvic activity คือ เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 90°C การเสื่อมสลายของเอนไซม์ activity จะมากกว่าที่อุณหภูมิ 80 และ 70°C ทำให้ปริมาณ Pyruvic acid ที่อุณหภูมิ 90°C มีปริมาณน้อยกว่าที่อุณหภูมิอื่น

การลดลงของเอนไซม์ Pyruvic acid สามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังนั้นการหาค่าการลดลงของเอนไซม์ Pyruvic acid ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลานั้นก็สามารถใช้ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และค่าคงที่ของการเสื่อมสลายเป็นไปตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation)

$$\text{Pyruvic acid } (P/P_o) = \exp\{- [0.3383 \exp(-2803.95/(1/T - (1/(273+70))))] \cdot t\}, R^2 = 0.937$$

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองอบแห้งกระเทียมพันธุ์เชียงใหม่ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การอบแห้งกระเทียมมีช่วงของอัตราการอบแห้งลดลง 2 ช่วง
2. ค่าการเปลี่ยนแปลงสีรวมมีค่าสูง กระเทียมมีสีน้ำตาลเหลืองและกลายเป็นสีน้ำตาลเข้มเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูง
3. การสูญเสียปริมาณวิตามินซี น้ำมันหอมระเหย และ Pyruvic acid ของการอบแห้งกระเทียมกลีบเปลือกเปลือกพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้งสูงจะมีอัตราการลดลงเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและสมการของอาร์เรเนียส

คำขอขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

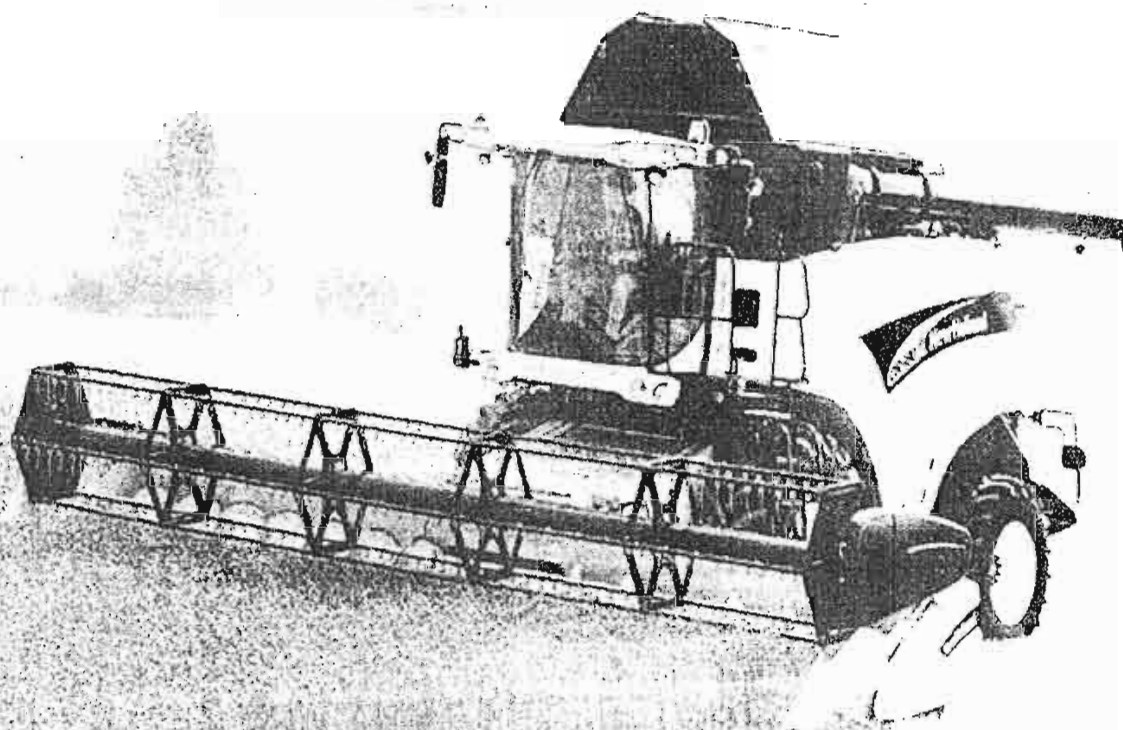
เอกสารอ้างอิง

1. ณรงค์ศักดิ์ แก้วนิล. 2546. วิธีการอบแห้งกระเทียมอย่างเหมาะสม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน. คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 115 น.
2. Freeman, G.G. and Mossadeghi, N. 1971. Influence of sulphate nutrition on the flavour component garlic (*Allium sativum*) and wild onion (*A. vineale*). National Vegetable Research Station. 330-334.
3. Schwimmer, S. and Weston, W.J. 1961. Enzymatic development of pyruvic acid in onion as a measure of pungency. J. Agric. Food Chem. 9: 301-304.
4. Shankanarayana, M.L., Abraham, K.O., Raghavan B. and Natarajan, C.P. 1981. Determination of flavour strength in alliums. Central Food Technological. 3-8.
5. Association of Official Analytical Chemists, 1995. Vitamins and Other Nutrients. Official Method of Analysis of AOAC International. Patricia Cunniff (Ed). AOAC International suite, Virginia 16-18.



วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก

Toward Kitchen of the World by Agricultural Engineering



MTEC

การประชุมวิชาการครั้งที่ 6 ประจำปี 2548

สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

30-31 มีนาคม 2548 คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาการอบแห้งมะพร้าวโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น

ฐานิดย์ เมธิยานนท์¹* เสริมพงษ์ อติเรกรัฐ² ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์³ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์⁴

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาอุณหภูมิการอบแห้งมะพร้าวชุดโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นเปรียบเทียบกับอบแห้งโดยใช้ลมร้อนอย่างเดียว โดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้นเพื่อดูดซับความชื้นของอากาศก่อนนำไปอบแห้งมะพร้าว โดยมีเงื่อนไขการทดลองคือ ใช้มะพร้าวชุดเป็นวัสดุทดลองมีน้ำหนักเริ่มต้น 1,260 g ความชื้นเริ่มต้น 140% d.b. อุณหภูมิอากาศที่เข้าอบแห้ง 50 °C ความเร็วเหนือพัด 0.23 m/s ศึกษาส่วนการนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 0 %, 40 % และ 100 % โดยจะอบแห้งมะพร้าวจนเหลือความชื้นสุดท้าย 10% d.b. ผลการทดลองพบว่า การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นจะให้อัตราการอบแห้งดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว โดยมีค่าในช่วง 112-114 gH₂O/h และพลังงานจำเพาะรวมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 14-19 MJ/kgH₂O สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น ส่วนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนอย่างเดียวจะให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยอยู่ในช่วง 85-114 gH₂O/h และพลังงานจำเพาะรวมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5-8 MJ/kgH₂O นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าห้องอบแห้ง (หากมีค่าสูงกว่า 28% RH) มีผลอย่างมากต่อสีของมะพร้าวที่ผ่านการอบแห้ง ซึ่งจากการทดลองในกรณีของการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นพบว่าค่าความสว่าง (L) ของมะพร้าวหลังการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 6% แต่จะมีค่าแปรปรวนในกรณีของการอบด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

³ นักศึกษา ป.โท 'ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

*ผู้รับผิดชอบบทความ โทร: 0-2988-3666 ต่อ 244; โทรสาร: 0-2988-3666 ต่อ 241; อีเมล: Thanid@mut.ac.th

A STUDY OF COCONUT DRYING USING HOT AIR COMBINED WITH DESICCANT

ฐานิดย์ เมธิยานนท์^{1*} เสริมพงษ์ อติเรกรัฐ² ประสาน สถิตยเรือศักดิ์ และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์

ABSTRACT

The objective of this research is to study drying kinetics of finely chopped coconut and its color after drying. The experimental results obtained from combined hot air - desiccant drying and those obtained from hot air drying were compared. Silica gel was used as selective desiccant to adsorb moisture from the air before sending it to drying chamber. The 1,260 g of finely chopped coconut with approximate moisture content 140 % d.b. was used for all experiments. Drying temperature and air velocity were held constant at 50 °C and 0.23 m/s, respectively. The percentages of circulating air was controlled at 0 %, 40 % and 100 % and changed from one experiment to the other. The coconut pieces were dried to final moisture content at around 10 % d.b. The results show higher drying rate of the combined system than that of hot air drying system, but the reverse is true for specific energy consumptions (SEC). Drying rate of the former system ranges from 112-114 gH₂O/h whereas SEC varies between 14-19 MJ/kgH₂O. 85-114 gH₂O/h of drying rate and 5-8 MJ/kgH₂O of SEC can be achieved by the latter system. It is very important to note that the relative humidity of drying air has strongly affected on the color of dried product. Relative humidity above 28 % will cause color to significantly change to unacceptable level. L value of dried coconut under combined hot air - silica gel drying appeared to be 6 % higher than initial value. However, for using only hot air L value can not be analyzed due to dynamic change of ambient air relative humidity with a consequence of large fluctuation in L value. Using hot air with silica gel shows substantially more advantaged in color preservation when compared with using only hot air.

KEYWORDS: Desiccant, Drying rate, Coconut

^{1,3}Department of Mechanical Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok 10530

²Graduate Student, ⁴Professor, School of Energy and Materials,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

*Corresponding author. Tel.: 0-2988-3666 Ext. 244; fax: 0-2988-3666 Ext. 241; E-mail address: Thanid@mut.ac.th

บทนำ

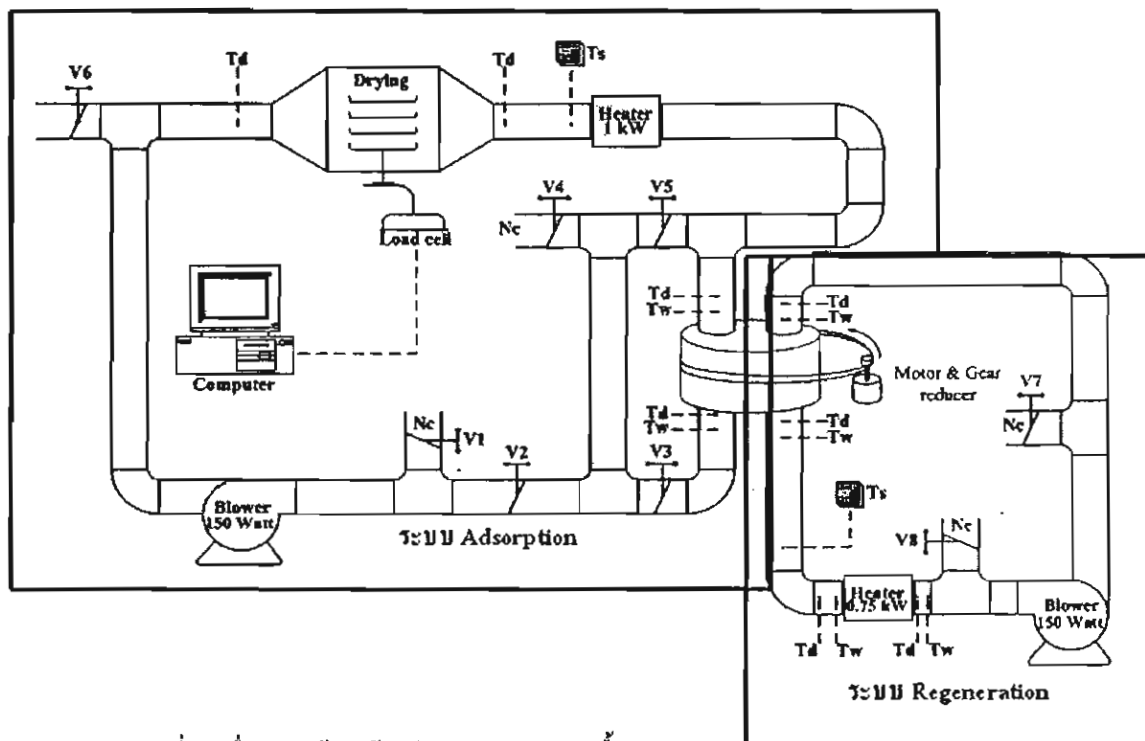
เนื้อมะพร้าวอบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชนิดหนึ่งจากมะพร้าวที่นำไปใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ขนมปังกรอบ ขนมเค้ก ฯลฯ ในปัจจุบันประเทศต่างๆ ที่มีการปลูกมะพร้าวกันเป็นจำนวนมากได้ทำผลิตภัณฑ์นี้ขึ้นมาเพื่อส่งไปจำหน่ายยังต่างประเทศและผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้กลายเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศสำหรับในประเทศไทยก็มีแนวทางที่จะผลิตเนื้อมะพร้าวอบแห้งเป็นอุตสาหกรรมได้เช่นกัน[1] ดังนั้นในกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรนั้นควรที่จะคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งให้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิต่ำก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านของรสชาติ กลิ่นและสีให้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี [2] จากการศึกษาการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยใช้อุณหภูมิต่ำได้ ซึ่งจากผลการทดลองอบแห้งคั่วมันขุบน้ำพบว่าระบบสามารถทำงานได้ดีโดยมีค่า อัตราการอบแห้ง อัตราการดูดซับและอัตราการไล่ความชื้นที่สอดคล้องกัน [3] โดยทั่วไปสารดูดความชื้น (adsorbent) จะดูดซับไอน้ำในอากาศเมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำของอากาศที่อยู่รอบๆ และจะคายไอน้ำให้กับอากาศเมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำของอากาศที่อยู่รอบๆ ความดันไอน้ำที่ผิวสารดูดความชื้นจะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิและปริมาณความชื้นของสารดูดความชื้นที่สูงขึ้น และมีแนวโน้มสู่จุดสมดุลกับความดันของไอน้ำบริเวณรอบๆ ความเวลาที่ผ่านไป ปริมาณน้ำที่ดูดซับโดยสารดูดความชื้นที่จุดนี้เรียกว่า ความจุสมดุล (equilibrium capacity) [4] อย่างไรก็ตามสารดูดความชื้นสามารถดูดซับความชื้นได้มากกว่าน้ำหนักตัวเอง 10-110 % ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดความชื้นและความชื้นที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม [5] ดังนั้นเพื่อให้สารดูดความชื้นสามารถนำกลับมาใช้งานได้อีกหลังจากดูดซับความชื้นออกจากอากาศแวดล้อมจึงต้องมีกระบวนการไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้นโดยใช้ความร้อนที่เรียกว่า regeneration ซึ่งอาจจะใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์หรือขดลวดความร้อนเป็นแหล่งให้ความร้อนกับอากาศที่ใช้ในการไล่ความชื้น [6,7] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาจนผลสาธิตการอบแห้งมะพร้าวหูกโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนอย่างเดียวโดยจะคำนึงถึงสีของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับวงล้อสารดูดความชื้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยจะมีวงจรอากาศแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) วงจรอากาศสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ซึ่งสามารถทำงานได้ทั้งระบบปิด (closed system) หรือระบบเปิดบางส่วน (partially open system) ในส่วนที่ (2) วงจรอากาศสำหรับไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้น ซึ่งถูกออกแบบไว้ให้สามารถนำอากาศที่ผ่านการไล่ความชื้นแล้วเวียนกลับมาใช้ใหม่ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้นโดยห้องอบแห้งมีขนาด $0.30 \times 0.50 \times 0.35$ (W×L×H) บรรจุธาตุซึ่งเป็นตะแกรงเจาะรูได้ 5 ใบ เพื่อให้สะดวกต่อการทดลองแหล่งให้ความร้อนแก่อากาศอบแห้งและอากาศที่ใช้ในการไล่ความชื้นของสารดูดความชื้น ใช้ขดลวดความร้อนขนาด 1 kW และ 0.75 kW ตามลำดับ พัดลมสำหรับอบแห้งและไล่ความชื้นเป็นพัดลมแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหน้า โดยแต่ละตัวมีขนาดมอเตอร์ 150 W

ในการทดลองทั้งหมดเลือกใช้มะพร้าวหูกเป็นวัสดุทดลองโดยใช้มะพร้าวหูกมีน้ำหนักเริ่มต้น 1,260 g ความชื้นเริ่มต้น 140 % d.b. อุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้ง 50°C และอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการไล่ความชื้น 100°C ซึ่งจะอบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้าย 10 % d.b. โดยมีสัดส่วนการนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 0 %, 40 % และ 100 % และความเร็วกวอากาศอบแห้ง 0.23 m/s ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิกระเปาะแห้งและเปียก แสดงในรูปที่ 1

การวัดอุณหภูมิใช้ เทอร์โมคัปเปิล type k ค่อยเข้ากับ data logger ความละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$ และบันทึก อุณหภูมิ ทุกๆ 20 นาที การควบคุมอุณหภูมิอากาศที่ใช้ออบแห้งและที่ใช้ในการไล่ความชื้นใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิ แบบ PID ความละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ความเร็วอากาศใช้ hot wire anemometer ความละเอียด $\pm 3\%$ ของค่าที่อ่านได้ ความเร็วของวงล้อสารดูดความชื้นถูกควบคุมด้วยเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (frequency inverter) การบันทึกค่าน้ำหนักของมะพร้าวชูดที่เวลาใช้ load cell ค่อยเข้ากับเครื่องแสดงผลน้ำหนักความละเอียด $\pm 1\text{ g}$ โดยต่อสัญญาณเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกผลทุกๆ 20 วินาที กำลังไฟฟ้าที่ใช้ของชุดลดไฟฟ้าสำหรับห้องอบแห้งและสำหรับการไล่ความชื้นจะอ่านจาก kW-h และบันทึกค่า ทุกๆ 20 นาที ระยะเวลาอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง 5-10 ชม. จากนั้นได้นำมะพร้าวหลังการอบแห้งไปทำการวัดสีด้วยเครื่อง Colorimeter โดยใช้ระบบ Hunter และทำการบันทึกข้อมูลค่า L-a-b ที่ใช้เป็นดัชนีหนึ่งในการกำหนดคุณภาพของมะพร้าวที่อบแห้งโดยที่ค่า L หมายถึง ค่าความสว่าง (Lighbess) ค่า a หมายถึงค่าสีเขียว-แดง ในขณะที่ค่า b หมายถึงค่าสีน้ำเงิน-เหลือง



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น

ผลการทดลองและวิจารณ์

จุดประสงค์ของการทดลองเพื่อศึกษาถึงการอบแห้งมะพร้าวชูดของระบบอบแห้งที่ใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น และประเมินถึงสมรรถนะโดยทั่วไปของระบบอบแห้ง ได้แก่ อัตราการอบแห้ง การใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) และปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อระบบอบแห้งมะพร้าวชูด และจะทำการวัดสีผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง และศึกษาอิทธิพลความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งต่อคุณภาพของมะพร้าวหลังการอบแห้งโดยจะเน้นคุณภาพของสีมะพร้าวหลังการอบแห้งเงื่อนไขการทดลองของระบบสรุปไว้ในตารางที่ 1

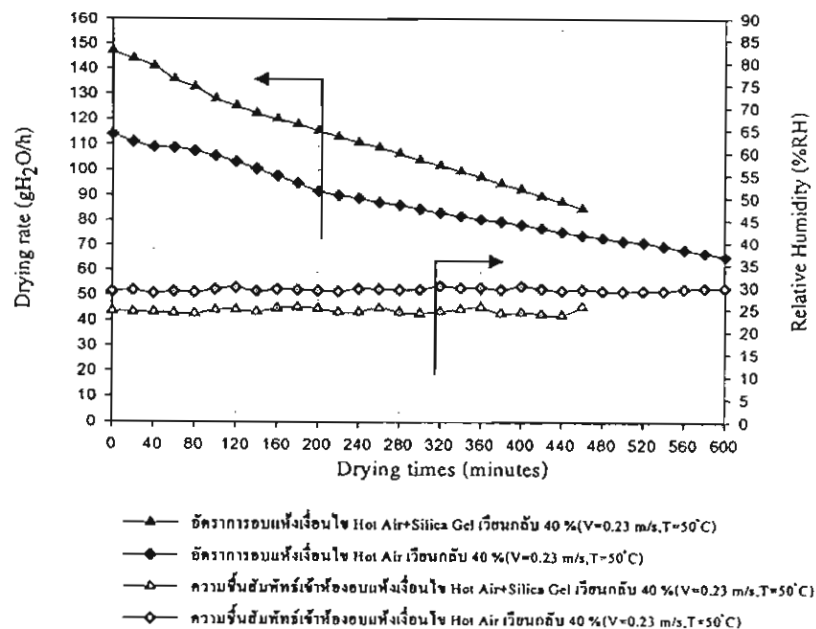
1. อัตราการอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าห้องอบ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอก

อัตราการอบแห้งเป็นดัชนีตัวหนึ่งที่ใช้วัดสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ค่าเฉลี่ยของอัตราการอบแห้งของการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และเพื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าห้องอบ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอก ข้อมูลดังกล่าวได้แสดงไว้ในภาพที่ 2 (a,b,c) สำหรับการทดลองที่ 1/2 และ 4/1 โดยที่แนวโน้มของข้อมูลสำหรับการทดลองอื่นจะคล้ายคลึงกัน

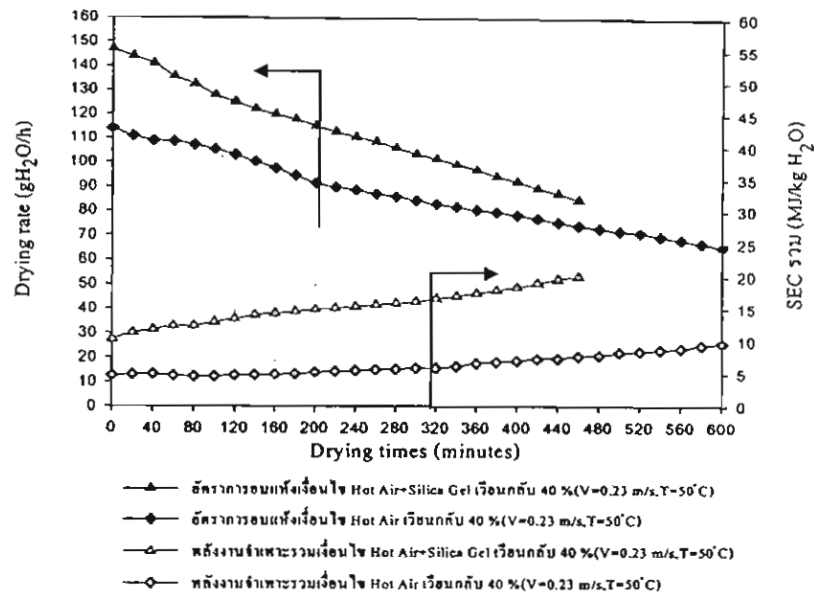
ตารางที่ 1 ผลการทดลองการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นและการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนอย่างเดียว ที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ

Description	Test No.1			Test No.2	Test No.3	Test No.4		Test No.5
	1/1	1/2	1/3	2/1	3/1	4/1	4/2	5/1
Average conditions								
Average temperature (°C)	29.8	31.7	31.5	30.5	31.1	31.9	30	32
Average relative humidity (%)	69.1	70.5	77.6	88.2	72.4	66.5	75.4	62.7
Condition of wrapped clothes								
Average initial moisture content (%d.b.)	138	140	137	135	140	138	136	139
Initial weight (g)	1265	1261	1272	1266	1262	1261	1265	1254
Moisture removed (g)	694	701	689	705	657	679	683	680
Drying conditions								
Average drying temperature (°C)	51.6	50.3	51.1	50.2	50.9	50.3	52	51
Average for air entering drying humidity (%)	23.4	29	28.8	29	24.7	24.3	24.5	23.3
Average generation temperature (°C)	-	-	-	-	101	101	102	102
Silica-gel weight (g)	-	-	-	-	800	800	800	800
Revolution of wheel (RPH)	-	-	-	-	1.5	1.5	1.5	1.5
Specific drying air flow rate (kg air/h-kg dry product)	67.2	67.2	67.2	68.1	64	67.2	67.2	62
Specific regen. air flow rate (kg air/h-dry product)	-	-	-	-	17.3	12.9	13	13.8
Fraction of recirculated regen. air (%)	-	-	-	-	100	100	100	100
Percentage of recirculated drying air (%)	40	40	40	100	0	40	40	100
Drying time (h)	11	9.4	10.2	10	8	8	8	8.2
Performance of dryer								
Drying rate (g H ₂ O/h)	84.3	90.3	89.8	85.3	112	113	114	112
Average SEC _{drying} (MJ/kg H ₂ O)	6.3	5	5.9	5.8	4	4.7	4.6	4.5
Average SEC _{regen.} (MJ/kg H ₂ O)	-	-	-	-	15	10.6	9.9	9.5
Total SEC (MJ/kg H ₂ O)	6.3	5	5.9	5.8	19	15.3	14.5	14

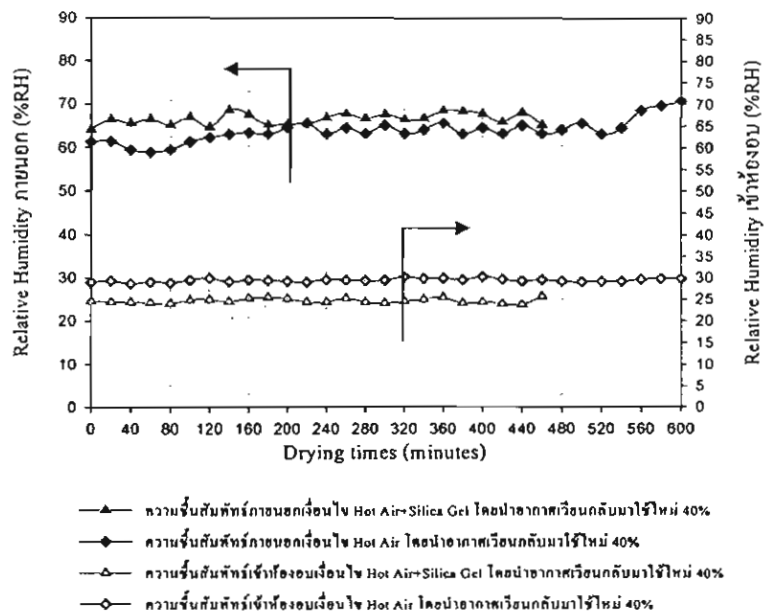
โดยหากนำกราฟเปรียบเทียบกันระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่เงื่อนไขสัดส่วนการนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ที่ 40 % จะพบว่าอัตราการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นจะมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าห้องอบแห้งมีค่าต่ำกว่า ดังภาพที่ 2(a) ในขณะที่เดียวกันจะพบว่าการใช้พลังงานจำเพาะรวมของการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นจะมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวเพราะการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นจะต้องใช้ขดลวดความร้อนในการไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้น ซึ่งเป็นผลทำให้การใช้พลังงานเพิ่มขึ้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ดังภาพที่ 2(b) ในการเปรียบเทียบเงื่อนไขดังกล่าวนี้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกระหว่างการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 2(c) แต่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่จะเข้าห้องอบแห้งของการใช้ร่วมกับสารดูดความชื้นจะมีค่าต่ำกว่าโดยอัตราการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นจะมีค่าอัตราการอบแห้งโดยมีค่าเฉลี่ยในช่วง 112-114 gH₂O/h และพลังงานจำเพาะรวมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 14-19 MJ/kgH₂O สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น ส่วนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนอย่างเดียวจะให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยอยู่ในช่วง 85-114 gH₂O/h และพลังงานรวมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5-8 MJ/kgH₂O ดังแสดงในตารางที่ 1



(a) กราฟเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งกับความชื้นสัมพัทธ์อากาศเข้าห้องอบ



(b) กราฟเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งกับพลังงานจำเพาะรวม



(c) กราฟเปรียบเทียบความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอกกับความชื้นสัมพัทธ์อากาศเข้าห้องอบ

ภาพที่ 2 กราฟเปรียบเทียบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นกับการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวเงื่อนไขการนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 40 %

2. ผลการวัดสีของมะพร้าวหลังการอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ

หลังจากทำการอบแห้งมะพร้าวด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นและนำไปทำการวัดสีของมะพร้าวเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นซึ่งมีค่าความสว่าง(L) 75.52 , สีเขียว (a) -0.46 และสีเหลือง (b) 4.19 จากการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นจะทำให้ค่าความสว่างของมะพร้าวเพิ่มขึ้นประมาณ 6 % และค่าความเหลืองเพิ่มขึ้นประมาณ 25 % แต่หากทำการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวจะพบว่าค่าความสว่างและค่าความเหลืองของมะพร้าวหลังการอบแห้งจะมีค่าความแปรปรวนมาก ส่วนค่าความเหลือง (b) ของการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 50 - 100 % ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นมาก แต่สำหรับค่า a ของการอบแห้งทั้ง 2 กรณีจะไม่แตกต่างกันในแต่ละเงื่อนไขการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวัดสีมะพร้าวหลังการอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ

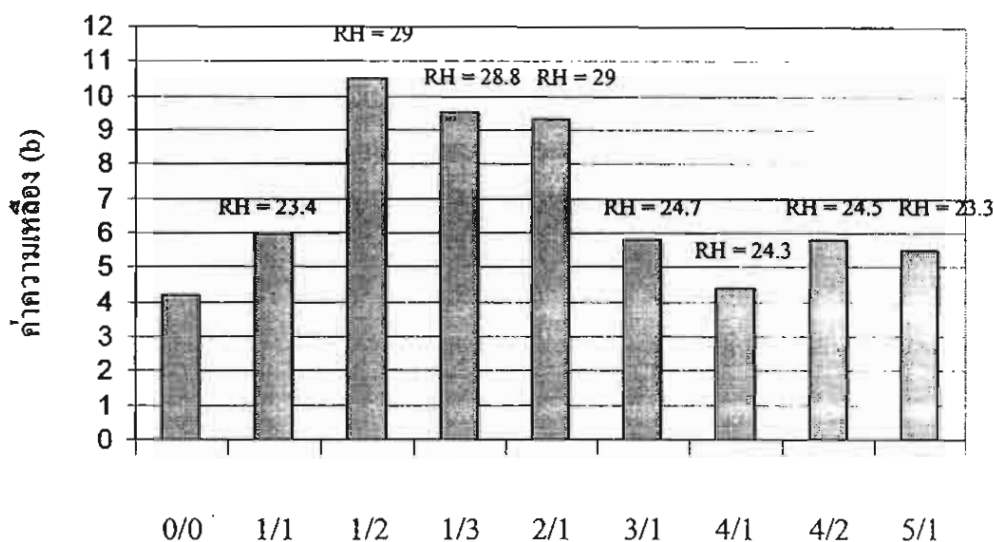
Test No.	เงื่อนไขการทดลอง	L - value	a - value	b - value
0/0	สีมะพร้าวชุดก่อนอบ	75.52	-0.46	4.19
1/1	Hot Air อย่างเดียวโดยนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 40 %	78.17	-0.78	5.95
1/2	Hot Air อย่างเดียวโดยนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 40 %	70.50	-1.05	10.5
1/3	Hot Air อย่างเดียวโดยนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 40 %	72.25	-1.00	9.54
2/1	Hot Air อย่างเดียวโดยนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 100 %	77.61	-1.15	9.30
3/1	Hot Air + Silica Gel อย่างเดียวโดยนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 0 %	80.67	-1.04	5.78
4/1	Hot Air + Silica Gel อย่างเดียวโดยนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 40 %	78.04	-1.02	4.42
4/2	Hot Air + Silica Gel อย่างเดียวโดยนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 40 %	77.80	-1.1	5.80
5/1	Hot Air + Silica Gel อย่างเดียวโดยนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 100 %	79.23	-1.01	5.49

3. อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์เข้าห้องอบที่มีต่อค่าความเหลือง (b) ของมะพร้าวหลังการอบแห้ง

จากการทดลองอบแห้งมะพร้าวด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นเปรียบเทียบกับกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว จะพบว่าคุณภาพของมะพร้าวหลังการอบแห้งมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในเรื่องของสี ซึ่งจากการศึกษาทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของมะพร้าวที่นำมาอบแห้ง คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าห้องอบแห้ง โดยหากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าห้องอบแห้งมีค่าสูงกว่า 28 % จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของมะพร้าวที่เงื่อนไขการทดลองที่ 1/2 และ 1/3 ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าห้องอบแห้ง 29 % และ 28.8 % ตามลำดับ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของมะพร้าวโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความเหลืองซึ่งสามารถสังเกตได้ดังตารางที่ 2 แต่ในกรณีของการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นจะไม่พบปัญหาดังกล่าว เพราะได้ทดลองโดยการจำลองสภาวะของอากาศภายนอกที่นำมาผสมก่อนเข้าห้องอบแห้งให้ใกล้เคียงกันของการอบแห้งทั้ง 2 กรณี ดังเงื่อนไข 1/3 และ 4/2 ในตารางที่ 1 โดยการสเปรย์ละอองน้ำเข้าไปในระบบทำให้มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกให้มีค่า 77.6 % และ 75.4 % ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าการอบแห้งร่วมกับสารดูดความชื้นจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของมะพร้าวหลังการอบแห้ง เนื่องจากสามารถลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าห้องอบแห้งให้เหลือเพียง 24.5 % แต่กรณีของการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวจะมีความสูงถึง 28.8 % ซึ่งส่งผลให้ค่าความเหลือง (b) ของมะพร้าวหลังการอบแห้งมีค่าสูงเช่นเดียวกับเงื่อนไข

การทดลองที่ 1/2 และ 2/1 ซึ่งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าห้องอบแห้ง 29 % ทั้ง 2 เงื่อนไข ฉะนั้นอาจกล่าวได้ว่าการอบแห้งมะพร้าวด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นจะได้มะพร้าวหลังการอบแห้งที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวภายใต้สภาวะอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอกสูง

หากนำค่าความเหลือของมะพร้าวหลังการอบแห้งมาเขียนกราฟคู่กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าห้องอบแห้งจะทำให้เห็นถึงอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ดีขึ้นดังรูปที่ 3



ภาพที่ 3 กราฟแสดงค่าความเหลือของมะพร้าวหลังอบแห้ง

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาการอบแห้งมะพร้าวโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นเปรียบเทียบกับการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวพบว่า อัตราการอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นโดยเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าเนื่องจากการใช้สารดูดความชื้นจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าห้องอบแห้งมีค่าต่ำลงส่งผลให้การอบแห้งเป็นไปได้ดีโดยมีค่าในช่วง 112-114 gH₂O/h และพลังงานรวมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 14-19 MJ/kgH₂O นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นจะให้คุณภาพสีของมะพร้าวหลังการอบแห้งที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวซึ่งมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยอยู่ในช่วง 85-114 gH₂O/h และพลังงานจำเพาะรวมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5-8 MJ/kgH₂O เนื่องจากปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าห้องอบแห้งจะส่งผลโดยตรงกับคุณภาพสี โดยหากมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าสูงเกิน 28 % จะทำให้มะพร้าวที่อบได้มีค่าความเหลือที่มากจนสามารถสังเกตได้ในขณะที่ปัญหาดังกล่าวนี้จะไม่พบกับกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นจะให้อัตราการอบแห้งและคุณภาพสีมะพร้าวหลังการอบแห้งที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวัดสึمةพริ้วหลังการอบแห้ง และขอขอบคุณนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ช่วยดำเนินการช่วยเก็บผลการทดลอง

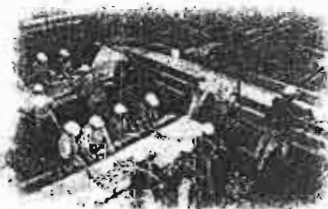
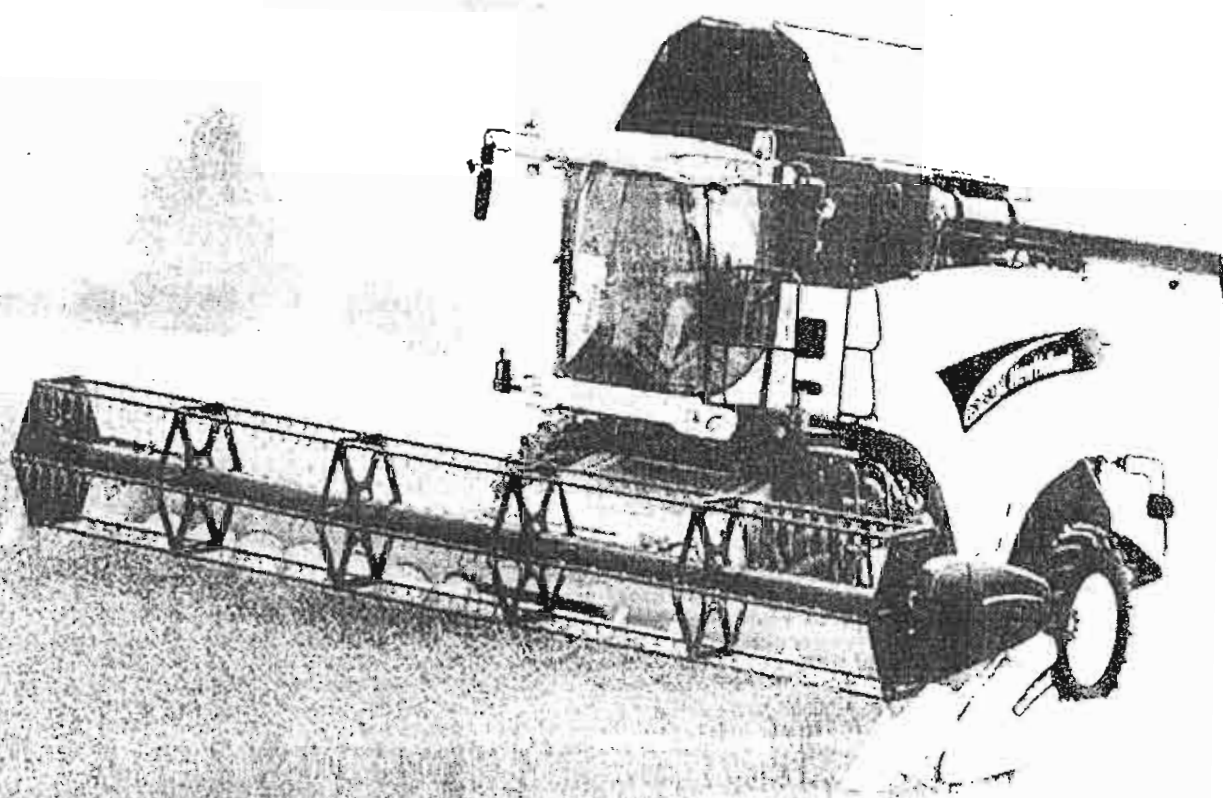
เอกสารอ้างอิง

1. กระทรวงอุตสาหกรรม. 2523. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเนื้อมะพร้าวแห้ง สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.18 น.
2. Yahya,M., Othamn,M.Y., Sopian ,K., Daud ,W.R.W. and Yatim ,B. 2003. Evaporative Capacity of a Solar Assisted
3. Dehumidification Drying System. Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Drying Conference. 532-538.
4. ชูนิติย์ เมธิยานนท์ และคณะ. 2546. การศึกษาความเป็นไปได้ในการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับวงล้อสารดูดความชื้น. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17.
5. American Society of Heating, Refrigerating and Air Condition Engineering. 1993. ASHRAE Handbook:Fundamentals. 22.1-22.6.
6. Waugaman, D.G., Kini A. and Kettleborough C.F. 1993. A Review of Desiccant Cooling Systems. Journal of Energy Resources Technology. 115: 1-8.
7. Saito,Y. 1993. Regeneration Characteristics of Absorbent in the Integrated Desicant/Collector. Journal of Solar Energy Engineering. 115: 169-175.
8. Techajunta,S. and Exell R.H.B. 1999. Experiments in Solar Simulation on Solid Desicant Regeneration and Air Dehumidification for Air Conditioning in Tropical Humid Climate. Renewable Energy 17: 549-568.



วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก

Toward Kitchen of the World by Agricultural Engineering



การประชุมวิชาการครั้งที่ 6 ประจำปี 2548

สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

30-31 มีนาคม 2548 คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองเมล็ดเดี่ยวด้วยไอน้ำร้อนขวดยึ่งและอากาศร้อน

อุบลวรรณ ชนะภัย¹ สมชาติ โสภณธฤทธิ์ และสมเกียรติ ปรัชญาวารากร^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองเมล็ดเดี่ยวระหว่างการใช้อไอน้ำร้อนขวดยึ่งและอากาศร้อนด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน โดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อนและมวลมาอธิบายกระบวนการอบแห้ง เพื่อทำนายผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อการควบแน่นของไอน้ำและอิทธิพลของตัวกลางต่ออัตราการอบแห้ง ซึ่งผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลอง และจากการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับน้ำในช่วงการควบแน่นของไอน้ำที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนขวดยึ่งและอุณหภูมิเริ่มต้นของถั่วเหลือง โดยเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนขวดยึ่งและอุณหภูมิเริ่มต้นของถั่วเหลืองสูงจะทำให้การดูดซับน้ำของเมล็ดเกิดขึ้นน้อย นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาส่วนของอุณหภูมิอินเวอร์ชันต่ออัตราการอบแห้งของเมล็ดถั่วเหลืองเดี่ยว พบว่าเมื่อใช้ความเร็วตัวกลางของการอบแห้งและความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าอุณหภูมิอินเวอร์ชันต่ำลง

¹นักศึกษา²ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ³รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

*ผู้รับผิดชอบบทความ โทร: 0-2470-9220-30 ต่อ 206; โทรสาร: 0-2428-3534; อีเมล: Somkiat.Pra@kmutt.ac.th

MATHEMATICAL MODELING FOR A SINGLE SOYBEAN DRYING WITH SUPERHEATED STEAM AND HOT AIR

Ubonwan Chanapai¹, Somchart Soponronnarit² and Somkiat Prachayawarakorn³*

ABSTRACT

The objective of this research was to develop the mathematical model, based on the principles of heat and mass transfer, for a single soybean drying using superheated steam and hot air as drying medium. The effects of operating parameters on condensation period and drying medium on drying rate were investigated. The experimental results were predicted by the proposed mathematical models relatively well for both superheated steam and hot air drying. Drying temperature and initial temperature of soybean exerts a strong influence on the initial condensation. Higher drying temperature and higher initial temperature of kernel lead to a decrease water adsorption. The model was extended to investigate the effects of various parameters on the inversion temperature. The results showed that the inversion temperature decreased with an increase in the drying medium velocity and the initial moisture content of product.

KEYWORDS: Inversion temperature, Mathematical model, Superheated steam

¹Graduated Student, ²Professor, School of Energy and Materials, ³Associate Professor,
Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

*Corresponding author. Tel.: 0-2470-9220-30 Ext. 206; Fax: 0-2428-3534; E-mail address: Somkiat.Pra@kmutt.ac.th

บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการได้ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหย โดยทั่วไปจะอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน และตัวกลางที่ใช้มักจะเป็นอากาศร้อนแต่ปัจจุบันนิยมใช้น้ำร้อนขดยิ่งเป็นตัวกลางการอบแห้ง เนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งที่ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งมีคุณภาพสูงขึ้น เช่นที่กล่าวไว้ในงานวิจัยของ คลฤดี ใจสุทธิ [1], อิศเรศ ฐชกัถยา [2] และณรงค์ อึ้งกิมบัวน [3] เป็นต้น อีกทั้งยังเหมาะกับกระบวนการที่ต้องการความปลอดภัยในการดำเนินการสูง เช่น การอบแห้งด้านหินจากที่กล่าวไว้ในงานวิจัยของ Chen และคณะ [4] เนื่องจากในระบบไอน้ำร้อนขดยิ่งไม่มีก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นสารช่วยติดไฟ นอกจากนี้การอบแห้งด้วยวิธีนี้ยังเป็นการเป็นการช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ลง ซึ่ง Tarnawshi พบว่าในการอบแห้งกระดาษด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งสามารถลดพลังงานที่ผลิตต้องการลง 35% พลังงานที่ใช้ในระบบอบแห้งลดลง 76% และประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบอบแห้งสูงกว่าถึง 5 เท่า เมื่อเทียบกับอากาศร้อน

โดยปกติแล้วอัตราการอบแห้งของวัสดุในตัวกลาง ระหว่างไอน้ำร้อนขดยิ่งและอากาศร้อนจะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จุดใหญ่ที่แตกต่างคือการกลั่นตัวของไอน้ำบนผิววัสดุในช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ ซึ่งอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งจะเร็วกว่าหรือช้ากว่าอากาศร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำความแน่นที่เกิดขึ้น ความดันของไอน้ำร้อนขดยิ่ง ความเร็วของไอน้ำร้อนขดยิ่ง และอุณหภูมิไอน้ำร้อนขดยิ่ง ผลของการกลั่นตัวของไอน้ำส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งที่ได้จากตัวกลางทั้งสองแตกต่างกัน

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนและมวลสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองเมล็ดเขียวเพื่ออธิบายลักษณะการอบแห้งของวัสดุในตัวกลางไอน้ำร้อนขดยิ่งและอากาศร้อน และศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความแน่นของไอน้ำ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลที่ได้จากการทดลอง

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งกรณีใช้น้ำร้อนขดยิ่งเป็นตัวกลางเป็นเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชัน ซึ่งห้องอบแห้งเป็นรูปทรงกระบอกทำด้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ลักษณะการทำงานเริ่มต้นจากการค้ำน้ำด้วยเครื่องกำเนิดไอน้ำ ซึ่งออกแบบความดันใช้งานสูงสุด 3.5 bars สามารถผลิตไอน้ำได้ 31 kg/h ที่อุณหภูมิ 100°C ความดันบรรยากาศ ความเร็วของไอน้ำที่เข้าห้องอบแห้ง 3.2 m/s จากนั้นไอน้ำเข้าในระบบโดยไอน้ำจะถูกทำให้ร้อนโดยอุปกรณ์ให้ความร้อนขนาด 13.5 kW เพื่อทำให้ไอน้ำกลายเป็นไอน้ำร้อนขดยิ่ง (ควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมแบบ PID มีค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$) จากนั้นจะนำไอน้ำร้อนขดยิ่งผ่านเข้าห้องอบแห้งเพื่อลดความชื้นของถั่วเหลือง และผ่านต่อไปยังเครื่องคัดฝุ่น ไอน้ำในระบบถูกหมุนเวียนโดยพัดลมเป็นแบบเหวี่ยงใบพัดสังกะสี มีมอเตอร์ขนาด 2.2 kW สามารถปรับความเร็วรอบของพัดลมได้ ระบบอบแห้งที่ออกแบบนี้สามารถใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งได้ด้วย สำหรับอุณหภูมิของตัวกลางทำการวัดโดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K คอเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ที่มีความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ส่วนอุณหภูมิถั่วเหลือง ทำการวัดโดยนำถั่วเหลืองออกจากห้องอบแห้งแล้วใส่ในภาชนะปิดที่มีฉนวนหุ้ม สำหรับการหาความชื้นของถั่วเหลืองจะเก็บตัวอย่างไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

1. การอบแห้งเมล็ดข้าวเหลืองด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันโดยใช้ตัวกลางไอน้ำร้อนขวดย้ง

1.1 ช่วงการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ

เมื่อไอน้ำร้อนขวดย้งสัมผัสกับเมล็ดข้าวเหลืองที่มีอุณหภูมิค่า จะส่งผลให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำที่บริเวณผิวของเมล็ดข้าวเหลือง โดยในงานวิจัยนี้ได้นำหลักการของการควบแน่นแบบฟิล์ม [6] มาอธิบายปรากฏการณ์การควบแน่นที่เกิดขึ้น โดยชั้นฟิล์มของเหลวที่เกิดขึ้นนี้จะทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นตัวต้านทานการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางและเมล็ดข้าวเหลืองที่ปลดปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการควบแน่นของไอน้ำร้อนขวดย้งนั่นเอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{q}_r = \bar{h}_r A_s (T_{sat} - T_p) = \dot{m}_{cond} h_{fg}'' \quad (1)$$

ในกรณีที่การไหลของไอน้ำภายในฟิล์มเป็นแบบราบเรียบ ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในฟิล์มมีลักษณะเป็นเชิงเส้นกับความหนาของฟิล์ม ดังนั้นค่าความร้อนแฝงที่ไอน้ำร้อนขวดย้งสามารถคำนวณได้จากสมการ [7]

$$h_{fg}'' = C_{p,sl} (T_{sat} - T_{sat}) + h_{fg,T_{sat}} + \frac{1}{8} C_{p,p} (T_{sat} - T_p) \quad (2)$$

และอัตราการควบแน่นของไอน้ำ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\dot{m}_{cond} = \frac{\bar{h}_r A_s (T_{sat} - T_p)}{h_{fg}''} \quad (3)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของฟิล์มในกรณีที่เป็นการไหลแบบราบเรียบ สามารถประมาณได้จากสมการเอมไพริคัล สำหรับวัสดุทรงกลม [8]

$$\bar{h}_r = 0.815 \cdot \left[\frac{\rho_r (\rho_r - \rho_{sat}) \cdot g \cdot h_{fg}'' \cdot k_r^3}{\mu_r \cdot D_p \cdot (T_{sat} - T_p)} \right]^{1/4} \quad (4)$$

สำหรับการทำสมดุลพลังงานที่เมล็ดข้าวเหลือง กล่าวได้ว่าเมล็ดข้าวเหลืองจะได้รับพลังงานความร้อนมาจากความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาระหว่างการควบแน่นของไอน้ำร้อนขวดย้ง ทำให้พลังงานภายในเมล็ดข้าวเหลืองเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 5 นอกจากนี้ปริมาณความร้อนดังกล่าวยังเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอิสระที่อยู่บริเวณรอบนอกของเมล็ดข้าวเหลือง ซึ่งก็คือเทอมที่สองทางซ้ายมือของสมการที่ 5

สมการสมดุลพลังงาน:

$$\left(\frac{D_p}{6} \rho_p C_{p,p} + m_{fw} C_{p,w} \right) \frac{dT_p}{dt} = \dot{m}_{cond} h_{fg}'' \quad (5)$$

สำหรับที่สภาวะขอบเขตที่พิจารณา(Boundary Condition) มีดังนี้

$$T_p(0) = T_{p,initial} \quad t = 0 \quad (6)$$

$$T_p(t_1) = T_{sat} \quad t = t_1 \quad (7)$$

ผลจากการควบแน่นของไอน้ำทำให้ความชื้นของเมล็ดถั่วเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความชื้นที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถประมาณได้จากสมการการแพร่ของ Fick โดยสมมติให้ค่าการแพร่ของน้ำเข้าไปยังเมล็ดถั่วเหลืองเกิดจากผลต่างของความเข้มข้น ในงานวิจัยนี้สมมติให้ถั่วเหลืองมีลักษณะเป็นทรงกลม

สมการการแพร่ของ Fick:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(D_{eff} \cdot r^2 \cdot \frac{\partial M}{\partial r} \right) \right] \quad (8)$$

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้น (D_{eff}) ที่พิจารณาจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นภายในวัสดุ [8] ดังสมการ

$$D_{eff} = [5.4364 \times 10^{-20} + (5.111 \times 10^{-18} \times M^2)] \times \exp(0.053718 \times T_p) \quad (9)$$

สำหรับที่สภาวะขอบเขตที่พิจารณา (Boundary Condition) เป็นดังนี้

$$M(r, 0) = M_{initial} \quad t = 0 \quad (10)$$

$$-D_{eff} \rho_p \left(\frac{\partial M}{\partial r} \right) \bigg|_{r=R} = \frac{\dot{m}_{cond}}{A_s} \quad t > t_2 \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial M}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad t > 0 \quad (12)$$

สมการที่ (11) กำหนดให้ความชื้นที่ผิวมีค่าเท่ากับปริมาณน้ำกลั่นตัว ณ ช่วงเวลาที่พิจารณา ในการแก้ปัญหาของการคำนวณสมการการแพร่ความชื้น จะใช้เทคนิคแก้ปัญหาแบบ Finite Difference ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเมล็ดถั่วเหลือง ดังนั้นเราสามารถคำนวณความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดถั่วเหลืองจากสมการ

$$\bar{M}(t) = \int M(r, t) \times \frac{4\pi r^2}{V} dr \quad (13)$$

ในการคำนวณช่วงนี้ไม่มีการสะสมของน้ำอิสระที่บริเวณผิวของถั่วเหลืองเนื่องจากความชื้นที่ผิวของถั่วเหลืองยังไม่ถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งจากการทดลองพบว่าความชื้นสูงสุดที่ถั่วเหลืองสามารถดูดซับได้มีค่าเท่ากับ 150% มาตรฐานแห้ง และเมื่อความชื้นที่ผิวมาถึงที่ความชื้นอิ่มตัวดังกล่าวแล้วความชื้นของถั่วเหลืองที่ผิวจะไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลาอีกต่อไป และสภาวะขอบเขตที่พิจารณาในสมการที่ (11) จะเปลี่ยนไปเป็นความชื้นที่ผิวจะมีค่าเท่ากับ 150% มาตรฐานแห้ง ตลอดช่วงที่เหลือของการควบแน่นของไอน้ำ ปริมาณน้ำที่ถั่วเหลืองสามารถดูดซับไว้มีค่าเท่ากับ

$$m_{adsorp, t+1} = m_p \cdot [\bar{M}_{t+1} - \bar{M}_t] \quad (14)$$

และปริมาณน้ำอิสระยังคงเหลืออยู่ที่ผิวของถั่วเหลืองสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$m_{fw, (t+1)} = \sum_{t=t_2}^t \dot{m}_{cond, (t+1)} (\Delta t) - m_{adsorp, (t+1)} \quad (15)$$

อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของตัวเหลืองเพิ่มขึ้น จนกระทั่งใกล้จุดเดือดของน้ำ เราพบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวเหลืองจะมากขึ้น ซึ่งจะมากกว่าปริมาณน้ำอิสระคงเหลือ ดังนั้นที่ผิวรวมกันกับที่ไอน้ำกลั่นตัว ในกรณีนี้จะต้องจำกัดปริมาณน้ำที่ตัวเหลืองดูดซับสูงสุดเพียงแค่ว่าปริมาณไอน้ำที่คงเหลือที่ผิวเท่านั้น

$$m_{adsorp, i+1}^* = \dot{m}_{cond, i+1} \times \Delta t + m_{fw, i+1} \quad (17)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณความชื้นเฉลี่ยได้ดังสมการ (18)

$$\bar{M}_{i+1} = \bar{M}_i + \frac{m_{adsorp, i+1}^*}{m_p} \quad (18)$$

1.2 ช่วงการอบแห้งวัสดุ

ในการอบแห้งช่วงนี้ความร้อนที่ให้กับเมล็ดตัวเหลืองนั้นจะใช้ไปเพื่อการระเหยน้ำในเมล็ดแทน โดยเริ่มต้นจะทำการระเหยน้ำอิสระที่บริเวณผิวก่อน จากนั้นจึงเริ่มมีการระเหยน้ำภายในเมล็ดตัวเหลืองต่อไป เนื่องจากในช่วงต้นของช่วงการอบแห้งนั้นเป็นการระเหยน้ำอิสระที่ผิวของวัสดุ และน้ำที่วัสดุดูดซับไว้ซึ่งจะอยู่ที่บริเวณใกล้กับผิวของวัสดุ ซึ่งกระบวนการนี้จะปฏิบัติคล้ายกับช่วงการอัดการอบแห้งครั้งที่ของวัสดุ เป็นผลให้อุณหภูมิของเมล็ดจะคงที่ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิวัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อความชื้นที่ผิวลดลงเหลือประมาณ 0 เปอร์เซ็นค่ามาตรฐานแห้ง โดยจะเรียกช่วงนี้ว่าเป็นช่วงการอบแห้งลดลง ดังนั้นในช่วงของการอบแห้งของวัสดุจึงแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วงย่อย คือ ช่วงอัดการอบแห้งคงที่ และช่วงอัดการอบแห้งลดลง

1.2.1 ช่วงอัดการอบแห้งคงที่

สมการสมดุลพลังงาน:

พลังงานความร้อนที่ได้จากการพาความร้อนของไอน้ำร้อนยวดยิ่งไปยังผิวของเมล็ดตัวเหลือง ถูกนำมาใช้ในการระเหยน้ำสะสมจากการควบแน่นของไอน้ำ ซึ่งในขณะนี้อุณหภูมิของวัสดุจะคงที่ที่จุดเดือดของน้ำที่ความดันของระบบ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$h_{fg, atm} m_{vap}'' = h(T_u - T_r) \quad (19)$$

อัตราการระเหยน้ำคือหน่วยพื้นที่ที่สามารถคำนวณได้จาก

$$m_{vap, max}'' = \frac{h(T_u - T_r)}{h_{fg, atm}} \quad (20)$$

สมการสมดุลมวล:

การเคลื่อนที่ของน้ำในเนื้อวัสดุ เกิดขึ้นเนื่องจากการการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุ รูปแบบสมการที่พิจารณา ใช้สมการเดียวกับสมการการแพร่ความชื้นในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ แต่จะแตกต่างกันในส่วนของการขอบเขตที่พิจารณา

$$M(r, t) = M(r, t_j) \quad t = t_j \quad (21)$$

$$-D_{eff} \left(\rho_p \frac{\partial M}{\partial r} \right)_{r=R} = K \quad t > t_3 \quad (22)$$

$$\left. \frac{\partial M}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad t > t_3 \quad (23)$$

โดยที่

$$K = m_{vap,max}'' = \frac{h(T_{st} - T_p)}{h_{fg,grain}} \quad (24)$$

1.2.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

สมการสมดุลพลังงาน:

พลังงานความร้อนที่ได้จากการพาความร้อนของไอน้ำร้อนยังคงไปยังผิวของเมล็ดั่วเหลือง จะนำไปใช้เป็นพลังงานในการระเหยน้ำและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานในเมล็ด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\left(\frac{D_p}{6} \rho_p C_{p,p} \right) \frac{dT_p}{dt} + h_{fg,grain} m_{vap}'' = h(T_{st} - T_p) \quad (25)$$

กำหนดให้สภาวะเริ่มต้นที่พิจารณา(Boundary Condition) มีดังนี้

$$T_p(t_1) = T_{st} \quad t = t_1 \quad (26)$$

อัตราการระเหยน้ำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ สามารถคำนวณได้จาก

$$m_{vap}'' = \frac{D_p}{6} \cdot \rho_p \cdot \frac{[\bar{M}_{t,t} - \bar{M}_t]}{\Delta t} \quad (27)$$

สมการสมดุลมวล:

สำหรับสภาวะขอบเขตที่พิจารณา(Boundary Condition) เป็นดังนี้

$$M(r,0) = M(r) \quad t = t_3 \quad (28)$$

$$M(R,t) = 0 \quad t > t_3 \quad (29)$$

$$\left. \frac{\partial M}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad t > t_3 \quad (30)$$

เมื่อ t_3 = เวลาที่สิ้นสุดการควบแน่น, s

2. การอบแห้งเมล็ดั่วเหลืองเดี่ยวด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันโดยใช้ตัวกลางอากาศร้อน

ในการอบแห้งอากาศร้อน วัสดุจะไม่มีช่วงการเพิ่มอุณหภูมิในวัสดุความร้อนที่วัสดุได้รับส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำและเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุเท่านั้น ดังนั้นในการพิจารณาสมการสมดุลพลังงานและสมการสมดุลมวลจึงพิจารณาคล้ายกับช่วงการอบแห้งลดลงของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคง ในการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นยังคงใช้สมการที่ (10) โดยพิจารณาว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุเกิดจากกลไกการแพร่ และใช้สภาวะขอบเขตที่พิจารณา(Boundary Condition) เช่นเดียวกับการอบแห้งลดลงของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงคือสมการที่ (28) ถึง

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 "วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก".

30-31 มีนาคม 2548 ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ กรุงเทพฯ

สมการที่ (30) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน, D_{eff} ในกรณีอบแห้งด้วยอากาศร้อนนั้นสามารถหาได้จากการทดลอง [9] ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความชื้นและอุณหภูมิของตัวเหลืองดังสมการ

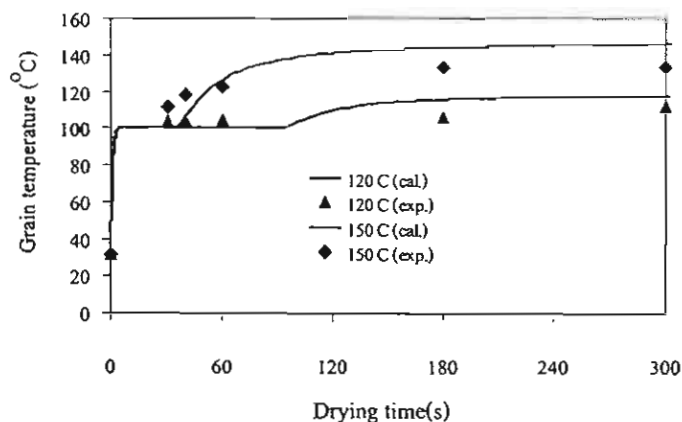
$$D = (5.821 \times 10^{-10} \times \exp(0.05691 \times T_p)) \times \exp((96.4504 - 0.2655T_p + 0.0001111T_p^2) \times M) \quad (31)$$

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นภายในเมล็ด

1.1 การอบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่ง

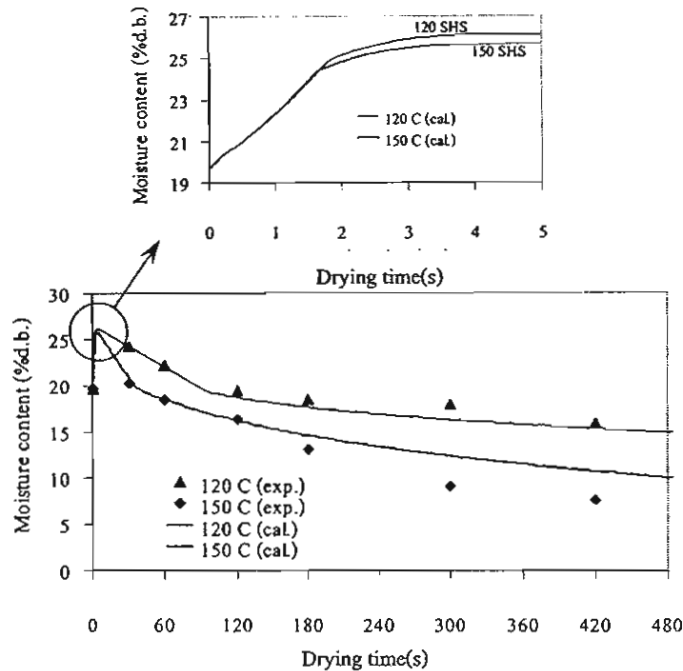
รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดถั่วเหลืองเมื่อผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนชนิดยิ่ง 120 และ 150 °C พบว่าอุณหภูมิของเมล็ดถั่วเหลืองสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง เนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำที่เกิดการควบแน่นคายความร้อนให้กับเมล็ดถั่วเหลือง เมื่ออุณหภูมิของเมล็ดถั่วเหลืองเพิ่มสูงขึ้นถึงอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำ อุณหภูมิของเมล็ดถั่วเหลืองจะคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยในช่วงระยะเวลาดังกล่าวนี้นตรงกับช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และปริมาณน้ำที่ระเหยในช่วงนี้มาจากความชื้นที่ถั่วเหลืองได้รับจากช่วงการกลั่นตัวของไอน้ำ หลังจากนั้นอุณหภูมิของเมล็ดถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นจนอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิของไอน้ำร้อนชนิดยิ่ง และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าผลจากการคำนวณอุณหภูมิมีค่าสูงกว่าที่วัดได้จากการทดลองเพียงเล็กน้อย



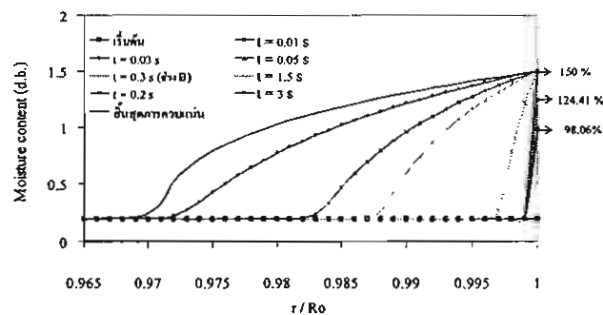
รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมล็ดกับเวลา สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่ง ที่อุณหภูมิ 120 และ 150 °C

รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดถั่วเหลืองที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนชนิดยิ่งต่างๆ พบว่าในช่วงต้นของการอบแห้งความชื้นของถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องจากเมื่อถั่วเหลืองสัมผัสกับไอน้ำร้อนชนิดยิ่งจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของถั่วเหลือง น้ำบางส่วนถูกดูดซับเข้าสู่ผิวของถั่วเหลือง เมื่อทำการอบแห้งถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้น 19.5%มาตรฐานแห้ง ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนชนิดยิ่ง 120 และ 150 °C ในช่วงเวลาการอบแห้ง 30 วินาที ถั่วเหลืองจะมีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น 4.53 และ 0.66 หน่วยความถ่วง และเมื่อการควบแน่นของไอน้ำหยุดลง การระเหยน้ำภายในเมล็ดถั่วเหลืองจึงเกิดขึ้นส่งผลให้ความชื้นของถั่วเหลืองลดลง

รูปที่ 3 แสดงโปรไฟล์ความชื้นภายในถั่วเหลืองในช่วงควมแน่นของไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะเกิดบริเวณผิวหรือใกล้ๆ กับผิวเมล็ดมากกว่าบริเวณด้านในของเมล็ดอย่างชัดเจน ขณะที่บริเวณพื้นที่ส่วนใหญ่ภายในเมล็ดยังคงมีความชื้นเท่ากับค่าความชื้นเริ่มต้น



รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกับเวลา สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อน ขนาดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 และ 150 °C

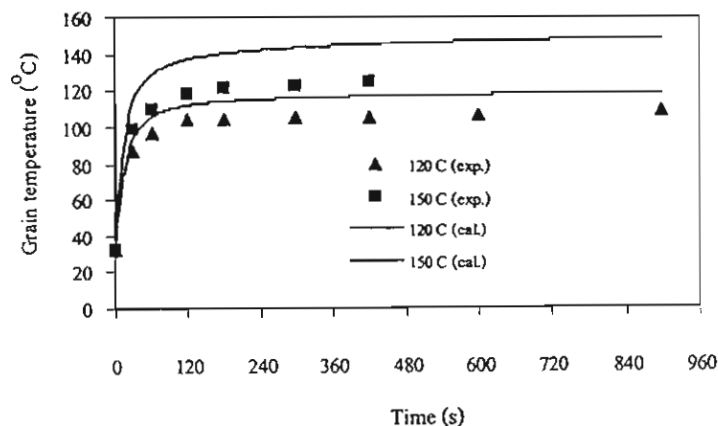


รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในเมล็ดถั่วเหลืองตามระยะทางที่เวลาต่างๆ (อุณหภูมิไอน้ำร้อนขนาดยิ่ง 120 °C, ความเร็วไอน้ำร้อนขนาดยิ่ง 3.2 m/s และความชื้นเริ่มต้น 19.5%d.b.)

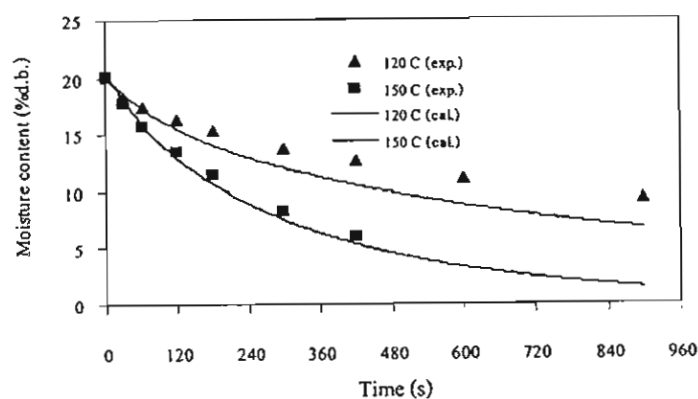
1.2 การอบแห้งด้วยอากาศร้อน

รูปที่ 4 และ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นขณะทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อน พบว่าความชื้นของถั่วเหลืองลดลงตลอดช่วงเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมล็ดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ

การอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้จะมีลักษณะที่แตกต่างจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิของเมล็ดถั่วเหลืองจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก อันเป็นผลเนื่องมาจากการคายความร้อนแฝงของไอน้ำควบแน่นนั่นเอง แต่อย่างไรก็ดีปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเพียงระยะเวลานั้นๆ เท่านั้น จากนั้นอุณหภูมิเมล็ดของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะสูงขึ้นใกล้เคียงกับอุณหภูมิตัวกลางเช่นเดียวกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่อพิจารณาผลการลดความชื้นภายในเมล็ดถั่วเหลืองของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะพบว่า การอบแห้งด้วยอากาศร้อนสามารถลดความชื้นของถั่วเหลืองได้เร็วกว่าไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิการอบแห้งที่ 120 และ 150 องศาเซลเซียส สำหรับผลของอุณหภูมิตัวกลางต่อการเพิ่มอุณหภูมิเมล็ด พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิตัวกลางสูงขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่เมล็ดถั่วเหลืองทำได้ง่ายขึ้น ทำให้เมล็ดมีอุณหภูมิสูงขึ้นได้เร็วกว่า และจากรูปที่ 5 พบว่าในการลดความชื้นภายในเมล็ดถั่วเหลืองเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูงจะเกิดขึ้นได้ดีกว่า เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังเมล็ดสูงกว่าเป็นผลให้การระเหยน้ำในเมล็ดจึงเกิดขึ้นได้ดีกว่า และเมื่อพิจารณาจากผลการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นพบว่าให้ทำนายใกล้เคียงกับการทดลอง



รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมล็ดกับเวลาสำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 และ 150°C

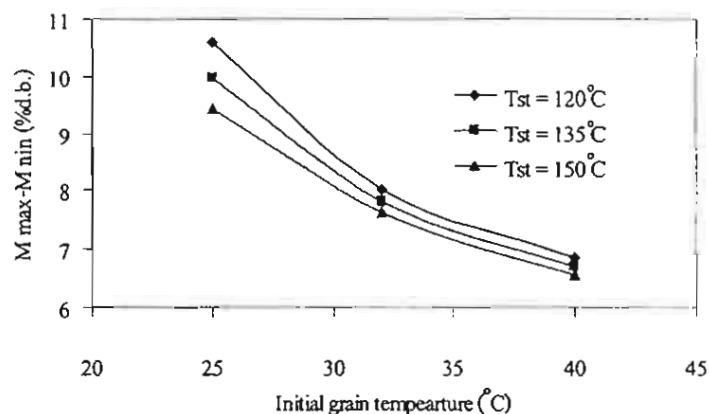


รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกับเวลา สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 และ 150°C

1.2 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

1.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิเมล็ดและไอน้ำร้อนขวดซึ่งที่มีผลต่อการเพิ่มความชื้นของเมล็ดถั่วเหลือง

รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนขวดซึ่งและอุณหภูมิเริ่มต้นของเมล็ดถั่วเหลืองที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความชื้นขณะเกิดกระบวนการควบแน่นของไอน้ำ โดยคิดจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นของถั่วเหลืองเมื่อสิ้นสุดการควบแน่นเทียบกับความชื้นเริ่มต้น ($M_{\max} - M_0$) พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเริ่มต้นของเมล็ดถั่วเหลืองเหมือนกัน เมื่อใช้อุณหภูมิไอน้ำร้อนขวดซึ่งสูง ส่งผลให้อัตราส่วนการเพิ่มความชื้นในเมล็ดน้อยลง เนื่องจากอุณหภูมิไอน้ำร้อนขวดซึ่งสูง การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้อุณหภูมิของถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำได้เร็วกว่า ดังนั้นโอกาสที่เมล็ดถั่วเหลืองจะดูดซับน้ำไวน้อยลง สำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิเมล็ดเริ่มต้นต่อการเพิ่มขึ้นของความชื้นขณะเกิดกระบวนการควบแน่นของไอน้ำ จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเมล็ดเริ่มต้นต่ำ อัตราส่วนของการเพิ่มความชื้นในเมล็ดมีค่ามากกว่าเมื่อใช้อุณหภูมิเมล็ดเริ่มต้นสูง ทั้งนี้เนื่องจากถั่วเหลืองที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำจะใช้เวลานานในการทำให้อุณหภูมิเมล็ดให้สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำ ส่งผลให้ช่วงเวลาการควบแน่นของไอน้ำเกิดขึ้นนาน โอกาสที่เมล็ดจะดูดซับน้ำควบแน่นที่เกิดขึ้นจึงสูงตามไปด้วย และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนขวดซึ่งและอุณหภูมิเริ่มต้นของเมล็ดถั่วเหลืองต่อการเพิ่มขึ้นของความชื้นที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการควบแน่นของไอน้ำนั้น จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของอุณหภูมิเริ่มต้นของเมล็ดถั่วเหลืองจะมีผลต่อการเพิ่มความชื้นมากกว่าอิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนขวดซึ่ง



รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนขวดซึ่งและอุณหภูมิเริ่มต้นของเมล็ดถั่วเหลืองที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความชื้นขณะเกิดกระบวนการควบแน่นของไอน้ำ (ความเร็วไอน้ำร้อนขวดซึ่ง 3.2 m/s, ความชื้นเริ่มต้น 19.5 d.b.)

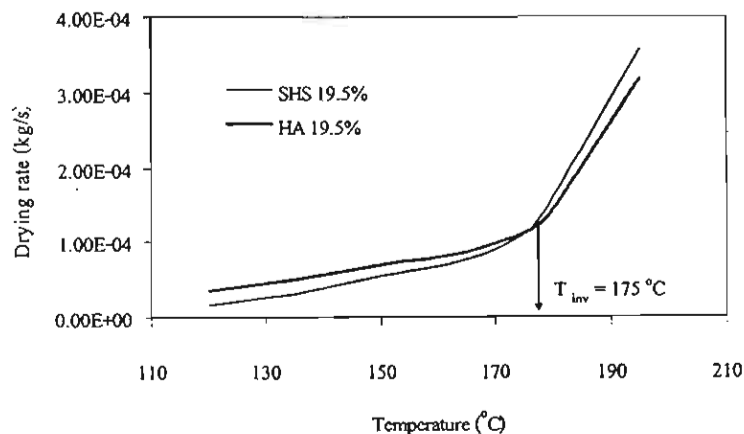
1.2.2 อุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Inversion temperature)

จากผลการทดลองด้วยกล้องอากาศร้อนให้อัตราการอบแห้งเร็วกว่าด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่ง เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งยังไม่ถึงอุณหภูมิอินเวอร์ชัน ดังนั้นอากาศร้อนจึงให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าไอน้ำร้อนขวดซึ่ง สำหรับอุณหภูมิอินเวอร์ชันในการอบแห้งเมล็ดถั่วเหลือง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะประมาณจากอัตราการอบแห้งของเมล็ดโดยเฉลี่ยจากสมการที่ (33)

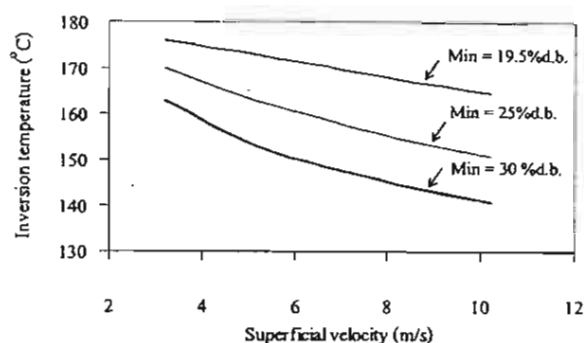
$$m_{vap,ave} = \frac{1}{t_{dry}} \int_0^{t_{dry}} m_{vap} dt \quad (33)$$

เมื่อ $m_{vap,ave}$ = อัตราการระเหยน้ำเฉลี่ย (kg/s)
 t_{dry} = เวลาการอบแห้ง (second) โดยกำหนดเวลาดังแต่เริ่มคั่นอบแห้งจนกระทั่ง
 ความชื้นสุดท้ายเป็น 12 %มาตรฐานแห้ง

รูปที่ 7 แสดงอุณหภูมิอินเวอร์ชันสำหรับการอบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้น 19.5 % มาตรฐานแห้ง ทำการอบแห้งโดยใช้ความเร็วตัวกลาง 3.2 m/s เท่ากัน พบว่าอุณหภูมิที่ทำให้อัตราการอบแห้งของเมล็ดถั่วเหลืองระหว่างไอน้ำร้อนขวดอึ้งและอากาศร้อนมีค่าเท่ากัน หรือที่เรียกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชันนั้นจะเกิดขึ้นที่ประมาณ 175 องศาเซลเซียส โดยที่ถ้าใช้อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน การอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ้ง ในทางกลับกันหากใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชันจะทำให้อัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิการอบแห้งที่ต่ำกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน ผลของสมบัติของอากาศร้อน เช่น ความหนืด ความหนาแน่น และความสามารถในการนำความร้อน ฯลฯ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนมากกว่าไอน้ำร้อนขวดอึ้งส่งผลให้อากาศร้อนมีอัตราการอบแห้งสูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของไอน้ำร้อนขวดอึ้งจะมีมากขึ้นทำให้มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไอน้ำร้อนขวดอึ้งสูงกว่าอากาศร้อน ดังนั้นที่อุณหภูมิการอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน อัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ้งจะมากกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน



รูปที่ 7 แสดงอุณหภูมิอินเวอร์ชันที่พบในการอบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้น 19.5% d.b. อุณหภูมิเมล็ดเริ่มต้น 32°C โดยใช้ความเร็วตัวกลาง 3.2 m/s



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของตัวกลางและความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดถั่วเหลือง
กับอุณหภูมิอินเวอร์ชัน

รูปที่ 8 แสดงผลของความชื้นเริ่มต้น และความเร็วของตัวกลางในการอบแห้งที่มีอุณหภูมิอินเวอร์ชัน พบว่าการเพิ่มความเร็วของตัวกลางจะทำให้อุณหภูมิอินเวอร์ชันมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเร็วของตัวกลางเสมือนกับการเพิ่มค่า Reynold number ให้สูงขึ้น มีผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงเช่นกัน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงตามไปด้วย โดยในกรณีนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนของไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเพิ่มขึ้นมากกว่าในกรณีของอากาศร้อน จึงส่งผลให้อุณหภูมิอินเวอร์ชันมีค่าลดลง สำหรับผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นเริ่มต้น พบว่าความชื้นเริ่มต้นสูงจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น ดังนั้นในกรณีการอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำในช่วงการควบแน่นของไอน้ำส่งผลให้น้ำในเมล็ดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวทำให้การแพร่ของความชื้น (ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล) ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีการเพิ่มขึ้นได้ในอัตราที่สูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ส่งผลให้เกิดอุณหภูมิอินเวอร์ชันมีแนวโน้มลดลง

สรุป

จากผลการทดลองและผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการดูดซับน้ำของเมล็ดถั่วเหลืองที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอุณหภูมิเริ่มต้นของถั่วเหลือง โดยเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอุณหภูมิเริ่มต้นของถั่วเหลืองสูงจะทำให้การดูดซับน้ำของเมล็ดเกิดขึ้นน้อย และสามารถพบอุณหภูมิอินเวอร์ชันได้ง่ายขึ้น โดยอุณหภูมิอินเวอร์ชันมีค่าลดลงเมื่อใช้ความเร็วของตัวกลางสูงขึ้นหรือเมื่อเพิ่มความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดถั่วเหลือง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยสำหรับโครงการนี้

เอกสารอ้างอิง

1. คลฤดี ใจสุทธี. 2543. การอบแห้งกึ่งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 101 น.
2. อิศรศ ฐชกัลยา. 2543. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 163 น.
3. ณรงค์ อังกิมบัว. 2544. การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 64 น.
4. Chen, Z., Wu, W. and Agarwal, P.K. 2000. Steam-Drying of Coal. Part 1. Modeling the Behavior of a Single Particle Fuel. 79: 961-973.
5. Tarnawski, W.Z., Mitera, J., Borowski, P. and Klepaczka, A. 1996. Energy Analysis on Use of Air and Superheated Steam as Drying Media. Drying Technology. 14 (7&8): 1733-1749.
6. Rohsenow, W.M. 1973. Film Condensation. chap. 12 in Handbook of Heat Transfer. McGraw-Hill, New York. 1-33.
7. Holman, J.P. 1997. Heat Transfer. 8th ed. McGraw-Hill, USA. 517-526.
8. ปาวิณา ปรัชญาวสิน. 2546. การศึกษาผลของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีผลต่อคุณภาพของถั่วเหลือง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 93 น.
9. Schwartz, J.P. and Brocker, S. 2002. A Theoretical Explanation for the Inversion Temperature. Chemical Engineering Journal. 86: 61-67.
10. Yoshida, T. and Hyoda, T. 1970. Evaporation of Water in Air. Humid Air and Superheated Steam. Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development. 9: 207-214.

สัญลักษณ์

A_s = พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนของเมล็ดถั่วเหลือง, m^2	h_m = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, $kg/m^2 \cdot s$ (kg/m^3)
C_p = ความร้อนจำเพาะ, $kJ/kg \cdot K$	k = ค่าการนำความร้อน, $W/m \cdot K$
D = เส้นผ่านศูนย์กลาง, m	M = ความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
D_{eff} = สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล, m^2/s	M_w = น้ำหนักโมเลกุลของน้ำ, $kg/kmol$
g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2	$\bar{M}$ = ความชื้นเฉลี่ยภายในเมล็ดถั่วเหลือง, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างตัวกลางและถั่วเหลือง, $W/m^2 \cdot K$	m = มวล, kg
h_g = ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ, kJ/kg	$\dot{m}_{cond}$ = อัตราการควบแน่นของน้ำ, kg/s
	$\dot{m}_{cond}''$ = อัตราการควบแน่นของไอน้ำ, $kg/m^2 \cdot s$

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 "วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก"

30-31 มีนาคม 2548 ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ กรุงเทพฯ

Q''	= อัตราการถ่ายเทความร้อน, kW/m ²	V	= ปริมาตร, m ³
q	= อัตราการถ่ายเทความร้อน, kW	v	= ความเร็ว, m/s
r	= ระยะในแนวรัศมี, m	ρ	= ความหนาแน่น, kg/m ³
T	= อุณหภูมิ, K	μ	= ค่าความหนืด, kg/m · s
t	= เวลา, second		

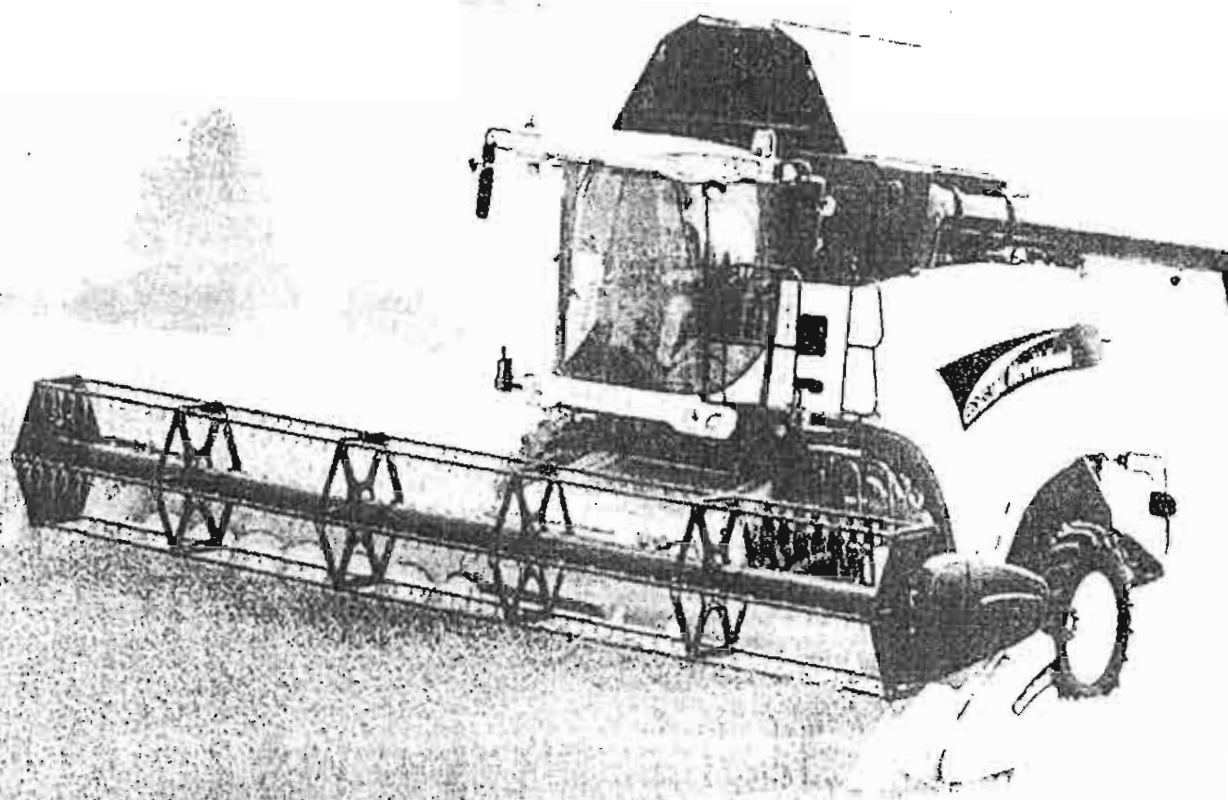
สัญลักษณ์กำกับล่าง

a	= อากาศร้อน	sat	= สภาวะอิ่มตัว
$cond$	= สภาวะการควบแน่นของไอน้ำ	st	= ไอน้ำร้อนชวคั้ง
f	= ฟิล์มน้ำ	v	= ไอน้ำ
fw	= น้ำอิสระ	vap	= สภาวะการระเหยน้ำ
p	= เมล็ดตัวเหลือง	w	= น้ำ



วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก

Toward Kitchen of the World by Agricultural Engineering



การประชุมวิชาการครั้งที่ 6 ประจำปี 2548

สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

30-31 มีนาคม 2548 คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ลักษณะของการอบแห้งกุ้งด้วยเทคนิควิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอนในสภาวะการอบแห้งที่แตกต่าง

ยวนารี นามสงวน^{1*} วารุณี เดีย² สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา³ และ สมชาติ โสภณธนาฤทธิ์⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอเทคนิควิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอน คือ การอบแห้งกุ้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ่งตามด้วยป้อนความร้อน (SSD/HPD) สภาวะการอบแห้งที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิอบแห้งในช่วงแรกด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ่งที่ 160°C-180°C และ ความชื้นที่ดึงออกจากเครื่องอบแห้งแบบใช้ไอน้ำร้อนขวดอึ่งอยู่ที่ประมาณ 30-40% w.b. แล้วอบแห้งช่วงที่สองด้วยป้อนความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C โดยศึกษาจลนศาสตร์ของการอบแห้งและคุณภาพของกุ้งหลังการอบแห้ง และทำการเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งกุ้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ่งเพียงอย่างเดียว (SSD) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิไอน้ำร้อนขวดอึ่งเท่ากัน คุณภาพของกุ้งแห้งที่ทำการศึกษาคือ การหาค่า สี และเนื้อสัมผัส จากการทดลองพบว่า การอบแห้งกุ้งที่สภาวะอุณหภูมิไอน้ำร้อนขวดอึ่งสูงขึ้นและการเปลี่ยนขั้นตอนการอบแห้งที่ความชื้นสูง มีผลดีเฉพาะคุณภาพสี ในการอบแห้งกุ้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ่งตามด้วยป้อนความร้อน ส่วนการหาค่านั้นมากขึ้นและเนื้อสัมผัสของกุ้งเหนียวและแข็งขึ้น และพบว่ากุ้งแห้งที่ได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ่งตามด้วยป้อนความร้อน มีการหาค่าน้อยลง คุณภาพสีดีขึ้น เนื้อไม่เหนียวและไม่แข็ง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ่งเพียงอย่างเดียว

¹อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200

²รองศาสตราจารย์³ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ⁴ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10400

*ผู้รับผิดชอบบทความ โทร: 0-5394-4146; โทรสาร: 05394-4145; อีเมล: yuvanaree@yahoo.com

CHARACTERISTICS OF SHRIMP DRIED BY TWO-STAGE DRYING TECHNIQUE AT DIFFERENT DRYING CONDITIONS

Yuvanaree Namsanguan^{1*}, Warunee Tia², Sakamon Devahastin³ and Somchart Soponronnarit⁴

ABSTRACT

The present work proposed the new technique of the two-stage drying. The work concerned on the drying of shrimp using superheated steam dryer followed by heat pump dryer (SSD/HPD) at different drying conditions. The effects of drying temperatures and intermediate moisture contents (IMC) on drying characteristics and dried product quality were investigated. Shrinkage, color and texture of dried shrimp were determined. The experiments were carried out in the two stages of SSD/HPD. The first-stage superheated steam drying was performed at the drying temperatures of 160°C and 180°C while the second-stage heat pump drying was operated at 50°C. The moisture content of shrimp at the end of the superheated steam drying stage (IMC) was varied between 30% and 40% (w.b.). For the comparison, purely SSD (superheated steam drying for the whole drying process) was also performed at the same drying steam temperature as used in the first-stage SSD. As for the effects of drying conditions, the results showed that higher drying steam temperature and higher IMC yielded better product quality only in terms of color. In addition, it was found that SSD/HPD dried shrimp had much lower degree of shrinkage, better color, softer and less tough than purely SSD dried shrimp.

KEYWORDS: Drying kinetics, Drying temperature, Hybrid drying, IMC, Quality

¹Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200

²Associate Professor, ³Professor, School of Energy and Materials, ⁴Assistant Professor, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

*Corresponding author. Tel.: 0-5394-4146; Fax: 05394-4145; E-mail address: yuvanaree@yahoo.com

บทนำ

กุ้งแห้งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ประมงที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เพราะมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 60 การผลิตกุ้งแห้งส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เดิมทำเป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือน โดยใช้แสงอาทิตย์ อบบนเตา หรือสลับกับการใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ซึ่งมักมีปัญหาในเรื่องความสม่ำเสมอของคุณภาพ และเนื่องจากความต้องการของทางการตลาดทั้งในและต่างประเทศที่มากขึ้น กระบวนการผลิตกุ้งแห้งจึงควรพิจารณาศักยภาพของการทำแห้งทั้งด้านอัตราการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการสิ้นเปลืองพลังงาน คุณภาพกุ้งแห้งที่ดีที่ได้รับการยอมรับ คือ กุ้งแห้งที่มีสีแดงเหลืองเข้ม การหดตัวน้อย เนื้อสัมผัสเหนียวนุ่มและนุ่ม

กระบวนการผลิตกุ้งแห้งโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การต้มกุ้งในน้ำเกลือและการอบแห้ง (Posomboon, 1998) การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงพบว่าเป็นวิธีที่น่าสนใจ มีศักยภาพการอบแห้งสูง เนื่องจากสามารถรวม 2 ขั้นตอนนี้ให้อยู่ในขั้นตอนเดียวได้ ใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่าลมร้อนมาก และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีกว่าการใช้ลมร้อน ไม่มีการสูญเสียสารอาหารไปกับน้ำต้มกุ้ง กุ้งแห้งที่ได้มีการหดตัวและสีดีกว่าการใช้ลมร้อน (Prachayawarakorn et al., 2002) เนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงเป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางในปัจจุบันว่า ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความพรุนมากและสีดีขึ้น เนื่องจากไม่เกิดปฏิกิริยา oxidation จากออกซิเจน อย่างไรก็ตาม การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงเพียงอย่างเดียวด้วยอุณหภูมิสูงตลอดทั้งช่วงการอบแห้งทั้งหมด มีผลต่อโครงสร้างและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะเนื้อสัตว์ซึ่งมีโปรตีนเป็นส่วนประกอบสำคัญ การสัมผัสกับอุณหภูมิสูงทำให้กล้ามเนื้อโปรตีนในกุ้งเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยอัดแน่นและเกาะเป็นก้อนแข็ง เพื่อลดปัญหาดังกล่าว เทคนิคการอบแห้งแบบผสมผสานจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ เช่น การอบแห้งแบบสองขั้นตอน โดย Chen et al. (1992) ได้ทดลองอบแห้งรังไหมด้วยเทคนิควิธีการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงตามด้วยลมร้อน (SSD/AD) พบว่า คุณภาพไหมที่ได้ดีกว่าการใช้วิธีการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมีการลดอุณหภูมิอบแห้งของลมร้อนในช่วงที่สอง ซึ่งส่งผลคือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจคือ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงตามด้วยปั๊มความร้อน (SSD/HPD) ซึ่งใช้การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงในช่วงความชื้นสูง สามารถอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงและอัตราการอบแห้งสูง และใช้การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนในช่วงที่ความชื้นลดลง สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำแต่อัตราการอบแห้งสูง ผลิตภัณฑ์จะไม่เสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนและเวลาอบแห้งนานในช่วงที่สอง สำหรับการอบแห้งด้วยวิธีนี้ยังคงช่วยลดขั้นตอนการต้มกุ้ง ทำให้กุ้งมีรสชาติดีและยังสามารถกำจัดจุลินทรีย์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอเทคนิควิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอน คือ การอบแห้งกุ้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงตามด้วยปั๊มความร้อน โดยศึกษาสภาวะการอบแห้งที่มีผลต่อระยะเวลาอบแห้งและคุณภาพของกุ้งหลังอบแห้ง สภาวะการอบแห้งที่ศึกษาคือ อุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งและความชื้นขณะเปลี่ยนขั้นตอนการอบแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลอง

การทดลองอบแห้งกุ้งแบ่งเป็น 2 ส่วนแต่ละส่วนแยกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ 1 การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยังคงเพียงอย่างเดียว และ แบบที่ 2 การอบแห้งแบบสองขั้นตอนโดยใช้ไอน้ำร้อนยังคงแล้วตามด้วยด้วยปั๊มความร้อน ซึ่งมีรายละเอียดของกระบวนการและสภาวะการอบแห้งดังตารางที่ 1 ระบบเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงเป็นแบบสำหรับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) มีส่วนประกอบหลัก คือ เครื่องกำเนิดไอน้ำ อุปกรณ์ให้ความร้อน (Superheater) ขนาด 13.5 kW ห้องอบแห้งแบบตู้ขนาด 30 x 30 x 10 cm³ และพัดลมใบพัดโค้งหลัง โดยทำการทดสอบที่ความดันบรรยากาศ

เครื่องอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนเป็นแบบวงจรปิด มีส่วนประกอบสำคัญ คือ ห้องอบแห้งขนาด 83 x 74 x 60 cm³ เครื่องอัดไอแบบลูกสูบขนาด 2.1 kW เครื่องทำระเหย ขนาด 6.2 kW เครื่องควบแน่นตัวในและเครื่องควบแน่นตัวนอกทั้งคู่มีขนาดเท่ากันคือ 8.3 kW

Table 1 The experimental conditions

Part	Drying process	Drying conditions
I	SSD	Single-stage SSD, 160°C
	SSD/HPD	1 st -stage SSD, 160°C until IMC = 40 ± 2.1% (w.b.) and 2 nd -stage HPD, 50°C
	SSD/HPD	1 st -stage SSD, 160°C until IMC = 30 ± 2.3% (w.b.) and 2 nd -stage HPD, 50°C
II	SSD	Single-stage SSD, 180°C
	SSD/HPD	1 st -stage SSD, 180°C until IMC = 40 ± 2.1% (w.b.) and 2 nd -stage HPD, 50°C
	SSD/HPD	1 st -stage SSD, 180°C until IMC = 30 ± 1.9% (w.b.) and 2 nd -stage HPD, 50°C

การทดลองแต่ละครั้งใช้กุ้งสดครั้งละ 1 กิโลกรัม การเตรียมตัวอย่าง นำกุ้งขาว (Penaeidae) ขนาดเล็ก มาทำความสะอาด แล้วนำไปแช่น้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 2% โดยปริมาตร ประมาณ 30 นาที ก่อนนำไปอบแห้ง ตัวอย่างกุ้งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 80% w.b. ทำการทดลองอบแห้งในแต่ละกรณีตามตารางที่ 1 อุณหภูมิและความเร็วของไอน้ำร้อนขวดที่ใช้ คือ 160°C และ 180°C และ 2.08 ± 0.2 m/s ตามลำดับ สำหรับการอบแห้งในขั้นตอนที่สอง อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน คือ 50°C และ ความเร็วลมในเครื่องอบแห้งคือ 0.94 m/s โดยความชื้นที่ดึงออกจากขั้นตอนแรก (intermediate moisture content: IMC) คือ 30% และ 40% w.b. แต่ละการทดลองทำการเก็บข้อมูลดังนี้ อุณหภูมิของตัวกลางที่ให้อบแห้ง การลดลงของความชื้นตัวอย่างขณะอบแห้งโดยใช้น้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียด ± 0.1 กรัม ทำการอบแห้งจนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 20% w.b. สำหรับการหาค่าน้ำหนักแห้งใช้คู่ออบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

การทดสอบคุณภาพของกุ้ง

คุณภาพกุ้งที่ทำการทดสอบคือ การหาค่า สี และเนื้อสัมผัส โดย 1) การทดสอบการหาค่า จะใช้วิธีวัดขนาดของตัวอย่างกุ้งก่อนและหลังทำการอบแห้งโดยใช้ vernier เพื่อหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าโดยสมมติรูปร่างกุ้งเป็นทรงกลม แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหาค่าของกุ้ง 2) การทดสอบคุณภาพสีของกุ้ง จะทำการวัดสีของกุ้งก่อนและหลังทำการอบแห้งโดยใช้เครื่องวัดสีอาหารชนิด Model Juki JP 7100P ซึ่งแสดงค่าสี 3 อย่าง คือ ค่าสีแดง (a) หรือสีเขียว (-a) ค่าสีเหลือง (b) หรือสีน้ำเงิน (-b) และค่าความสว่าง (L) และ 3) การทดสอบเนื้อสัมผัส จะทำการวัดค่าความเหนียวและความแข็ง

ของกุ้งหลังทำการอบแห้ง โดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัสของอาหารชนิด TA-XT2i Texture Analyzer ซึ่งแสดงค่าแรงเฉือนที่มากที่สุดที่ทำให้ตัวกุ้งขาด (ค่าความเหนียว) และใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัสของอาหารชนิด Instron Universal Testing Machine model 4301 ซึ่งแสดงค่าแรงกดที่ตัวกุ้งรับได้ (ค่าความแข็ง) ในการทดสอบเนื้อสัมผัสของกุ้งหลังการอบแห้งทั้งสองแบบนี้ เครื่องได้ออกแรงกดในแนวตั้งขวางความยาวของตัวกุ้ง

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลองอบแห้งกุ้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ

รูปที่ 1 และ 2 แสดงการเปรียบเทียบการลดความชื้นของกุ้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ และความชื้นที่ดึงออกจากชิ้นคอนแรกที่แตกต่างกัน (IMC) โดยใช้อุณหภูมิอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดที่ 160°C และ 180°C ตามลำดับ พบว่าการอบแห้งแบบสองชั้นคอน อัตราการลดความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก การอบแห้งจะช้าลงเมื่อเปลี่ยนการอบแห้งช่วงหลังมาใช้ไอน้ำร้อน โดยจะใช้เวลานานขึ้นกรณีที่การอบแห้งแบบสองชั้นคอนซึ่งวัสดุถูกดึงออกจากช่วงแรกที่มีความชื้นสูง โดยการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนชนิดที่ 160°C ใช้เวลานานขึ้นกว่ากรณีที่การอบแห้งแบบสองชั้นคอนซึ่งวัสดุถูกดึงออกจากช่วงแรกที่มีความชื้นสูง โดยการใช้ไอน้ำร้อนชนิดที่ 180°C ใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมด 127 และ 180 นาที สำหรับความชื้นที่ดึงออกจากชิ้นคอนแรก 30% w.b. และ 40% w.b. ตามลำดับ และ กรณีที่ใช้อุณหภูมิอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดที่ 180°C ใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมด 127 และ 180 นาที สำหรับความชื้นที่ดึงออกจากชิ้นคอนแรก 30% w.b. และ 40% w.b. ตามลำดับ ซึ่งถือว่า อุณหภูมิไอน้ำร้อนชนิดที่ 180°C ในช่วงที่ทำการศึกษามีผลน้อยมากต่อเวลาการอบแห้งทั้งหมด (เมื่อเปรียบเทียบที่ IMC เท่ากัน) ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิไอน้ำร้อนชนิดที่ 180°C ในช่วงนี้มีผลให้การอบแห้งเร็วขึ้นในช่วงแรกเพียงเล็กน้อย และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งในช่วงหลังด้วยไอน้ำร้อนชนิดที่ 160°C ไม่ต่างกันที่ค่าความชื้นที่ดึงออกจากชิ้นคอนแรกเดียวกัน ดังนั้นเวลาอบแห้งรวมทั้งหมดจึงไม่ต่างกัน

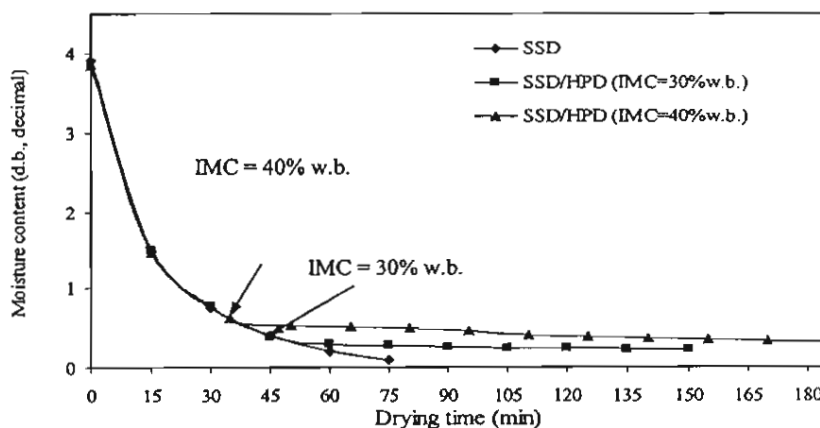


Figure 1 Drying curves of shrimp undergoing purely SSD and SSD/HPD
($T_s = 160^\circ\text{C}$ used in the superheated steam drying process)

สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งเพียงอย่างเดียว พบว่า มีอัตราการลดความชื้นเร็วที่สุดคือ ใช้เวลาอบแห้งประมาณ 60 และ 45 นาที ที่อุณหภูมิอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่ง 160°C และ 180°C ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากใช้อุณหภูมิสูงอบแห้งตลอดช่วงของการอบแห้งทั้งหมด

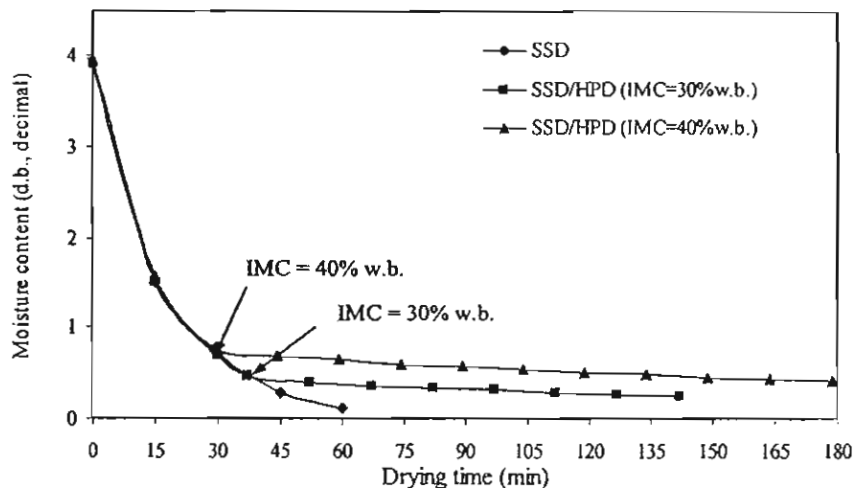


Figure 2 Drying curves of shrimp undergoing purely SSD and SSD/HPD
($T_s = 180^{\circ}\text{C}$ used in the superheated steam drying process)

คุณภาพของผลิตภัณฑ์

1. การหาคั่ว

จากผลการทดลองดังตารางที่ 2 พบว่า การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดยิ่งตามด้วยป้อนความร้อน (SSD/HPD) (ทั้งสองช่วงอุณหภูมิอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งที่ 160°C และ 180°C) ให้ผลการหาคั่วของกุ้งแห้งน้อยกว่าการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดยิ่งเพียงอย่างเดียว จึงถือได้ว่าช่วยให้การหาคั่วของกุ้งแห้งน้อยลง เป็นที่ทราบดีว่าการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดยิ่งช่วยลดการหาคั่วของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง เนื่องจากการระเหยน้ำในวัสดุเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นโดยที่ไอน้ำในวัสดุขยายตัวภายในผนังเซลล์ ทำให้วัสดุเกิดรูพรุนมากมาย (Li et al., 1999) แต่อย่างไรก็ตาม หากอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดยิ่งด้วยอุณหภูมิสูงตลอดช่วงของการอบแห้งทั้งหมด อาจมีผลคือโครงสร้างรูพรุนภายในวัสดุโดยทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดยิ่งตามด้วยป้อนความร้อน ซึ่งแบ่งการอบแห้งเป็นสองขั้นตอน โดยอบแห้งด้วยอุณหภูมิไอน้ำร้อนขวดยิ่งสูงในช่วงแรก แล้วเปลี่ยนเป็นการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำด้วยป้อนความร้อนในช่วงที่สอง การหาคั่วน้อยลงเนื่องจากการเปลี่ยนการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำในช่วงที่สอง ดังนั้นการใช้ป้อนความร้อนมาอบแห้งในช่วงที่สองช่วยรักษาภาพโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งเพียงอย่างเดียว

จากผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นที่ดึงออกจากชั้นคอนแรก (IMCs) ทั้งสองช่วงอุณหภูมิอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งที่ 160°C และ 180°C ตามตารางที่ 2 พบว่า การหาคั่วให้ผลที่มีแนวโน้มเดียวกัน คือ การอบแห้งแบบสองขั้นตอน (SSD/HPD) เมื่อดึงออกที่ความชื้นสูงขึ้นการหาคั่วจะเพิ่มขึ้น ความชื้นที่ดึงออกจากชั้นคอนแรก 30% w.b. จะได้กุ้งที่หาคั่วน้อยกว่ากรณีที่ดึงออกที่ความชื้น 40% w.b. ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหากเปลี่ยนขั้นตอนการอบแห้งที่ความชื้นสูงอยู่ การสร้าง

รูปทรงแบบนี้ด้วยการอบแห้งแบบใช้น้ำร้อนขวดซึ่งในช่วงแรกอาจยังไม่มากพอ (pore development) เมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนในช่วงสองจึงง่ายต่อการหดตัว นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อการหดตัวด้วย กรณีที่ดึงออกที่ความชื้นสูง (40% w.b.) เวลาที่ใช้ในการอบแห้งนานกว่ากรณีที่ดึงออกที่ความชื้นต่ำ (30% w.b.) ประมาณ 1.4 เท่า โดยการอบแห้งในช่วงที่สองซึ่งใช้อากาศในเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนจะใช้เวลานานขึ้นเมื่อดึงออกที่ความชื้นสูง

Table 2 Percentage of shrinkage of shrimp undergoing different drying techniques

Drying Technique	Shrinkage (%)
: $T_d = 160^\circ\text{C}$ used in the SSD process	
SSD (single-stage drying)	44.40 $\pm$ 4.59
SSD/HPD (IMC $\approx$ 40% w.b.)	35.25 $\pm$ 3.99
SSD/HPD (IMC $\approx$ 30% w.b.)	28.22 $\pm$ 8.14
: $T_d = 180^\circ\text{C}$ used in the SSD process	
SSD (single-stage drying)	44.63 $\pm$ 7.21
SSD/HPD (IMC $\approx$ 40% w.b.)	38.20 $\pm$ 6.16
SSD/HPD (IMC $\approx$ 30% w.b.)	31.56 $\pm$ 6.89

2. คุณภาพสี

ตารางที่ 3 แสดงค่าสีที่ได้จากการตรวจสอบโดยเครื่องวัดสีอาหาร 3 อย่าง คือ ค่าสีแดง (a) ค่าสีเหลือง (b) และค่าความสว่าง (L) พบว่า การใช้อุณหภูมิอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่งที่ 160°C และ 180°C มีแนวโน้มของคุณภาพสีคล้ายกัน คือ การอบแห้งโดยใช้น้ำร้อนขวดซึ่งตามด้วยปั๊มความร้อน (SSD/HPD) กุ้งแห้งที่ได้มีสีแดงและเหลืองกว่าการอบแห้งโดยใช้น้ำร้อนขวดซึ่งเพียงอย่างเดียว และมีค่าความสว่างต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย ถือได้ว่าช่วยพัฒนาสีของกุ้งแห้งซึ่งสีแดงเข้ม (intense red orange color) ถือว่าเป็นลักษณะที่ดีของผลิตภัณฑ์กุ้งแห้ง (Posomboon, 1998) เนื่องจากการอบแห้งแบบสองขั้นตอนนั้นอบแห้งด้วยอุณหภูมิค่าความชื้นปั๊มความร้อนในช่วงที่สอง สันนิษฐานว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงตลอดช่วงโดยการเปลี่ยนขั้นตอนการอบแห้งที่ความชื้นสูงจะให้คุณภาพสีที่ดีกว่าที่การเปลี่ยนขั้นตอนการอบแห้งที่ความชื้นต่ำ โดยใน

กรณีที่ความชื้นที่ดึงออกจากขั้นตอนแรกที่ 40% w.b. สีแดงและเหลืองของกุ้งแห้งสูงที่สุด อาจเนื่องมาจากใช้เวลาอบแห้งอุณหภูมิสูงด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่งในช่วงแรกสั้นกว่ากรณีที่ความชื้นที่ดึงออกจากขั้นตอนแรกที่ 30% w.b. และการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนช่วยรักษาคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ (Chua et al., 2000; Alves-Filho, 2002) ค่าสีเริ่มต้นของกุ้ง a, b และ L คือ -0.42, -0.97 และ 32.15 ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งเดียวกันและความชื้นที่ดึงออกจากขั้นตอนแรกเท่ากัน การใช้อุณหภูมิอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่งที่สูงขึ้น มีผลให้กุ้งแห้งมีสีแดงและเหลืองขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนขวดซึ่งที่สูงขึ้นนั้นใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง มีผลให้คุณภาพสีดีขึ้น

Table 3 Values of 'a', 'b' and 'L' for the dried shrimp samples

Sample	Colors		
	'a'	'b'	'L'
: $T_s = 160^\circ\text{C}$ used in the SSD process			
SSD (single-stage drying)	8.80	13.46	36.77
SSD/HPD (IMC $\approx$ 40% w.b.)	10.88	14.30	34.36
SSD/HPD (IMC $\approx$ 30% w.b.)	9.12	13.87	36.47
: $T_s = 180^\circ\text{C}$ used in the SSD process			
SSD (single-stage drying)	10.73	14.60	36.53
SSD/HPD (IMC $\approx$ 40% w.b.)	11.88	15.15	35.75
SSD/HPD (IMC $\approx$ 30% w.b.)	11.15	14.76	35.95

3. เนื้อสัมผัส

จากการทดสอบเนื้อสัมผัสของกุ้งที่ได้จากวิธีการอบแห้งและสภาวะการอบแห้งแต่ละแบบ ดังรูปที่ 3a) แสดงค่าแรงเฉือนที่มากที่สุดที่ตัดด้วงกุ้งจนขาด และ รูปที่ 3b) แสดงค่าแรงกดที่กุ้งรับได้ (หวักดแบบผิวหน้าแบนกดอัดด้วงกุ้งในระย 50% ของความหนาของด้วงกุ้ง) พบว่า การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขยคยั้งคามคัวยบีมความร้อน ได้ผลิตด้วงกุ้งแห้งที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสเหนียวและแข็งน้อยกว่าการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขยคยั้งเพียอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากว่า การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขยคยั้งเพียอย่างเดียว วัสดุคยงสัมผัสกับอุณหภูมิสูงของไอน้ำร้อนขยคยั้งตลอดทั้งช่วงการอบแห้ง ทำให้เนื้อสัมผัสเหนียวและแข็ง ขณะที่การอบแห้งแบบสองชั้นคอนเนือวัสดุสัมผัสกับอุณหภูมิสูงของไอน้ำร้อนขยคยั้งในช่วงแรกในระยะเวลาสั้น เนื้อสัมผัสจึงเหนียวและแข็งน้อยลง

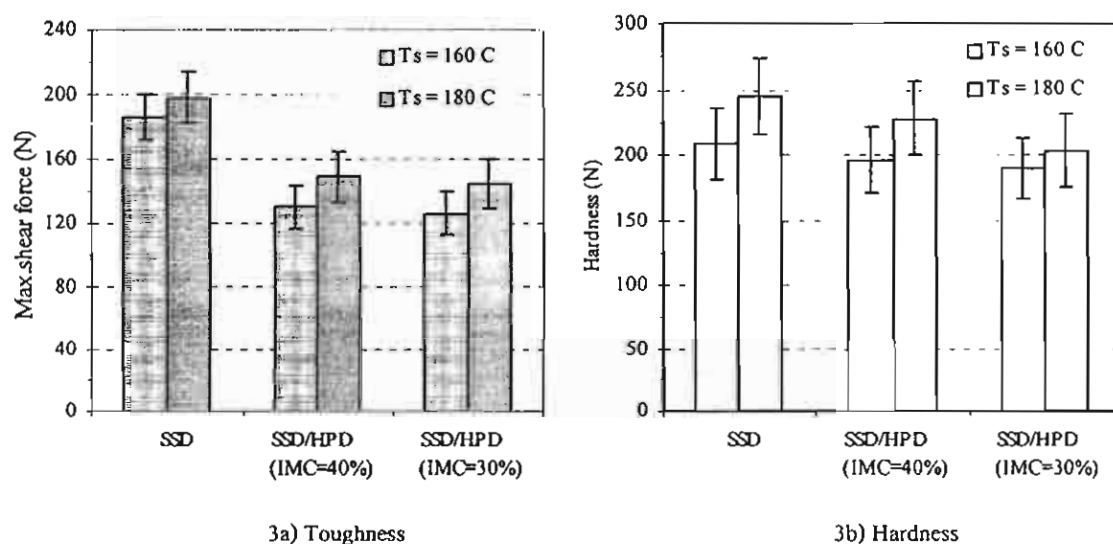


Figure 3 Textural properties of dried shrimp undergoing different drying techniques.

(Vertical lines indicate standard deviations)

สิ่งที่ทราบว่าคุณหุ้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพโปรตีนซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในคั่วกุ้ง คุณหุ้ที่สูงจะทำให้เนื้อโปรตีนแข็งและเกาะตัวกันมาก (Bouton and Harris, 1972) ดังนั้นการที่กุ้งสัมผัสกับคุณหุ้สูงเป็นเวลานานจึงมีผลให้เนื้อเหนียวและแข็งขึ้น จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มคุณหุ้ของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีผลทำให้กุ้งที่ได้จากการอบแห้งมีเนื้อสัมผัสที่เหนียวและแข็งขึ้นกว่าการใช้คุณหุ้ของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวและเนื้อสัมผัสของกุ้ง คือ การหัดตัวแปรผันตรงกับเนื้อสัมผัส โดยถ้าการหัดตัวของกุ้งมากเนื้อสัมผัสจะเหนียวและแข็งมากตาม

สรุป

วิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอน แบบการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยป้อนความร้อน (SSD/HPD) เป็นเทคนิควิธีการอบแห้งที่สามารถพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ กุ้งแห้งที่ได้มีการหัดตัวน้อยลง คุณภาพสีดีขึ้น เนื้อสัมผัสเหนียวน้อยลงและนุ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพียงอย่างเดียว (SSD) จากการศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งต่างๆ พบว่าการใช้คุณหุ้ของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สูงขึ้นและการเปลี่ยนขั้นตอนการอบแห้งที่ความชื้นสูงมีผลดีเฉพาะคุณภาพสี ส่วนการหัดตัวนั้นมากขึ้นและเนื้อสัมผัสของกุ้งเหนียวและแข็งขึ้น

โครงสร้างของผลิตภัณฑ์สามารถพัฒนาได้โดยการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วงแรก และการอบแห้งด้วยป้อนความร้อนในช่วงที่สองช่วยรักษาการสูญเสียรูปร่างของผลิตภัณฑ์ให้น้อยลง ซึ่งการเลือกสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม เช่น คุณหุ้ของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความชื้นที่ดึงออกจากขั้นตอนแรก เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มศักยภาพด้านคุณภาพได้จากการทดลอง พบว่าคุณหุ้ของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความชื้นที่ดึงออกจากขั้นตอนแรกที่มีค่าให้ผลดีหลายด้านต่อการอบแห้งกุ้ง ทั้งในด้านเวลาที่ใช้ออบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุน โครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

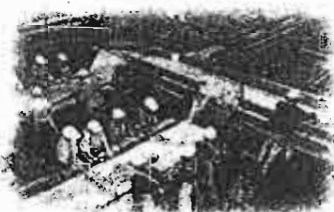
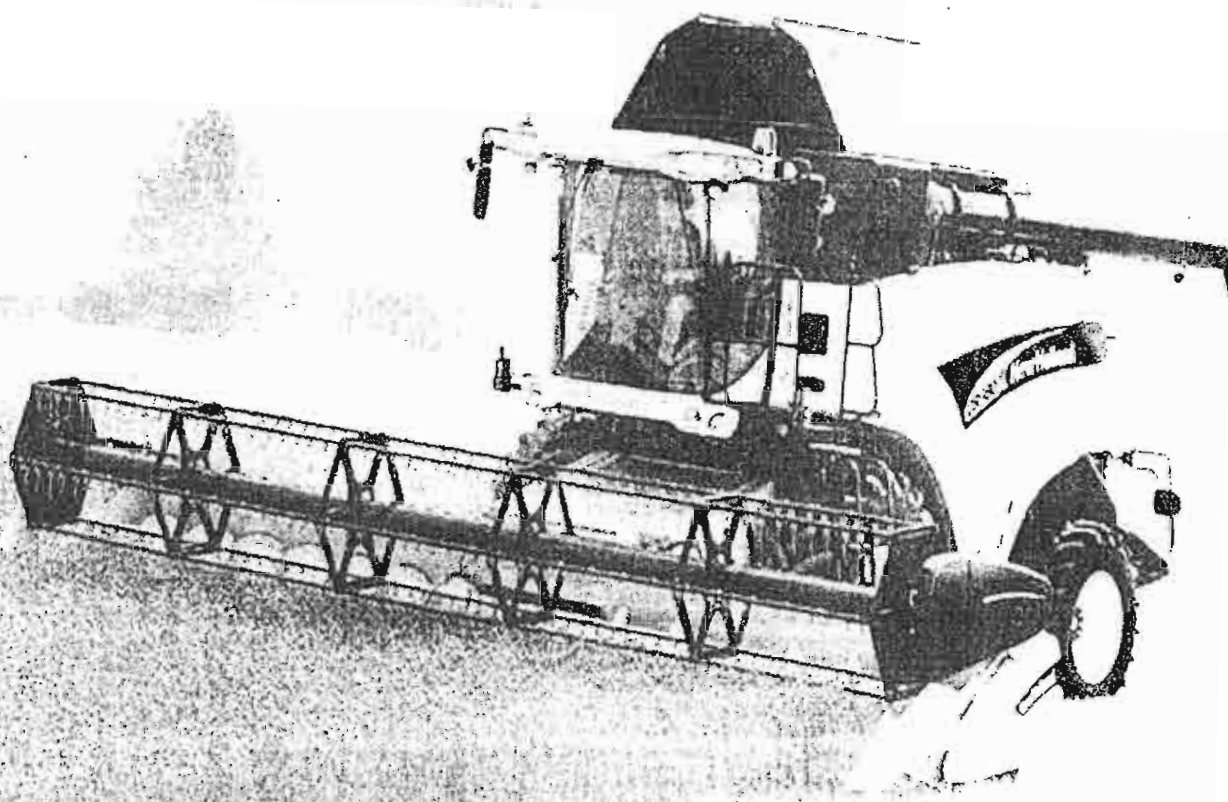
- Alves-Filho, O. 2002. Combined Innovative Heat Pump Drying Technologies and New Cold Extrusion Techniques for Production of Instant Foods. *Drying Technology*. 20 (8): 1541-1557.
- Chen, S.-R., Chen, J.-Y. and Mujumdar, A.S. 1992. A Preliminary Study of Steam Drying of Silkworm Cocoons. *Drying Technology*. 10 (1): 251-260.
- Bouton, R.E. and Harris, P.V. 1972. The Effect of Cooking Temperature and Time on Some Mechanical Properties of Meat. *Journal of Food Science*. 37: 140-144.
- Li, Y.B., Seyed-Yagoobi J., Moreira, R.G. and Yamsaengsung, R. 1999. Superheated Steam Impingement Drying of Tortilla Chips. *Drying Technology*. 17 (1 & 2): 191-213.
- Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S., Wetchacama, S. and Jaisut D. 2002. Desorption Isotherms and Drying Characteristics of Shrimp in Superheated Steam and Hot Air. *Drying Technology*. 20 (3): 669-684.

- Chua, J.K., Mujumdar, A.S., Chou, S.K., Hawlader, M.N.A. and Ho, J.C. 2000. Convective Drying of Banana, Guava and Potato Pieces : Effect of Cyclical Variations of Air Temperature on Drying kinetics and Color Change. Drying Technology. 18 (4&5): 907-936.
- Posomboon, W. 1998. Processing Effect on Quality of Dried Shrimp. Master Thesis. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.



วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก

Toward Kitchen of the World by Agricultural Engineering



MTEC

การประชุมวิชาการครั้งที่ 6 ประจำปี 2548

สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

30-31 มีนาคม 2548 คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การผลิตไอน้ำสำหรับอุตสาหกรรมครัวเรือนโดยใช้เตาเผาแบบตะกรับเลื่อนเป็นแหล่งให้ความร้อน

จิรวัดน์ กิตติคุณ^{1*} สมชาติ โสภณธนฤทธิ์² อำไพศักดิ์ ทัพญญา³ และ ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบ สร้างและทดสอบเตาเผาชีวมวลแบบตะกรับเลื่อน เพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำ สำหรับผลิตไอน้ำในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน กำลังการผลิตที่ออกแบบไว้คือ 20 kg/hr ที่ความดันสูงสุด 6 bar เชื้อเพลิงที่ใช้คือฟางข้าว โดยศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราการป้อนอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้และประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ และมลพิษที่เกิดขึ้น

จากผลการทดลองพบว่า หม้อไอน้ำสามารถผลิตไอน้ำได้ตามเงื่อนไขของการออกแบบ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศส่วนเกินมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้และประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ ส่วนปริมาณแก๊สพิษต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานอากาศเสียที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

¹นักศึกษาปริญญาโท ²อาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ. มหาสารคาม 44150

³อาจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ. กรุงเทพฯ 10140

⁴อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

*ผู้รับผิดชอบบทความ โทร: 0-6579-7087; โทรสาร: 0-4375-4316; อีเมล: chirawat_k@hotmail.com

PRODUCTION OF STEAM FOR DOMESTIC INDUSTRY USING TRAVELING GRATE COMBUSTOR AS HEAT SOURCE

Chirawat Kitikhun^{1*}, Somchart Soponronnarit², Umphisak Teeboonma³ and Songchai Wiriyaumpaiwong⁴

ABSTRACT

This research is to study design, construction and testing a biomass traveling grate combustor, an energy source, supplied to a boiler for production of steam in the domestic industry. Designed steam capacity is 20 kg/hr at the highest pressure of 6 bars. The studied fuel is straw rice. The effects of fuel feed rate and excess air on the combustor and boiler efficiency and emission were also investigated.

Experimental results showed that the boiler can be produced steam according to design condition. The fuel feed rate and excess air were more effected on the combustion efficiency and effectiveness of boiler. The toxic gases after combustion lie in the acceptable level of air emission from industrial plant.

KEYWORDS: Combustion, Traveling grate, Biomass, Boiler

¹Student, ⁴Lecturer, Department of Energy Technology,

Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kuntarawichai, Mahasarakham 44150

²Lecturer, School of Energy and Material, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

³Lecturer, Faculty of Engineering, Ubonratchatani University, Warinchuorab, Ubonratchatani 34190

*Corresponding author. Tel.: 0-6579-7087; Fax: 0-4375-4316; E-mail address: chirawat_k@hotmail.com

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนเชื้อเพลิงและความต้องการพลังงานในประเทศมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาการสูญเสียเงินตราในการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ดังนั้นการนำเอาทรัพยากรภายในประเทศมาผลิตใช้เป็นพลังงานทดแทนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก เช่น ข้าว น้ำตาล น้ำมันปาล์ม ยางพารา มันสำปะหลัง เป็นต้น ผลผลิตส่วนหนึ่งส่งออกไปต่างประเทศมีมูลค่าหลายพันล้านบาท อย่างไรก็ตามในการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้ จะมีวัสดุเหลือใช้ออกมาจำนวนหนึ่งด้วยได้แก่ แกลบ ชานอ้อย ฟางข้าว กากปาล์ม กากและกะลามะพร้าว เป็นต้น วัสดุเหลือใช้เหล่านี้เรียกว่า “ชีวมวล”

ชีวมวล เป็นแหล่งเก็บพลังงานจากธรรมชาติ สามารถนำมาผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเพื่อเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ออกมาเป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจะให้พลังงานออกมา แต่ชีวมวลจัดเป็นเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำและเผาไหม้ทั้งหม้อไอน้ำที่ใช้ส่วนใหญ่มีประสิทธิภาพต่ำมาก ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตพลังงาน และการหาพลังงานทดแทนอื่น ๆ มาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยออกแบบเตาเผาให้เหมาะสมกับการเผาไหม้และออกแบบหม้อไอน้ำให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เตาเผาชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน -20 – 60 % (สุวิทย์ เตีย, 2542) และที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 16 – 120 % (W. Permchart, 2004) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับเตาเผาแกลบแบบไฮโคลน ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน มากกว่า 200 % (สมชาติ ไสภณณฤทธิ์, 2543) พบว่าอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้น

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวมวล โดยศึกษาการเผาไหม้ฟางข้าวในเตาเผาแบบตะกรับเลื่อนเพื่อผลิตไอน้ำ ตลอดจนวิเคราะห์หาค่าพิกัดที่เกิดจากการเผาไหม้และประสิทธิภาพของเตาเผา รวมไปถึงหม้อไอน้ำที่สร้างขึ้นด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

ขั้นตอนการออกแบบ

ในการออกแบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงชีวมวล เริ่มจากการคำนวณหาความร้อนที่ต้องป้อนให้กับหม้อไอน้ำ จากนั้นหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิง และคำนวณหาขนาดพื้นที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้วิธี Effectiveness-NTU Method ระบบโดยรวมประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนเตาเผาและส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 1 หม้อไอน้ำเชื้อเพลิงชีวมวลที่สร้างขึ้น คิดถึงอุปกรณ์และตำแหน่งในการวัดตัวแปรต่าง ๆ ดังภาพที่ 1

วัสดุและอุปกรณ์

เตาเผา ประกอบด้วยห้องเผาไหม้ มีลักษณะเป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยม กว้าง 60 cm ยาว 90 cm สูง 60 cm หุ้มด้วยฉนวน 3 ชั้น ชั้นในสุดเป็นอิฐทนไฟ ชั้นที่สองเป็นฉนวนกันความร้อน และ ชั้นนอกสุดเป็นแผ่นเหล็ก อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับความเร็วรอบและประตูกำหนดความสูงของกองเชื้อเพลิง