

ผลและวิจารณ์

เครื่องอบแห้งขมิ้นชันต้นแบบ

แบบของเครื่องอบแห้งขมิ้นชันระบบปั๊มความร้อนนี้แบบแสดงอยู่ในภาคผนวก ก สัดส่วนภายนอกของเครื่องคือ $0.82 \times 1.6 \times 1.4 \text{ m}^3$ ใช้ระบบปั๊มความร้อนที่ใช้ระบบไฟฟ้า 220 V 1 เฟส กำลังไฟฟ้ารวมสูงสุด 1.38 kW สามารถอบขมิ้นชันได้สูงสุด 30 kg โดยใช้เวลาอบไม่เกิน 9 h

การอบแห้งขมิ้นชัน

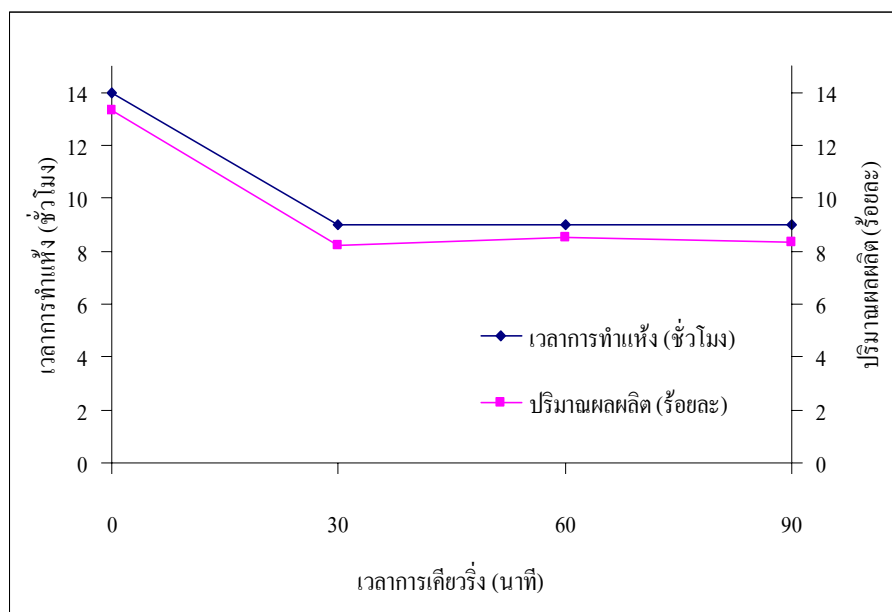
ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองอบแห้งขมิ้นชันจำนวน 12 การทดลอง โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองคือ 1.) อบแห้งแบบระบบปิด (close loop system) 2.) ควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 60°C 3.) อัตราไหลอากาศส่วน Bypass air 70% 4.) ปริมาณขมิ้นชันอบแห้งจำนวน 6 kg ได้ทำการวิเคราะห์และสรุปผลไว้ในตารางที่ 7 ถึงตารางที่ 10 สำหรับรายละเอียดของการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง

ผลการต้มขมิ้นชันในน้ำเดือดที่เวลาต่างกัน 4 ระดับ คือ 0 (ไม่ผ่านการต้ม), 30, 60 และ 90 min ที่น้ำหนักเริ่มต้นอยู่ระหว่าง 6.22 – 5.39 kg ขนาดของชิ้นอบแห้งประมาณ $2 \times 5 \times 0.3 \text{ cm}^3$ แล้วนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งขมิ้นชันระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ยประมาณ 60°C จนน้ำหนักคงที่พบว่า ปริมาณผลผลิตมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการต้มเพิ่มขึ้น ขมิ้นชันที่ไม่ผ่านการต้มจะให้ปริมาณผลผลิตสูงที่สุดคือร้อยละ 13.33 ที่น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 6.15 kg จนเหลือน้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย 0.82 kg ที่ความชื้นเริ่มต้น 856.85 – 1038.87 %db จนเหลือความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 2.59 – 14.29 %db ส่วนขมิ้นชันที่ผ่านการต้มเป็นเวลานาน 30, 60 และ 90 min จะให้ปริมาณผลผลิตค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยที่ขมิ้นชันที่ผ่านการต้มเป็นเวลานาน 30 min จะให้ปริมาณผลผลิตต่ำที่สุดคือร้อยละ 8.23 ที่น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 5.83 kg จนเหลือน้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย 0.48 kg ที่ความชื้นเริ่มต้น 1170.70 – 2208.17 %db จนเหลือความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 8.66 – 10.73 %db ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5 และกราฟภาพที่ 15 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเกิดการสูญเสียองค์ประกอบบางอย่างไปในระหว่างการต้มและการทำแห้ง โดยทั่วไปปริมาณผลผลิตขมิ้นชันแห้งภายหลังการเก็วเรียงและการทำแห้งแล้วจะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 15 – 25 ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของขมิ้นชัน (Purseglove และคณะ, 1981)

เมื่อพิจารณาผลของการต้มที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง พบว่าขมิ้นชันที่ผ่านการต้มจะใช้เวลาในการทำแห้งน้อยกว่าขมิ้นชันที่ไม่ผ่านการต้ม โดยขมิ้นชันที่ไม่ผ่านการต้มจะใช้เวลาในการทำแห้งนานที่สุดถึง 14 h ส่วนขมิ้นชันที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 30, 60 และ 90 min จะใช้เวลาในการทำแห้งเท่ากันคือ 9 h ซึ่งการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sampathu และคณะ (1988) ที่รายงานว่าขมิ้นที่ไม่ผ่านการต้มจะใช้เวลาในการทำแห้งนานกว่าขมิ้นที่ไม่ผ่านการต้มโดยการต้มในน้ำและถ้ามีการลดขนาดของขมิ้นชันโดยการหั่นเป็นท่อนก่อนการทำแห้งจะช่วยลดเวลาในการทำแห้งลงได้อีก ทั้งในกรณีการทำแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และใช้เครื่องอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากการลดขนาดดังกล่าวยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ สายสนม และวราภา (2537) ที่รายงานว่าการต้มขมิ้นชันก่อนการทำแห้งจะช่วยลดเวลาการทำแห้งขมิ้นชันได้เมื่อเทียบกับขมิ้นชันที่ไม่ผ่านการต้มเป็นการช่วยประหยัดพลังงานในการทำแห้งรวมทั้งช่วยลดการปนเปื้อนได้อีกด้วย

ตารางที่ 5 ปริมาณผลผลิตขมิ้นชันหลังผ่านการอบแห้งและเวลาในการทำแห้งของขมิ้นชันที่ผ่านการต้มที่เวลาต่างๆ

เวลาในการต้ม (min)	เวลาในการทำแห้ง (h)	ปริมาณผลผลิต (ร้อยละ)
0	14.00	13.33
30	9.00	8.23
60	9.00	8.52
90	9.00	8.32



ภาพที่ 15 ปริมาณผลผลิตขมิ้นชันแห้งและเวลาการทำแห้งของขมิ้นชันในช่วงเวลาการต้มต่าง ๆ

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งขมิ้นชัน

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งขมิ้นชัน จะประเมินทั้งในด้านความสามารถในการอบแห้ง (capacity of drying) ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (energy effectiveness) และประสิทธิภาพของระบบปั๊มความร้อน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ความสามารถในการอบแห้ง จะถูกกำหนดด้วยค่าอัตราการอบแห้ง (Drying rate) และ Moisture extraction rate (MER)

2. ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน สามารถบ่งบอกได้ด้วยค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) มีหน่วยเป็นเมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย และค่า Specific Moisture Extraction Rate (SMER) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมน้ำระเหยต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

3. ประสิทธิภาพของระบบปั๊มความร้อน กำหนดได้ด้วยค่า Coefficient of performance (COP) ซึ่งแบ่งออกเป็น $COP_{hp(used)}$ ที่เครื่องควบแน่นตัวในใช้ประโยชน์ได้จริง $COP_{hp(sys)a}$ ระบบโดยรวม และ $COP_{hp(sys)r}$ ที่คิดจากวงจรสารทำความเย็น

จากผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้ง (drying rate) ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการอบแห้ง ซึ่งพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงความชื้นขมิ้นชันเทียบกับเวลาดังแสดงในกราฟภาพที่ 16 ถึงภาพที่ 19 หรือพิจารณาจากอัตราการควบแน่นน้ำจากเครื่องทำระเหย (Moisture extraction rate, MER) ดังแสดงในกราฟภาพที่ 20 ถึงภาพที่ 23 ของทั้งสี่เงื่อนไขการทดลองจะเห็นว่าความสิ้นเปลืองพลังงานทั้งหมดมีค่าค่อนข้างจะคงที่ตลอดช่วงเวลาการอบแห้ง ถึงแม้กระบวนการอบแห้งจะดำเนินไปในลักษณะสถานะไม่คงที่ (transient state process) ก็ตาม ในขณะที่พลังงานที่ให้กับพัสดรมีค่าค่อนข้างจะคงที่ เพราะอัตราการไหลของอากาศและความดันลดในระบบไม่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาการอบแห้ง ซึ่งหมายความว่าพลังงานที่เครื่องอัดไอใช้ค่อนข้างคงที่ด้วย เนื่องมาจากมีการระบายความร้อนส่วนเกินจากภายในระบบออกสู่อากาศแวดล้อมภายนอกเป็นระยะ ๆ ตลอดช่วงเวลาการอบแห้ง โดยผ่านทางเครื่องควบแน่นตัวนอกเพื่อต้องการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งไม่ให้สูงจนเกินไป ผลคือทำให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นตลอดจนความดันที่เข้าและออกภายในระบบเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่แน่นอน ในระยะสั้น ๆ มีลักษณะเป็นวัฏจักรหรืออาจกล่าวได้ว่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น ตลอดจนสถานะของสารทำความเย็นที่เข้าและออกเครื่องอัดไอ มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน ทำให้งานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไรมีค่าค่อนข้างคงที่ในคาบเวลาที่พิจารณา เช่นทุก 1 ชั่วโมง เป็นต้น

ด้านประสิทธิภาพของการอบแห้ง เมื่อพิจารณาจากค่าอัตราการอบแห้งตลอดการทดลองของการอบแห้งขมิ้นชันที่ไม่ผ่านการเคียวรังจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.372 - 0.387 kg/h โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 6 เมื่อคิดเป็นหน่วยความชื้นจะอยู่ในช่วง 61.019 - 73.184 %db/h ส่วนขมิ้นชันที่ผ่านการเคียวรังจะมีค่าอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.549 - 0.647 kg/h เมื่อคิดเป็นหน่วยความชื้นจะอยู่ในช่วง 122.588 - 244.259 %db/h โดยอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตและความชื้นเริ่มต้น จากกราฟอัตราการอบแห้งในภาพที่ 16 ถึงภาพที่ 19 เมื่อทำการ Equation fitting ข้อมูลการทดลองด้วย Microsoft Excel (ใช้วิธีการ Least square เป็น Algorithm) โดยกำหนดให้จุดตัดแกนอยู่ที่ความชื้นกับเวลาในการอบแห้งอยู่ในรูปของ $M = a_1 t^3 + a_2 t^2 + a_3 t + M_1$ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.998 - 0.999 สาเหตุที่ขมิ้นชันผ่านการเคียวรังมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าอาจเนื่องมาจากโครงสร้างเนื้อเยื่อของขมิ้นที่เรียกว่าเม็ดสตาร์ชเกิดการเจลไนซ์แล้วเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนอยู่ภายในเซลล์ทำให้เกิดช่องว่างภายในเซลล์โดยรอบจึงช่วยให้น้ำระเหยออกไปได้ง่ายและเร็วเป็นการช่วยประหยัดพลังงานในการทำแห้งไปได้มาก และยังช่วยรักษาคุณภาพของขมิ้นไว้ได้มากกว่า เนื่องจากไม่ต้องสัมผัสกับความร้อนนานเกินไปในระหว่างการทำแห้ง

ตารางที่ 6 อัตราการอบแห้งของขมิ้นชันที่ผ่านการต้มที่เวลาต่าง ๆ

เวลาในการต้ม (min)	อัตราการอบแห้ง (kg/h)
0	0.3807 ^a
30	0.5947 ^b
60	0.5847 ^b
90	0.6130 ^b

a, b ค่าเฉลี่ยที่แสดงด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 0.05

ด้านการใช้พลังงานของการอบแห้งตลอดช่วงการทดลองจะมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมงอยู่ระหว่าง 1.30 – 1.49 kWh ซึ่งการใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ที่อุณหภูมิการทำงานเดียวกัน เมื่อคิดเป็นความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) การอบแห้งขมิ้นชันที่ไม่ผ่านการต้มจะมีค่าอยู่ระหว่าง 13.098 – 15.471 MJ/kWh ส่วนขมิ้นชันที่ผ่านการต้มจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ระหว่าง 9.271 – 10.538 MJ/kWh และในส่วนกลับถ้าคิดเป็นปริมาณน้ำระเหยต่อหน่วยพลังงาน (SMER) ขมิ้นชันที่ไม่ผ่านการต้มจะได้ค่าระหว่าง 0.246 – 0.275 kg/kWh ส่วนขมิ้นชันที่ผ่านการต้มได้ค่าระหว่าง 0.342 – 0.410 kg/kWh สำหรับระบบปั๊มความร้อนจะประเมินประสิทธิภาพจากค่า COP ของระบบซึ่งแบ่งออกเป็น $COP_{hp(used)}$ ที่เครื่องควบแน่นตัวในใช้ประโยชน์ได้จริงค่าอยู่ระหว่าง 0.874 – 2.391 ขณะที่ระบบโดยรวม $COP_{hp(sys)a}$ ที่คิดจากวงจรอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 1.943 – 3.116 และค่า $COP_{hp(sys)r}$ ที่คิดจากวงจรสารทำความเย็นมีค่าอยู่ระหว่าง 3.108 – 7.307 มีระดับความผิดพลาดระหว่างสองวงจรอยู่ในช่วง 0.002 – 1.782 % สาเหตุที่ค่า COP_{hp} ของทั้งสองมีความคลาดเคลื่อนกัน เนื่องมาจากในการทดลองไม่สามารถวัดอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นได้โดยตรงแต่คำนวณจากพลังงานที่เครื่องอัดไอใช้ ประการที่สองเกิดจากการคลาดเคลื่อนในการวัดปริมาณลม เนื่องจากไม่สามารถวัดความเร็วลม ณ ตำแหน่งที่ถูกต้องตามหลักการได้ ตำแหน่งที่วัดความเร็วลมที่ถูกต้องควรจะอยู่บนท่อลมที่ตรงและมีความยาวต่อเนื่องเป็นระยะทางประมาณ 5-8 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าของท่อลม ประการสุดท้ายในการวัดอุณหภูมิของสารทำความเย็นปลายสายเทอร์โมคัปเปิลไม่ได้สัมผัสโดยตรงกับสาร

ทำความเย็นทำให้ค่าที่วัดคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งส่งผลต่อการหาค่าเอนทัลปีของสารทำความเย็น จากการทดลองจะสังเกตว่าค่า $COP_{hp(sys)}$ มีค่ามากกว่าค่า $COP_{hp(used)}$ สาเหตุมาจากมีความร้อนส่วนเกิน ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับผลรวมของพลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอและพัดลมถูกทิ้งสู่บรรยากาศ เพื่อควบคุมไม่ให้อุณหภูมิในห้องอบแห้งสูงเกินความต้องการ

ตารางที่ 7 ผลการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่ไม่ผ่านการต้ม

รายการ	การทดลองที่		
	1	2	3
น้ำหนักขมิ้นชันเริ่มต้น (kg)	6.22	6.19	6.04
น้ำหนักขมิ้นชันสุดท้าย (kg)	0.80	0.83	0.83
ความชื้นเริ่มต้น (%db)	856.85	1038.87	1000.08
ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	89.33	90.30	89.89
ความชื้นสุดท้าย (%db)	2.59	14.29	11.90
ความชื้นสุดท้าย (%wb)	2.52	12.50	10.64
เวลาในการอบแห้ง (h)	14.00	14.00	14.00
สภาวะแวดล้อม			
อุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	30.00	30.33	28.53
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศเฉลี่ย (%)	68.00	82.73	78.40
สภาวะการอบแห้ง			
อุณหภูมิอากาศอบแห้งเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	58.43	58.50	59.57
อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้งเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	56.71	57.50	57.14
อัตราการไหลอากาศ (kg/s)	0.304	0.326	0.315
อัตราการไหลอากาศส่วน Bypass air (kg/s)	0.209	0.213	0.227
อัตราส่วนอากาศ Bypass air (%)	68.75	65.34	72.06
สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง			
อัตราการอบแห้ง (kg/h)	0.387	0.383	0.372
อัตราการอบแห้ง (%db/h)	61.019	73.184	70.584
MER (kg/h)	0.279	0.275	0.294
SMER (kg/kW h)	0.275	0.246	0.233
SEC (MJ/kg)	13.098	14.642	15.471
$\text{COP}_{\text{hp(used)}}$	1.368	1.215	1.678
$\text{COP}_{\text{hp(sys)a}}$	2.627	2.626	2.561
$\text{COP}_{\text{hp(sys)r}}$	7.307	3.173	4.243
Error of $\text{COP}_{\text{hp(sys)}}$ (%)	1.782	0.208	0.657

ตารางที่ 8 ผลการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 30 นาที

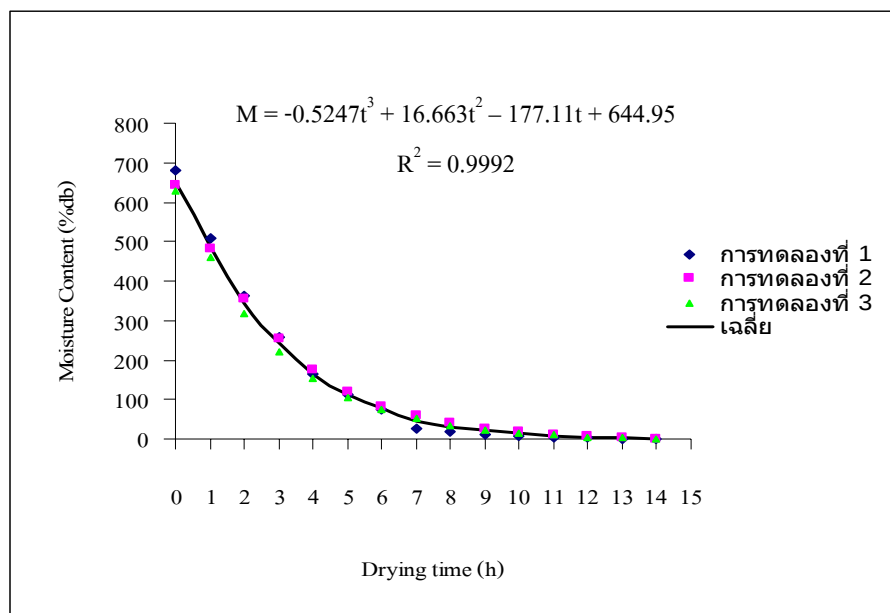
รายการ	การทดลองที่		
	1	2	3
น้ำหนักขมิ้นชันเริ่มต้น (kg)	6.05	6.01	5.44
น้ำหนักขมิ้นชันสุดท้าย (kg)	0.48	0.51	0.45
ความชื้นเริ่มต้น (%db)	1549.39	2208.17	1170.70
ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	93.15	95.25	92.03
ความชื้นสุดท้าย (%db)	10.73	9.84	8.66
ความชื้นสุดท้าย (%wb)	9.69	8.96	7.97
เวลาในการอบแห้ง (h)	9.00	9.00	9.00
สภาวะแวดล้อม			
อุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	29.20	31.20	29.90
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศเฉลี่ย (%)	79.70	66.60	71.90
สภาวะการอบแห้ง			
อุณหภูมิอากาศอบแห้งเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	58.56	58.56	58.33
อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้งเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	55.44	56.11	56.44
อัตราการไหลอากาศ (kg/s)	0.308	0.288	0.325
อัตราการไหลอากาศส่วน Bypass air (kg/s)	0.202	0.211	0.227
อัตราส่วนอากาศ Bypass air (%)	65.68	73.26	69.85
สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง			
อัตราการอบแห้ง (kg/h)	0.619	0.611	0.554
อัตราการอบแห้ง (%db/h)	170.962	244.259	129.116
MER (kg/h)	0.416	0.405	0.382
SMER (kg/kW h)	0.387	0.391	0.360
SEC (MJ/kg)	9.294	9.209	9.992
$\text{COP}_{\text{hp(used)}}$	1.506	1.805	1.458
$\text{COP}_{\text{hp(sys)a}}$	1.943	2.909	3.110
$\text{COP}_{\text{hp(sys)r}}$	5.204	3.156	7.085
Error of $\text{COP}_{\text{hp(sys)}}$ (%)	1.678	0.085	1.278

ตารางที่ 9 ผลการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 60 นาที

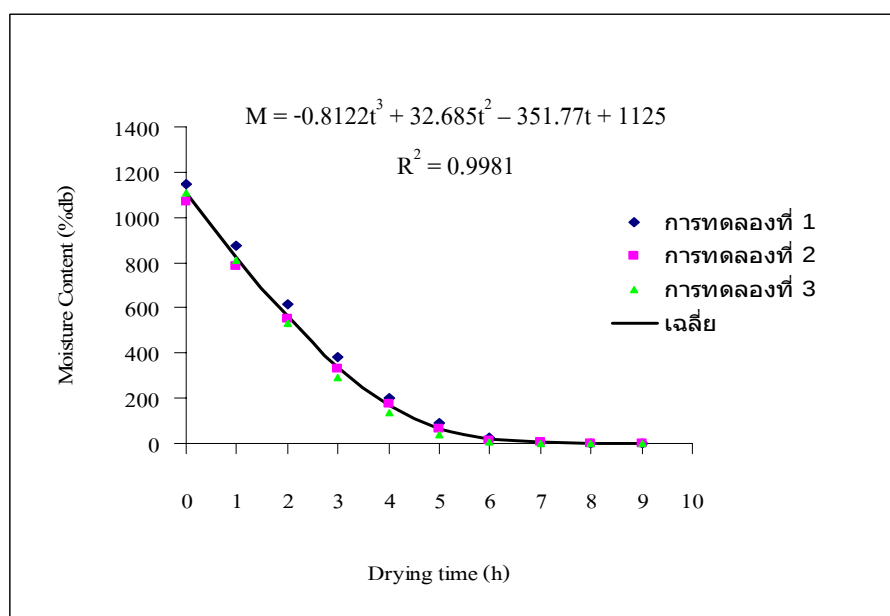
รายการ	การทดลองที่		
	1	2	3
น้ำหนักขมิ้นชันเริ่มต้น (kg)	6.01	5.85	5.39
น้ำหนักขมิ้นชันสุดท้าย (kg)	0.50	0.51	0.45
ความชื้นเริ่มต้น (%db)	1765.67	1239.94	1238.90
ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	94.09	92.36	92.27
ความชื้นสุดท้าย (%db)	8.13	7.35	8.14
ความชื้นสุดท้าย (%wb)	7.52	6.85	7.52
เวลาในการอบแห้ง (h)	9.00	9.00	9.00
สภาวะแวดล้อม			
อุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	29.20	27.50	27.80
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)	73.30	71.90	79.40
สภาวะการอบแห้ง			
อุณหภูมิอากาศอบแห้งเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	58.56	59.44	58.56
อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้งเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	56.00	57.33	56.89
อัตราการไหลอากาศ (kg/s)	0.285	0.311	0.332
อัตราการไหลอากาศส่วน Bypass air (kg/s)	0.199	0.213	0.234
อัตราส่วนอากาศ Bypass air (%)	69.82	68.49	70.48
สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง			
อัตราการอบแห้ง (kg/h)	0.612	0.593	0.549
อัตราการอบแห้ง (%db/h)	195.282	136.954	136.751
MER (kg/h)	0.449	0.429	0.386
SMER (kg/kW h)	0.388	0.362	0.342
SEC (MJ/kg)	9.271	9.937	10.538
$\text{COP}_{\text{hp(used)}}$	1.952	1.893	0.874
$\text{COP}_{\text{hp(sys)a}}$	3.166	2.703	2.664
$\text{COP}_{\text{hp(sys)r}}$	3.160	3.108	3.110
Error of $\text{COP}_{\text{hp(sys)}}$ (%)	0.002	0.150	0.168

ตารางที่ 10 ผลการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 90 นาที

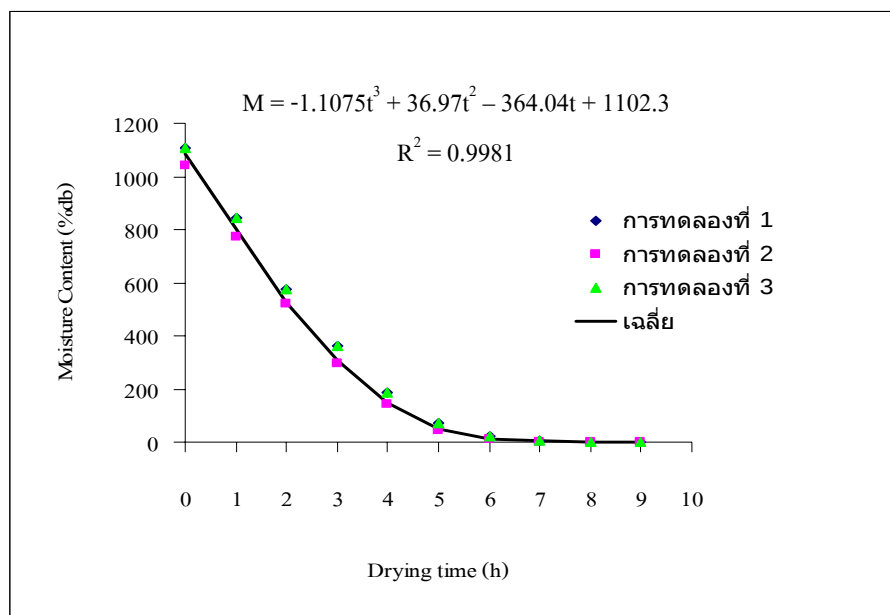
รายการ	การทดลองที่		
	1	2	3
น้ำหนักขมิ้นชันเริ่มต้น (kg)	6.29	5.83	5.92
น้ำหนักขมิ้นชันสุดท้าย (kg)	0.47	0.59	0.43
ความชื้นเริ่มต้น (%db)	1568.36	1112.55	1356.42
ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	93.87	91.36	92.90
ความชื้นสุดท้าย (%db)	9.30	9.26	8.74
ความชื้นสุดท้าย (%wb)	8.51	8.47	8.04
เวลาในการอบแห้ง (h)	9.00	9.00	9.00
สภาวะแวดล้อม			
อุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	30.01	31.30	38.30
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศเฉลี่ย (%)	68.50	61.50	68.50
สภาวะการอบแห้ง			
อุณหภูมิอากาศอบแห้งเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	58.78	58.22	59.67
อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้งเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	54.89	55.56	57.44
อัตราการไหลอากาศ (kg/s)	0.341	0.323	0.335
อัตราการไหลอากาศส่วน Bypass air (kg/s)	0.229	0.223	0.234
อัตราส่วนอากาศ Bypass air (%)	67.16	69.04	69.85
สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง			
อัตราการอบแห้ง (kg/h)	0.647	0.582	0.610
อัตราการอบแห้ง (%db/h)	173.229	122.588	149.742
MER (kg/h)	0.449	0.375	0.430
SMER (kg/kW h)	0.410	0.387	0.394
SEC (MJ/kg)	8.784	9.302	9.141
$\text{COP}_{\text{hp(used)}}$	1.231	2.391	1.637
$\text{COP}_{\text{hp(sys)a}}$	3.001	3.537	2.669
$\text{COP}_{\text{hp(sys)r}}$	3.206	3.341	5.529
Error of $\text{COP}_{\text{hp(sys)}}$ (%)	0.068	0.055	1.071



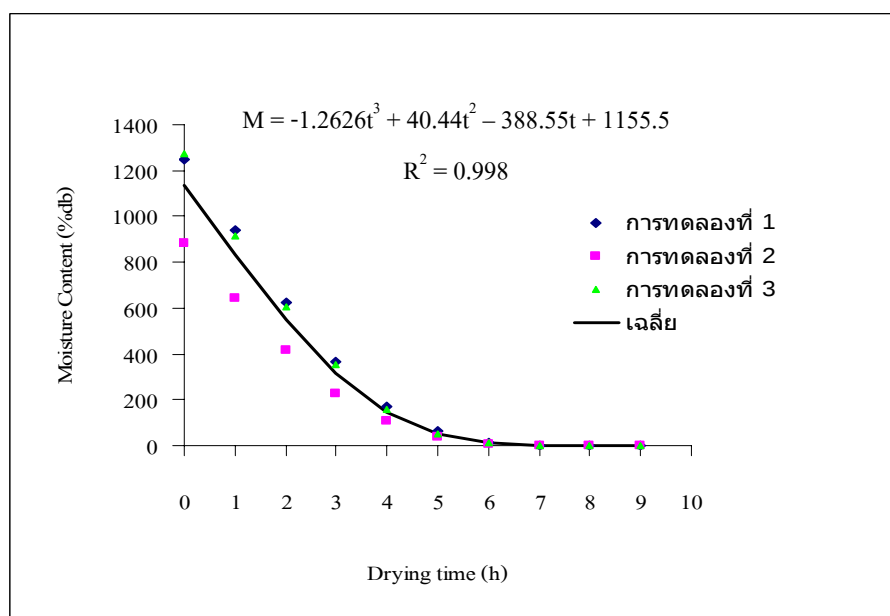
ภาพที่ 16 กราฟแสดงอัตราการอบแห้งขมิ้นชันในเครื่องอบแห้งที่ไม่ผ่านการดัม



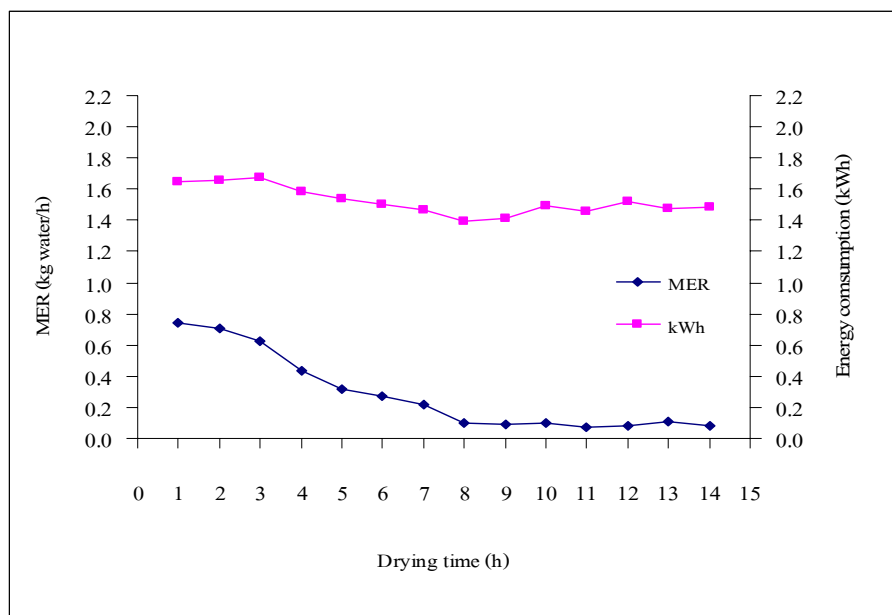
ภาพที่ 17 กราฟแสดงอัตราการอบแห้งขมิ้นชันในเครื่องอบแห้งที่ผ่านการดัมเป็นเวลา 30 นาที



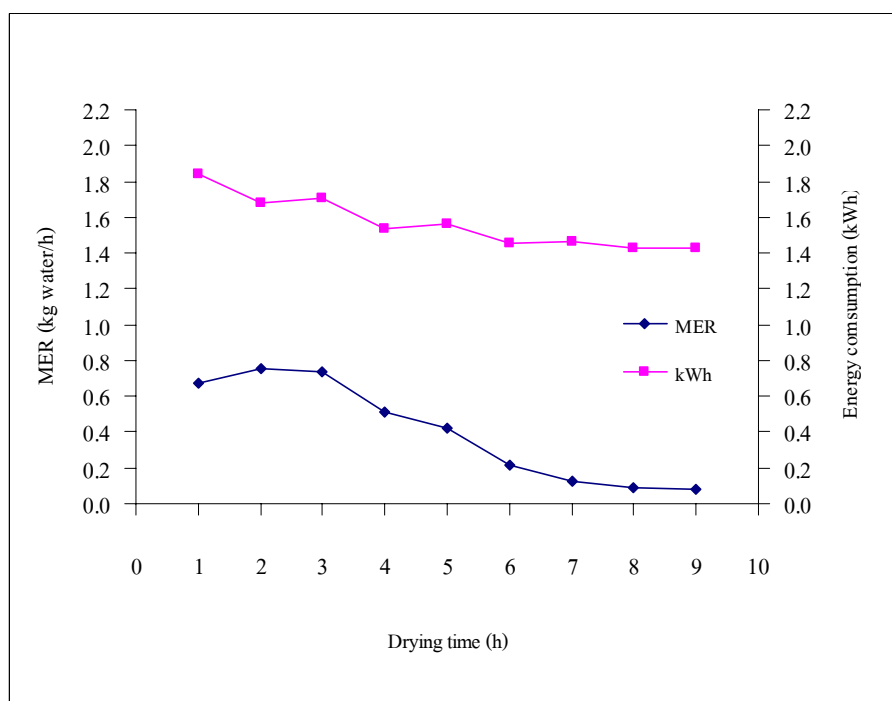
ภาพที่ 18 กราฟแสดงอัตราการอบแห้งขมิ้นชันในเครื่องอบแห้งที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 60 นาที



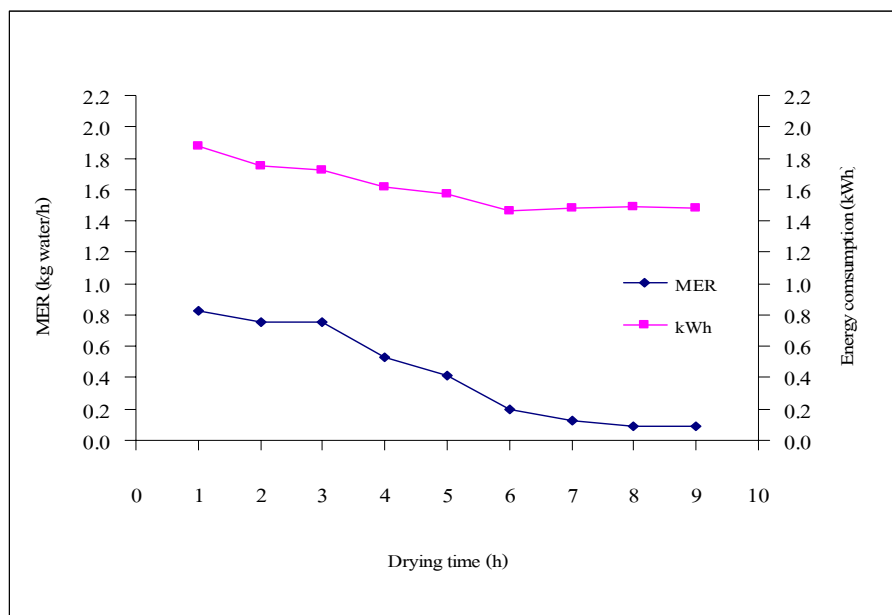
ภาพที่ 19 กราฟแสดงอัตราการอบแห้งขมิ้นชันในเครื่องอบแห้งที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 90 นาที



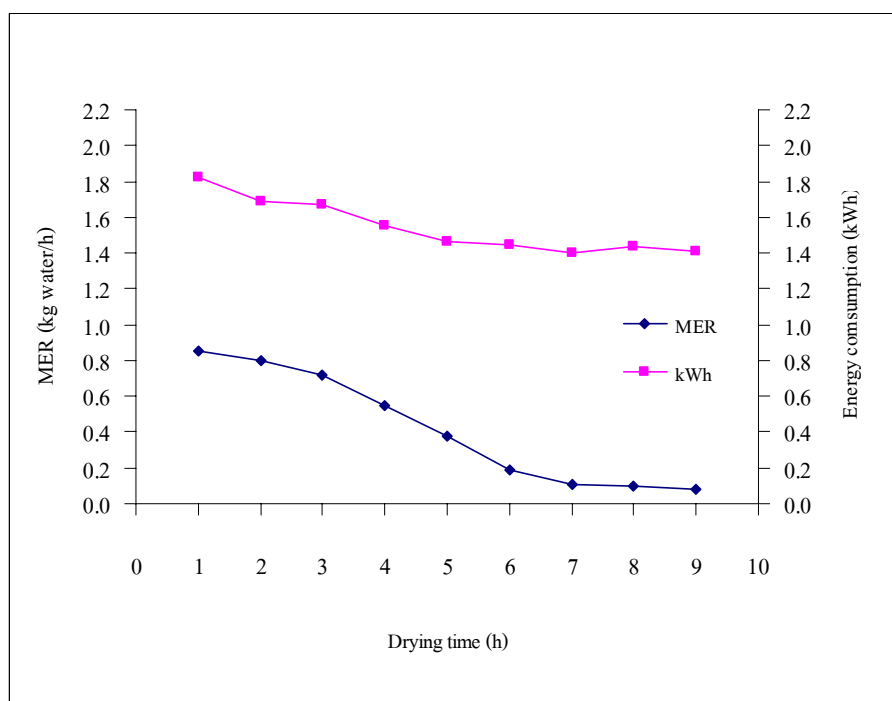
ภาพที่ 20 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยอัตราการควบแน่นน้ำและพลังงานที่ใช้กับเวลาการอบแห้งขมิ้นชันที่ไม่ผ่านการต้ม



ภาพที่ 21 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยอัตราการควบแน่นและพลังงานที่ใช้กับเวลาการอบแห้งขมิ้นชันที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 22 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยอัตราการควบแน่นและพลังงานที่ใช้กับเวลาการอบแห้งขมิ้นชันที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 60 นาที



ภาพที่ 23 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยอัตราการควบแน่นและพลังงานที่ใช้กับเวลาการอบแห้งขมิ้นชันที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 90 นาที

คุณภาพผลิตภัณฑ์

จากผลการทดลองในตารางที่ 11 พบว่าการต้มมีผลต่อปริมาณเคอร์คิวมินและค่าสีปรากฏ โดยค่าความสว่าง (L) ค่าสีแดง (a) และค่าแสดงสีเหลือง (b) ของขมิ้นผงที่ไม่ผ่านการต้มจะสังเกตว่ามีความแตกต่างจากตัวอย่างอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยขมิ้นผงดังกล่าวจะมีค่าความสว่าง ค่าสีแดงและมีสีเหลืองน้อยที่สุดโดยขมิ้นชั้นผงที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 90 min มีค่า L และค่า b สูงที่สุดเท่ากับ 37.42 และ 24.09 ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของสีในขมิ้นชั้นผงอาจมีผลจากการบดรวมด้วยเนื่องจากในขณะบดจะมีความร้อนเกิดขึ้นและมีการสัมผัสกับแสง ซึ่งอาจมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณรงควัตถุไปได้บางส่วน ซึ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของเคอร์คิวมินอาจมีผลต่อค่าสีปรากฏได้ ซึ่งตามรายงานของ Pesek และ Wilson (1986) พบว่าการบดขมิ้นโดยใช้วิธี cryogenic จะให้ขมิ้นผงที่มีค่าความสว่าง (L) และสีเหลือง (b) สูงกว่าวิธีการบดแบบธรรมดา

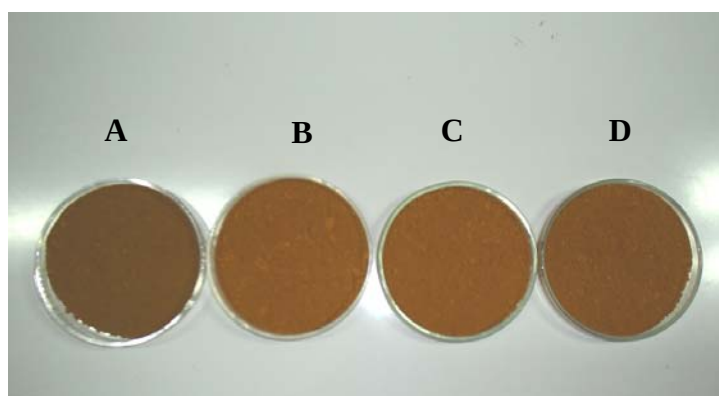
ตารางที่ 11 คุณภาพทางกายภาพและเคมีของขมิ้นชั้นสดและขมิ้นชั้นผงที่ไม่ผ่านและผ่านการต้มที่ระยะเวลาต่าง ๆ

เวลาการต้ม (min)	เวลาทำแห้ง (h)	ความชื้น (%db)	ปริมาณเคอร์คิวมิน (ร้อยละ)	ค่าสีปรากฏ		
				L	a	b
ขมิ้นสด	-	-	9.02	-	-	-
0	14.00	7.54	7.51	32.54 ^a	14.72 ^a	20.58 ^a
30	9.00	7.02	5.21	36.31 ^b	20.46 ^b	23.47 ^b
60	9.00	5.97	5.47	36.30 ^b	20.97 ^c	23.45 ^b
90	9.00	7.34	3.48	37.42 ^c	20.04 ^d	24.09 ^c

a, b, c, d ค่าเฉลี่ยที่แสดงด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 0.05

จากผลการทดลองในตารางที่ 11 พบว่าขมิ้นชั้นสดมีปริมาณเคอร์คิวมินร้อยละ 9.02 ส่วนขมิ้นผงที่ผ่านและไม่ผ่านการต้มจะมีปริมาณเคอร์คิวมินน้อยกว่าปริมาณเคอร์คิวมินในขมิ้นสด เมื่อ

เปรียบเทียบปริมาณเคอร์คิวมินของขมิ้นชันผงที่ไม่ผ่านและผ่านการต้มและทำแห้งพบว่าขมิ้นชันที่ไม่ผ่านการต้มนานปริมาณเคอร์คิวมินจะมีแนวโน้มที่ต่ำกว่าขมิ้นที่ไม่ผ่านการต้ม ทั้งนี้เนื่องจากขมิ้นที่ผ่านการเคี้ยวรีงประกอบกับการหั่นขมิ้นเป็นแว่นก่อนการอบแห้งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจึงมีผลทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณเคอร์คิวมินของขมิ้นและการเคี้ยวรีงยังมีผลทำให้ปริมาณเคอร์คิวมินของขมิ้นผงลดลง ซึ่งอาจเนื่องจากการสูญเสียตรงควัตถุดังกล่าวในระหว่างการต้มขมิ้นในน้ำเดือดเนื่องจากรงควัตถุถูกชะออกมาได้บ้าง ซึ่งสังเกตได้จากน้ำที่ต้มแ่งขมิ้นจะมีสีน้ำตาล และจะมีสีเข้มมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการเคี้ยวรีงนานขึ้น



ภาพที่ 24 ขมิ้นชันผงที่เตรียมจากขมิ้นชันที่ผ่านการเคี้ยวรีงโดยการต้มในน้ำเดือดที่เวลาต่าง ๆ

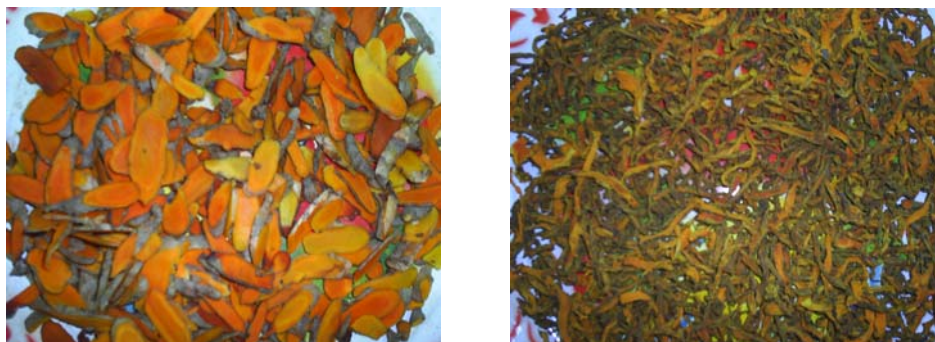
A ขมิ้นชันผงที่ไม่ผ่านการต้ม

B ขมิ้นชันผงที่ผ่านการต้ม 30 min

C ขมิ้นชันผงที่ผ่านการต้ม 60 min

D ขมิ้นชันผงที่ผ่านการต้ม 90 min

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง ปริมาณเคอร์คิวมินของขมิ้นชันผงที่ไม่ผ่านและผ่านการต้มพบว่า เวลาในการต้มขมิ้นชันโดยการต้มในน้ำเดือดที่เหมาะสมที่พิจารณาในด้านเวลาการทำแห้งและการใช้พลังงานอยู่ในช่วง 30- 60 min เนื่องจากใช้เวลาในการทำแห้งเพียง 9 h เมื่อเทียบกับขมิ้นที่ไม่ผ่านการต้มที่ต้องใช้เวลาในการอบแห้งถึง 14 h ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานในการต้มและการทำแห้งและให้ปริมาณผลผลิตเฉลี่ยร้อยละ 8.38 นอกจากนี้ยังให้ปริมาณเคอร์คิวมินสูงถึงร้อยละ 5.34 ซึ่งไม่แตกต่างจากปริมาณเคอร์คิวมินของตัวอย่างขมิ้นชันที่ไม่ผ่านการต้มมาก และมีค่าปริมาณเคอร์คิวมินสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมขมิ้นชันแห้ง มอก. 890-2532 ที่กำหนดให้มีปริมาณเคอร์คิวมินไม่ต่ำกว่าร้อยละ 4 ของน้ำหนักตัวอย่าง



ภาพที่ 25 ขมิ้นชันก่อนและหลังการอบแห้ง

การประเมินค่าใช้จ่ายเชิงเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนในเชิงเศรษฐศาสตร์ ของการลงทุนสร้างเครื่องอบแห้งขมิ้นชันเงื่อนไขที่ใช้ในการประเมินผลมีดังนี้ (ข้อมูลค่าใช้จ่ายสร้างเครื่องดูภาคผนวก ข) ผลการวิเคราะห์สรุปได้ดังตารางที่ 12 รายละเอียดการคำนวณดังนี้ คือ

- ต้นทุนการสร้างเครื่องอบแห้งขมิ้นชันรวมเท่ากับ 52,841.60 บาท
- สามารถอบแห้งขมิ้นชันได้ครั้งละ 30 kg
- มีอัตราน้ำระเหยต่อการอบแห้งเท่ากับ 26.00 kg
- ใช้เวลาในการอบแห้งครั้งละ 9 h
- ทำการอบแห้งสัปดาห์ละ 5 วัน ปีละ 48 สัปดาห์
- สมมุติให้มีการอบแห้งผลผลิตอื่นรวมด้วยตลอดปี ที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกัน
- อัตราการใช้ไฟฟ้าต่อชั่วโมงเฉลี่ยเท่ากับ 1.48 kWh
- อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ปัจจุบัน 10.50 เปอร์เซ็นต์ต่อปี (อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคารไทยพาณิชย์ เมื่อวันที่ 6 ธันวาคม พ.ศ. 2548)

- ตัวเครื่องมีอายุการใช้งาน 6 ปี
- มูลค่าซากคิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุน
- ค่าบำรุงรักษารายปีคิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุน
- ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยเท่ากับ 3.23 บาทต่อหน่วย
- ไม่คิดค่าใช้จ่ายการสร้างแรงงาน เนื่องจากการผลิตต่ำ

- ราคาต้นทุนของขม้นชั้นสดปัจจุบันกิโลกรัมละ 16 บาท
- กำหนดให้ราคาขายผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง มีมูลค่าเพิ่มจากต้นทุน 66.66 เปอร์เซ็นต์

สูตรการคำนวณดอกเบี้ยหาได้จากสูตร $(P/Ai - n)$ เมื่อหาค่า P จาก A ดังสมการ

$$= [(1 + i)^n - 1] / i(1 + i)^n$$

สูตรการคำนวณดอกเบี้ยหาได้จากสูตร $(A/Fi - n)$ เมื่อหาค่า A จาก F ดังสมการ

$$= i[(1 + i)^n - 1]^{-1}$$

ค่าใช้จ่ายเทียบรายปีของต้นทุนสร้างเครื่อง

$$\begin{aligned}
 &= 52841.60 (A/P, 10.50\%, 6) - 52841.60(0.1)(A/F, 10.5\%, 6) \\
 &= 52841.60 \left(\frac{0.15(0.15 + 1)^6}{(0.15 + 1)^6 - 1} \right) - 52841.60 \left(\frac{0.15}{(0.15 + 1)^6 - 1} \right) \\
 &= 7946.41 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้ารายปี

$$\begin{aligned}
 &= \text{ชั่วโมงการทำงานรวม} \times \text{อัตราการใช้ไฟฟ้า} \times \text{ราคาต่อหน่วย} \\
 &= 9 \times 5 \times 48 \times 1.48 \times 3.23 \\
 &= 10325.66 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

ค่าบำรุงรักษารายปี

$$\begin{aligned}
 &= 52841.60 \times 0.05 \\
 &= 2642.08 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายรวมรายปี

$$\begin{aligned}
 &= 7946.41 + 10325.66 + 2642.08 \\
 &= 20914.15 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายต่อปริมาณผลผลิต

$$\text{ต้นทุนเครื่อง} = 7946.41 / (5 \times 48 \times 30)$$

$$\begin{aligned}
 &= 1.10 \text{ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิต} \\
 \text{ค่าไฟฟ้า} &= 10325.66 / (5 \times 48 \times 30) \\
 &= 1.43 \text{ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิต} \\
 \text{บำรุงรักษา} &= 2642.08 / (5 \times 48 \times 30) \\
 &= 0.37 \text{ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิต} \\
 \text{รวม} &= 20914.15 / (5 \times 48 \times 30) \\
 &= 2.91 \text{ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิต}
 \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายต่อปริมาณน้ำระเหย

$$\begin{aligned}
 \text{ต้นทุนเครื่อง} &= 7946.41 / (5 \times 48 \times 26.00) \\
 &= 1.27 \text{ บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย} \\
 \text{ค่าไฟฟ้า} &= 10325.66 / (5 \times 48 \times 26.00) \\
 &= 1.66 \text{ บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย} \\
 \text{บำรุงรักษา} &= 2642.08 / (5 \times 48 \times 26.00) \\
 &= 0.42 \text{ บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย} \\
 \text{รวม} &= 20914.15 / (5 \times 48 \times 26.00) \\
 &= 3.35 \text{ บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย}
 \end{aligned}$$

ผลตอบแทนรายปี

$$\begin{aligned}
 &= (\text{ปริมาณวัสดุ} \times \text{ราคาต้นทุน} \times \text{มูลค่าเพิ่ม } 66.66 \%) \\
 &= (5 \times 48 \times 30 \times 16 \times 0.6666) \\
 &= 76792.32 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

กำไรสุทธิรายปี

$$\begin{aligned}
 &= \text{ผลตอบแทน} - \text{ค่าใช้จ่ายรวม} \\
 &= 76792.32 - 20914.15 \\
 &= 55878.17 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

$$\begin{aligned}
 &= \text{ต้นทุนสร้างเครื่อง / กำไรสุทธิต่อปี} \\
 &= 52841.60 / 55878.17 \\
 &= 0.95 \text{ ปี}
 \end{aligned}$$

อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (Internal Rate of Return)

$$52841.60 = 55878.17 (P/A, i, 6)$$

$$\frac{52841.60}{55878.17} = \left(\frac{(i+1)^6 - 1}{i(i+1)^6} \right)$$

จากการ Trial & Error จะได้ค่า $i = 1\%$

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและผลตอบแทน

ค่าใช้จ่ายเทียบเท่ารายปี (บาท)		ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยการผลิต (บาท)	
		ต่อกิโลกรัมนํ้าระเหย	ต่อกิโลกรัมผลผลิต
ค่าเสื่อมราคา	7946.41	1.27	1.10
พลังงานไฟฟ้า	10325.66	1.66	1.43
การบำรุงรักษา	2642.08	0.42	0.37
รวมทั้งหมด	20914.15	3.35	2.91
ผลตอบแทนเทียบเท่ารายปี (บาท)		ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (%)
รายได้	76792.32	0.95	1.00
กำไร	55878.17		