



การออกแบบระบบการถ่ายเทความร้อนเพื่อการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ
โดยใช้ปั๊มความร้อน สำหรับผลผลิตทางการเกษตร
: กรณีศึกษาอบแห้งผักตบชวา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล

พ.ศ. 2543

ISBN 974-664-349-5

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยมหิดล

Copyright by Mahidol University

TH
๗๕๕๙๗
๘๕๔๓
ค. ๕
54649

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบระบบการถ่ายเทความร้อนเพื่อการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ
โดยใช้ปั๊มความร้อน สำหรับผลผลิตทางการเกษตร : กรณีศึกษาอบแห้งผักตบชวา



[Signature]
.....

นายเนศ สว่างจันทร์
ผู้วิจัย

[Signature]
.....

อาจารย์สมพงษ์ ชงไชย วท.ม.
ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

[Signature]
.....

อาจารย์ประเสริฐ ผลรัตน์ วท.ม.
กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

[Signature]
.....

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัลลภ จันทร์ตระกูล ค.อ.ม.
กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

[Signature]
.....

ศาสตราจารย์เลียงชัย ลิ้มล้อมวงศ์ Ph.D.
คณบดี
บัณฑิตวิทยาลัย

[Signature]
.....

รองศาสตราจารย์รุ่งจิรัฐ หุตะเจริญ วท.ม.
ประธานคณะกรรมการประจำหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร
คนและสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

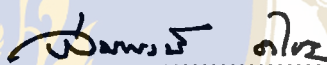
การออกแบบระบบการถ่ายเทความร้อนเพื่อการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ
โดยใช้ปั๊มความร้อน สำหรับผลผลิตทางการเกษตร : กรณีศึกษาอบแห้งผักตบชวา
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร

วันที่ 5 มิถุนายน พ.ศ. 2543



นายนเรศ สว่างจันทร์

ผู้วิจัย



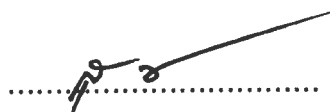
อาจารย์สมพงษ์ ชงไชย วท.ม.

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



อาจารย์ประเสริฐ ผลรัตน์ วท.ม.

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



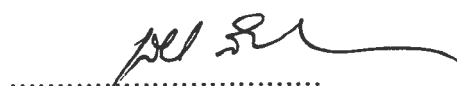
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุจิระ ขอจิตต์เมตต์ วท.ม.

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัลลภ จันทร์ตระกูล ค.อ.ม.

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ศาสตราจารย์เลียงชัย ถิมถ่อมวงศ์ Ph.D.

คณบดี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล



รองศาสตราจารย์อนุชาติ พวงสำลี Ph.D.

คณบดี

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหิดล

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณ อาจารย์สมพงษ์ ชงไชย อาจารย์ประเสริฐ ผลรัตน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัลลภ จันทร์ตระกูล และผู้ช่วยศาสตราจารย์สุจิระ ขอบจิตต์เมตต์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติที่ให้เงินทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณจรรยาพร เกิดสม ประธานกลุ่มหัตถกรรมผักตบชวาบ้านอ้อย จังหวัดชัยนาท ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับข้อมูลผักตบชวาในการนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณสุดารัตน์ ปรีชาธนาเสฏฐ์ และคุณอรรษา ถีนานนท์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ และขอขอบคุณเพื่อน ๆ AT 11 ภาคพิเศษทุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจด้วยดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอเทิดทูนและระลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา ที่ได้อบรม สั่งสอน ให้ผู้วิจัยมีความมานะ อดทน จนประสบผลสำเร็จในการวิจัยครั้งนี้ ซึ่งคุณความดีและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา และคุณครูทุกท่านผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาแก่ผู้วิจัย

นเรศ สว่างจันทร์

3937677 ENAT/M : สาขาวิชา : เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร :

วท.ม. (เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร)

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้ง / ผักตบชวา / ป้อนความร้อน

นเรศ สว่างจันทร์ : การออกแบบระบบการถ่ายเทความร้อนเพื่อการอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน สำหรับผลผลิตทางการเกษตร : กรณีศึกษาอบแห้งผักตบชวา (HEAT TRANSFER SYSTEM DESIGN FOR AGRICULTURE PRODUCT LOW TEMPERATURE DRYING BY USING HEAT PUMP : CASE STUDY JAVA WEED DRYING) : คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ : สมพงษ์ ชงไชย,วท.ม., ประเสริฐ ผลรัตน์,วท.ม., วัลลภ จันทร์ตระกูล, ค.อ.ม., 199 หน้า. ISBN 974-664-349-5

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน และหาประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งโดยใช้ผักตบชวาเป็นตัวอย่างทดสอบ โดยหาคุณสมบัติทางกายภาพด้านสี รูปทรง ความชื้น และความเค้นดึง ซึ่งได้ออกแบบเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำ มีขนาดกว้าง 1.2 m ยาว 2 m สูง 1.1 m ปริมาตร 2.64 m³ ขนาดถาดใส่ผลิตภัณฑ์เป็นถาดสี่เหลี่ยม กว้าง 0.9 m ยาว 0.9 m สูง 0.02 m จำนวน 18 ถาด ขนาดเครื่องอัดไอ 1.6 kW ใช้สารทำความเย็น ชนิด R-134a เครื่องควบแน่นชุดในขนาด 3.3 kW เครื่องควบแน่นชุดนอกขนาด 1.2 Kw และเครื่องทำระเหย ขนาด 3.6 kW สามารถอบแห้งได้ อุณหภูมิระหว่าง 40 °, 50 ° และ 60 °C ความเร็วลม 0.3 , 0.6 และ 0.9 m/s

จากผลการศึกษา พบว่า ด้านกายภาพของผักตบชวา ภายหลังจากการอบแห้ง มีสีเขียวอ่อนจาง รูปทรงยังคงรูป ส่วนปลายบิดงอเล็กน้อย ความชื้นเริ่มต้นของการอบ 970 %db ความชื้นสุดท้ายของการอบ 14 %db ความเค้นดึง 1.09 – 2.15 N/mm² และจากการศึกษาประสิทธิภาพผลกระบวนการอบแห้ง พบว่า การอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ ณ อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s มีความชื้นสุดท้าย 14 % db ความเค้นดึง 2.13 N/mm² และใช้เวลาในการอบแห้ง 18 ชั่วโมง

เครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อนสามารถทำการอบแห้งผักตบชวาได้ อุณหภูมิสูงสุดถึง 60 °C สามารถประยุกต์ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอื่นๆ ที่ต้องการใช้ปัจจัยทางด้านอุณหภูมิ ความเร็วลม และเวลาที่ใกล้เคียงกันได้ เช่น ผัก ผลไม้ เมล็ดพันธุ์พืช และผลิตภัณฑ์ด้านหัตถกรรม ซึ่งสามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาเป็นเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อนทางการเกษตรในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน และอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ต่อไปได้

3937677 ENAT/M : MAJOR: APPROPRIATE TECHNOLOGY FOR RESOURCE DEVELOPMENT ;
M.Sc. (APPROPRIATE TECHNOLOGY FOR RESOURCE DEVELOPMENT)

KEY WORDS : HEAT PUMP DRYER / JAVA WEED / HEAT PUMP

NARES SAWANGCHAN : HEAT TRANSFER SYSTEM DESIGN FOR AGRICULTURE
PRODUCT LOW TEMPERATURE DRYING BY USING HEAT PUMP : CASE STUDY JAVA
WEED DRYING. THESIS ADVISOR : SOMPONG THONGCHAI, M.Sc., PRASERT PHOLRAT,
M.Sc., WALLOP CHANTRAKUL, M.S. Tech. Ed., 199 p. ISBN 974-664-349-5

The purpose of this research was to study, design and construct a low heat dryer and to find an effective drying system that used Java weed in an experiment to test its physical qualities such as color, shape, moisture content and tensile stress. The low heat pump dryer was 1.2 meters wide, 2 meters long, 1.1 meters high with a volume of 2.64 cubic meters. The 18 square trays containing Java weed were 0.9 meter long, 0.9 meter wide and 0.02 meter high. The compressor was 1.6 kW that used R-134a refrigerant. The internal condenser was 3.3 kW. The external condenser was 1.2 kW and the evaporator was 3.6 kW. The drying temperature was 40° , 50° , and 60 °C with a velocity of 0.3 , 0.6 and 0.9 m/s.

The result showed that the physical qualities of Java weed after drying had not been changed. The initial moisture content of drying was 970 % dry basis. The final moisture content of drying was 14 % dry basis. The tensile stress was 1.09-2.15 N/mm². The process showed that the optimum drying was achieved as follows : The temperature was 50 °C , velocity was 0.9 m/s, the final moisture content was 14 % dry basis, the tensile stress was 2.13 N/mm² and it takes 18 hours for drying.

The low heat pump dryer can dry the Java weed at the highest temperature of 60 °C and can be applied for drying other agricultural products depending on the factors of temperature , velocity , time available for vegetables , fruits , seeds and handicrafts. It can be used as a model to develop a low heat pump dryer to be used for family use agricultural industrial and other such uses.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
สารบัญแผนภูมิ	ฏ
คำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ฒ
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 กรอบแนวคิดในการวิจัย	5
1.3 วัตถุประสงค์ในการวิจัย	6
1.4 ขอบเขตการศึกษา	6
1.5 นิยามศัพท์	6
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	7
2. ทบทวนวรรณกรรม	8
2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง	8
2.2 ทฤษฎีการทำงานของปั๊มความร้อน	13
2.3 การเลือกใช้สารความเย็น	18
2.4 กรรมวิธีการทำให้แห้ง	19
2.5 การปรับปรุงกรรมวิธีการทำให้แห้ง	20
2.6 ประเภทของเครื่องอบแห้ง	22
2.7 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับผักตบชวา	24
2.8 คุณสมบัติทางกลและการทดสอบวัสดุ	28
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้องทางด้านการใช้เทคโนโลยีการอบแห้ง	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. วิธีการวิจัย	34
3.1 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน	36
3.1.1 การออกแบบระบบปั๊มความร้อน	37
3.1.2 การออกแบบภาดใส่ผลิตภัณฑ์	41
3.1.3 การออกแบบตู้อบแห้ง	42
3.1.4 การออกแบบระบบลม	43
3.2 ขั้นตอนการสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน	54
3.3 ทดสอบขั้นต้นของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน	61
3.4 ขั้นตอนการวางแผนและทดลองเบื้องต้นเพื่อหาช่วงระยะเวลา (Screen test)	62
3.5 ขั้นตอนการวางแผนและทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง อุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน	66
3.6 ขั้นตอนการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล	69
4. ผลการศึกษา	70
4.1 ผลการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาช่วงระยะเวลาเวลาเฉลี่ย	70
4.2 ผลการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาก่อนและหลังการผ่าน กระบวนการอบแห้ง	72
4.2.1 ผลการศึกษาด้านสีของผักตบชวาก่อนและหลังการผ่าน กระบวนการอบแห้ง	72
4.2.2 ผลการศึกษาด้านรูปทรงของผักตบชวาก่อนและหลังการผ่าน กระบวนการอบแห้ง	76
4.2.3 ผลการศึกษาด้านความชื้นของผักตบชวาก่อนและหลังการผ่าน กระบวนการอบแห้ง	79
4.2.4 ผลการศึกษาด้านความเค้นดึงของผักตบชวาก่อนและหลังการผ่าน กระบวนการอบแห้ง	84
4.3 ผลการศึกษาด้านประสิทธิภาพกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน	89

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 อภิปรายผลการศึกษา	91
5.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน	91
5.1.1 การออกแบบระบบป้มความร้อน	91
5.1.2 การออกแบบตู้อบแห้ง	91
5.1.3 การสร้างเครื่องอบแห้ง	92
5.2 คุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาก่อนและหลังกระบวนการอบแห้ง	92
5.2.1 การศึกษาด้านสีของผักตบชวา	92
5.2.2 การศึกษาด้านรูปทรงของผักตบชวา	93
5.2.3 การศึกษาด้านความชื้นของผักตบชวา	93
5.2.4 การศึกษาด้านความเค็มดิ่งของผักตบชวา	93
5.3 ประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน	94
6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	95
6.1 สรุปผลการวิจัย	95
6.1.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน	95
6.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาก่อนและหลังการผ่านกระบวนการอบแห้ง	96
6.1.3 ประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน	96
6.2 ข้อเสนอแนะ	97
6.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	97
6.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในครั้งนี้	97
6.2.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป	97
รายการอ้างอิง	98
ภาคผนวก ก :-	102
- แสดงแรงดันและเอนทัลปีของระบบป้มความร้อน	102
- แสดงค่า Fitting Loss Coefficients	104
- แสดงสมรรถนะของพัดลมยี่ห้อ National	107

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข การหาหน้าหนักผลิตภัณฑ์รวม	108
ภาคผนวก ค รายละเอียดแบบเครื่องอบแห้ง	117
ภาคผนวก ง ข้อมูลสีของผักตบชวาหลังการอบแห้ง	129
ภาคผนวก จ :-	139
- การหาความชื้นเริ่มและความชื้นสุดท้ายของผักตบชวา	140
- ข้อมูลความชื้นของผักตบชวาหลังการอบแห้ง	143
ภาคผนวก ฉ :-	152
- ข้อมูลค่าความเค็มคิ่งของผักตบชวาสด	153
- ข้อมูลค่าความเค็มคิ่งของผักตบชวาทากแดด	154
- ข้อมูลแรงคิ่ง พื้นที่หน้าตัด และความเค็มคิ่งของผักตบชวาหลังการอบแห้ง	155
ภาคผนวก ช ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของการอบแห้งผักตบชวา	182
ภาคผนวก ซ ข้อมูลค่าใช้จ่ายทั้งหมด	192
ภาคผนวก ฌ คำแนะนำการใช้เครื่องอบแห้ง	196
ประวัติผู้วิจัย	199

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 คำนวณ ODP และ GWP ของสารทำความเย็น	19
ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการตากแห้งกับการอบแห้ง	21
ตารางที่ 2-3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบ	23
ตารางที่ 3-1 แสดง Pressure drop of air flowing through a finned coil	48
ตารางที่ 3-2 แสดงรายละเอียดของตู้อบแห้งและอุปกรณ์ประกอบ	54
ตารางที่ 4-1 แสดงเวลาที่ได้จากการทดลองอบแห้งเบื้องต้น	71
ตารางที่ 4-2 แสดงสีของผักตบชวหลังกระบวนการอบแห้ง	73
ตารางที่ 4-3 แสดงความชื้นของผักตบชวหลังกระบวนการอบแห้ง ณ อุณหภูมิ 40 °C	79
ตารางที่ 4-4 แสดงความชื้นของผักตบชวหลังกระบวนการอบแห้ง ณ อุณหภูมิ 50 °C	81
ตารางที่ 4-5 แสดงความชื้นของผักตบชวหลังกระบวนการอบแห้ง ณ อุณหภูมิ 60 °C	82
ตารางที่ 4-6 แสดงความเค็มดิ่งของผักตบชวหลังกระบวนการอบแห้ง ณ อุณหภูมิ 40 °C	84
ตารางที่ 4-7 แสดงความเค็มดิ่งของผักตบชวหลังกระบวนการอบแห้ง ณ อุณหภูมิ 50 °C	86
ตารางที่ 4-8 แสดงความเค็มดิ่งของผักตบชวหลังกระบวนการอบแห้ง ณ อุณหภูมิ 60 °C	88
ตารางที่ ก-1 แสดงแรงดันและเอนทัลปีของระบบปั๊มความร้อน	103
ตารางที่ ก-2 แสดงค่า Fitting Loss Coefficients	104
ตารางที่ ก-3 แสดงสมรรถนะของพัดลมยี่ห้อ National	107
ตารางที่ ข-1 แสดงผลลัพธ์การคำนวณ โดยใช้วิธี Trial and error	110
ตารางที่ ง-1 สีของผักตบชวหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3 m/s	130
ตารางที่ ง-2 สีของผักตบชวหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.6 m/s	131
ตารางที่ ง-3 สีของผักตบชวหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.9 m/s	132
ตารางที่ ง-4 สีของผักตบชวหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3 m/s	133
ตารางที่ ง-5 สีของผักตบชวหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.6 m/s	134
ตารางที่ ง-6 สีของผักตบชวหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s	135
ตารางที่ ง-7 สีของผักตบชวหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.3 m/s	136
ตารางที่ ง-8 สีของผักตบชวหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.6 m/s	137
ตารางที่ ง-9 สีของผักตบชวหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.9 m/s	138

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ จ-1 การหาค่าความชื้นเริ่มต้นของฝักตบชาสด	141
ตารางที่ จ-2 การหาค่าความชื้นสุดท้ายของฝักตบชาแห้ง	142
ตารางที่ จ-3 ข้อมูลความชื้นของฝักตบชาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3 m/s	143
ตารางที่ จ-4 ข้อมูลความชื้นของฝักตบชาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.6 m/s	144
ตารางที่ จ-5 ข้อมูลความชื้นของฝักตบชาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.9 m/s	145
ตารางที่ จ-6 ข้อมูลความชื้นของฝักตบชาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3 m/s	146
ตารางที่ จ-7 ข้อมูลความชื้นของฝักตบชาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.6 m/s	147
ตารางที่ จ-8 ข้อมูลความชื้นของฝักตบชาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s	148
ตารางที่ จ-9 ข้อมูลความชื้นของฝักตบชาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.3 m/s	149
ตารางที่ จ-10 ข้อมูลความชื้นของฝักตบชาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.6 m/s	150
ตารางที่ จ-11 ข้อมูลความชื้นของฝักตบชาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.9 m/s	151
ตารางที่ ฉ-1 ข้อมูลค่าความเค้นดึงของฝักตบชาสด	153
ตารางที่ ฉ-2 ข้อมูลค่าความเค้นดึงของฝักตบชาตากแดด	154
ตารางที่ ฉ-3 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของฝักตบชาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3 m/s	155
ตารางที่ ฉ-4 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของฝักตบชาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.6 m/s	156

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ฉ-5 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของฝักตบชวาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.9 m/s	157
ตารางที่ ฉ-6 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของฝักตบชวาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3 m/s	158
ตารางที่ ฉ-7 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของฝักตบชวาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.6 m/s	159
ตารางที่ ฉ-8 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของฝักตบชวาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s	160
ตารางที่ ฉ-9 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของฝักตบชวาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.3 m/s	161
ตารางที่ ฉ-10 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของฝักตบชวาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.6 m/s	162
ตารางที่ ฉ-11 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของฝักตบชวาหลังการอบแห้ง อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.6 m/s	163
ตารางที่ ช-1 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของวงจรรอบอากาศที่ 40 °C ความเร็วลม 0.3 m/s	183
ตารางที่ ช-2 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของวงจรรอบอากาศที่ 40 °C ความเร็วลม 0.6 m/s	184
ตารางที่ ช-3 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของวงจรรอบอากาศที่ 40 °C ความเร็วลม 0.9 m/s	185
ตารางที่ ช-4 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของวงจรรอบอากาศที่ 50 °C ความเร็วลม 0.3 m/s	186
ตารางที่ ช-5 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของวงจรรอบอากาศที่ 50 °C ความเร็วลม 0.6 m/s	187
ตารางที่ ช-6 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของวงจรรอบอากาศที่ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s	188
ตารางที่ ช-7 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของวงจรรอบอากาศที่ 60 °C ความเร็วลม 0.3 m/s	189
ตารางที่ ช-8 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของวงจรรอบอากาศที่ 60 °C ความเร็วลม 0.6 m/s	190
ตารางที่ ช-9 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของวงจรรอบอากาศที่ 60 °C ความเร็วลม 0.9 m/s	191
ตารางที่ ช ข้อมูลค่าใช้จ่ายทั้งหมด	193

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 การแพร่ของมวลจากผิวของแข็งไปยังของไหล	9
รูปที่ 2-2 ส่วนประกอบลำต้นผักตบชวา	24
รูปที่ 2-3 แสดงการเกิดความเค้น	28
รูปที่ 2-4 แสดงความเค้นดึง	29
รูปที่ 3-1 แสดงการสร้างตู้อบแห้ง	55
รูปที่ 3-2 แสดงท่อส่งลมเข้าและออก	55
รูปที่ 3-3 แสดงท่อไค้งส่งลม	56
รูปที่ 3-4 แสดงท่อขยายทางออกพัดลม	56
รูปที่ 3-5 กล่องลมติดตั้งเครื่องทำระเหย	57
รูปที่ 3-6 แสดงกล่องลมติดตั้งเครื่องควมแน่นและพัดลม	57
รูปที่ 3-7 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ปั๊มความร้อน	58
รูปที่ 3-8 แสดงหุ้มฉนวนความร้อนท่อส่งลม	59
รูปที่ 3-9 แสดงเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน	59
รูปที่ 3-10 แสดงภาคใต้ผลิตภัณฑ์	61
รูปที่ 3-11 แสดงเครื่องควบคุมอุณหภูมิ	64
รูปที่ 3-12 แสดงเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ	64
รูปที่ 3-13 แสดงเครื่องปรับความเร็วของมอเตอร์พัดลม	65
รูปที่ 3-14 แสดงเครื่องวัดความเร็วลม	65
รูปที่ 3-15 แสดงคู่มือเทียบสี Process color chart	67
รูปที่ 3-16 แสดงเครื่องชั่งน้ำหนัก	67
รูปที่ 3-17 แสดงเครื่องทดสอบ Universal testing machine	68
รูปที่ 4-1 แสดงการจัดเรียงผักตบชวาในถาด	71
รูปที่ 4-2 แสดงรูปทรงของผักตบชวา	76
รูปที่ 4-3 แสดงการอบแห้งช่วงระยะเวลาต่างๆ	77
รูปที่ 4-4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของผักตบชวาที่ความเร็วลมต่าง ๆ	78
รูปที่ 4-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของผักตบชวาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	78
รูปที่ จ-1 แสดงเครื่องอบแห้งไฟฟ้าลดความชื้น	140

สารบัญแผนภูมิ

	หน้า
แผนภูมิที่ 1-1 แสดงกรอบแนวคิดในการวิจัย	5
แผนภูมิที่ 2-1 แสดงการอบแห้งในช่วงอัตรากรอบแห้งคงที่และลดลง	11
แผนภูมิที่ 2-2 แสดงหลักการทำงานของระบบปั๊มความร้อน	13
แผนภูมิที่ 2-3 แสดงวัฏจักรย้อนกลับของคาร์โน	14
แผนภูมิที่ 2-4 แสดงส่วนประกอบของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ	15
แผนภูมิที่ 2-5 แสดงแผนภูมิแรงดัน-เอนทัลปี (P-h Diagram)	16
แผนภูมิที่ 2-6 แสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรมของวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ	17
แผนภูมิที่ 3-1 แสดงขั้นตอนวิธีการวิจัย	35
แผนภูมิที่ 3-2 แสดงระบบของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน	36
แผนภูมิที่ 3-3 แสดงวงจรสารทำความเย็นของระบบปั๊มความร้อน	37
แผนภูมิที่ 3-4 แสดงระบบและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน	60
แผนภูมิที่ 4-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเฉลี่ยแต่ละความเร็วมกับเวลาที่อุณหภูมิ 40 °C	80
แผนภูมิที่ 4-2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเฉลี่ยแต่ละความเร็วมกับเวลาที่อุณหภูมิ 50 °C	82
แผนภูมิที่ 4-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเฉลี่ยแต่ละความเร็วมกับเวลาที่อุณหภูมิ 60 °C	83
แผนภูมิที่ 4-4 การเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงเฉลี่ยแต่ละความเร็วมกับเวลาเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C	85
แผนภูมิที่ 4-5 การเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงเฉลี่ยแต่ละความเร็วมกับเวลาเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C	87
แผนภูมิที่ 4-6 การเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงเฉลี่ยแต่ละความเร็วมกับเวลาเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C	89
แผนภูมิที่ ข-1 แสดง Information flow diagram	111

คำย่อที่ใช้ในการวิจัย

สัญลักษณ์	ความหมาย
A	พื้นที่ (area) , mm ² หรือ m ²
C _a	ความร้อนจำเพาะของอากาศ (Constant pressure specific heat) , kJ/kg °C
d	เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) , mm หรือ m
db	มาตรฐานแห้ง (Dry basis)
F	แรงค้ำของฝักตบชวา (Force) , N
h	เอนทัลปี (Enthalpy) , kJ/kg
h _{fg}	ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ (Enthalpy of latent heat) , kJ/kg °C
m	มวล (Mass) , kg
m [•]	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (Mass flow rate) , kg/s
M	ความชื้น (Moisture) , %db
P	ความดัน (Pressure) , Pa หรือ psig
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (Volume flow rate) , m ³ /s
Q _e	ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิของ เครื่องทำระเหย (Refrigerating capacity) , kW
Q _c	ความสามารถในการทำความร้อนสุทธิของ เครื่องควบแน่น (Condenser heat rejection) , kW
T	อุณหภูมิ (Temperature) , °C
t	เวลา (Time) , hr
v	ความเร็วลม (Velocity) , m/s

คำย่อที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
w	น้ำหนักของฝักตบชวา (Weight) , g หรือ kg
ΔT	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Difference of temperature) , °C
σ_t	ความเค้นดึง (Tensile stress) , N/mm ²
η	ประสิทธิภาพ (Efficiency)
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ (Density of air) , kg/m ³
สัญลักษณ์กำกับล่าง	
a	อากาศ (Air)
b	พัดลม (Blower)
c	เครื่องควบแน่น (Condenser)
e	เครื่องทำระเหย (Evaporator)
d	มาตรฐานแห้ง (Dry basis)
f	สถานะหลังอบแห้ง (Final)
i	สถานะก่อนอบแห้ง (Initial)
m	มอเตอร์ไฟฟ้า (Motor)
w	น้ำ (Water)
ci	เครื่องควบแน่นชุดใน (Internal condenser)
cx	เครื่องควบแน่นชุดนอก (External condenser)
t	แรงดึง (Tensile force)

บทที่ 1 -

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีภูมิประเทศและสภาพภูมิอากาศเหมาะสมต่อการทำเกษตรกรรม ซึ่งในปัจจุบันการทำเกษตรกรรมเพียงอย่างเดียวไม่สามารถแข่งขันกับตลาดต่างประเทศได้ ประกอบกับสภาพทางเศรษฐกิจโดยรวม และการพัฒนาประเทศได้มุ่งเน้นพัฒนาจากการทำเกษตรกรรมเพียงอย่างเดียวมาเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์การเกษตร ซึ่งสามารถนำมาใช้บริโภคภายในประเทศหรือเพื่อการส่งออก แต่ปัญหาประการหนึ่งที่เกษตรกรมักประสบอยู่เสมอคือ ในบางฤดูกาลที่ปริมาณผลผลิตทางการเกษตร เช่น พืช ผัก และผลไม้ มีมากเกินไปเกินความต้องการของผู้บริโภคภายในประเทศ ทำให้ราคาผลผลิตตกต่ำ โดยเฉพาะผลผลิตที่ออกตามฤดูกาลเมื่อจำหน่ายได้ไม่หมดในเวลาอันควร จะเกิดการเน่าเสียของผลผลิต ซึ่งในการเพิ่มมูลค่าของผลผลิตการเกษตร ตลอดจนการพัฒนาผลผลิตเพื่อการส่งออก จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการแก้ปัญหาภาวะวิกฤตทางเศรษฐกิจของประเทศในปัจจุบัน ซึ่งขณะนี้ทุกฝ่ายทั้งทางภาครัฐและเอกชน ให้ความสำคัญในการพัฒนาทางการเกษตรไปสู่อุตสาหกรรมเกษตร เนื่องจากเป็นภาคอุตสาหกรรมเดียวที่ใช้แรงงานและวัตถุดิบภายในประเทศเป็นหลัก โดยมูลค่าการส่งออกสินค้าเกษตรคิดเป็นสัดส่วน ประมาณร้อยละ 17.34 ของมูลค่าการส่งออกทั้งหมดของประเทศ ในปี พ.ศ. 2541 หรือประมาณ 389,831 ล้านบาท (1)

ปัจจุบันยังเกิดผลกระทบของข้อผูกพันตามพันธกรณีต่างๆ ที่ไทยได้กระทำไว้แก่องค์การการค้าโลก (World Trade Organization : WTO) ซึ่งมีการเปิดตลาดสำหรับสินค้าเกษตรเพื่อเป็นประโยชน์กับผู้ส่งออกในเรื่องภาษีที่ลดลง และการอุดหนุนการส่งออก ทำให้ไทยสามารถแข่งขันกับประเทศอื่นได้ และการเข้าเป็นสมาชิกของกลุ่มความร่วมมือทางเศรษฐกิจต่าง ๆ เช่น ข้อตกลงเขตการค้าเสรีอาเซียน (Asean Free Trade Area : AFTA) ได้กำหนดเป้าหมายในการลดภาษีลงให้เหลือร้อยละ 0 - 5 และยกเลิกมาตรการที่มีภาษีศุลกากรใน 10 ปี (พ.ศ. 2536-2546) โดยมีหลักการดำเนินการสำหรับสินค้ายกเว้นชั่วคราว (Temporary Exclusion List) ได้แก่ สินค้าที่แต่ละประเทศสงวนสิทธิ์ไม่ลดภาษีชั่วคราว แต่จะทยอยนำมาลดภาษีภายใน 5 ปี โดยเริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539-2543 สำหรับสินค้าอุตสาหกรรมและเกษตรแปรรูป นอกจากนี้ยังมีตลาดที่สำคัญของ

ไทย คือ ประชาคมยุโรปหรือ สหภาพยุโรป (European Union : EU) เป็นตลาดใหญ่ที่รองรับสินค้าเกษตรและอุตสาหกรรมที่สำคัญของไทย โดยไทยส่งออกประมาณร้อยละ 15.9 ของมูลค่าการส่งออก ในปี พ.ศ. 2539 และข้อตกลงการค้าเสรีอเมริกาเหนือ (North American Free Trade Agreement : AFTA) โดยเฉพาะสินค้าเกษตร ประมาณครึ่งหนึ่งของสินค้าที่เรียกเก็บภาษีและมิโควัตจะถูกขจัดออกไป (2) สรุปแล้ว การค้าระหว่างประเทศในขณะนี้ เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมาก การแข่งขันในตลาดโลกจะทวีความรุนแรงยิ่งขึ้น ธุรกิจที่จะแข่งขันได้ในอนาคต จะต้องมีการพัฒนาการใช้เทคโนโลยีเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มมูลค่าสินค้า ดังนั้นการแปรรูปจึงเป็นทางออกที่ดีอีกทางหนึ่งในการแก้ปัญหาหนี้ ซึ่งนอกจากจะลดความเสียหายและยืดระยะเวลาการเก็บรักษาแล้วยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลผลิตด้วย

ตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2540-2544) มีเป้าหมายในการพัฒนาอุตสาหกรรมในระดับครัวเรือน อุตสาหกรรมชนบทและอุตสาหกรรมชุมชนในการส่งเสริมให้ภาคธุรกิจเอกชนเข้ามาสนับสนุนทั้งในด้านทุน และเทคโนโลยีแก่เกษตรกรและชุมชน รวมทั้งการฝึกอบรมและให้ข้อมูลเกี่ยวกับโอกาสในการลงทุนด้านการแปรรูปสินค้าเกษตรอย่างง่าย และสนับสนุนอุตสาหกรรมชุมชนที่ประชาชนในท้องถิ่นจัดตั้งและเป็นเจ้าของร่วมกัน โดยรัฐให้สิทธิประโยชน์ด้านภาษีและการลงทุน ข้อมูลข่าวสารด้านการตลาด และเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและการตลาด อันจะเป็นแนวทางเลือกแก่เกษตรกรในการผลิตสินค้าเกษตรที่มีศักยภาพที่จะเป็นวัตถุดิบในการแปรรูป และสนับสนุนเกษตรกรในการผลิตและแปรรูปสินค้าเกษตรภายใต้แนวทางการพัฒนาแบบยั่งยืน สอดคล้องกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะช่วยลดอุปสรรคของการส่งออกสินค้าเกษตรของไทยในระยะยาว โดยเฉพาะสินค้าเกษตรแปรรูปประเภทอาหาร และเครื่องอุปโภคบริโภค โดยให้การสนับสนุนเป็นพิเศษสำหรับอุตสาหกรรมที่นำเทคโนโลยีการแปรรูปมาใช้ นอกจากนี้ยังมีเป้าหมายในการพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรและอุตสาหกรรมชุมชน ให้เป็นแหล่งรองรับและเชื่อมโยงการผลิต โดยให้อุตสาหกรรมเกษตรและการแปรรูปสินค้าเกษตร มีบทบาทต่อการผลิตรวมของประเทศเพิ่มขึ้น นำไปสู่การเพิ่มรายได้ และการมีงานทำของเกษตรกร สนับสนุนอุตสาหกรรม การเกษตร และการแปรรูปสินค้าเกษตร โดยจัดตั้งเขตการผลิตสินค้าเกษตรเพื่อเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรม ปรับโครงสร้างการผลิตอุตสาหกรรมและบริการ โดยการเพิ่มขีดความสามารถด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม โดยการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการและปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิต การส่งเสริมการลงทุนและการใช้มาตรฐานสูงใจด้านการเงิน การคลัง สำหรับกิจกรรมการพัฒนา และการปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิต การจัดสร้างระบบข้อมูลและเผยแพร่ความก้าวหน้าในเทคโนโลยีการผลิตระหว่างกลุ่มผู้ผลิตรวมทั้งการถ่ายทอดเทคโนโลยีไปสู่อุตสาหกรรมขนาดกลาง

และขนาดเล็ก (3) ดังพระราชดำริสของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 9 ความว่า วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างความเจริญของบ้านเมือง จึงควรสนับสนุนให้มีการค้นคิดเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับภาวะ และความต้องการของประเทศขึ้นใช้เองอย่างจริงจัง ถ้าสามารถค้นคิดได้มากเท่าใด จะเป็นการประหยัดและช่วยให้สามารถนำไปใช้งานต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวางยิ่งขึ้นเท่านั้น (4)

ปัจจุบันการส่งออกผักและผลไม้อบแห้ง มีแนวโน้มขยายตัวอย่างรวดเร็ว จากปี 2538 มีมูลค่าการส่งออก 634.8 ล้านบาท และปี 2539 มีมูลค่าการส่งออกรวม 1,674.75 ล้านบาท คิดเป็นอัตราเติบโตร้อยละ 163.8 ต่อปี (5)

การใช้เทคโนโลยีการอบแห้ง เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้น ซึ่งกรรมวิธีการอบแห้งมีประโยชน์ในการช่วยถนอมรักษาอาหาร ให้สามารถเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสีย เนื่องจากอาหารที่แห้งแล้วทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีน้อย และช่วยลดปริมาณและน้ำหนัก กล่าวคืออาหารที่แห้งแล้วจะมีปริมาณและน้ำหนักลดลง ทำให้สามารถลดต้นทุนในการเก็บรักษาและการขนส่งได้ (6)

จากเดิมที่ผ่านมาประเทศไทยใช้เทคโนโลยีการอบแห้งโดยใช้วิธีการตากแดด ซึ่งพบปัญหาการปนเปื้อนฝุ่นละอองในผลิตภัณฑ์และเกิดการรบกวนจากแมลงรวมทั้งพาหะนำเชื้อโรคต่าง ๆ อีกทั้งต้องใช้ระยะเวลาในการตากแดดค่อนข้างนานทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางอาหาร ผลิตภัณฑ์น่าเสีย นอกจากนี้ยังมีปัญหาของพื้นที่สำหรับการตากแดดซึ่งต้องใช้พื้นที่มาก และไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้

ต่อมามีการคิดค้นพัฒนานาเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาใช้ในกระบวนการอบแห้ง คือการนำพลังงานรูปแบบต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์ในการอบแห้ง เช่น การใช้ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ตู้อบก๊าซ ตู้อบไอน้ำ และตู้อบไฟฟ้า (5) ซึ่งเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้สามารถแก้ปัญหาการอบแห้งโดยวิธีการตากแดดได้ แต่วิธีดังกล่าวจะประสบปัญหาเรื่องของความชื้นในบรรยากาศในช่วงฤดูฝน ทั้งนี้เนื่องจากกรรมวิธีการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญคือ อุณหภูมิ ความเร็วลม และความชื้นในอากาศ ซึ่งตู้อบดังกล่าวข้างต้นมีข้อจำกัดคือ การควบคุมปริมาณความชื้น ซึ่งการลดความชื้นในขณะอบแห้งจะต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น มีผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูง

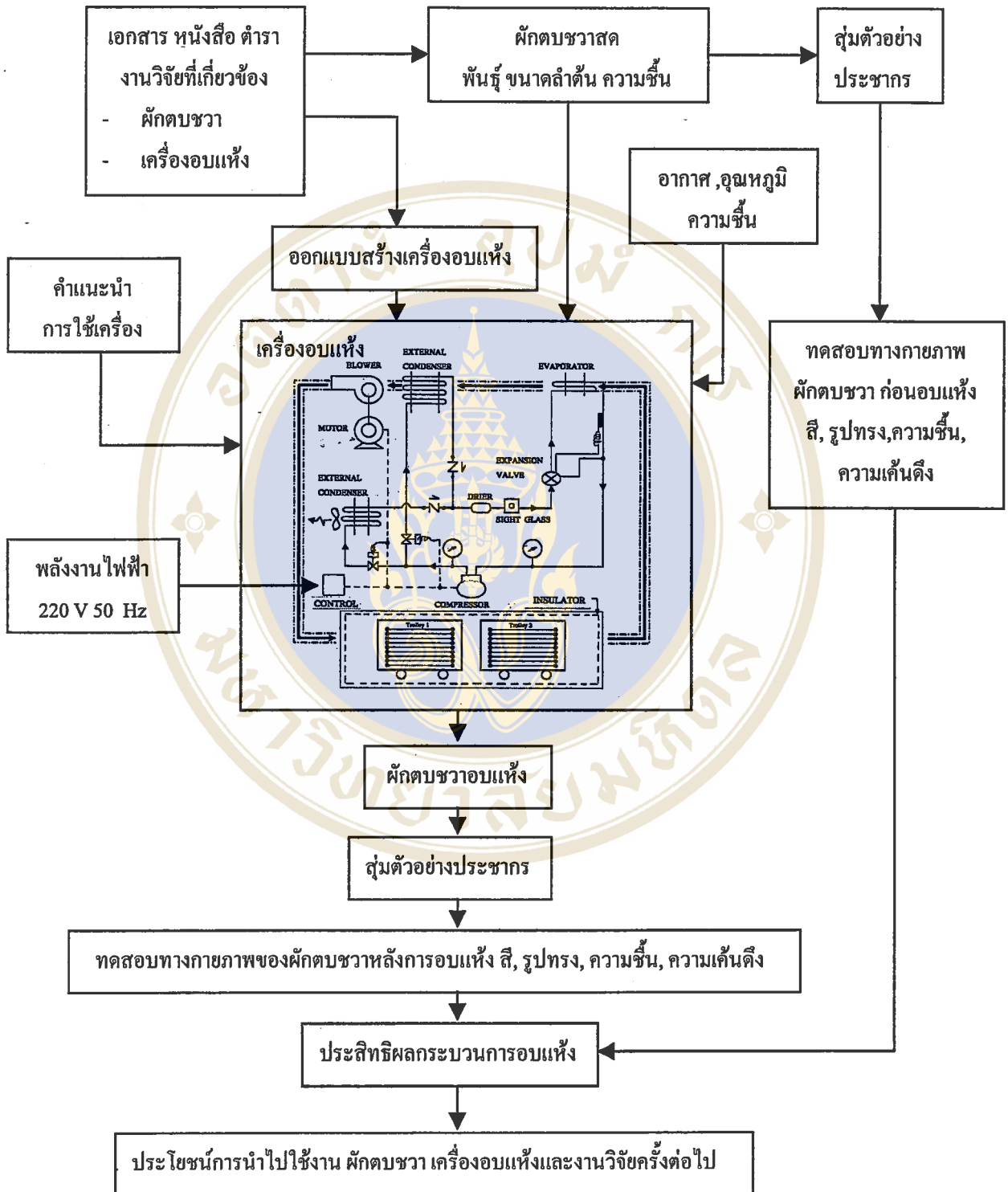
จากปัญหาเรื่องความชื้นของการใช้เครื่องอบแห้งดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยมีแนวคิดในเรื่องของการนำระบบปั๊มความร้อน (Heat pump) มาใช้ในการอบแห้ง เนื่องจากระบบปั๊มความร้อนมีเครื่องทำระเหย (Evaporator) สามารถช่วยดึงความชื้นออกจากอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งเป็นระบบปิดทั้งหมด ซึ่งคาดว่าจะช่วยลดปัญหาเรื่องของความชื้นในการอบแห้งได้ จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัยจึงสนใจพัฒนากระบวนการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อน ทำการออกแบบและ

สร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำ โดยนำผักตบชวามาเป็นตัวอย่างทดสอบ เนื่องจากผักตบชวาเป็นพืชที่ขึ้นตามแม่น้ำลำคลองทั่วไปสามารถแพร่ขยายพันธุ์ได้รวดเร็วมาก ซึ่งจัดว่าเป็นวัชพืชที่สร้างความเสียหายอย่างมาก ก่อให้เกิดปัญหาในด้านการจัดการทรัพยากรแหล่งน้ำ เช่น กีดขวางการคมนาคมทางน้ำ ขัดขวางการไหลของน้ำในคลองชลประทานและเกิดปัญหาในการใช้น้ำในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในกรณีที่มีผักตบชวาเจริญเติบโตในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดการดูดและระเหยไปสู่อากาศ (Evapotranspiration) ที่อัตราสูงกว่าการระเหยของน้ำตามปกติถึง 5.8 เท่า ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำไปอย่างมหาศาล (7)

จากการสำรวจปริมาณผักตบชวาที่พบในจังหวัดต่าง ๆ ในเขตลุ่มน้ำท่าจีนของบริษัท พอล คอนซัลแตนท์ จำกัด พบว่า ปริมาณผักตบชวาในแม่น้ำท่าจีนมีความหนาแน่นเฉลี่ยร้อยละ 7.88 ของลำน้ำ ส่วนในลำคลองของกลุ่มน้ำท่าจีนมีความหนาแน่นของผักตบชวา ประมาณร้อยละ 30-40 ของลำคลอง ในบึงธรรมชาติมีความหนาแน่นของผักตบชวา ประมาณร้อยละ 25 โดยที่ปริมาณของผักตบชวาจะมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ปริมาณของผักตบชวาในลุ่มน้ำท่าจีนในปัจจุบัน มีประมาณ 1.68 ล้านตัน ผักตบชวาเหล่านี้ จะกระจายอยู่ในแหล่งน้ำและคลองสาขาต่าง ๆ (8) ซึ่งในปัจจุบันได้มีการแก้ปัญหาผักตบชวา โดยการพัฒนานำผักตบชวามาใช้เป็นอาหารสัตว์ ปุ๋ยหมัก วัสดุในการเพาะเห็ดฟาง ผลิตก๊าซชีวภาพ รวมทั้งนำมาประดิษฐ์เป็นของใช้ที่มีคุณค่า เช่น ภาชนะใส่ของ กระเป๋า ตะกร้า และของที่ระลึก เป็นต้น ซึ่งให้ความงามทางศิลปะและเกิดคุณค่าด้านประโยชน์ใช้สอยในครัวเรือน และสามารถนำไปจำหน่าย เป็นการสร้างอาชีพเพื่อเพิ่มรายได้ให้กับชาวบ้าน

ดังนั้นการสร้างและทดลองเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำ โดยใช้ป้อนความร้อนซึ่งใช้ผักตบชวาเป็นตัวอย่างทดสอบจะก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านการพัฒนากระบวนการอบแห้งและพัฒนาคุณภาพผักตบชวาที่ใช้ในงานหัตถกรรม และยังสามารถนำไปใช้อบแห้งผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ทางการเกษตรได้

1.2 กรอบแนวคิดในการวิจัย



แผนภูมิที่ 1-1 แสดงกรอบแนวคิดในการวิจัย

1.3 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน
- 1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง
- 1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพผลของกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ในการวิจัยมีขอบเขตดังนี้

- 1.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ เครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน ประกอบด้วย เครื่องปรับอากาศขนาด 1 ตันความเย็น (12000 Btu/hr) หรือเท่ากับ 3.6 kW และเลือกใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a (Hydrofluorocarbons) เป็นสารที่ไม่ทำลายชั้นโอโซน
- 1.4.2 ผลิตภัณฑ์ที่นำมาเป็นตัวอย่างทดสอบกับเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อนคือ ผักตบชวาจากบ้านอ้อย ตำบลสรรพยา อำเภอสรรพยา จังหวัดชัยนาท เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวา คือ สี รูปทรง ความชื้น และความเค็มดิ่ง

1.5 นิยามศัพท์

1.5.1 การอบแห้งอุณหภูมิต่ำ หมายถึง กระบวนการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิไม่เกิน 60 °C โดยใช้การถ่ายเทความร้อน ซึ่งความร้อนที่ได้เป็นลมร้อนผ่านเครื่องควบแน่น ทำให้ความชื้นของผักตบชวาสุดท้ายเหลือ 14 % db

1.5.2 ปั๊มความร้อน หมายถึง การถ่ายเทความร้อนจากเครื่องควบแน่น (Condenser) ไปที่ผักตบชวา ทำให้ความชื้นจากผักตบชวาถูกดูดมากระทบกับเครื่องทำระเหย (Evaporator) จึงกลั่นตัวเป็นหยดน้ำออกมภายนอกกระบวนการ

1.5.3 ผักตบชวา หมายถึง ผักตบชวาที่นำมาจากบ้านอ้อย ตำบลสรรพยา อำเภอสรรพยา จังหวัดชัยนาท ทำการคัดเลือกตัดเฉพาะลำต้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 – 2.5 cm และมีความยาวของลำต้นประมาณ 60 cm

1.5.4 คุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวา หมายถึง คุณสมบัติของผักตบชวา ทางด้าน สี รูปทรง ความชื้น และความเค็มดิ่ง ซึ่งทำการทดสอบก่อนและหลังการอบแห้ง

1.5.5 สี หมายถึง ลักษณะสีผิวภายนอกโดยรวมของผักตบชวาเมื่อนำไปเทียบกับ

Process color chart

1.5.6 รูปทรง หมายถึง ลักษณะรูปทรงโดยรวมของต้นผักตบชวา ทดสอบโดยการสังเกตด้วยตาเปล่า

1.5.7 ความชื้น หมายถึง อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในผักตบชวาสดต่อน้ำหนักผักตบชวาอบแห้ง มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

1.5.8 ความเค้นดึง หมายถึง การทดสอบแรงดึงตามแนวยาวของผักตบชวาโดยใช้เครื่องทดสอบ Universal testing machine มีหน่วยเป็น N/mm^2

1.5.9 หนึ่งตันความเย็น หมายถึง ความสามารถในการดูดซับปริมาณความร้อนของเครื่องทำระเหย เท่ากับ 12000 Btu/hr หรือเท่ากับ 3.6 kW

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำ โดยใช้ปั๊มความร้อนมีอุณหภูมิต่ำไม่เกิน 60 °C นำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร

1.6.2 ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาก่อน และหลังกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน

1.6.3 เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการนำไปใช้ประยุกต์กับการอบแห้งผลิตภัณฑ์อื่นทางการเกษตรที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ไม่เกิน 60 °C

บทที่ 2

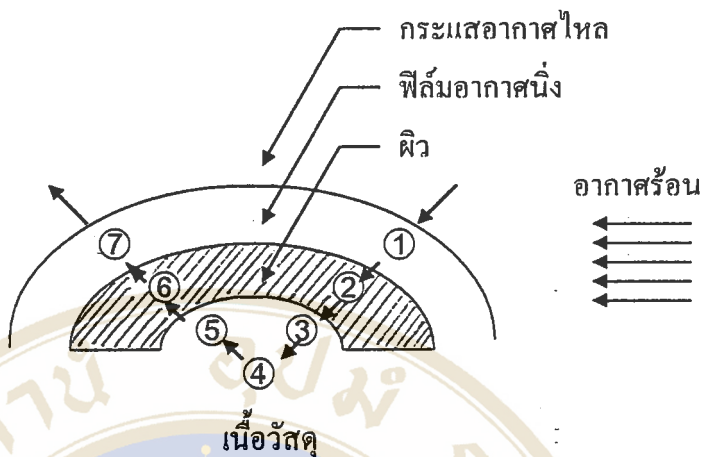
ทบทวนวรรณกรรม

การทบทวนวรรณกรรมมีหัวข้อสำคัญแบ่งได้ดังนี้

- 2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง
- 2.2 ทฤษฎีการทำงานของปั๊มความร้อน
- 2.3 การเลือกใช้สารทำความเย็น
- 2.4 กรรมวิธีการทำให้แห้ง
- 2.5 การปรับปรุงกรรมวิธีการทำให้แห้ง
- 2.6 ประเภทของเครื่องอบแห้ง
- 2.7 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับผักตบชวา
- 2.8 คุณสมบัติทางกลและการทดสอบวัสดุ
- 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการใช้เทคโนโลยีการอบแห้ง

2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย สิ่งที่สำคัญในการอบแห้งคือ การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด จะเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนและการแผ่รังสี โดยทั่วไปมักจะใช้วิธีการพาความร้อนและความร้อนสัมผัสจากอากาศที่วัสดุได้รับส่วนใหญ่มักจะใช้น้ำระเหยออกจากวัสดุ



- ① ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ฟิล์มอากาศนิ่ง
- ② ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ผิววัสดุ
- ③ ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนในเนื้อวัสดุ
- ④ น้ำที่ระเหย
- ⑤ ความต้านทานการถ่ายเทมวลในเนื้อวัสดุ
- ⑥ ความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุ
- ⑦ ความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ฟิล์มอากาศนิ่ง

รูปที่ 2-1 การแพร่ของมวลจากผิวของแข็งไปยังของไหล

2.1.1 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นในผลิตภัณฑ์อาหารและเมล็ดพืชมีทั้งความชื้นที่เกาะติดที่ผิวของวัสดุ ซึ่งสามารถไล่ความชื้นนี้ออกไปได้หมด โดยการให้ความร้อน ความชื้นนี้อาจเกาะติดอยู่ภายในผนังด้านในท่อนเล็ก ที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุ โดยไม่สามารถไล่ความชื้นภายในวัสดุนี้ได้หมด ปริมาณความชื้นในวัสดุ สามารถแสดงได้ 2 แบบ คือ

2.1.1.1 ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet Basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุชื้น ซึ่งเมื่อคูณด้วย 100 จะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์

$$M_w = [(W - d)/W] \times 100 \tag{2-1}$$

เมื่อ

M_w = เปอร์เซนต์ความชื้นมาตรฐานเปียก, %wb

W = น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุชิ้น, kg

d = น้ำหนักของวัสดุแห้ง, kg

การแสดงความชื้นแบบนี้นิยมใช้ในทางการค้า

2.1.1.2 ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis) คืออัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุแห้ง หากค่าเป็นเปอร์เซนต์ ดังนี้

$$M_d = [(W - d)/d] \times 100 \quad (2-2)$$

เมื่อ

M_d = เปอร์เซนต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง, %db

การแสดงความชื้นแบบนี้ส่วนใหญ่ใช้ทางด้านการวิจัย เพราะสามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการอบแห้งได้ง่ายขึ้น เนื่องจากน้ำหนักแห้งของวัสดุคงที่ (7)

2.1.2 ปรากฏการณ์การอบแห้ง (Drying Phenomena)

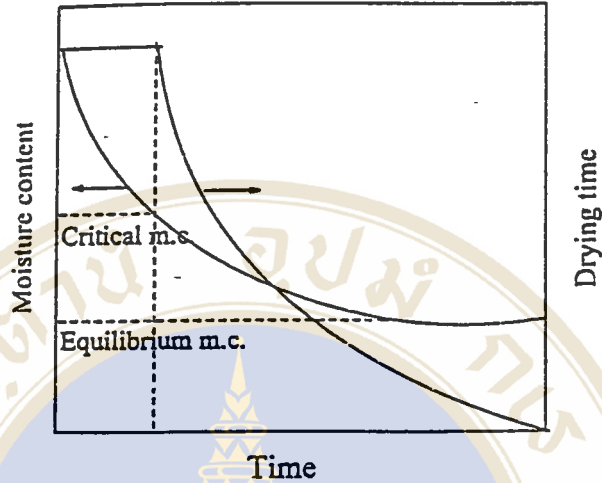
การอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างภายในมีลักษณะเป็นรูพรุน แบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ

2.1.2.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period)

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสูงกว่าปริมาณความชื้นวิกฤติ ที่ผิวของผลิตภัณฑ์ จะมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมากเมื่อผ่านกระแสอากาศไปบนตัวผลิตภัณฑ์ ความร้อนสัมผัสจากอากาศจะถ่ายเทไปยังผลิตภัณฑ์และน้ำจะระเหยจากผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น

2.1.2.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period)

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ มีค่าต่ำกว่าปริมาณความชื้นวิกฤติ น้ำจะเคลื่อนที่จากภายในตัวผลิตภัณฑ์มาที่ผิวในลักษณะของของเหลว หรือน้ำ และน้ำที่ผิวจะระเหยไปยังอากาศทำให้อัตราการอบแห้งลดลงและถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดเกรเดียนความชื้นและเกรเดียนอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ



แผนภูมิที่ 2-1 แสดงการอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งคงที่และลดลง

เมื่อพิจารณาการอบแห้งวัสดุเพียงหนึ่งชิ้น พบว่า มีตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง ดังนี้

1) อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ การอบแห้งอาหารที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน ส่วนใหญ่จะมีเฉพาะการอบแห้งลดลง ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้งจะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวและเนื้อวัสดุมีมากขึ้น เป็นผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อลดความชื้นของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นหากมีการเพิ่มอุณหภูมิและลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งแล้ว จะมีผลทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น

2) ความเร็วลม อิทธิพลของความเร็วลมต่อการอบแห้งสำหรับช่วงการอบแห้งคงที่เมื่อเพิ่มความเร็วลม หรืออัตราการไหลของอากาศจะมีผลทำให้ความหนาของฟิล์มอากาศนิ่ง (ดังแผนภูมิที่ 2-1) ลดลงเป็นผลให้ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนและมวลลดลง ส่วนใหญ่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วลมจะทำให้ความหนาของฟิล์มอากาศนิ่งมีค่าลดลงเป็นผลให้ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนและมวลลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากความต้านทานที่แผ่นฟิล์ม อากาศนิ่งมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานตัวอื่น ๆ ดังนั้นการเพิ่มความเร็วลมจึงไม่มีผลต่อการอบแห้งมากนัก

3) ความชื้นของวัสดุอบแห้ง การเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของของเหลวซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น วัสดุที่มีความชื้นสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงด้วย

4) ขนาดของวัสดุอบแห้ง วัสดุอบแห้งที่มีขนาดความต้านทานภายในน้อยกว่าจะมีผลทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่า

แต่หากพิจารณาการอบแห้งวัสดุหลาย ๆ ชิ้นพร้อมกันแล้ว อัตราการอบแห้งโดยรวมจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศด้วย ซึ่งสามารถหาได้โดยทำการสมดุลมวลและพลังงาน (9)

2.1.3 สมดุลพลังงานสำหรับการอบแห้ง (Energy Balance)

ในกระบวนการอบแห้ง เรามักสมมติกันว่า ความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์เท่ากับความร้อนสัมผัสของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเมื่อไหลผ่านผลิตภัณฑ์นั้น ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

$$m_w h_{fg} = m_a C_a (T_i - T_f) \quad (2-3)$$

เมื่อ

$$m_w = \text{มวลของน้ำที่ระเหย, kg}$$

$$h_{fg} = \text{ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในวัสดุ, kJ/kg}$$

$$m_a = \text{มวลของอากาศที่ใช้ออบแห้ง, kg}$$

$$C_a = \text{ความร้อนจำเพาะ, kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

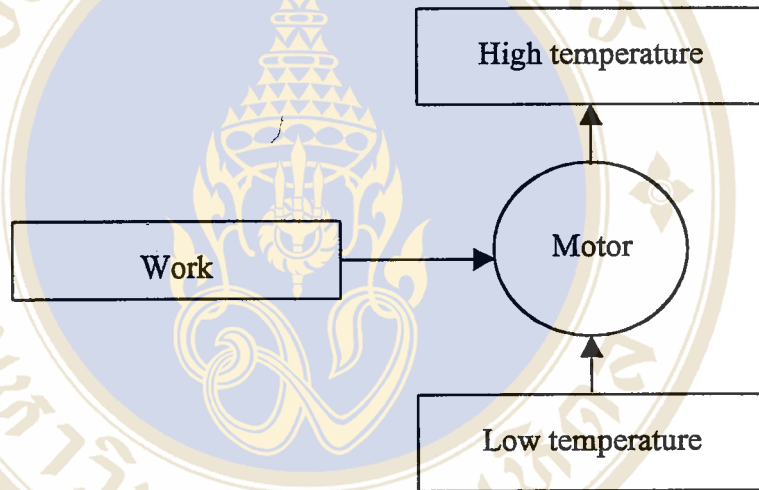
$$T_i = \text{อุณหภูมิของอากาศร้อนก่อนอบแห้งวัสดุ, } ^\circ\text{C}$$

$$T_f = \text{อุณหภูมิของอากาศหลังอบแห้ง, } ^\circ\text{C}$$

จากสมการ (2-3) จะเห็นว่าสามารถหาค่ามวลของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งได้และถ้ารู้ว่าวัสดุจะแห้งภายในกี่วัน และในแต่ละวันใช้เวลาในการอบกี่ชั่วโมง จะสามารถหาอัตราการไหลของอากาศที่จะใช้ออบได้ (10)

2.2 ทฤษฎีการทำงานของปั๊มความร้อน

การทำงานของปั๊มความร้อนหรือระบบทำความเย็นโดยงาน ถูกป้อนให้กับเครื่องยนต์ ความร้อน และสามารถดึงความร้อนโดยมีสารทำความเย็นเป็นตัวกลาง จากแหล่งความร้อน อุณหภูมิต่ำ และถ่ายเทความร้อนให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง ระบบปั๊มความร้อนและระบบทำความเย็นโดยหลักการแล้วการทำงานของวัฏจักรซึ่งมีส่วนประกอบหลักๆ เหมือนกัน แต่ทั้งสองระบบจะแตกต่างกันที่วัตถุประสงค์การนำไปใช้งาน โดยที่ระบบปั๊มความร้อนจะมุ่งเน้นใช้ประโยชน์จากการคายความร้อนให้แก่แหล่งความร้อนสูง ส่วนระบบทำความเย็นจะมุ่งเน้นใช้ประโยชน์จากการดูดความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ



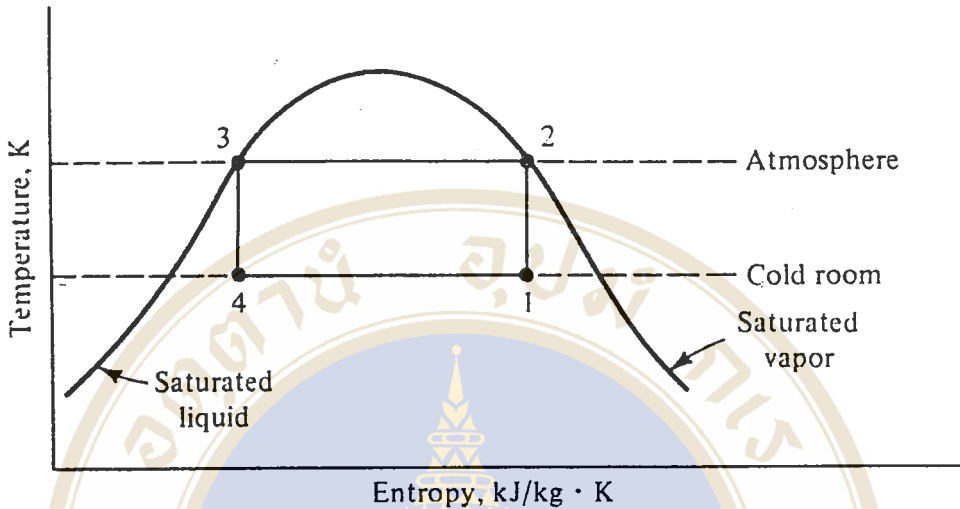
แผนภูมิที่ 2-2 แสดงหลักการการทำงานของระบบปั๊มความร้อน

2.2.1 วัฏจักรย้อนกลับของคาร์โน (The reversed Carnot cycle)

การศึกษาวัฏจักรย้อนกลับของคาร์โนด้วยเหตุผลดังนี้

2.2.1.1 เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ถึงอุณหภูมิที่จะทำงานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของระบบที่ดีที่สุด

2.2.1.2 เพื่อใช้เป็นกรอบมาตรฐานในการเปรียบเทียบหาข้อปรับปรุงระบบ



แผนภูมิที่ 2-3 แสดงวัฏจักรย้อนกลับของคาร์โน

ในทุก ๆ กระบวนการในวัฏจักรคาร์โนดังแผนภูมิที่ 2-3 เป็นกระบวนการแบบย้อนกลับ (Reversible process) ได้ดังนี้

กระบวนการ 1 - 2 คือ กระบวนการอัดตัวแบบไอเซนทรอปิก (Isentropic compression process)

กระบวนการ 2 - 3 คือ กระบวนการคายความร้อนที่ความดันและอุณหภูมิคงที่
 กระบวนการ 3 - 4 คือ กระบวนการขยายตัวแบบไอเซนทรอปิก

(Isentropic process)

กระบวนการ 4 - 1 คือ กระบวนการรับความร้อนที่ความดันและอุณหภูมิคงที่

2.2.2 ประเภทของระบบปั๊มความร้อน

ระบบปั๊มความร้อนสามารถแยกประเภทออกได้ดังนี้

2.2.2.1 ระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

2.2.2.2 ระบบปั๊มความร้อนแบบดูดกลืน

2.2.2.3 ระบบปั๊มความร้อนแบบเทอร์โมอิเล็กทริก

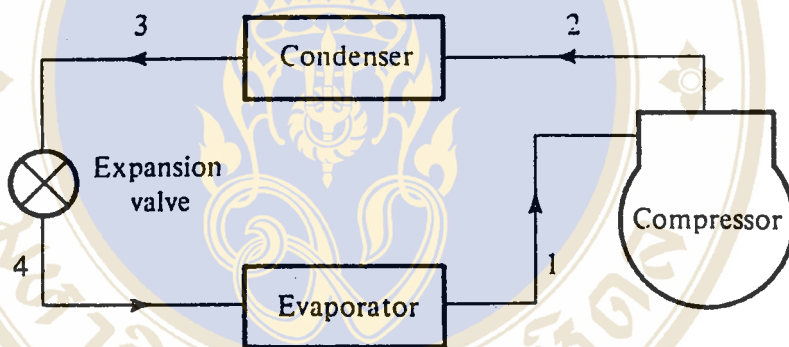
2.2.2.4 ระบบปั๊มความร้อนแบบแยกตัว

2.2.2.5 ระบบปั๊มความร้อนแบบเคมี

ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จะศึกษาระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอเท่านั้น.

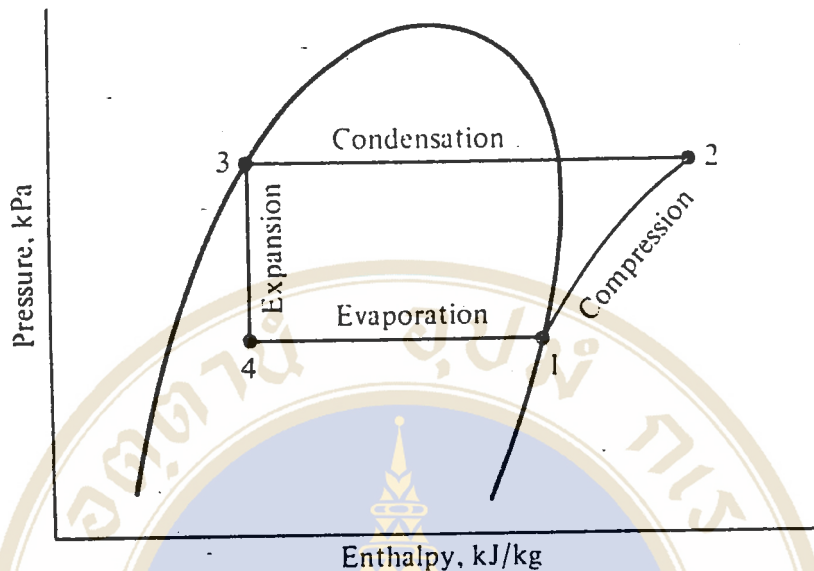
2.2.3 วัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอทางอุดมคติ (The ideal vapour compression heat pump cycle) มีส่วนประกอบหลักดังนี้

- 2.2.3.1 เครื่องอัดไอ (Compressor)
- 2.2.3.2 เครื่องควบแน่น (Condenser)
- 2.2.3.3 เครื่องทำระเหย (Evaporator)
- 2.2.3.4 วาล์วลดความดัน (Expansion valve)



แผนภูมิที่ 2-4 แสดงส่วนประกอบของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

สำหรับวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอทางอุดมคติสามารถอธิบายได้โดยใช้แผนภูมิความดัน-เอนทัลปี (P-h Diagram)



แผนภูมิที่ 2-5 แสดงแรงดัน-เอนทัลปี (P-h Diagram)

กระบวนการต่าง ๆ ของวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอทางอุดมคติจากแผนภูมิที่ 2-5 เป็นดังนี้

กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการที่สารทำความเย็นในสถานะเป็น ไออัดแบบ ไอเซนโทรปิกด้วยเครื่องอัดไอ ให้ไอสารทำความเย็นมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น

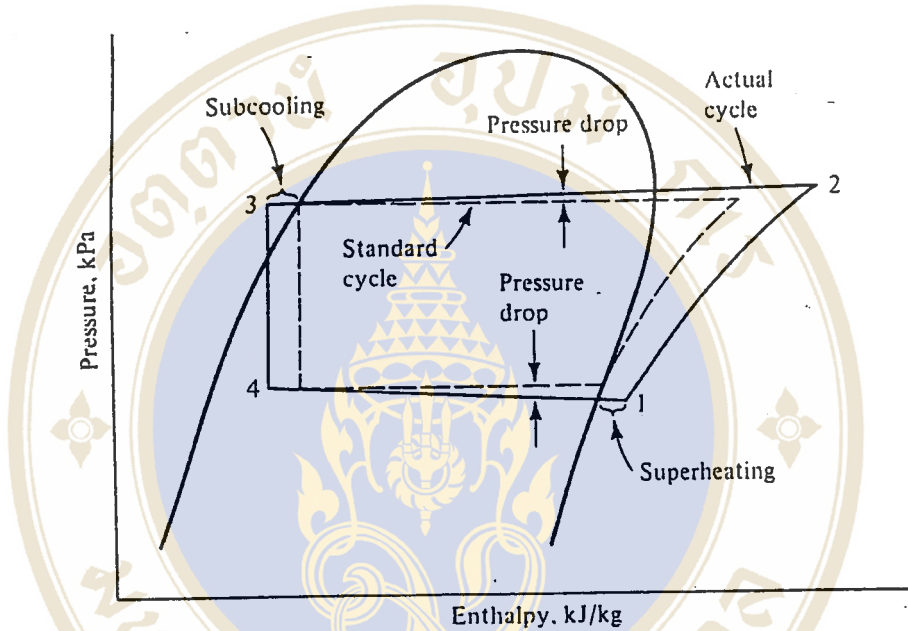
กระบวนการ 2-3 คือ กระบวนการที่ไอสารทำความเย็นกลั่นตัวกลายเป็นของเหลว โดยคายความร้อนออกมาที่เครื่องควบแน่น เป็นกระบวนการที่ความดันคงที่

กระบวนการ 3-4 คือ กระบวนการที่สารทำความเย็นมีสถานะเป็นของเหลวถูกลดความดันด้วยวาล์วขยายตัวซึ่งเป็นกระบวนการเอนทัลปีคงที่

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการที่สารทำความเย็นสถานะของเหลวจะเดือดกลายเป็นไอและดูดความร้อนเข้าไปที่เครื่องทำระเหย และเป็นกระบวนการความดันคงที่

2.2.4 วัฏจักรจริงของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ (Actual vapour compression heat pump cycle)

วัฏจักรจริงของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ เมื่อเปรียบเทียบกับวัฏจักรปั๊มความร้อนทางอุดมคติ



แผนภูมิที่ 2-6 แสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรมของวัฏจักรทางอุดมคติของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

จากแผนภูมิที่ 2-6 จะเห็นความแตกต่างที่สำคัญ คือ

2.2.4.1 ผลที่เกิดขึ้นโดยไม่อาจหลีกเลี่ยง ได้แก่ ความดันที่ตกลงในเครื่องควบแน่น และเครื่องทำระเหย ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรจริงซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างสารทำความเย็นกับผนังท่อและในวัฏจักรจริง การอัดค่าในเครื่องอัดไอจริงคือยกกว่าเครื่องอัดไอทางอุดมคติ สาเหตุเนื่องจากในตัวเครื่องอัดไอ มีแรงเสียดทาน และการสูญเสียอื่น ๆ

2.2.4.2 เหตุผลที่เกิดขึ้นโดยเจตนา ได้แก่ การเกิดสภาวะ ใอร้อนชวดยิ่ง (Super heat) และของเหลวเย็นชวดยิ่ง (Subcooling) ของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องทำระเหย และเครื่องควบแน่น ตามลำดับ สาเหตุเนื่องจาก เพื่อให้แน่ใจว่าสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องทำระเหย มีสถานะเป็นไอทั้งหมด เพราะถ้าของเหลวเข้าสู่เครื่องอัดไอจะทำให้ชำรุด และเพื่อให้แน่ใจว่าสารทำความเย็นที่เข้าวาล์วขยายตัวมีสถานะเป็นของเหลวทั้งหมด (11)

2.3 การเลือกใช้สารทำความเย็น

ปัจจุบันมีการพบว่าสารทำความเย็น ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับโอโซนในชั้นบรรยากาศ ซึ่งทำหน้าที่ห่อหุ้มโลกนี้ให้พ้นจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต กลายเป็นช่องโหว่ทางขั้วโลก จึงมีข้อตกลงระหว่างประเทศได้ลงนามในพิธีสารมอนทรีออล (Montreal Protocol) เพื่อจำกัดปริมาณการใช้สารนี้ โดยเฉพาะสารที่มีองค์ประกอบของคลอรีน (Cl) ฟลูออรีน (F) และคาร์บอน (C) หรือที่เรียกกันว่า CFC (Chlorofluorocarbons) เนื่องจากสารตัวนี้สามารถตกค้างอยู่ในชั้นบรรยากาศได้ยาวนาน ในขณะที่ตัวอื่นก็จะทำลายโอโซนไปได้เรื่อย ๆ นอกจากนี้ยังกล่าวกันว่า ให้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่เข้ามายังโลกสะท้อนกลับออกไปสู่นอกโลกได้น้อยลง ทำให้บรรยากาศของโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น

2.3.1 ข้อกำหนดเกี่ยวกับการใช้สารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbons, CFCs)

นักวิจัยทั่วโลกได้ตระหนักถึงผลกระทบของการใช้สาร CFCs ที่มีผลต่อชั้นบรรยากาศ โดยมีการประชุมของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก และได้จัดสนธิสัญญาป้องกันการทำลายชั้นโอโซนเพื่อร่วมลงนามในพิธีสารมอนทรีออล (Montreal protocol) ซึ่งเป็นพิธีสารที่เน้นหนักเกี่ยวกับการควบคุมการใช้และการผลิตสาร CFCs และ Hologen

2.3.2 สารตามข้อกำหนด

คุณสมบัติของสาร CFCs ที่กำหนดให้ยกเลิกการใช้ตามข้อกำหนดตกลงร่วมกันของการประชุมสมาชิก พิธีสารมอนทรีออล ครั้งที่ 2

1. ค่า ODP (Ozone depletion potential) หมายถึง ค่าแสดงถึงศักยภาพในการทำลายชั้นโอโซนของบรรยากาศโลก
2. ค่า GWP (Global warming potential) หมายถึง ค่าแสดงถึงศักยภาพในการทำให้โลกร้อนขึ้นในชั้นโอโซนของบรรยากาศโลก

ตารางที่ 2-1 ดัชนี ODP และ GWP ของสารทำความเย็น

สารทำความเย็น	R-11	R-12	R-22	R-502	R-123	R-134a
	(CFC-11)	(CFC-12)	(HCFC-22)	(CFC-502)	CHCFC-123)	(HFC-134a)
ODP	1.0	1.0	0.05	0.23	0.02	0.0
GWP	1.0	2.8	0.34	3.75	0.02	0.26

ที่มา : วารสารเทคนิค ปีที่ 13 ฉบับที่ 143 มกราคม 2540 (12)

สารทำความเย็น R-134a (HCF-134a) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้แทนสารทำความเย็นตัวเก่าซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะทางเทอร์โมไดนามิกส์ใกล้เคียงกับสารทำความเย็น R-12 มาก สารทำความเย็น R-134a นี้เหมาะที่ให้กับเครื่องปรับอากาศรถยนต์ ตู้เย็น และตู้แช่ เนื่องจากค่าในการทำลายโอโซน (ODP) มีค่าเป็นศูนย์ และค่าที่ทำให้โลกร้อนขึ้น (GWP) มีค่าต่ำมาก จึงเป็นเหตุที่ทำให้เลือกสารทำความเย็นนี้เพื่อการวิจัย เพราะต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโลกและสมรรถนะในการทำงานของสารทำความเย็น

ส่วน R-22 เป็นพวกที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจน (H) เป็นหลักด้วย จึงอยู่ในพวกที่เรียกว่า HCFC (Hydrochlorofluorocarbon) ซึ่งจะมีค่า ODP และ GWP ต่ำกว่า และเนื่องจากใช้อยู่กับเครื่องปรับอากาศขนาดเล็กที่มีจำนวนเครื่องมหาศาล จึงยังคงให้ใช้ต่อไปอีกกระยะหนึ่งหรือไม่เกินปี ค.ศ.2030 และมีแนวโน้มว่าจะถูกกำจัดไปเร็วกว่านี้

2.4 กรรมวิธีการทำให้แห้ง

การทำอาหารแห้งแบบต่าง ๆ

การทำแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย

การทำอาหารแห้งมีหลายวิธี เช่น การตากแดด การอบแห้ง การพ่นฝอย (Spray drying) และการทำให้แห้งแบบเย็นเยือกแข็ง (Freeze drying) เป็นต้น

การที่จะเลือกใช้วิธีใดก็ต้องพิจารณาจาก ลักษณะของของที่จะทำให้แห้ง ความยากง่ายในการทำความพร้อมของเครื่องมือและต้นทุนในการทำ เป็นต้น (13)

2.5 การปรับปรุงกรรมวิธีการทำให้แห้ง

การทำอาหารแห้งเป็นวิธีถนอมอาหารวิธีหนึ่ง ที่นิยมทำกันมากทั้งในระดับชาวบ้าน และระดับอุตสาหกรรม วิธีการทำอาหารแห้งที่นิยมกันมากที่สุด โดยเฉพาะในประเทศที่มีแสงแดด จัดตลอดทั้งวัน ได้แก่ การตากแดดเพราะวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อย การถนอมอาหารโดยวิธีตากแดดนี้ แม้ว่าจะทำกันมานานตั้งแต่สมัยโบราณจนถึงปัจจุบันก็ยังคงใช้วิธีเดิม ไม่ค่อยมีการปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้นคือ นำอาหารที่จะตากแดดมาวางบนตะแกรงหรือถาด โดยไม่มีอะไรปกปิดแล้วทิ้งไว้จนกว่าอาหารนั้นจะแห้งได้ที่ ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ถูกสุขลักษณะและอาหารที่แห้งแล้วมักจะสกปรกปนเปื้อนไปด้วยผง ผุ่นละออง ทั้งยังถูกแมลง นก หนู และสัตว์เลื้อย รบกวน โดยเฉพาะถ้าการตากแดดนั้นต้องใช้เวลาตากติดต่อกันหลายวัน เช่น อาหารพวกเนื้อสัตว์ อาหารทะเล เป็นต้น หรือในกรณีมีฝนตกในระหว่างการตากแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่าการนำเสีย ของอาหารยังอาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากแมลงมาไข่ทิ้งไว้และเจริญเติบโตขึ้นภายหลังการตากแห้ง ในประเทศไทยมีรายงานที่เชื่อถือได้ว่ามีการใช้ยามาแมลงพ่นฉีดลงบนอาหาร ในขณะที่นำมา ตากแห้งเพื่อป้องกันการรบกวนของแมลงซึ่งนับเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคอย่างยิ่ง ถ้าหากนำอาหาร นั้นไปรับประทาน โดยที่ฤทธิ์ของยามาแมลงนั้นยังไม่เสื่อมสลายไป (14)

วิธีการแปรรูปโดยการทำแห้งมี 3 วิธี คือ

2.5.1 การทำแห้งโดยอาศัยธรรมชาติ ได้แก่การตากแดด (sun dry) และการผึ่งลม เช่น การตากผลไม้บางชนิดที่มีน้ำตาลอยู่สูง เช่น กลิ้วตาก การแปรรูปวิธีนี้ใช้กันแพร่หลายในประเทศ ที่มีแสงแดดเพียงพอ เป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายน้อย แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอและมีสิ่ง เจือปนมาก

2.5.2 การทำแห้งโดยใช้พลังแสงแดด (solar dehydration) ได้มีการประดิษฐ์ตู้อบแห้ง ใช้พลังแสงแดดขึ้นเพื่อการแปรรูปอาหาร โดยวิธีทำแห้ง ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีกว่าการใช้วิธี การตากแดด ในด้านสุขลักษณะของอาหาร ซึ่งทำให้อาหารไม่สัมผัสกับผุ่นละอองในอากาศและ ปราศจากการรบกวนของแมลง นก หนู และสัตว์เลื้อยอื่น ๆ อาหารได้รับความร้อนสม่ำเสมอทั้งทำ ให้สีของอาหารดีขึ้น ทั้งยังช่วยลดระยะเวลาในการตากแห้งได้ถึงร้อยละ 35-40 ของระยะเวลาที่ใช้ ในการตากแดด การตากในตู้อบพลังแสงแดดใช้เนื้อที่น้อยกว่า เพราะตากซ้อนกันได้และไม่จำเป็นต้องเก็บอาหารเข้าออก เมื่อเวลาไม่มีแสงแดดหรือฝนตกทำให้ลดแรงงานลงได้ การที่อุณหภูมิใน ตู้อบแสงแดดสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก ทำให้สามารถทำลายจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในอาหาร ไปมากกว่า การตากแดด ผลิตภัณฑ์จึงเก็บไว้ได้นานกว่า

2.5.3 การทำแห้งโดยวิธี artificial drying เป็นวิธีที่นำเอาหลักวิชาและเทคนิคทาง วิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์เข้ามาใช้ โดยใช้หลักการส่งความร้อนไปยังอาหารเพื่อทำให้น้ำ

หรือความชื้นที่มีอยู่ในอาหารระเหยออกไป การส่งความร้อนใช้วิธีการนำความร้อน (conduction) การพาความร้อน (convection) หรือการแผ่รังสี (radiation) วิธีใดวิธีหนึ่งหรือร่วมกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบเครื่องอบแห้ง (dehydrater) ทั้งนี้ต้องรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ให้มากที่สุด (15)

ความแตกต่างระหว่าง การตากแห้ง กับ การอบแห้ง

ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการตากแห้งกับการอบแห้ง

การตากแห้ง	การอบแห้ง
1. อาศัยธรรมชาติฉะนั้นความสำเร็จจึงขึ้นอยู่กับลักษณะอากาศของแต่ละท้องถิ่น	1. อาศัยการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในห้องอบ ฉะนั้นจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี
2. ต้องการเนื้อที่ในการตากแห้งมาก คือถึงราวร้อยละ 5 ของเนื้อที่เพาะปลูกพืช	2. ไม่เปลืองเนื้อที่มาก เพราะสามารถซ้อนได้หลายชั้น
3. ลำบากในการควบคุมความสะอาดและปลอดภัย	3. ไม่ค่อยมีปัญหาเรื่องความสกปรกหรือเชื้อโรคต่าง ๆ เพราะอยู่ในที่ปกปิด
4. ต้องใช้เวลาในการดำเนินงานยาว เพราะต้องอาศัยแสงแดดเฉพาะเวลากลางวัน	4. สามารถดำเนินงานได้ตลอด 24 ชม. จึงสามารถย่นระยะเวลาในการดำเนินงานลงได้มาก
5. อาจมีการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการตากแห้ง	5. ไม่มีการเสื่อมคุณภาพระหว่างการอบแห้ง เพราะกรรมวิธีอบแห้งรวดเร็วและมีการควบคุมอุณหภูมิ
6. วิตามินหลายอย่างเสื่อมไปมาก เช่น วิตามินซี และ เอ เพราะถูกทั้งอากาศและแสงแดด	6. รักษาวิตามินไว้ได้มากกว่าการตากแห้ง เพราะ สัมผัสอากาศแต่เพียงเล็กน้อยและไม่ถูกแสงแดด
7. เสียอาหารดีกว่าการอบแห้ง	7. เสียน้อยกว่าการตากแห้ง
8. ไม่ต้องการเครื่องมือมาก	8. ต้องการเครื่องมือพิเศษ
9. เสียค่าใช้จ่ายน้อย	9. สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ทั้งค่าอุปกรณ์และเชื้อเพลิง

ที่มา : ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาลิก : 2532 (16)

2.6 ประเภทของเครื่องอบแห้ง

เนื่องจากความแตกต่างที่มีอยู่มากมายในรูปทรง และคุณสมบัติอบแห้งของวัสดุจึงจำเป็นต้องมีเครื่องอบแห้งหลาย ๆ แบบ เพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุนั้น ๆ วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล: 2525 (13) ได้ทำการรวบรวมและสรุปประเภทของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรมโดยสามารถจัดแบ่งได้ 3 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้

2.6.1 เครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน

ลักษณะของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ โครงสร้างจะมีการหุ้มฉนวนกันความร้อน แหล่งกำเนิดความร้อนมักจะเป็นห้องเผาไหม้ หรือคอยล์ทำความร้อน แล้วลมร้อนจะถูกดูดหรือเป่าเข้าสู่ห้องหรือตู้อบ ความสามารถของเครื่องชนิดนี้ขึ้นอยู่กับ จำนวนวัสดุ ลักษณะธรรมชาติของวัสดุที่จะอบแห้ง และสภาวะอากาศภายนอก รูปแบบของเครื่องอบแห้งแบบพาความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบถาด (The Tray-Dryer) เครื่องอบแห้งแบบสายพาน (Belt Dryer) เครื่องอบแห้งแบบหมุน (Rotary Dryer) และเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic Dryer) เป็นต้น

2.6.2 เครื่องอบแห้งแบบนำความร้อน (Conductive Dryers)

ลักษณะของเครื่องจะคล้ายกับเครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน ต่างกันที่เครื่องอบแห้งแบบนำความร้อน จะมีตัวกลางสำหรับถ่ายเทความร้อน เช่น แท่งเหล็ก ความร้อนที่ได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ เนื่องจากวัสดุที่ต้องการอบแห้งจะสัมผัสกับตัวกลางโดยตรง รูปแบบของเครื่องอบแห้งแบบนำความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ เตอบสูญญากาศ, เครื่องอบแห้งแบบทรงกระบอกร้อน (Hot-Cylinderdryers), เครื่องอบแห้งแบบหมุนที่ให้ความร้อนทางอ้อม (Indirectly Heated Rotary Dryer) เป็นต้น

2.6.3 เครื่องอบแห้งแบบแผ่รังสี (Radiative dryers)

ส่วนใหญ่มักจะใช้พลังงานความร้อนจากธรรมชาติ ความร้อนจะเคลื่อนตัวผ่านตัวกลาง เช่น พลาสติก หรือ กระจก และจะเคลื่อนตัวไปตามอากาศที่มีอยู่ภายใน โดยไม่มีการใช้พาหะใด ๆ เป็นตัวช่วยพา เครื่องอบแห้งที่พบเห็นในปัจจุบันในระบบอุตสาหกรรม ได้แก่ เตอบแสงอาทิตย์ เป็นต้น

ตารางที่ 2-3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบ

คุณสมบัติ	เครื่องอบแห้ง		
	ชนิดพาความร้อน	ชนิดนำความร้อน	ชนิดแผ่รังสี
1. ระยะเวลาในการอบ	สั้น	สั้น	นาน
2. อุณหภูมิในการอบแห้ง	สม่ำเสมอ	สม่ำเสมอ	ไม่สม่ำเสมอ
3. ราคาเครื่องอบแห้ง	ปานกลาง	แพง	ถูก
4. ความสามารถในการลดความชื้น	สูง	สูง	ปานกลาง
5. การติดตั้ง	ใช้พื้นที่น้อย	ใช้พื้นที่น้อย	ใช้พื้นที่มาก
6. คุณภาพของผลิตภัณฑ์	ดี	ดี	ปานกลาง
7. การจัดการบำรุงรักษา	ง่าย	ง่าย	ยาก

ที่มา : วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล : 2525 (13)

จากคุณสมบัติของเครื่องอบแห้งประเภทต่างๆ ถ้าจะพิจารณาสร้างเครื่องอบแห้งสำหรับจะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ปัจจัยแรกที่จะต้องพิจารณาร่วมกัน ก็คือ ราคาของเครื่อง และความสามารถในการลดความชื้นของเครื่องอบแห้ง ดังนั้น เมื่อพิจารณาปัจจัยทางด้านราคาแล้ว เครื่องอบแห้งที่น่าจะเลือกใช้ ควรจะเป็นเครื่องอบแห้งชนิดพาความร้อน หรือเครื่องอบแห้งชนิดแผ่รังสี แต่เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการลดความชื้น และปัจจัยอื่น ๆ ประกอบ ระหว่างเครื่องอบแห้งทั้ง 2 ชนิด และพบว่า เครื่องอบแห้งชนิดพาความร้อน มีความเหมาะสมมากกว่าเครื่องอบแห้งชนิดแผ่รังสี ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้เครื่องอบแห้งประเภทพาความร้อน เป็นรูปแบบที่จะนำมาใช้ในการออกแบบวิจัย

2.7 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับผักตบชวา

2.7.1 ความรู้เกี่ยวกับผักตบชวา

ผักตบชวามีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Eichhornia Crassipes* (Mart.) Solms. ชื่ออื่น ๆ คือผักตบชวา สวะผักปอด ผักตบ ผักโรด ชะวา ผักอีโงย ผักโป่ง ผักบัวลอย ผักป่อง ผักข่ง เป็นพืชที่เจริญเติบโตลอยอยู่ผิวน้ำ เจริญพันธุ์ได้ด้วยการแตกหน่อจากลำต้น ประกอบด้วยลำต้นที่มีหัวราก (rhizomatous stem) ใบเป็นก่อกิ่งชั้น (rosette of leaves) และรากที่ห้อยย้อยลงในน้ำ มีดอกสีม่วงที่สวยงาม ดังแสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 2-2



A portion of the plant showing sympodial branching

B-Leaf blade, F-Float, I-Isthmus, L-Ligule, R-Rhizome, rh-Root hairs, rc-Root cap, S-Stolon

รูปที่ 2-2 ส่วนประกอบลำต้นผักตบชวา

หัวราก (rhizomes) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ได้ถึง 5-6 cm และยาวได้ถึง 30 cm ลำต้น (stolon) มีสีม่วงแดงมีขนาดแตกต่างกันออกไปซึ่งอาจจะยาวได้ถึง 50 cm ใบสีเขียวเข้ม ทุ่นลอย (float) มีลักษณะพุ่มและเบา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ถึง 8 cm แต่ในบางสภาวะแวดล้อม เช่นที่มีการเจริญเติบโตอย่างหนาแน่น ผักตบชวาอาจจะไม่สร้างทุ่นลอย แต่จะมีก้านใบที่ยาวกว่าปกติ รากใหญ่เป็นเส้นยาวไม่แตกแขนง (unbranched) และมีรากฝอยแตกออกมา ซึ่งอาจจะยาวได้ถึง 70 cm ระบบรากอาจจะมีน้ำหนักถึงร้อยละ 50 ของน้ำหนักทั้งหมดถ้าลอยอยู่ในน้ำ แต่จะสั้นมากหากเจริญเติบโตอยู่บนโคลน ผักตบชวาที่ขึ้นอยู่ในบ่อที่ใช้บำบัดน้ำเสียจะมีความสูงถึง 75-100 cm แต่มีรากน้อย (สั้นกว่า 20 cm) เนื่องจากมีอาหารอุดมสมบูรณ์ ในทำนองกลับกันหากอยู่ในน้ำซึ่งมีอาหารน้อยพบว่าลำต้นจะสั้นกว่า 20 cm และจะมีรากยาวกว่า 60 cm ดอกเป็นสีลาเวนเดอร์ (lavender) หรือสีขาวที่สวยงาม ในแต่ละช่อจะมีดอกประมาณ 4-26 ดอก (17)

ต้นผักตบชวาทั้งหมด 100 kg หลังจากตากทิ้งให้แห้งแล้วจะมีน้ำหนักเหลือประมาณ 5 kg คิดเป็นน้ำหนักของกากแห้งเฉลี่ยได้ร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด ในพื้นที่ 1 เฮกตาร์ (10,000 m²) จะมีผักตบชวาเจริญเติบโตได้ตั้งแต่ 140-1,200 ต้น หรือคิดเป็นน้ำหนักของกากแห้งได้ประมาณ 7-60 ตัน และมีอัตราการเจริญเติบโตประมาณ 35-875 kg น้ำหนักแห้ง/เฮกตาร์-วัน โดยขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ Wolverton, B.C. (17) อ้างถึงในสุรพล สายพานิช

จากการวิจัยพบว่ามีแบคทีเรียที่จับไนโตรเจน (nitrogen fixing bacteria) อาศัยอยู่ที่รากและใบของผักตบชวา เช่น *Azotobacter chroococcum* และ *Azospirillum lipoferum* แต่อย่างไรก็ตามผักตบชวาสามารถนำธาตุไนโตรเจนในรูปรีดิวซ์ (reduced form) เช่น แอมโมเนียมที่มีอยู่ในน้ำมาใช้ได้โดยตรงอยู่แล้ว อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 27-30 °C และจะหยุดการเจริญเติบโตเมื่อมีอุณหภูมิต่ำกว่า 10 °C หรือสูงกว่า 40 °C อาหารเสริม (nutrients) ที่จำเป็น ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโปแตสเซียม (K) เช่นเดียวกับพืชทั่ว ๆ ไป โดยพบว่ามีความเข้มข้นของอาหารเสริมที่ผักตบชวาเจริญเติบโตได้ดีที่สุด ได้แก่ ไนโตรเจน 25-100 mg/l และฟอสฟอรัส 20 mg/l สำหรับค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่ำที่สุด ซึ่งจะจำกัดการเจริญเติบโตเท่ากับ 0.1 mg/l ผักตบชวาสามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำที่มีค่าพีเอชระหว่าง 4 ถึง 8 Wolverton, B.C. and McDonald, R.C. (17) อ้างถึงในสุรพล สายพานิช

ผักตบชวาได้เจริญเติบโตและแพร่พันธุ์ไปมากกว่า 50 ประเทศในเขตที่มีอากาศร้อนทั่วโลก โดยมีอยู่ตามแหล่งน้ำจืดต่าง ๆ เช่น สระ บ่อ คลอง อ่างเก็บน้ำ แม่น้ำ ตลอดจนในระบบชลประทานต่าง ๆ ทั้ง ๆ ที่พืชชนิดนี้เพิ่งจะเป็นที่รู้จักและแพร่กระจายจากจุดกำเนิดยังไม่ถึงหนึ่งร้อยปีจากการนำไปปลูกยังที่ต่าง ๆ ของมนุษย์ จนกระทั่งในปัจจุบันนับได้ว่าเป็นที่ก่อให้เกิดปัญหาหนักที่สุดชนิดหนึ่ง

ผักตบชวา เป็นพืชพื้นเมืองของทวีปอเมริกาใต้ ปัจจุบันที่รู้จักอย่างแพร่หลายทั่วโลก และจัดว่าเป็นพืชน้ำที่ก่อให้เกิดปัญหาหนักที่สุด ในปี 2424 ชาวดัตช์ที่ปกครองประเทศอินโดนีเซียได้นำเข้ามาปลูกในประเทศอินโดนีเซียเพื่อเป็นไม้ประดับ เนื่องจากมีดอกสวยงามได้ปลูกเลี้ยงไว้อย่างดีในสวนพฤกษชาติที่เมืองโปกอร์ ต่อจากนั้นไม่นานก็แพร่กระจายไปตามลำน้ำต่าง ๆ อย่างรวดเร็ว ในปี 2444 ได้มีการนำผักตบชวาจากอินโดนีเซียเข้ามาปลูกในวังสระประทุม ภายหลังจากนั้นทั่ววังสระประทุม ผักตบชวาจึงหลุดลอยตามน้ำไปสู่แม่น้ำลำคลองและแพร่กระจายไปทั่วประเทศอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งปี 2456 จึงได้มีพระราชบัญญัติกำจัดผักตบชวาออกมา และพระราชบัญญัตินี้ยังมีผลบังคับใช้ตราจนทุกวันนี้ (17)

2.7.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ผักตบชวาเป็นพืชน้ำประเทไบเลี้ยงเดี่ยว ลอยน้ำได้โดยไม่ต้องมีที่ยึดเกาะ สามารถแพร่พันธุ์ได้รวดเร็วมาก จัดเป็นวัชพืชน้ำที่สร้างความเสียหายให้กับการชลประทาน การประมง การเกษตร การสาธารณสุข และด้านเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก

ใบเป็นใบเดี่ยว แผ่นใบคล้ายรูปหัวใจ เป็นมันหนา ก้านใบพองออกตรงช่องกลาง ภายในมีลักษณะเป็นรูพรุน เนื้อฟ้าม ช่วยพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้

ดอก มีลักษณะเป็นช่อ ดอกย่อยแต่ละดอกมีสีฟ้าอมม่วงแกมเหลือง ไม่มีก้าน ช่อดอกมีกลีบ 6 กลีบ ตอนที่ดอกยังไม่บานจะมีใบธงหุ้มอยู่ เมื่อดอกออกพ้นใบธง ดอกจะบานทันที ดอกมีลักษณะบางเหยียดวางกลีบกลาง มีแฉกสีเหลืองขอบสีม่วงเข้ม ทำให้ดอกมีสีสรรสวยงาม โดยทั่วไปแล้วสภาพแวดล้อม เช่น ประเทศไทยไม่ค่อยมีเมล็ด ทั้งนี้ เพราะไม่มีการผสมเกสรแต่บางครั้งก็มีการผสมและติดเมล็ด ได้เมล็ดมีขนาดเล็ก สีน้ำตาลเข้ม

2.7.3 การแพร่กระจาย

ผักตบชวา เจริญได้ง่าย และแพร่พันธุ์ได้ง่าย เพราะผักตบชวาค้นอยู่แต่ในแม่น้ำ ลำคลอง และลอยอยู่บนพื้นน้ำได้อย่างอิสระ และปรับตัวเองได้ตามสภาวะ เช่น ลมแรงก็จะไม่จมลงไปใต้น้ำ เพราะมีรากถ่วงยาวทรงตัวอยู่ได้ เมื่อมีลมแรงก็จะไปตามลมเพราะมีใบใหญ่จะไม่ฉีกขาด เพราะลำต้นมีกระเปาะพองอยู่ในน้ำ ผักตบชวาไม่กลัวว่าจะไปติดหรือเกาะกับสิ่งใด แม้ไปติดอยู่ก็มีโอกาสได้ เจริญเต็มที่ก้านจะยาว และจะมีรากที่แข็งแรงนั้น และหยั่งลงไปใต้น้ำลึกเป็นที่อยู่ของปลาได้อีกด้วย ปลาจะช่วยแพร่พันธุ์ผักตบชวา ขณะที่เข้าไปอาศัยทำให้รากสั้น สะเทือน และสะท้อนขึ้นไปถึงส่วนลำต้น ทำให้เมล็ดที่กำลังแก่ร่วงลงน้ำ เป็นการแพร่พันธุ์ไปในตัว อันที่จริงแล้วการสืบพันธุ์ของผักตบชวานั้น ปรากฏอยู่ติดกันกับต้นไม้อื่น หรือจะเรียกว่า ผักตบชวามีระบบการกระจายพันธุ์ได้อย่างสมบูรณ์ที่สุด กล่าวคือ ผักตบชวาสืบพันธุ์โดยทางดอก แพร่พันธุ์โดยทางเมล็ด และสืบพันธุ์หรือกระจายพันธุ์โดยทางลำต้นหรือทางราก ดังนี้

2.7.3.1 การสืบพันธุ์โดยทางดอก

เมื่อผักตบชวามีอายุสมควรในการออกดอกแล้ว จะให้ดอกสวยงามมาก เป็นสีฟ้าอ่อนปนม่วง และเหลืองเป็นจุด ช่อหนึ่งมีประมาณ 3-7 ดอก ทำให้หมู่แมลงชอบตอมมาก เหตุนี้เองเป็นบ่อเกิดแห่งการสืบพันธุ์ทางดอก ในทางชีวพืชก็จะทำให้เกิดเมล็ดขึ้นภายหลัง

2.7.3.2 การแพร่พันธุ์โดยทางเมล็ด

ขณะที่ฝักตบชวาล่องลอยอยู่ในแม่น้ำลำคลองไหลไปมาอยู่นั้น เมล็ดจะร่วงหล่นลงน้ำเป็นครั้งคราว การที่เมล็ดร่วงลงในแม่น้ำลำคลอง บางแห่งก็ต้นเงิน แต่แทนที่เมล็ดจะงอกกลับยังตั้งอยู่เฉย ๆ ระยะเวลาหนึ่ง ถ้าเหตุการณ์อำนวย คือแม่น้ำลำคลองไหลสะดวก เมล็ดฝักตบชวาเหล่านี้ก็จะเจริญงอกงามขึ้นทันใด ส่วนแม่น้ำลำคลองต้นเงินและแห้งผากเมล็ดฝักตบชวาก็ฝังตัวอยู่เช่นนั้น และมีอายุอยู่นานประมาณ 15 ปี แต่ถ้ามีโอกาสขึ้นมาเมื่อใด เมล็ดเหล่านี้ก็จะงอกงามทันทีเป็นฝักตบชวาไหลไปตามน้ำดังที่เห็นกันเป็นประจำ ในขณะที่เดียวกันฝักตบชวาอาจกระจายพันธุ์ในทางอื่นได้อีกด้วย

2.7.3.3 การกระจายพันธุ์ของฝักตบชวา

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า ฝักตบชวาล่องลอยไปตามท้องน้ำทั่วทุกหนทุกแห่ง และเห็นว่าเพิ่มจำนวนมากขึ้น ๆ ในขณะที่ล่องลอยอยู่นั้น ฝักตบชวาไม่หยุดการเจริญงอกงาม แม้กระทั่งลอยอยู่ยังสามารถแพร่พันธุ์ได้อีกด้วย ดังเช่นเมื่อมีดอก มีเมล็ดแล้ว โดยทางธรรมชาติ ฝักตบชวาจะมีไหลทอดเป็นก้านยาวลงน้ำ และเกิดขึ้นอีกกอหนึ่งหรือหลาย ๆ กอ จึงดูเพิ่มจำนวนทวีขึ้นตามลำดับ อันที่จริงการสัญจรไปมาทางน้ำถูกรบกวนมากจากฝักตบชวา จนกระทั่งมีการรณรงค์ในการกำจัดฝักตบชวากันขึ้นบ่อยๆ แต่ก็ต้องอ่อนข้อกันไปในที่สุด

ถึงแม้ว่าจะทำลายให้หมดนั้นเป็นไปได้ยาก แต่การที่ปล่อยไว้ไม่กำจัดเสียเลยก็จะขึ้นกรุงรังไปทุกแห่ง เป็นอันตรายต่อการสัญจรไปมาทางน้ำ และเป็นอุปสรรคในการประมงอีกด้วย

ฝักตบชวาเป็นพืชน้ำ สามารถอยู่ในน้ำได้ทุกสภาพ ทั้งในน้ำสกปรกและสะอาด บางแห่งที่มีฝักตบชวาขึ้นอาศัยอยู่นั้น น้ำสะอาดได้ด้วยเหตุนี้ ฝักตบชวาจึงมีกลิ่นในลำต้นยากแก่การกำจัด ต้องทิ้งไว้เป็นเวลานานนับเป็นเดือนกลิ่นจะจางลง

2.7.4 ประโยชน์ของผักตบชวา

ประโยชน์ของผักตบชวา สรุปได้ดังนี้

2.7.4.1 ใช้ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดมลสาร (pollutants) ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้ น้ำนั้นมีคุณภาพดีขึ้น จนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีก

2.7.4.2 ใช้เป็นวัตถุดิบในการหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (bio-gas)

2.7.4.3 เป็นปุ๋ยสำหรับพืช

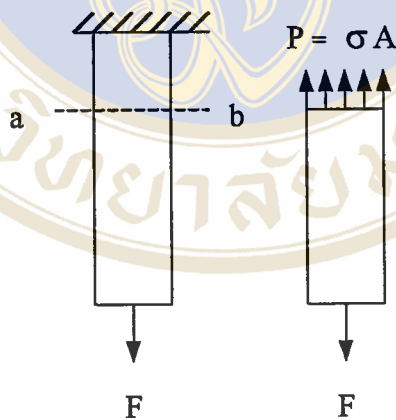
2.7.4.4 เป็นอาหาร (food) อาหารสัตว์ (feed) อาหารเสริม (nutrients)

2.7.4.5 เป็นประโยชน์ด้านอื่นๆ เช่น เพื่อนำดอกมาใช้ ใช้เป็นวัสดุในการปลูกเห็ด ใช้แทนเส้นใย ผลิตภัณฑ์ออกซาลิก เอริทโรลกอฮอล์ กำจัดสารพิษในแหล่งน้ำที่นำมาผลิตน้ำประปา ฯลฯ

2.7.4.6 นำมาประดิษฐ์ ถักสานเป็นผลิตภัณฑ์ (17)

2.8 คุณสมบัติทางกลและการทดสอบวัสดุ

2.8.1 ความเค้น (Stress)



รูปที่ 2-3 แสดงการเกิดความเค้น

จากรูปที่ 2-3 เมื่อพิจารณาแท่งวัตถุอันหนึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A อยู่ภายใต้แรงดึง F ถ้าแรง F มีค่าไม่มากนัก วัตถุจะยืดออกเล็กน้อยแล้วไม่ยืดต่อไปอีก ถ้าเราตัด section a-b วัตถุจะอยู่ในสภาวะสมดุลย์ได้ จะต้องมีแรงต้านแรง F เอาไว้ แรงสมดุลย์ P นี้กระทำภายในเนื้อวัสดุ เรียกว่าแรงภายใน และจะกระจายไปตลอดพื้นที่หน้าตัด แรงที่กระทำอนุภาคเล็ก ๆ ในเนื้อวัสดุ หรือความเข้มข้นของแรง นั่นคือ แรงต่อพื้นที่หน้าตัด จึงมีความสำคัญมาก

$$P = \sigma A = F$$

$$\sigma = F/A \quad \text{เรียกว่า ความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นในวัตถุ}$$

ความเค้นที่เกิดขึ้นมี 3 ลักษณะ คือ ความเค้นดึง (Tensile stress) ความเค้นอัด (Compressive stress) และความเค้นเฉือน (Shear stress) (18) ซึ่งการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ความเค้นดึงมาใช้ในการทดสอบ

2.8.2 ความเค้นดึง (Tensile stress)

ความเค้นดึงเกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงดึง ดังรูปที่ 2-4 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-4



รูปที่ 2-4 แสดงความเค้นดึง

$$\sigma_t = F/A \quad (2-4)$$

เมื่อ

$$\sigma_t = \text{ความเค้นดึง, N/mm}^2$$

$$F = \text{แรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุ, N}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ, mm}^2$$

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการใช้เทคโนโลยีการอบแห้ง

วีระวุฒิ ลิ่มตระกูล (19) จากการทดสอบเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบตู้โดยอากาศไหลเวียนตามธรรมชาติช่วงเวลา 8.00-16.00 น. ตัวตู้ทำด้วยไม้อัด มีพื้นที่รับแสงอาทิตย์ 2.6 m^2 พบว่าการอบแห้งแบบหมุนเวียนใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ยงวดละ 7 วัน เป็นเวลา 57 hr จะสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนทั้งสิ้น $192 \text{ MJ/kg water evaporated}$ และมีประสิทธิภาพกฏข้อที่หนึ่งของระบบอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์แบบตู้โดยอากาศไหลเวียนตามธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ 11.1 % เครื่องอบแห้งแบบตู้โดยอากาศไหลเวียนตามธรรมชาติและใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง ตัวตู้ทำด้วยคอนกรีต ด้านบนของตู้และประตูด้านหน้าทำด้วยสังกะสีบุเคลือบ พบว่าการอบแห้งแบบหมุนเวียนใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ย งวดละ 3, 4 และ 5 วัน เป็นเวลา 46, 45 และ 45 hr จะสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนทั้งสิ้น 10.2, 8.6 และ 8.4 MJ/kg water evaporated และมีประสิทธิภาพกฏข้อที่หนึ่งของระบบอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์แบบตู้โดยอากาศไหลเวียนตามธรรมชาติเท่ากับ 23.6, 28 และ 30 % ตามลำดับ เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบตู้โดยบังคับการไหลของอากาศช่วงเวลา 9.00-16.00 น. ตัวตู้ทำด้วยสังกะสีบุเคลือบ มีพื้นที่รับแสงอาทิตย์ 23.1 m^2 พบว่า การอบแห้งแบบหมุนเวียน ใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ยงวดละ 5 วัน เป็นเวลา 44 hr จะสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนทั้งสิ้น $14.9 \text{ MJ/kg water evaporated}$ และมีประสิทธิภาพกฏข้อที่หนึ่งของระบบการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์แบบตู้โดยบังคับการไหลของอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 15.8 %

ทักษิณา ลอยจिरากุล (20) ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ และความเร็วลม ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของ พุทรา ละมุด องุ่น และมะยม โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งในช่วง $55-72 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 0.6 และ 1.2 m/s พบว่า อัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์เกษตรที่ศึกษาทั้งหมด อยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลง อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์เกษตร ความเร็วลมจะมีอิทธิพลเล็กน้อยต่ออัตราการอบแห้งของพุทรา แต่จะมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งของละมุดและองุ่น

ณัฐวุฒิ คุชฎี (21) ได้พัฒนาระบบอบแห้งผลไม้โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานเสริมโดยการใช้กล้วยเป็นวัสดุในการทดลอง พบว่า คุณภาพของกล้วยอบแห้งจะดีที่สุดที่อุณหภูมิ $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อแนวทางในการอบแห้งที่เหมาะสม โดยการแปรค่าอัตราการไหลเฉพาะของอากาศ อัตราส่วนอากาศเวียนกลับมาและอุณหภูมิ พบว่า ควรอบแห้งที่อุณหภูมิ $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้อัตราการไหลเฉพาะของอากาศประมาณ 10.5 กิโลกรัมอากาศแห้งต่อชั่วโมง-กิโลกรัมกล้วยอบแห้ง อัตราส่วนอากาศย้อนกลับ 90-95 % ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งสิ้น และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำ

สุขฤดี สุขใจ (22) ได้ศึกษาการอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยแสงอาทิตย์ เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งเมื่อใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์และ LPG รวมทั้งพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยแสงอาทิตย์ และประเมินความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ จากการทดสอบรังสีรวมแสงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ย 706.3 วัตต์ต่อตารางเมตร (337-840 วัตต์ต่อตารางเมตร) อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีค่า 0.27 kg/s อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าเฉลี่ย 37.6 °C (28-37 °C) ประสิทธิภาพของตัวรับรังสีมีค่าเฉลี่ย 24.7 % ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ได้จากทางทฤษฎี เมื่อทดสอบ พบว่า ประสิทธิภาพกฎข้อที่หนึ่งของระบบอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์และ LPG แปรตามความชื้นเฉลี่ยของกล้วย และอัตราการไหลเฉพาะของอากาศในลักษณะเชิงเส้น โดยมีวิธีการอบ 2 วิธี คือ อบแบบหมุนเวียนใช้เวลาเฉลี่ยแต่ละงวด 6 วัน วันละ 6 hr และอบแบบต่อเนื่องใช้เวลาเฉลี่ยแต่ละงวด 66 hr การอบแห้งแบบต่อเนื่องจะสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าแบบหมุนเวียน ซึ่งแบบต่อเนื่องจะคุ้มทุนภายใน 2 ปี แต่แบบหมุนเวียนจะคุ้มทุนภายในเวลา 3 ปี

สมยศ จรรยาวิลาส และคณะ (23) ทำการทดลองสร้างตู้อบแห้งแบบลดความชื้นโดยวิธีกลในตู้อบ ประกอบด้วยชั้นวางวัสดุ 6 ชั้น ประตูเปิดปิด มีคอยล์เย็น และคอยล์ร้อน ระบายอากาศร้อนด้วยพัดลมภายนอกมีคอมเพรสเซอร์ ทำการทดลองอบกล้วยโดยใช้กล้วยน้ำว้าที่สุกพอดีนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่มีความเข้มข้น 0.1 % เป็นเวลา 30 นาทีจากนั้นนำไปอบในตู้อบแบบลดความชื้น สภาวะที่อบใช้อุณหภูมิ 2 ช่วง ช่วงแรกอุณหภูมิที่ใช้ออบ 40-53 °C ผลิตรสชาติได้ค่อนข้างแข็งและหวานน้อย ช่วงสองอุณหภูมิที่ใช้ออบ 47-49 °C พบว่า อัตราการอบแห้งมีทั้งสองช่วง คือ อัตราการอบแห้งคงที่ และอัตราการอบแห้งน้อยลง และความชื้นสุดท้ายที่อบได้ คือ ประมาณ 20 % db ผลิตรสชาติที่ได้จะมีเนื้อเหนียว สีดี และรสหวาน

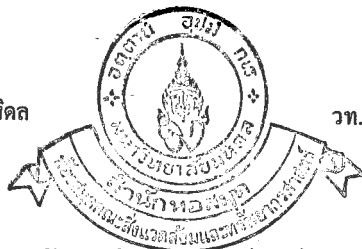
อุษาวดี ผ่องคำเจียก (24) จากการศึกษาทั้งประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อน รวมทั้งการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์จะเห็นว่าระบบทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อน จะมีประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนสูงกว่าระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ เนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อนเท่ากับ 3.8 สำหรับการประหยัดเชื้อเพลิงเมื่อนำระบบทำน้ำร้อนทั้งสองมาเปรียบเทียบกับระบบทำน้ำร้อนด้วยไอน้ำจากหม้อน้ำที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ระบบทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนจะประหยัดเงินค่าเชื้อเพลิงสูงกว่า และราคาพลังงานก็ถูกกว่า

Rossi et al. (25) ศึกษาการอบแห้งผักโดยใช้ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ อบแห้งผักแบบถาดอยู่กับที่ ใช้สารทำความเย็น R-22 ขนาดถาดอลูมิเนียมกว้าง 0.2 m ยาว 0.2 m สูง 0.08 m ตู้อบแห้งบรรจุผักได้จำนวน 1.3 kg อุณหภูมิอากาศลมร้อนในห้องอบแห้ง 55 °C ความเร็วลมร้อน 1.25 m/s การอบแห้งเป็นระบบเปิดคือ อากาศแวดล้อมผ่านเข้า เครื่องทำระเหย ผ่านเครื่อง

ควบแน่น และผ่านเข้าห้องอบแห้งแล้วปล่อยทิ้งบรรยากาศ โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้ 1) ปรับอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมเข้าที่ เครื่องทำระเหย 2) ปรับความชื้นสัมพัทธ์ที่เข้าเครื่องทำระเหย 3) ปรับอุณหภูมิที่เครื่องทำระเหย 4) ปรับอัตราการไหลของอากาศที่เข้าเครื่องทำระเหย ผลการทดลองพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อค่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนคือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าเครื่องทำระเหย อุณหภูมิของเครื่องทำระเหย นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานระหว่างเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน และเครื่องอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อน พบว่า เครื่องอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนสามารถประหยัดพลังงานได้ 30-40 % อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งก็มีคุณภาพดี และเวลาที่ใช้ในการ อบแห้งก็สั้น

ฐานิตย์ เมธิยานนท์ (26) ศึกษาการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนในระดับอุตสาหกรรม บรรจุน้ำหนักได้ 4 คัน รวมน้ำหนักผลิตภัณฑ์ 600-700 kg อบแห้งโดยความชื้นเริ่มต้น 86 % db อบจนเหลือความชื้นสุดท้าย 14 % db อุณหภูมิเฉลี่ย 55 °C ใช้เวลาอบแห้ง 32 hr พบว่า มีอัตราการอบแห้ง 0.732 กิโลกรัม น้ำระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 4.92 เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำระเหย ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP_{hp}) เท่ากับ 3.4

Chou และคณะ (27) ศึกษาการอบแห้งผลไม้โดยใช้ปั๊มความร้อน ซึ่งสามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มากกว่าเครื่องอบแห้งโดยทั่วไปที่ใช้ก๊าซ หรือน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ระบบประกอบด้วยเครื่องปรับอากาศชนิดหน้าต่าง ขนาดทำความเย็น 1 ตัน (3.517 kW) พร้อมด้วยขดลวดไฟฟ้า ขนาด 15 kW เป็นตัวเสริมเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ การทดลองจะทำในระบบเปิด (fully open system) และระบบเปิดบางส่วน (partially open system) โดยระบบเปิด อากาศร้อนขึ้นบางส่วนที่ออกจากเครื่องอบแห้ง จะถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ ส่วนที่เหลือจะผ่านไปยังเครื่องทำระเหย เพื่อทำการปรับคืนความร้อน (heat recovery) ทั้งในส่วน of ความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝงก่อนจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ ในขณะที่อากาศแวดล้อมภายนอกจะถูกนำเข้ามาทดแทน โดยผ่านเครื่องควบแน่น เพื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิก่อนส่งเข้าห้องอบแห้งต่อไป ส่วนระบบเปิดบางส่วน อากาศร้อนขึ้นหลังอบแห้งบางส่วนจะถูกทิ้งสู่บรรยากาศ ส่วนที่เหลือจะถูกเวียนกลับมาใช้ใหม่ โดยจะถูกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหยก่อนจะผสมกับอากาศแวดล้อมภายนอก แล้วจึงผ่านไปยังเครื่องควบแน่นเพื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไป เงื่อนไขการทดลองเป็นดังนี้ ใช้กล้วยและสับปะรดเป็นวัสดุอบแห้ง โดยกล้วยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 mm หนา 10 mm และสับปะรดจะถูกตัดเป็นชิ้น ๆ หนา 10 mm การอบแห้งทั้งสองระบบจะควบคุมอุณหภูมิอากาศร้อนก่อนอบแห้ง เท่ากับ 61 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 43 % ระยะเวลาในการอบแห้ง 6 hr จากผลการทดลองสรุปได้ว่า 1) อัตราการอบแห้งจะมีค่าสูงในช่วงต้นของการอบแห้ง และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป 2) อัตราการอบแห้งจะสูงขณะที่วัสดุอบแห้งมีค่าความชื้นสูง และจากการวิเคราะห์



ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ยังพบว่าการอบแห้งผลไม้โดยใช้ปั๊มความร้อนในระบบเปิดบางส่วนจะประหยัดกว่าเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

Clements, Jia และ Jolly (28) ศึกษาการอบแห้งแบบต่อเนื่องโดยใช้ปั๊มความร้อนทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วัสดุที่อบแห้งเป็นประเภท ขาง ใช้ R12 เป็นสารทำความเย็น อุณหภูมิอบแห้งสูงสุด 70 °C มอเตอร์เครื่องอัดไอชนิดลูกสูบและมอเตอร์พัดลมเป่าอากาศปรับความเร็วรอบได้ จากผลการศึกษา พบว่า ผลข้อมูลจากการทดลองกับผลการคำนวณทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลใกล้เคียงกันมาก ค่า SMER (Specific moisture extraction) อยู่ระหว่าง 1.5-2.5 กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง กำลังการผลิตขางอบแห้งประมาณ 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อค่าสมรรถนะของระบบอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนคือ 1) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศผ่านเข้าเครื่องทำระเหยยังมีค่าสูง ค่า COP (Coefficient of performance) เพิ่มสูงตามไปด้วย 2) สัดส่วนอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านเข้าเครื่องทำระเหย ที่เหมาะสม คือ 60-70 % ของอัตราการไหลของอากาศรวม 3) อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศสำหรับห้องอบแห้งขนาด กว้าง 1 m ยาว 4.1 m สูง 0.5 m ค่าที่เหมาะสมเท่ากับ 0.63 kg/s และ 4) ความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องอัดไอ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า เทคโนโลยีที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในปัจจุบันมีหลายวิธี ซึ่งผู้วิจัยสนใจศึกษาเทคโนโลยีการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนแบบอัดไอ เนื่องจากเป็นระบบที่ใช้ในปัจจุบัน จึงมีแนวความคิดเพื่อหาแนวทางในการออกแบบการถ่ายเทความร้อนเพื่อการอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน และใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a รวมทั้งการหาประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งคาดหวังว่าจะเป็นประโยชน์ และสามารถนำไปใช้กับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอื่น ๆ ต่อไป



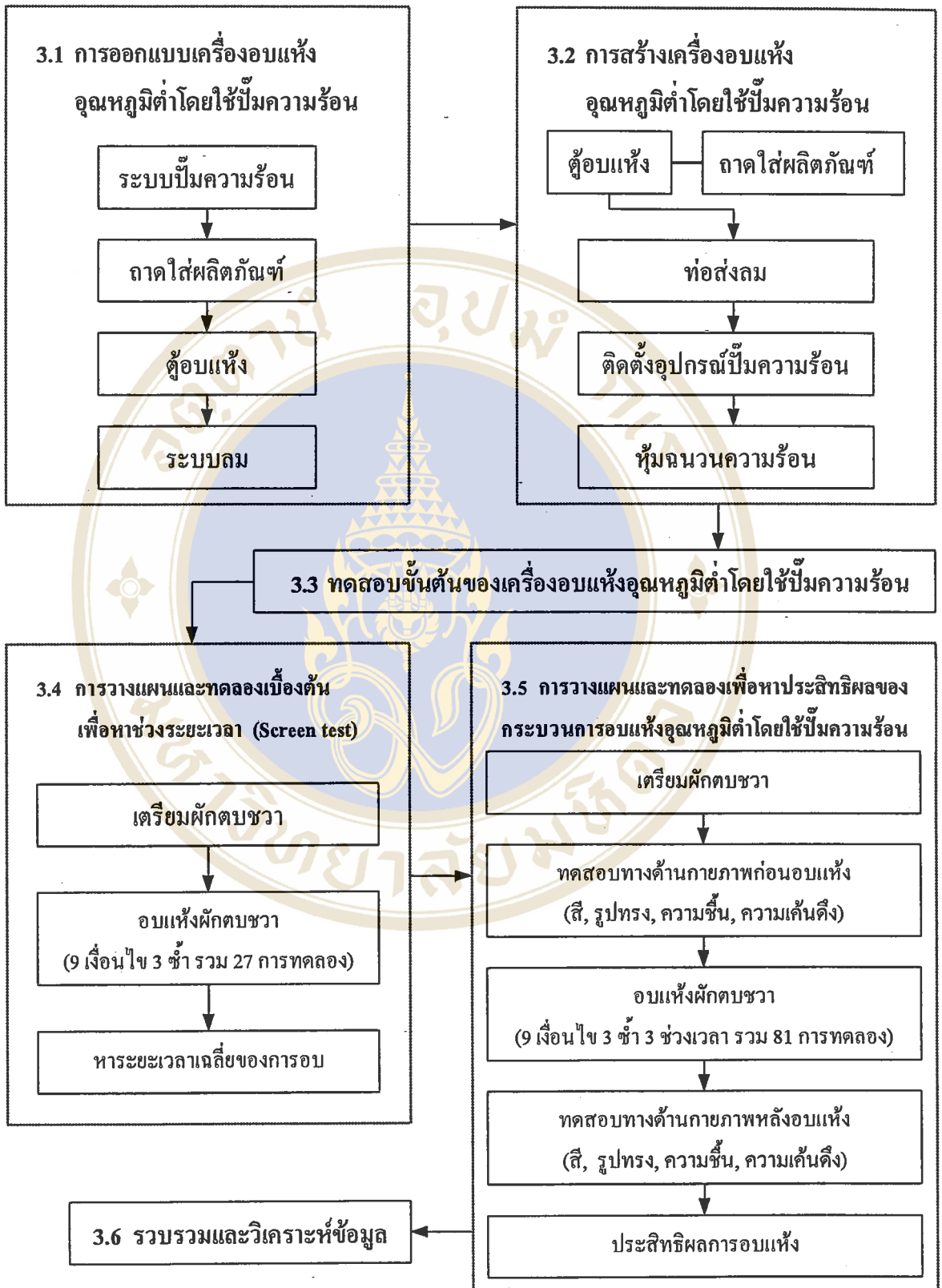
บทที่ 3

วิธีการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการออกแบบเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน สำหรับประยุกต์ใช้กับผลผลิตทางการเกษตร กรณีศึกษาอบแห้งผักตบชวา โดยเป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพก่อนและหลังที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง และศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง ซึ่งมีการวางแผนดำเนินการวิจัย โดยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 5 ขั้นตอน ตามลำดับดังนี้

- 3.1 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน
- 3.2 ขั้นตอนการสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน
- 3.3 ทดสอบขั้นต้นของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน
- 3.4 ขั้นตอนการวางแผนและทดลองเบื้องต้นเพื่อหาช่วงระยะเวลา (Screen test)
- 3.5 ขั้นตอนการวางแผนและทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน
- 3.6 ขั้นตอนการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

ซึ่งมีขั้นตอนวิธีการวิจัย ดังแสดงในแผนภูมิที่ 3-1 สามารถอธิบายได้ดังนี้

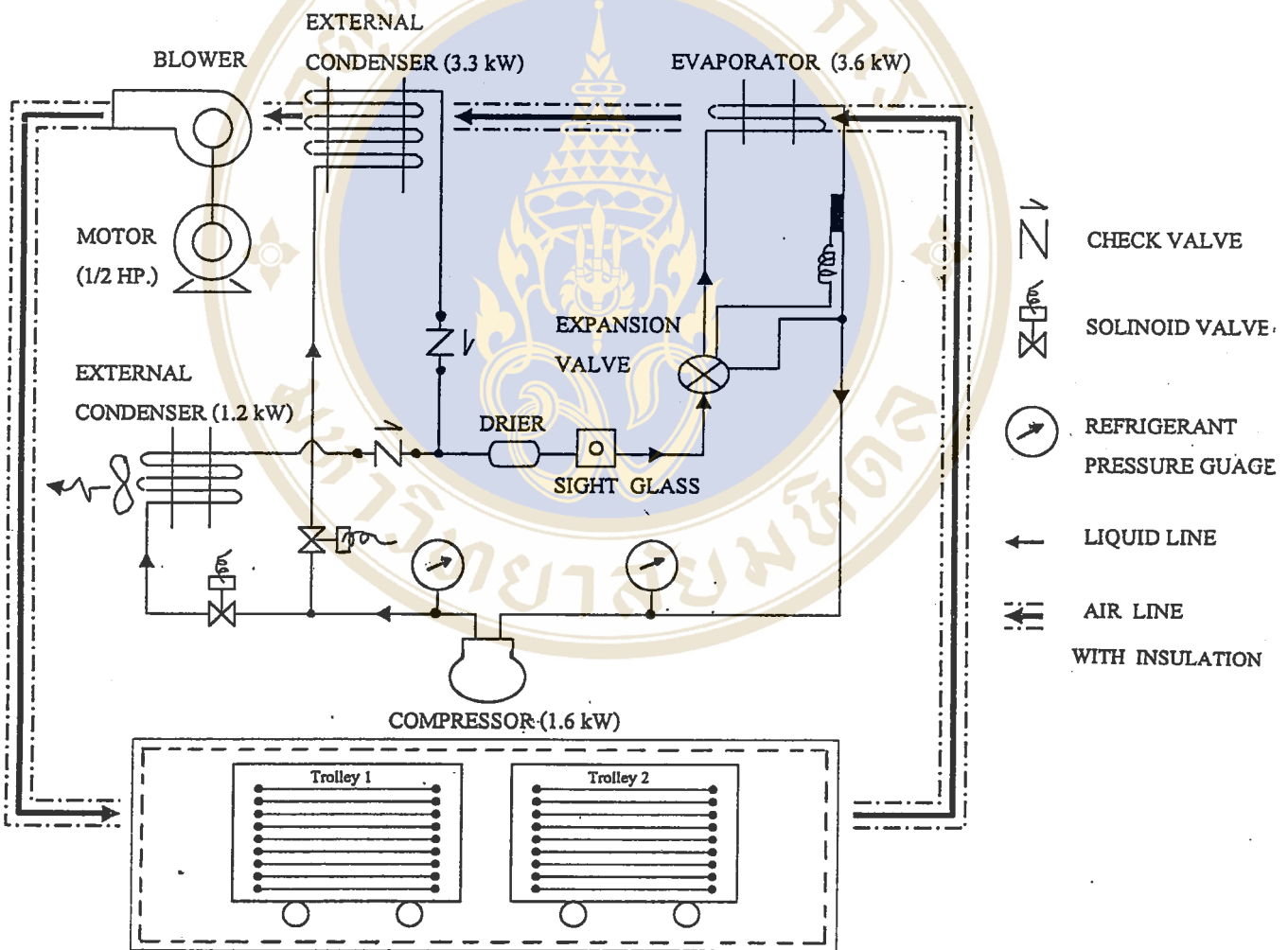


3.1 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน

การออกแบบเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อนแบ่งขั้นตอนออกได้ดังนี้

- 3.1.1 การออกแบบระบบปั๊มความร้อน
- 3.1.2 การออกแบบภาคใส่ผลิตภัณฑ์
- 3.1.3 การออกแบบตู้อบแห้ง
- 3.1.4 การออกแบบระบบลม

รายละเอียดดังแสดงตามแผนภูมิที่ 3-2 ดังนี้



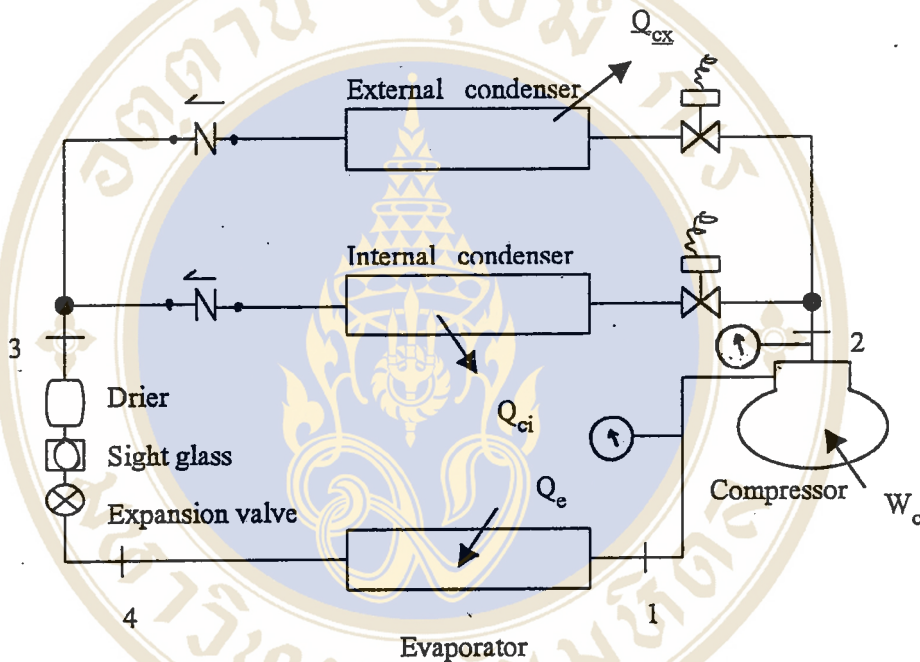
แผนภูมิที่ 3-2 แสดงระบบของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน

3.1.1 การออกแบบระบบปั๊มความร้อน

การออกแบบระบบปั๊มความร้อนมีขั้นตอนการออกแบบ คือ การคำนวณหาค่าอุปกรณ์หลัก และการคัดเลือกอุปกรณ์ มีขั้นตอนดังนี้

3.1.1.1 การคำนวณหาค่าอุปกรณ์หลัก

ในการคำนวณหาขนาดปั๊มความร้อน จะต้องเขียนวงจรสารทำความเย็นของระบบปั๊มความร้อนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เสียก่อน ซึ่งแสดงไว้ในแผนภูมิที่ 3-3



แผนภูมิที่ 3-3 แสดงวงจรสารทำความเย็นของระบบปั๊มความร้อน

จากวงจรสารทำความเย็นของระบบปั๊มความร้อนที่ได้ตั้งแผนภูมิที่ 3-3 ซึ่งเป็นวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ มาเขียนลงในแผนภูมิความดันและเอนทัลปี ดังตารางในภาคผนวก ก โดยกำหนดให้

1) อุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ 60 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิของอากาศสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์และการออกแบบระบบปั๊มความร้อน ไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงมาก ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อเครื่องอัดไอ และถ้าให้อุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นต่ำเกินไปจะทำให้การอบแห้งใช้ระยะเวลานาน

2) อุณหภูมิที่เครื่องทำระเหย 8 °C เป็นอุณหภูมิของอากาศสำหรับทำการกลั่นตัวของมวลน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์

จากตารางความดันและเอนทัลปีดังภาคผนวก ก สามารถอ่านค่าเอนทัลปีที่จุดต่างๆ ได้ดังนี้

- h_1 = เอนทัลปีที่ทางเข้าของเครื่องอัดไอ, (405 kJ / kg)
- h_2 = เอนทัลปีที่ทางออกของเครื่องอัดไอ, (440 kJ / kg)
- h_3 = เอนทัลปีที่ทางออกของเครื่องควบแน่น, (290 kJ / kg)
- h_4 = เอนทัลปีที่ทางเข้าของเครื่องทำระเหย, (290 kJ / kg)

จากข้อมูลเบื้องต้นดังกล่าวสามารถคำนวณขนาดระบบปั๊มความร้อน ได้แก่ ขนาดของเครื่องอัดไอ และขนาดเครื่องควบแน่น ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.1.1.1.1 ขนาดของเครื่องอัดไอ (Compressor)

คำนวณได้จากสมการที่ 3-1

$$W_c = \frac{[Q_e(h_2 - h_1)]}{[\eta_c \eta_m (h_1 - h_4)]} \quad (3-1)$$

เมื่อ

$$W_c = \text{ขนาดเครื่องอัดไอ, kW}$$

$$Q_e = \text{ความสามารถทำความเย็นสุทธิของเครื่องทำระเหย, (3.6 kW ซึ่งได้จากขอบเขตงานวิจัย)}$$

$$\eta_c = \text{ประสิทธิภาพทางกลของเครื่องอัดไอ, (0.80 ซึ่งได้จาก (29))}$$

$$\eta_m = \text{ประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้า, (0.85 ซึ่งได้จาก (29))}$$

$$h_1 = \text{เอนทัลปีที่ทางเข้าของเครื่องอัดไอ, (405 kJ / kg)}$$

$$h_2 = \text{เอนทัลปีที่ทางออกของเครื่องอัดไอ, (440 kJ / kg)}$$

$$h_4 = \text{เอนทัลปีที่ทางเข้าของเครื่องทำระเหย, (290 kJ / kg)}$$

แทนค่าในสมการที่ 3-1 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} W_c &= [3.6 \times (440 - 405)] / [0.80 \times 0.85 (405 - 290)] \\ &= 1.6 \text{ kW} \end{aligned}$$

ดังนั้นจึงเลือกขนาดของเครื่องอัดไอ 1.6 kW ยี่ห้อ Maneurop Model MTZ 18 JA 5 VE ขนาดแรงดัน 220 V ความถี่ 50 Hz กระแสสูงสุด 12 A ใช้กับสารทำความเย็นชนิด R-134a

3.1.1.1.2 ขนาดเครื่องควบแน่น (Condenser)

เครื่องควบแน่นในระบบปั๊มความร้อน 2 ชุด คือเครื่องควบแน่นชุดใน ทำหน้าที่ให้ลมร้อนสู่ผลิตภัณฑ์ และเครื่องควบแน่นชุดนอก ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากตู้อบแห้ง กรณีที่อุณหภูมิสูงกว่าที่กำหนดไว้ มีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

ก) ขนาดของเครื่องควบแน่นชุดใน (Internal Condenser)

คำนวณได้จากสมการที่ (3-2)

$$Q_{ci} = m_a \cdot C_a \cdot \Delta T_c \tag{3-2}$$

เมื่อ

Q_{ci} = ขนาดของเครื่องควบแน่นชุดใน, kW

m_a = อัตราการไหลของอากาศ, (0.65 kg/s ซึ่งได้จากการคำนวณ (ภาคผนวก ข))

C_a = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ, (1.006 kJ/kg °C ซึ่งได้จากการเปิดตารางคุณสมบัติของอากาศ (30))

ΔT_c = ความแตกต่างอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นชุดใน, (5 °C ซึ่งได้จาก (31))

แทนค่าในสมการที่ (3-2) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_{ci} &= 0.65 \times 1.006 \times 5 \\ &= 3.3 \text{ kW} \end{aligned}$$

ข) ขนาดของเครื่องควบแน่นชุดนอก (External condenser)

คำนวณได้จากสมการที่ (3-3) ดังนี้

$$Q_{cx} = (W_c + Q_e) - Q_{ci} \quad (3-3)$$

เมื่อ

Q_{cx} = ขนาดของเครื่องควบแน่นชุดนอก, kW

W_c = ขนาดของเครื่องอัดไอ, (1.6 kW)

Q_e = ความสามารถทำความเย็นสุทธิของเครื่องทำระเหย, (3.6 kW)

Q_{ci} = ขนาดของเครื่องควบแน่นชุดใน, (3.3 kW)

แทนค่าในสมการที่ (3-3) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_{cx} &= (1.6 + 3.6) - 3.3 \\ &= 1.2 \text{ kW} \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณหาขนาดเครื่องควบแน่นในระบบปั๊มความร้อนซึ่งจะมีอยู่ถึง 2 ชุด คือ เครื่องควบแน่นชุดใน (Internal condenser) มีขนาด 3.3 kW และเครื่องควบแน่นชุดนอก (External condenser) มีขนาด 1.2 kW ซึ่งทั้ง 2 ชุดต่อขนานกันดังแผนภูมิที่ 3-2

3.1.1.2 การคัดเลือกอุปกรณ์

การคัดเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบปั๊มความร้อน ประกอบด้วย

1) การคัดเลือกอุปกรณ์หลักในระบบปั๊มความร้อน

1.1) เครื่องทำระเหย (Evaporator)

เครื่องทำระเหยเป็นแบบขดท่อ และครีป (Finned-tube coil evaporator)

มีขนาด 3.6 kW

1.2) สารทำความเย็น (Refrigerant)

เลือกใช้สารทำความเย็นชนิด R-134 a (Hydrofluorocarbon)

2) คัดเลือกอุปกรณ์ประกอบในระบบปรับอากาศ

2.1) โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve)

Model MP 604 ขนาดแรงดันไฟฟ้า 220 V ความถี่ 50 Hz ความดันสูงสุด 500 psig ขนาดของทองแดง 3/8 นิ้ว แบบเชื่อม จำนวน 2 ตัว

2.2) วาล์วกันกลับ (Check valve)

เป็นวาล์วกันกลับแบบสปริง ขนาด 3/8 นิ้ว จำนวน 2 ตัว

2.3) ตัวกรองความชื้น (Filter drier)

ตัวกรองความชื้น ใช้กับสารทำความเย็นชนิด R-134a จำนวน 1 ตัว

2.4) กระจกมองน้ำยา (Sight glasses)

กระจกมองน้ำยาจะเป็นแบบแฟร์นิต (Flare nut) จำนวน 1 ตัว

2.5) วาล์วควบคุมสารทำความเย็น (Expansion valve)

วาล์วลดความดันเป็นแบบ TEV (Thermostatic expansion valve) จำนวน 1 ตัว

3.1.2 การออกแบบภาคใส่ผลิตภัณฑ์

กำหนดขนาดของภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ โดยคำนึงถึงปริมาตรและลักษณะการจัดเรียงในตู้อบ ซึ่งจากการคำนวณหาจำนวนภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ สามารถหาได้โดยอาศัยน้ำหนักผลิตภัณฑ์รวม 168 kg ซึ่งได้จากภาคผนวก ข และต้องกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติม คือ ขนาดภาชนะกว้าง 0.90 m ยาว 0.09 m ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสม ผลิตภัณฑ์ที่ใส่อบแห้งหนึ่งชิ้น มีขนาดกว้าง 0.032 m ยาว 0.079 m มีน้ำหนักเฉลี่ยต่อชิ้น 0.06 kg

จากเงื่อนไขดังกล่าวสามารถคำนวณหาจำนวนภาชนะทั้งหมด ตามขั้นตอน ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ก) พื้นที่เฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ต่อหนึ่งชิ้น} &= 0.032 \text{ m} \times 0.079 \text{ m} \\ &= 2.53 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{ชิ้น} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ข) พื้นที่เฉลี่ยต่อหนึ่งภาชนะ} &= 0.9 \text{ m} \times 0.9 \text{ m} \\ &= 0.81 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค) ภาชนะหนึ่งภาชนะวางผลิตภัณฑ์ได้เต็มที่} &= (0.81 \text{ m}^2/\text{ชิ้น}) / 2.53 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \\ &= 320 \text{ ชิ้น} \end{aligned}$$

แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถวางผลิตภัณฑ์ชิดกันมาก เพราะจะมีผลต่อระยะเวลาการอบแห้ง กำหนดให้การวางผลิตภัณฑ์มีช่องว่างระหว่างผลิตภัณฑ์เท่ากับผลิตภัณฑ์หนึ่งชิ้น และสามารถวางผลิตภัณฑ์ได้เพียง 160 ชิ้น/ภาชนะ

$$\begin{aligned}
 \text{ง) จำนวนชิ้นผลิตภัณฑ์ทั้งหมด} &= 168 \text{ kg} / (0.06 \text{ kg/ชิ้น}) \\
 &= 2,800 \text{ ชิ้น} \\
 \text{จ) จำนวนถาดทั้งหมด} &= 2,800 \text{ ชิ้น} / (160 \text{ ชิ้น/ถาด}) \\
 &= 17.5 \text{ ถาด}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจากผลการคำนวณสรุปได้ว่า จำนวนถาดบรรจุผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 18 ถาด โดยมีชั้นวางถาด 2 ชุด ชุดละ 9 ถาด รายละเอียดตามแบบ HPD - 10 ในภาคผนวก ก

3.1.3 การออกแบบตู้อบแห้ง

จากการคำนวณหาหน้าหนึ่งของผลิตภัณฑ์ที่เครื่องอบสามารถอบได้สูงสุด รวมถึงขนาดของถาด และจำนวนถาดรวม ช่องว่างระหว่างถาดแต่ละถาด ซึ่งจะนำไปคำนวณหาปริมาตรของตู้อบ สามารถคำนวณหาขนาดตู้อบแห้ง กำหนดขนาดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- จำนวนถาด 18 ถาด แบ่งออกเป็น 2 ชุด
- ระยะห่างระหว่างถาด 8 cm
- ขอบถาดสูง 2 cm
- ระยะห่างจากพื้นตู้ ถึงส่วนล่างชั้นวางถาด 10 cm
- ระยะห่างจากเพดานตู้ส่วนบนชั้นวางถาด 10 cm
- ระยะห่างจากผนังทั้งสองด้านถึงชั้นวางถาด 15 cm
- เพื่อระยะท่อส่งลมเข้าและออกจากตู้ ด้านละ 10 cm

ดังนั้น สามารถคำนวณหาขนาดตู้อบแห้ง ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 3.1.3.1 \text{ ความสูงของชั้นวางถาด} &= \text{ระยะห่างระหว่างถาดต่อถาด} \times \text{จำนวนถาด} \\
 &= 0.10 \times 9 \\
 &= 0.9 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3.1.3.2 \text{ ความสูงภายในตู้อบ} &= \text{ความสูงชั้นวางถาด} + \text{ระยะห่างจากพื้นตู้ถึง} \\
 &\text{ส่วนล่างของชั้นวางถาด} + \text{ระยะห่างจากเพดานตู้ ถึงส่วนบนของชั้นวางถาด} \\
 &= 0.9 + 0.1 + 0.1 \\
 &= 1.1 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3.1.3.3 \text{ ความยาวภายในตู้อบ} &= (\text{จำนวนชั้นวางถาด} \times \text{ความกว้างของชั้นวางถาด}) + \\
 &(\text{ระยะเพื่อท่อส่งลมเข้า และออกจากตู้}) \\
 &= (2 \times 0.9) + 0.1 + 0.1
 \end{aligned}$$

$$= 2 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 3.1.3.4 \text{ ความกว้างภายในตู้อบ} &= \text{ความลึกของชั้นวางถาด} + \text{ระยะห่างจากผนังทั้งสองด้าน} \\
 &= 0.9 + 0.15 + 0.15 \text{ m} \\
 &= 1.2 \text{ m}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจากผลการคำนวณสรุปได้ว่า ขนาดตู้อบแห้งภายใน กว้าง 1.2 m ยาว 2 m สูง 1.1 m รายละเอียดตามแบบ HPD - 02 ในภาคผนวก ค

3.1.4 การออกแบบระบบลม

การออกแบบระบบลมจะต้องคำนวณหาขนาดพัดลมและหาขนาดมอเตอร์พัดลม ดังนี้

3.1.4.1 ขนาดของพัดลม (Blower)

การหาขนาดของพัดลมจะต้องคำนึงถึง ความดันสูญเสียรวมในระบบ มีหน่วยเป็น Pa และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ มีหน่วยเป็น kg/s และจะนำไปเทียบตารางการเลือกพัดลม โดยมีขั้นตอนการหาขนาดพัดลมดังต่อไปนี้

3.1.4.1.1 การหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ

- อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ($\dot{m}_a = 0.65 \text{ kg/s}$) ซึ่งได้จากการคำนวณภาคผนวก ข

- ความหนาแน่นของอากาศ ($\rho_a = 1.09 \text{ kg/m}^3$) ได้จากการเปิดตารางคุณสมบัติของอากาศที่ อุณหภูมิ 60°C (30)

จากข้อมูลเบื้องต้นสามารถคำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศคำนวณได้จากสมการที่ 3-4 ดังนี้

$$Q_a = \dot{m}_a / \rho_a \tag{3-4}$$

เมื่อ

$$Q_a = \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, (m}^3\text{/s)}$$

$$\dot{m}_a = \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, (0.65 kg/s)}$$

$$\rho_a = \text{ความหนาแน่นของอากาศ, (1.09 kg/m}^3\text{)}$$

แทนค่าในสมการที่ 3-4 จะได้ว่า

$$Q_a = 0.65/1.09$$

$$= 0.6 \text{ m}^3\text{/s}$$

3.1.4.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Fitting loss coefficient, C_o)

ซึ่งหาได้จากการเปิดตาราง ใน ASHRAE (32)

3.1.4.1.3 การคำนวณความดันสูญเสียที่อุปกรณ์ต่างๆ ในเครื่องอบแห้ง

มีดังนี้

1) ความดันสูญเสียเนื่องจากตู้อบแห้ง รายละเอียดตามแบบ HPD-02 (ภาคผนวก ก) ซึ่งเทียบค่า fitting loss coefficient 5-1 ใน ASHRAE (ภาคผนวก ก)

$$\begin{aligned}
 C_o &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย} \\
 A_o &= \text{พื้นที่หน้าตัดของตู้อบแห้ง, (1.2m x 1.1m = 1.32 m}^2\text{)} \\
 A_1 &= \text{พื้นที่หน้าตัดสัมผัสอากาศจริง, (1.2m x 0.92m = 1.1 m}^2\text{)} \\
 \theta &= \text{มุมเอียง, (180 องศา)} \\
 A_o/A_1 &= 1.32/1.1 \\
 &= 1.2 \\
 &\approx 2
 \end{aligned}$$

เทียบค่า $C_o = 0.26$

หาค่าความเร็วลมจากสมการที่ 3-5

$$v = Q_a / A_1 \quad (3-5)$$

เมื่อ

$$v = \text{ความเร็วลม, m/s}$$

$$Q_a = \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, (0.6 m}^3\text{/s)}$$

แทนค่าใน สมการที่ 3-5 จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 v &= 0.6/1.1 \\
 &= 0.55 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

หาค่าความดันสูญเสียเนื่องจากตู้อบแห้งจากสมการที่ 3-6

$$\Delta P_1 = (C_o \rho_a v^2) / 2 \quad (3-6)$$

เมื่อ

$$P_1 = \text{ความดันสูญเสียเนื่องจากดู่บแห้ง, Pa}$$

$$\rho_a = \text{ความหนาแน่นของอากาศ, (1.09 kg/m}^3\text{)}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= [(0.26 \times 1.09 \times (0.55)^2) / 2] \\ &= 0.04 P_a \end{aligned}$$

2) ความดันสูญเสียเนื่องจากฟิลเตอร์ รายละเอียดตามแบบ HPD-09

(ภาคผนวก ก) เทียบค่า fitting loss coefficient 7-8 ใน ASHRAE (ภาคผนวก ก)

$$A_o = \text{พื้นที่หน้าตัดท่อส่งลม, (0.15 m x 0.7 m = 0.105 m}^2\text{)}$$

$$A_{or} = \text{พื้นที่หน้าตัดสัมผัสอากาศจริง, (0.07 mm}^2\text{ ข้อมูลจากบริษัทรีฟริโก จำกัด)}$$

$$n = \text{อัตราส่วนช่องว่างของฟิลเตอร์}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} n &= A_{or} / A_o && (3-7) \\ &= 0.07 / 0.105 \\ &= 0.67 \\ &\approx 0.65 \end{aligned}$$

เทียบค่า

$$C_o = 0.75$$

หาค่าความเร็วลมจากสมการที่ 3-8

$$v = Q_a / A_{or} \tag{3-8}$$

เมื่อ

$$v = \text{ความเร็วลม, m/s}$$

$$Q_a = \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, 0.6 m}^3\text{/s}$$

แทนค่า

$$v = 0.6/0.07$$

$$= 8.6 \text{ m/s}$$

หาค่าความดันสูญเสียเนื่องจากฟิลเตอร์จากสมการที่ 3-9

$$\Delta P_2 = (C_o \rho_a v^2) / 2 \quad (3-9)$$

เมื่อ

$$\Delta P_2 = \text{ความดันสูญเสียเนื่องจากฟิลเตอร์, Pa}$$

$$\rho_a = \text{ความหนาแน่นของอากาศ, (1.09 kg / m}^3\text{)}$$

แทนค่าสมการที่ 3-9 จะได้ว่า

$$\Delta P_2 = [0.75 \times 1.09 \times (8.6)^2] / 2$$

$$= 30.23 \text{ Pa}$$

3) ความดันสูญเสียเนื่องจากท่อโค้งส่งลมจำนวน 2 ตัว รายละเอียดตามแบบ HPD - 04 (ภาคผนวก ค) เทียบค่า fitting loss coefficient 3-5 ใน ASHRAE (ภาคผนวก ก)

$$W = \text{ความกว้างของท่อโค้งส่งลมขาเข้า, (0.15 m)}$$

$$H = \text{ความสูงของท่อโค้งส่งลม, (0.7 m)}$$

$$R = \text{รัศมีส่วนโค้ง, (0.225 m)}$$

$$R/W = 0.225/0.15$$

$$= 1.5$$

$$H/W = 0.7/0.15$$

$$= 4.67$$

$$\approx 5$$

$$\text{เทียบค่า } C_o = 0.16$$

หาค่าความเร็วลมจากสมการที่ 3-10

$$v = Q_a / (H \times W) \quad (3-10)$$

เมื่อ

$$v = \text{ความเร็วลม, m/s}$$

$$Q_a = \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, (0.6 m}^3\text{/s)}$$

แทนค่าสมการที่ 3-10 จะได้ว่า

$$v = 0.6 / (0.7 \times 0.15)$$

$$= 5.7 \text{ m/s}$$

หาค่าความดันสูญเสียเนื่องจากท่อโค้งส่งลมจำนวน 2 ตัว จากสมการที่ 3-11

$$\Delta P_3 = (C_o \rho_a v^2) / 2 \quad (3-11)$$

เมื่อ

$$\Delta P_3 = \text{ความดันสูญเสียเนื่องจากท่อโค้งส่งลมจำนวน 2 ตัว, Pa}$$

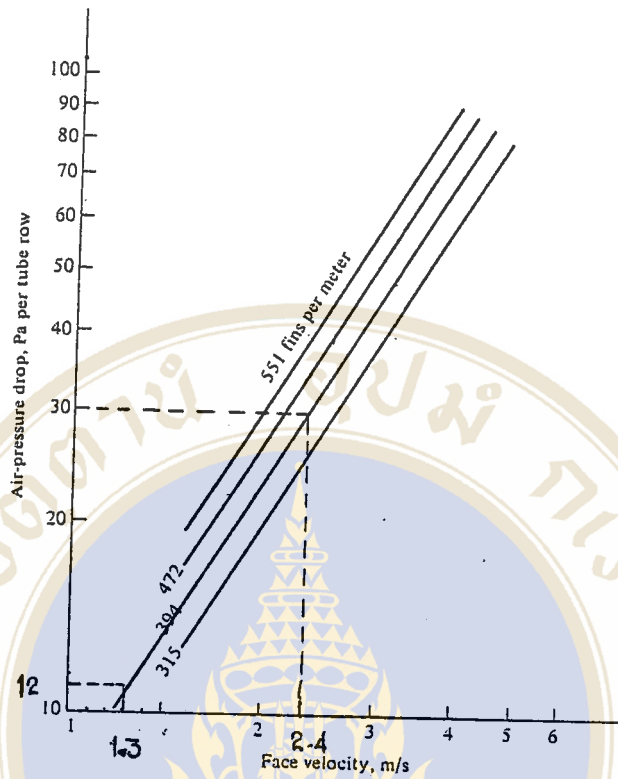
$$\rho_a = \text{ความหนาแน่นของอากาศ, (1.09 kg/m}^3\text{)}$$

แทนค่าสมการที่ 3-11 จะได้ว่า

$$\Delta P_3 = [0.16 \times 1.09 \times (5.7)^2 \times 2] / 2$$

$$= 5.67 \text{ Pa}$$

4) ความดันสูญเสียเนื่องจากเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหย ซึ่งหาได้จากตาราง Pressure drop of air flowing through a finned coil ดังตารางที่ 3-1 (33)



ตารางที่ 3-1 แสดง Pressure drop of air flowing through a finned coil

4.1) ความดันสูญเสียเนื่องจากเครื่องควบแน่น, ΔP_c

- A = พื้นที่หน้าตัดสัมผัสผิวดังอากาศจริง, (0.2475 m²)
- n = จำนวนท่อของเครื่องควบแน่น, (2 ท่อ)

หาค่าความเร็วจากสมการที่ 3-12

$$v = Q_a / A \tag{3-12}$$

เมื่อ

v = ความเร็วลม, m/s

Q_a = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, (0.6 m³/s)

แทนค่า สมการที่ 3-12 จะได้ว่า

$$v = 0.6 / 0.2475$$

$$= 2.4 \text{ m/s}$$

อ่านค่าความดันสูญเสียจากตารางที่ 3-1 ได้ เท่ากับ 30 Pa/row

ดังนั้น ความดันสูญเสียเนื่องจากเครื่องควบแน่น, ΔP_c

$$\begin{aligned} \Delta P_c &= n \times \text{ความดันสูญเสีย, (Pa/row)} \\ &= 2 \times 30 \\ &= 60 \text{ Pa} \end{aligned}$$

4.2) ความดันสูญเสียเนื่องจากเครื่องทำระเหย, ΔP_e

$$\begin{aligned} A &= \text{พื้นที่หน้าตัดสัมผัสอากาศจริง, (0.138 m}^2\text{)} \\ N &= \text{จำนวนท่อของเครื่องทำระเหย, (3 ท่อ)} \\ Q &= \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ไหลผ่านเครื่อง} \\ &\quad \text{ทำระเหยเป็น 30 \% ของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของ} \\ &\quad \text{อากาศรวม (28)} \end{aligned}$$

แทนสมการ ที่ 3-13

$$\begin{aligned} Q &= 0.3 \times Q_a \\ &= 0.3 \times 0.6 \\ &= 0.18 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned} \tag{3-13}$$

หาค่าความเร็วลมจากสมการที่ 3-13

$$\begin{aligned} v &= Q/A \\ &= 0.18/0.138 \\ &= 1.3 \text{ m/s} \end{aligned}$$

อ่านค่าความดันสูญเสียจากตารางที่ 3-1 ได้เท่ากับ 12 Pa/row

ความดันสูญเสียเนื่องจากเครื่องทำระเหย, ΔP_e

$$\begin{aligned} \Delta P_e &= n \times \text{ความดันสูญเสีย (Pa/row)} \\ &= 3 \times 12 \\ &= 36 \text{ Pa} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ความดันสูญเสียรวมของเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหย, ΔP_4

$$\begin{aligned}\Delta P_4 &= \Delta P_c + \Delta P_e \\ &= 60 + 36 \\ &= 96 \text{ Pa}\end{aligned}$$

5) ความดันสูญเสียเนื่องจากกล่องที่ติดตั้งเครื่องทำระเหย รายละเอียดตามแบบ HPD-05 (ภาคผนวก ก) เทียบค่า fitting loss coefficient 4-3 ใน ASHRAE (ภาคผนวก ก)

$$A_o = \text{พื้นที่หน้าตัดด้านอากาศเข้า, (0.15 m x 0.7m = 0.105 m}^2\text{)}$$

$$A_1 = \text{พื้นที่หน้าตัดด้านอากาศออก, (0.4 m x 0.7m = 0.28 m}^2\text{)}$$

$$\theta = \text{มุมเอียง, (45 องศา)}$$

$$A_1/A_o = 0.28/0.105$$

$$= 2.6$$

$$\approx 3$$

$$\text{เทียบค่า } C_o = 0.60$$

หาค่าความเร็วลมจากสมการที่ 3-14

$$v = Q_a / A \quad (3-14)$$

เมื่อ

$$v = \text{ความเร็วลม, m/s}$$

$$Q_a = \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, (0.6 m}^3\text{/s)}$$

แทนค่าสมการที่ 3-14 จะได้ว่า

$$v = 0.6/0.105$$

$$= 5.7 \text{ m/s}$$

หาค่าความดันสูญเสียเนื่องจากกล่องที่ติดตั้งเครื่องทำระเหยจากสมการที่ 3-15

$$\Delta P_5 = (C_o \rho_a v^2) / 2 \quad (3-15)$$

เมื่อ

$$\Delta P_5 = \text{ความดันสูญเสียเนื่องจากกล่องที่ติดตั้งเครื่องทำระเหย, Pa}$$

$$\rho_a = \text{ความหนาแน่นของอากาศ, (1.09 kg / m}^3\text{)}$$

แทนค่าสมการที่ 3-14

$$\begin{aligned} \Delta P_5 &= [0.6 \times 1.09 \times (5.7)^2] / 2 \\ &= 10.62 \text{ Pa} \end{aligned}$$

6) ความดันสูญเสียเนื่องจากท่อขยายทางออกของพัดลมรายละเอียดตามแบบ HPD-07 (ภาคผนวก ค) เทียบค่า fitting loss coefficient 4-9 ใน ASHRAE (ภาคผนวก ก)

$$A_o = \text{พื้นที่หน้าตัดขาเข้า, (0.3 m} \times \text{0.27 m} = \text{0.081 m}^2\text{)}$$

$$A_1 = \text{พื้นที่หน้าตัดขาออก, (0.7 m} \times \text{0.15 m} = \text{0.105 m}^2\text{)}$$

$$\theta = \text{มุมเอียง, (30 องศา)}$$

$$A_1 / A_o = 0.105 / 0.081$$

$$= 1.3$$

$$\approx 1.5$$

$$\text{เทียบค่า } C_o = 0.42$$

หาค่าความเร็วลมจากสมการที่ 3-16

$$v = Q_a / A_1 \quad (3-16)$$

เมื่อ

$$v = \text{ความเร็วลม, m/s}$$

$$Q_a = \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, (0.6 m}^3\text{/s)}$$

แทนค่า สมการที่ 3-16 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} v &= 0.6/0.105 \\ &= 5.7 \text{ m/s} \end{aligned}$$

หาค่าความดันสูญเสียเนื่องจากท่อขยายทางออกของพัดลมจากสมการที่ 3-17

$$\Delta P_6 = (C_o \rho_a v^2) / 2 \quad (3-17)$$

เมื่อ

$$\Delta P_6 = \text{ความดันสูญเสียเนื่องจากท่อขยายทางออกของพัดลม, Pa}$$

$$\rho_a = \text{ความหนาแน่นของอากาศ, (1.09 kg/m}^3\text{)}$$

แทนค่าสมการที่ 3-17 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta P_6 &= [0.42 \times 1.09 \times (5.7)^2] / 2 \\ &= 7.44 \text{ Pa} \end{aligned}$$

3.1.4.1.4 ความดันสูญเสียรวมในเครื่องอบแห้งทั้งหมด

มีดังนี้

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 + \Delta P_6 \quad (3-18)$$

เมื่อ

$$\Delta P = \text{ความดันสูญเสียรวมทั้งหมด, Pa}$$

$$\Delta P_1 = \text{ความดันสูญเสียเนื่องจากตู้อบแห้ง, (0.04 Pa)}$$

$$\Delta P_2 = \text{ความดันสูญเสียเนื่องจากฟิลเตอร์, (30.23 Pa)}$$

$$\Delta P_3 = \text{ความดันสูญเสียเนื่องจากท่อโค้งส่งลม, (5.67 Pa)}$$

$$\Delta P_4 = \text{ความดันสูญเสียเนื่องจากเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหย, (96 Pa)}$$

$$\Delta P_5 = \text{ความดันสูญเสียเนื่องจากกล่องที่ติดตั้งเครื่องทำระเหย, (10.62 Pa)}$$

$$\Delta P_6 = \text{ความดันสูญเสียเนื่องจากท่อขยายทางออกพัดลม, (7.44 Pa)}$$

แทนค่าสมการที่ 3-18 จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\Delta P &= 0.04 + 30.23 + 5.67 + 96 + 10.62 + 7.44 \\ &= 150 \text{ Pa}\end{aligned}$$

ความดันสูญเสียรวมในระบบเท่ากับ 150 Pa หรือเท่ากับ ที่ ความดันสถิต (Static pressure) 15.3 mm.WG และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (Air volume flow rate) เท่ากับ 0.6 m³/s หรือ เท่ากับ 1271 CFM จากตารางแสดงสมรรถนะของพัดลมยี่ห้อ National แบบ Forward curved blade จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพัดลม เท่ากับ 10 นิ้ว และได้ความเร็วรอบของพัดลม 850 รอบ ต่อ นาที ดังภาคผนวก ก

3.1.4.2 การหาขนาดมอเตอร์พัดลม

คำนวณหาขนาดมอเตอร์พัดลมได้จากสมการที่ 3-19

$$P_m = \frac{Q_a \Delta P}{\eta_b \eta_m} \quad (3-19)$$

เมื่อ

$$Q_a = \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, (0.6 m}^3\text{/s)}$$

$$\Delta P = \text{ความดันสูญเสียรวมของระบบ, (150 Pa)}$$

$$\eta_b = \text{ประสิทธิภาพของพัดลม, (0.6 ซึ่งหาได้จาก (6))}$$

$$\eta_m = \text{ประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลม, (0.85 ซึ่งหาได้จาก (30))}$$

แทนค่าสมการที่ (3-18) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}P_m &= 0.6 \times 150 / (0.6 \times 0.85) \\ &= 176.5 \text{ W}\end{aligned}$$

ดังนั้นจึงเลือกมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขนาด 1/2 HP 4 Pole Type SF – JR 50 Hz 220 / 380 V 1400 rpm

จากผลการคำนวณ สามารถสรุปรายละเอียดของตู้อบแห้ง และอุปกรณ์ประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 แสดงรายละเอียดของตู้อบแห้งและอุปกรณ์ประกอบ

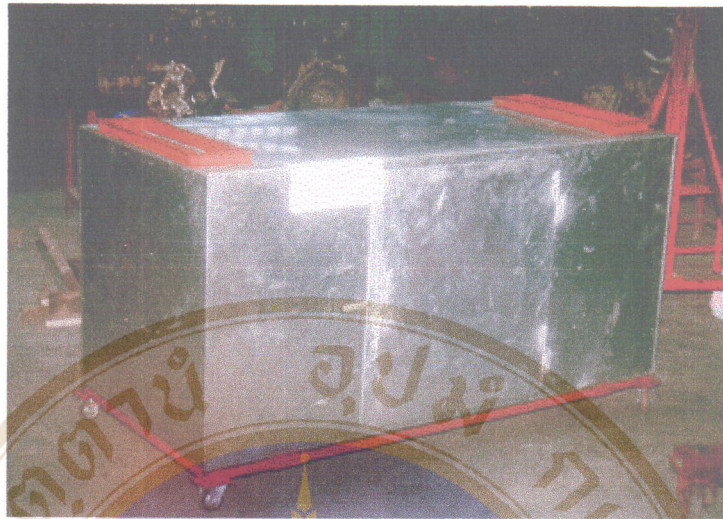
รายการ	รายละเอียด
1. ตู้อบแห้ง	กว้าง 1.2 m ยาว 2 m สูง 1.1 m ขนาดปริมาตร 2.64 m ³
2. ภาควางผลิตภัณฑ์	กว้าง 0.9 m ยาว 0.9 m จำนวน 18 ภาควาง แบ่งออกเป็น 2 ชุด ๆ ละ 9 ภาควาง
3. พัดลม	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 1271 CFM. , ความดันสถิต 15.3 mm. WG. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อพัดลม 10 นิ้ว และ ชนิดใบพัดใบโค้งหน้า
4. มอเตอร์พัดลม	มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พิกัด 1/2 HP แรงดัน 220/380 V ความถี่ 50 Hz

3.2 ขั้นตอนการสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน

การสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน สามารถอธิบายขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การสร้างตู้อบแห้ง

จัดเตรียมวัสดุและเครื่องมือ เช่น เหล็ก สังกะสี เครื่องตัดเหล็ก และ เครื่องเชื่อม เป็นต้น ดำเนินการประกอบตามแบบที่ออกแบบไว้ ดังแสดงรายละเอียดแบบไว้ในภาคผนวก ค ซึ่งใช้สังกะสีต่อเข้าตะเข็บเป็นผนังตู้ และสร้างภาควางผลิตภัณฑ์โดยใช้อุณหภูมิต่ำตามแบบที่ออกแบบไว้ โดยสร้างตู้อบแห้ง ขนาดกว้าง 1.2 m ยาว 2 m สูง 1.1 m ปริมาตร 2.64 m³ ใช้เหล็กกล่อง ขนาด $\square 50 \times 50 \times 1.5$ mm ทำเป็นโครงตู้ โดยใช้สังกะสี เบอร์ 18 เป็นผนังตู้ ดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 แสดงการสร้างตู้อบแห้ง

ขั้นตอนที่ 2 สร้างท่อส่งลม

การสร้างท่อส่งลม โดยทำการติดตั้งท่อระบบปั๊มความร้อนกับตู้อบแห้ง โดยท่อส่งลมนั้นทำมาจากสังกะสีมีลักษณะรูปทรงตรง โค้ง ตามที่ออกแบบไว้พร้อมทำการติดตั้งพัดลมด้วย ซึ่งการสร้างท่อส่งลมประกอบเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน มีจำนวน 7 ชุด ดังนี้

1. ท่อส่งลมเข้าและออก จำนวน 2 ชุด ดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 แสดงท่อส่งลมเข้าและออก

2. ท่อโค้งส่งลมจำนวน 2 ชุด ดังรูปที่ 3-3



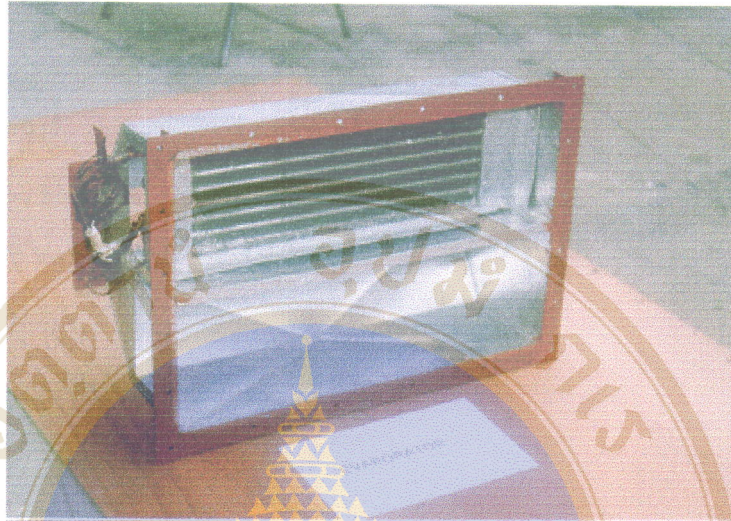
รูปที่ 3-3 แสดงท่อโค้งส่งลม

3. ท่อขยายทางออกพัดลม ดังรูปที่ 3-4



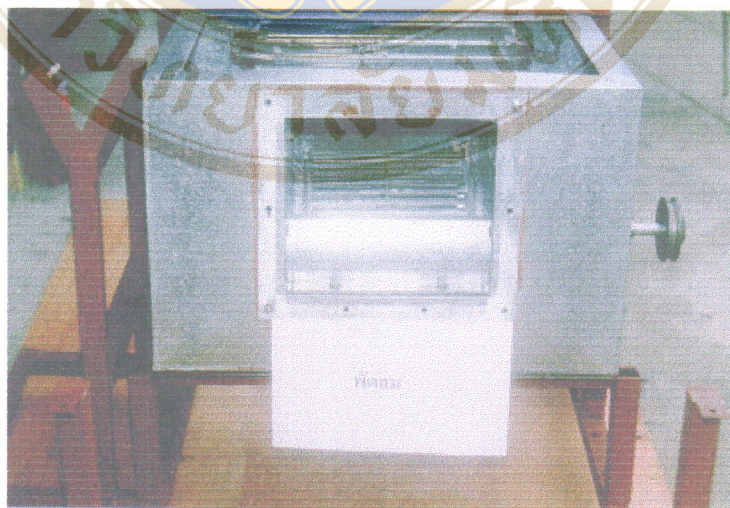
รูปที่ 3-4 แสดงท่อขยายทางออกพัดลม

4. ก่อตั้งเครื่องทำระเหย ดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 แสดงก่อตั้งเครื่องทำระเหย

5. ก่อตั้งเครื่องควบคุมและพัลลัม ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 แสดงก่อตั้งเครื่องควบคุมและพัลลัม

ส่วนประกอบทั้งหมด 7 ชั้นดังที่กล่าวมา มีขนาดโดยละเอียดตามแบบดังแสดงไว้ในภาคผนวก ค และ วัสดุที่ใช้คือ สังกะสี เบอร์ 18 ขนาด 12 m x 2.4 m สำหรับหน้าแปลนใช้เหล็กฉาก ขนาด L 40 x 40 x 3.2¹ mm และยึดด้วยนัทขนาด 8 mm ระหว่างหน้าแปลนของท่อส่งลม

ขั้นตอนที่ 3 ติดตั้งอุปกรณ์ปั๊มความร้อน

การติดตั้งอุปกรณ์ปั๊มความร้อน จะเริ่มโดยการติดตั้งเครื่องทำระเหยเข้าไปในกล่องลมติดตั้งเครื่องทำระเหยตามหมายเลขแบบ HPD-05 (ภาคผนวก ค) และติดตั้งเครื่องควบแน่นชุดใน และพัดลมในกล่องลมติดตั้งเครื่องควบแน่นและพัดลม ตามหมายเลขแบบ HPD-06 (ภาคผนวก ค)

หลังจากนั้นดำเนินการติดตั้งฐานรองรับชุดเครื่องอัดไอ เครื่องควบแน่นชุดนอก และมอเตอร์พัดลม พร้อมทั้งติดตั้งระบบท่อสารทำความเย็นของระบบปั๊มความร้อน ดังรูปที่ 3-7

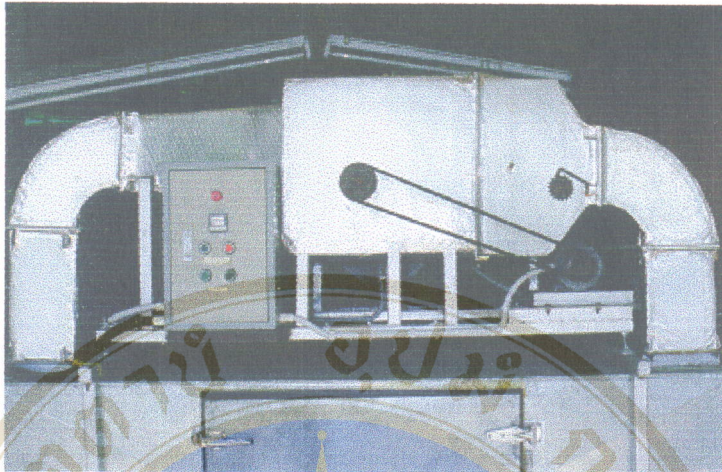


รูปที่ 3-7 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ปั๊มความร้อน

ขั้นตอนที่ 4 หุ้มฉนวนความร้อน

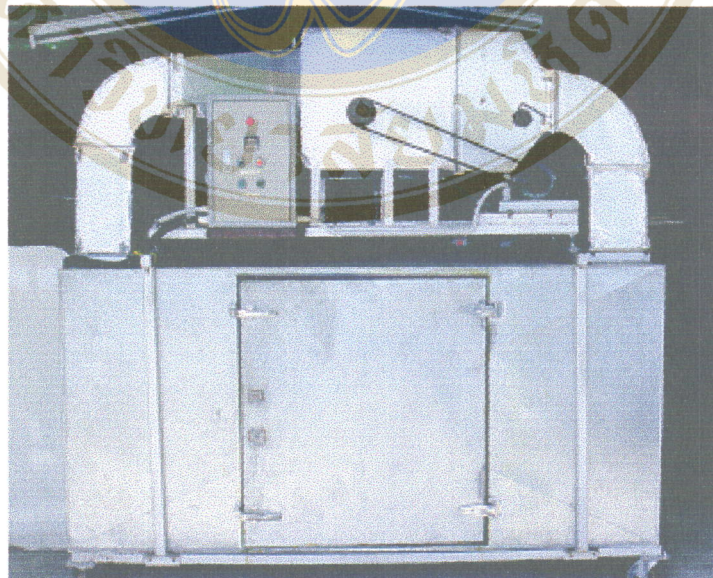
การหุ้มฉนวนความร้อนใช้ฉนวนใยแก้ว (Micro fiber) แบบมีฟอล์ยอลูมิเนียมด้านเดียว ขนาดความหนาแน่น 32 kg/m³ หนา 40 mm ทำการหุ้มดังนี้

ก) หุ้มฉนวนท่อส่งลมทุก ๆ ชั้นส่วน โดยทำการหุ้ม โดยทา กาวยางด้านที่ไม่มีฟอล์ยติดกับผนังท่อส่งลม และใช้ฟอล์ยอลูมิเนียมชนิดมีกาวยึดติดด้านนอกตามรอยต่อของท่อส่งลม ดังรูปที่ 3-8

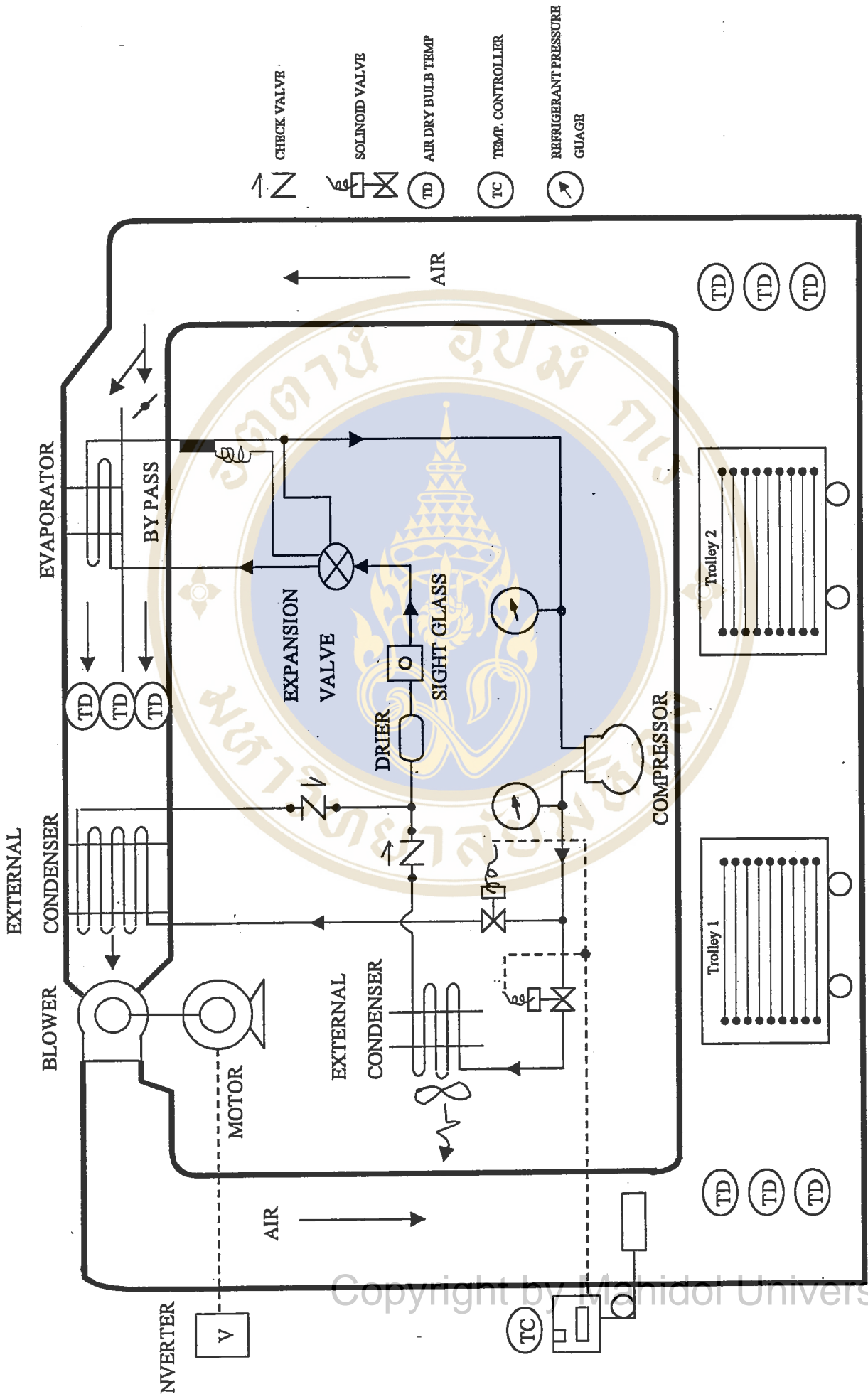


รูปที่ 3-8 แสดงหุ้มฉนวนความร้อนท่อส่งลม

ข) หุ้มฉนวนตู้อบแห้ง โดยการหุ้มอยู่ตรงกลางระหว่างผนังตู้ทั้งสองด้านเมื่อหุ้มฉนวนดังกล่าวแล้ว ก็จะได้เครื่องอบแห้งที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์ ดังรูปที่ 3-9 ซึ่งสามารถแสดงระบบของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ไอน้ำความร้อน ดังแผนภูมิที่ 3-4



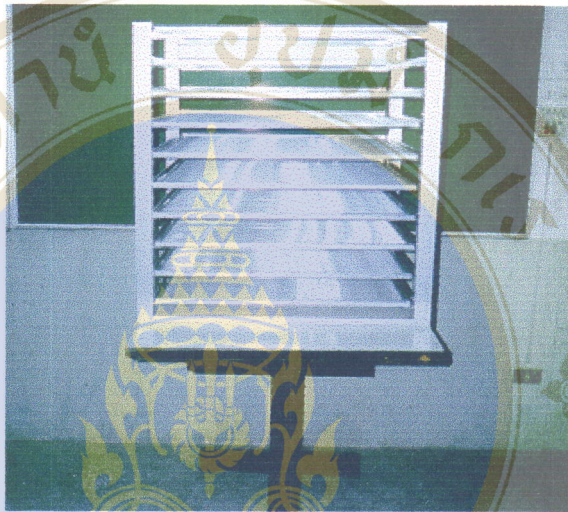
รูปที่ 3-9 แสดงเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ไอน้ำความร้อน



แผนภูมิที่ 3-4 แสดงระบบและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปมความร้อน

ขั้นตอนที่ 5 การสร้างถาดใส่ผลิตภัณฑ์

การสร้างถาดใส่ผลิตภัณฑ์ ทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 0.9 m ยาว 0.9 m สูง 0.02 m จำนวน 18 ถาด แบ่งออกเป็น 2 ชุด ๆ ละ 9 ถาด โดยมีช่องว่างระหว่างชั้น 0.08 m ใช้อลูมิเนียมกล่อง $50 \times 50 \times 1.5$ mm ทำเป็นโครงและถาดใช้ตะแกรงตาข่ายอลูมิเนียม ดังรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 แสดงถาดใส่ผลิตภัณฑ์

3.3 ทดสอบขั้นต้นของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน

ดำเนินการทดสอบเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อนโดยการอุ่นเครื่อง ใช้เวลาประมาณ 90 นาที โดยการปรับอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C โดยทำการวัดอุณหภูมิช่วงขาเข้าตู้อบแห้ง และปรับความเร็วลมโดยการปรับความถี่ที่เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Inverter control motor) แล้วทำการวัดความเร็วโดยใช้เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) วัดบริเวณกลางตู้อบแห้งที่ความเร็วลม 0.3, 0.6 และ 0.9 m/s และการวัดค่ากระแสเครื่องอัดไอ 7 A ความดันของสารความเย็นทางต่ำ ประมาณ 58 psig ความดันของสารทำความเย็นทางสูง ประมาณ 240 psig วัดค่าอุณหภูมิในช่วง 40, 50 และ 60 °C และปรับความเร็วลมในตู้อยู่ประมาณ 0.3, 0.6 และ 0.9 m/s ตามลำดับ

3.4 ขั้นตอนการวางแผนและทดลองเบื้องต้นเพื่อหาช่วงระยะเวลา (Screen test)

ในการวางแผนการทดลองนี้จะใช้การวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) (34) เป็นการวางแผนการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาช่วงระยะเวลาเฉลี่ยโดยการทดลอง ซึ่งมีปัจจัยดังนี้

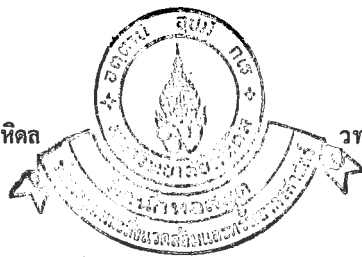
ปัจจัย A คือ	a_1	=	อุณหภูมิ 40 °C
	a_2	=	อุณหภูมิ 50 °C
	a_3	=	อุณหภูมิ 60 °C
ปัจจัย B คือ	b_1	=	ความเร็วลม 0.3 m/s
	b_2	=	ความเร็วลม 0.6 m/s
	b_3	=	ความเร็วลม 0.9 m/s

โดยมี 9 เงื่อนไขการทดลอง คือ ณ อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3, 0.6, 0.9 m/s ตามลำดับ ณ อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3, 0.6, 0.9 ตามลำดับ และ ณ อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.3, 0.6, 0.9 m/s ตามลำดับ โดยกำหนดให้ 1 เงื่อนไขการทดลอง ใช้ผักตบชวา 10 kg ดังนั้น 9 เงื่อนไข จึงต้องใช้ผักตบชวา 90 kg มาทำการทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ จึงมีการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ดังนั้น หนึ่งการทดลองจะต้องใช้ผักตบชวา 3,330 กรัม (3.33 kg) พร้อมนำไปทำการทดลองเบื้องต้น (Screen test) เนื่องจากการทดลองแต่ละการทดลองมีอุณหภูมิและความเร็วลมต่างกัน ดังนั้นเวลาที่ใช้อบแห้งจึงต่างกันด้วย เป็นการทดสอบเพื่อต้องการหาช่วงระยะเวลาการ อบแห้งแต่ละการทดลองซึ่งจะต้องทำการหาความชื้นเริ่มต้น (970 %db) และความชื้นสุดท้าย (14 %db) ของผักตบชวาก่อน ดังภาคผนวก จ ซึ่งการทดลองเบื้องต้นมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 เตรียมผักตบชวา

การเตรียมผักตบชวาทำการคัดเลือกผักตบชวาที่มีลำต้นตรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-2.5 cm ความยาวลำต้นประมาณ 60 cm นำมาล้างทำความสะอาดและผึ่งลม นำมาชั่งน้ำหนัก 3,330 g และจัดเรียงใส่ถาดตามแนวนอนถาดละประมาณ 23 ต้น จำนวน 4 ถาด

ขั้นที่ 2 การอบแห้งผักตบชวากับเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ไ้มความร้อน หลังจากเตรียมผักตบชวาใส่ถาดเรียบร้อยแล้ว จะทำการอุ่นเครื่องก่อนประมาณ 90 นาที เพื่อให้ได้ อุณหภูมิตามที่ต้องการ (40 , 50 และ 60 °C) แล้วนำผักตบชวาที่เรียงใส่ถาดแล้ว มาอบแห้งที่ อุณหภูมิและความเร็วลมต่าง ๆ ซึ่งการปรับอุณหภูมิ สามารถปรับจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (รูปที่ 3-11) ที่ผู้วิจัยได้ติดตั้งไว้ที่ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าโดยอ่านค่าจากเทอร์โมมิเตอร์ (รูปที่ 3-12)



ซึ่งติดตั้งไว้ จำนวน 3 จุด ๆ ละ 3 แห่ง และนำมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละจุด และปรับความเร็วลมได้จากการปรับความถี่ของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ซึ่งเป็นระบบดิจิทัล (รูปที่ 3-13) และทำการวัดความเร็วลมได้โดยใช้เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) (รูปที่ 3-14) ทำการวัดตำแหน่งกลางตู้อบแห้ง ดังนี้

- อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3, 0.6 และ 0.9 m/s ตามลำดับ
- อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3, 0.6 และ 0.9 m/s ตามลำดับ
- อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.3, 0.6 และ 0.9 m/s ตามลำดับ

โดยทำการชั่งน้ำหนักปริมาณน้ำที่ออกจากตู้อบ ให้ได้ปริมาณที่คำนวณจากสมการที่ (3-19)

$$W_w = W_i - [W_i \times (M_f + 1) / (M_i + 1)] \quad (3-19)$$

เมื่อ

$$W_w = \text{น้ำหนักน้ำที่ออกจากตู้อบแห้ง, kg}$$

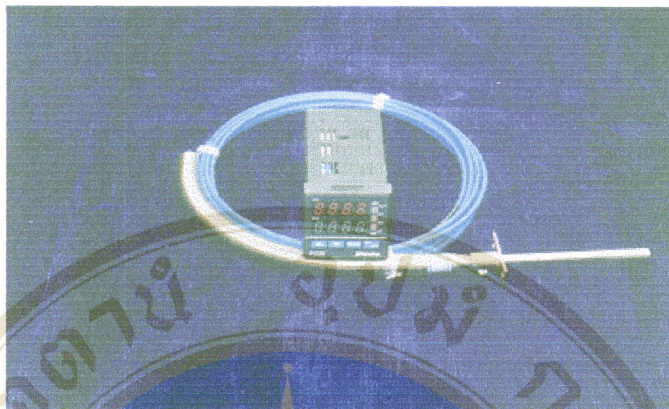
$$W_i = \text{น้ำหนักของผักตบชวาเริ่มต้นก่อนอบแห้ง, (3,330 g)}$$

$$M_i = \text{ความชื้นของผักตบชวาสดเริ่มต้น, (970 \%db) ซึ่งแสดงวิธีการหาได้จากภาคผนวก จ}$$

$$M_f = \text{ความชื้นของผักตบชวาแห้งสุดท้าย, (14 \%db) ซึ่งแสดงวิธีการหาได้จากภาคผนวก จ}$$

ขั้นที่ 3 จากสมการดังกล่าวข้างต้นสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำที่ออกจากตู้อบแห้งได้ 2,975 g เมื่อปริมาณน้ำที่ออกมาจากตู้อบแห้งมีค่าเท่ากับ 2,975 g จะทำการหยุดเครื่องและบันทึกเวลา นำค่าเวลาที่ได้จากการอบแห้งมาคำนวณหาช่วงระยะเวลาเฉลี่ย 3 ช่วงเวลา





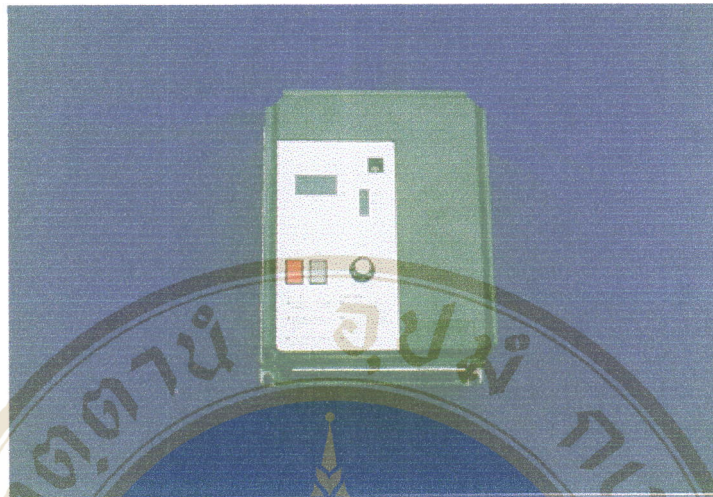
Model FCS 100 ค่าความแม่นยำ $\pm 0.3\%$ เต็มสเกล วัดค่าเป็น $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งใช้ร่วมกับ Thermocouple type K

รูปที่ 3-11 แสดง เครื่องควบคุมอุณหภูมิ



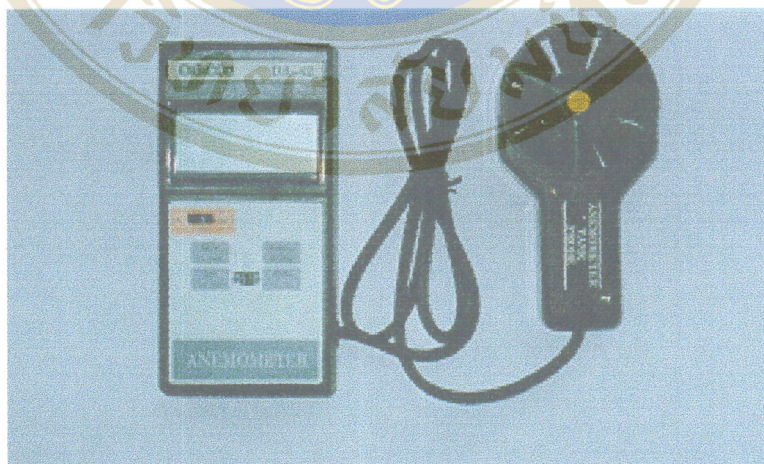
เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท วัดอุณหภูมิได้สูงสุด 100°C

รูปที่ 3-12 แสดงเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ



Model FRA400 แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 220 V แรงดันไฟฟ้าขาออก 220/380 V ความถี่ขาออก 1-120 Hz
ความแม่นยำ $\pm 0.2\%$ ของความถี่ขาออก

รูปที่ 3-13 แสดงเครื่องปรับความเร็วของมอเตอร์พัดลม



Model DA-43 ค่าความแม่นยำ $\pm 2\% +1$ หลัก โดยวัดค่าเป็น m/s

รูปที่ 3-14 แสดงเครื่องวัดความเร็วลม

Copyright by Mahidol University

3.5 ขั้นตอนการวางแผนและทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง อุณหภูมิค่าโดยใช้ปั๊มความร้อน

โดยการทดลองมีปัจจัยดังนี้

ปัจจัย A คือ $a_1 =$ อุณหภูมิ 40 °C

$a_2 =$ อุณหภูมิ 50 °C

$a_3 =$ อุณหภูมิ 60 °C

ปัจจัย B คือ $b_1 =$ ความเร็วลม 0.3 m/s

$b_2 =$ ความเร็วลม 0.6 m/s

$b_3 =$ ความเร็วลม 0.9 m/s

โดยมี 9 เงื่อนไขการทดลอง คือ ณ อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3 , 0.6 , 0.9 m/s ตามลำดับ ณ อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3 , 0.6 , 0.9 ตามลำดับ และ ณ อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.3 , 0.6 , 0.9 m/s ตามลำดับ และจากผลการทดลองเบื้องต้น (Screen test) แต่ละเงื่อนไข แบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา ดังนั้นจึงมีเงื่อนไขการทดลอง 27 การทดลอง โดยกำหนดให้หนึ่งเงื่อนไขการทดลอง ใช้ผักตบชวา 10 kg ดังนั้นจึงต้องใช้ผักตบชวา 270 kg มาทำการทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ จึงมีการทดลองทั้งหมด 81 การทดลอง โดยหนึ่งการทดลองจะต้องใช้ผักตบชวา 3,330 กรัม (3.33 kg) โดยมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

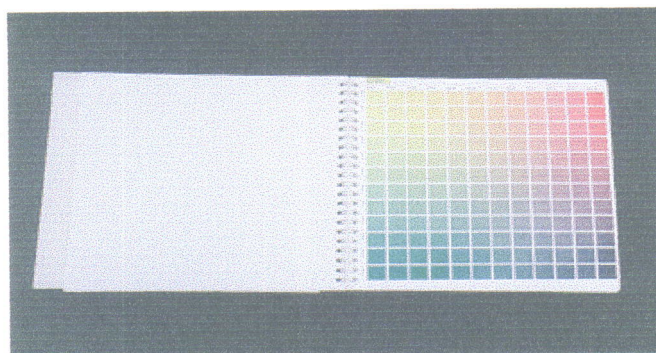
ขั้นที่ 1 เตรียมผักตบชวา

การเตรียมผักตบชวาทำการคัดเลือกผักตบชวาที่มีลำต้นตรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-2.5 cm ความยาวลำต้นประมาณ 60 cm นำมาล้างทำความสะอาดและผึ่งลม นำมาชั่งน้ำหนัก 3,330 g (3.33 kg) และจัดเรียงใส่ถาดตามแนวนอนถาดละประมาณ 23 ต้น จำนวน 4 ถาด

ขั้นที่ 2 ทดสอบทางด้านกายภาพก่อนอบแห้ง

การทดสอบทางด้านกายภาพก่อนการอบแห้ง โดยการนำผักตบชวาที่ได้กำหนดไว้จากการทำเครื่องหมาย จำนวน 9 ต้น ไปทำการทดสอบ สี รูปทรง และความเค้นดึง สำหรับการหาความชื้นจะหาจากน้ำหนักผักตบชวาทั้งหมด ซึ่งมีการทดสอบดังนี้

1) ด้านสี ทำการเทียบสีโดยใช้คู่มือ Process color Chart (รูปที่ 3-15) ซึ่งเป็นการแยกสีระบบ CIE Chromaticity System โดยทำการเทียบสีก่อนและหลังการอบแห้ง



เป็นคู่มือที่ใช้ในระบบ CIE Chromaticity system

รูปที่ 3-15 แสดงคู่มือเทียบสี Process color chart

- 2) ด้านรูปทรง โดยการสังเกตรูปทรงของผักตบชวาก่อนอบ และทำเครื่องหมายเป็นสัญลักษณ์ไว้ที่ต้น เพื่อเปรียบเทียบรูปทรงหลังการอบแห้ง
- 3) ด้านความชื้น สามารถหาความชื้นของผักตบชวาได้โดยวิธีการเปรียบเทียบน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนัก (รูปที่ 3-16) ผักตบชวาก่อนและหลังอบแห้ง และนำมาคำนวณหาค่าความชื้นสุดท้าย ได้จากสมการที่ (3-20)

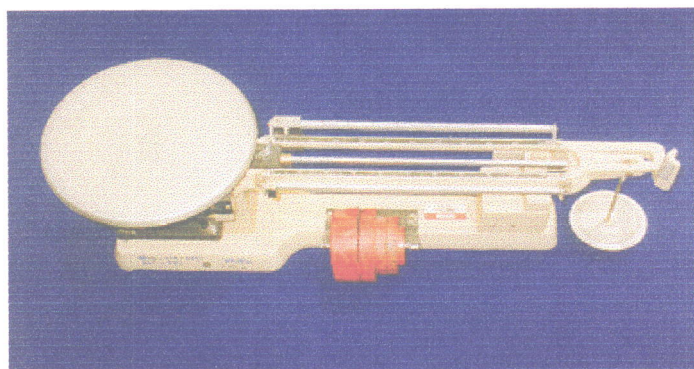
$$M_f = (W_i - d) / d \tag{3-20}$$

เมื่อ

M_f = ความชื้นสุดท้ายของผักตบชวาที่ผ่านการอบแห้ง, %db

W_i = น้ำหนักเริ่มต้นของผักตบชวาก่อนอบแห้ง, g

d = มวลของผักตบชวาแห้ง (ไม่มีความชื้น), g



เครื่องชั่งน้ำหนัก โดยใช้หน่วยเป็น g ค่าความคลาดเคลื่อน ± 1 g

รูปที่ 3-16 แสดงเครื่องชั่งน้ำหนัก

4) ด้านความเค้นดึง การทดสอบความเค้นดึงของผักตบชวาก่อน และหลังอบแห้ง สามารถทดสอบ โดยการนำผักตบชวาที่เป็นตัวแทนทั้ง 9 ต้น มาทำการทดสอบความเค้นดึงโดยการนำเอาแต่ละต้นมาทำการตัดออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงต้น ช่วงกลาง และช่วงปลาย ช่วงละ 20 cm แล้วนำมาทดสอบความเค้นดึงเพื่อหาความเค้นดึงเฉลี่ยทั้งต้น โดยนำไปทดสอบกับเครื่องทดสอบ Universal testing machine (รูปที่ 3-17) ณ ห้องปฏิบัติการวิทยาลัยเทคนิคสระบุรี โดยมีขั้นตอนการทดสอบความเค้นดึงดังต่อไปนี้

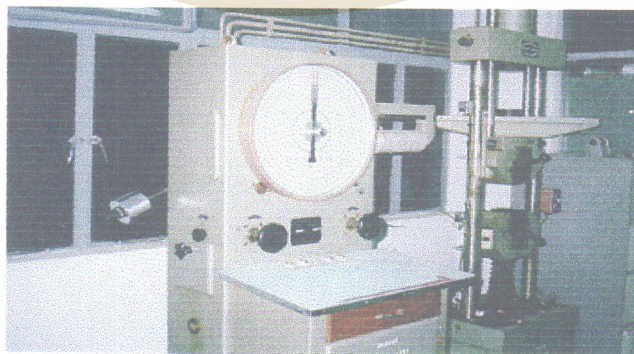
- 4.1) วัดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นทดสอบโดยใช้เวอร์เนีย แล้วบันทึกค่า
- 4.2) นำชิ้นทดสอบใส่หัวจับเครื่องทดสอบ โดยให้ระยะหัวจับได้ 13 cm
- 4.3) เพิ่มแรงจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดจากกันบันทึกค่าแรงที่ได้
- 4.4) ถอดชิ้นทดสอบออกจากเครื่องทดสอบ

ค่าแรงที่ได้เป็นค่าแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดผักตบชวา มีหน่วยเป็น N เมื่อต้องการหาค่าแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัด หรือ ความเค้นดึง (Tensile stress) ของผักตบชวา คำนวณได้สมการที่ (3-21)

$$\sigma_t = F/A \tag{3-21}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \text{ความเค้นดึงของผักตบชวา, N/mm}^2 \\ F &= \text{แรงที่กระทำต่อผักตบชวา, N} \\ A &= \text{พื้นที่หน้าตัดของผักตบชวา, mm}^2 \end{aligned}$$



Model WE-50 ค่าความละเอียดในการวัด 0.02 kN/Div ความคลาดเคลื่อนของเครื่อง ± 1% ของโหลดสูงสุด โดยการทดสอบความเค้นดึง หน่วยวัดค่าเป็น N/mm²

รูปที่ 3-17 แสดงเครื่องทดสอบ Universal testing machine

ขั้นที่ 3 ขั้นตอนการอบแห้ง

การอบแห้งโดยการจัดเรียงผักตบชวาใส่ถาดตามแนวนอนถาดละประมาณ 23 ต้น จำนวน 4 ถาด โดยมีขั้นตอนการอุ่นเครื่องเช่นเดียวกับการทำ Screen test และทำการอบแห้งที่ อุณหภูมิ ความเร็วลม และช่วงเวลาต่าง ๆ ดังนี้

- อุณหภูมิ 40 °C, ความเร็วลม 0.3 , 0.6 และ 0.9 m/s , 3 ช่วงเวลา
- อุณหภูมิ 50 °C, ความเร็วลม 0.3 , 0.6 และ 0.9 m/s , 3 ช่วงเวลา
- อุณหภูมิ 60 °C, ความเร็วลม 0.3 , 0.6 และ 0.9 m/s , 3 ช่วงเวลา

ทำการอบแห้ง จำนวน 3 ชั่วโมง

ขั้นที่ 4 ทดสอบทางด้านกายภาพหลังอบแห้ง

การทดสอบทางด้านกายภาพหลังอบแห้ง โดยการนำผักตบชวาที่ทำเครื่องหมาย จำนวน 9 ต้น ทำการทดสอบ สี รูปทรง ความชื้น และความเค้นดึง ซึ่งมีการทดสอบเช่นเดียวกับ ขั้นที่ 2

ขั้นที่ 5 ประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง

การหาประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง คือ การนำผลจากการทดสอบผักตบชวา ก่อนอบแห้ง และหลังอบแห้งมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับการอบแห้งผักตบชวา

3.6 ขั้นตอนการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมา ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) เป็นการรวบรวมข้อมูลจากการทดลองกระบวนการอบแห้ง อุณหภูมิค่าโดยใช้ปั๊มความร้อน ซึ่งใช้ผักตบชวาเป็นกลุ่มตัวอย่างทดสอบ สถิติที่ใช้คือ ค่าเฉลี่ย

ผลที่ได้ คือ ทราบรายละเอียดว่าการทดลองทุกเงื่อนไขจะได้ค่าคุณภาพทางด้านกายภาพของผักตบชวา ด้าน สี รูปทรง ความชื้น และความเค้นดึง ตลอดจนทราบถึงความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งผักตบชวา

การรายงานผลด้านรูปทรงใช้วิธีการสังเกต และใช้ตารางแสดงผลข้อมูล ประกอบการอธิบาย

บทที่ 4

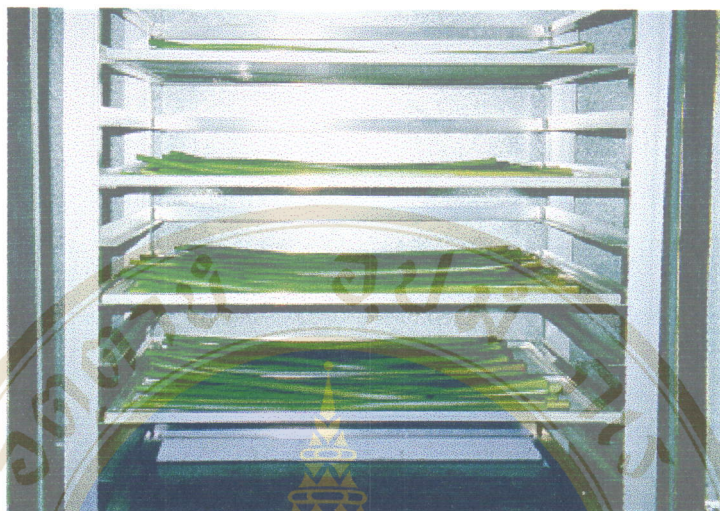
ผลการศึกษา

จากการศึกษา เรื่อง การออกแบบระบบการถ่ายเทความร้อนเพื่อการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ โดยใช้บั้งความร้อนสำหรับผลผลิตทางการเกษตร กรณีศึกษาอบแห้งผักตบชวา สามารถแบ่งผล การศึกษาออกเป็นประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

- 4.1 ผลการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาช่วงระยะเวลาเฉลี่ย
- 4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาก่อนและหลังการผ่าน กระบวนการอบแห้ง
- 4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพผลกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้บั้งความร้อน โดยมีรายละเอียดของผลการศึกษาในแต่ละประเด็นดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาช่วงระยะเวลาเฉลี่ย (Screen test)

จากการคัดเลือกผักตบชวา ขนาดลำต้น ประมาณ 2–2.5 cm ความยาว 60 cm นำ มาล้างทำความสะอาด และทำการชั่งน้ำหนัก 3,330 g จัดเรียงใส่ถาด เฉลี่ยถาดละ 23 ต้น จำนวน 4 ถาด เพื่อให้ได้น้ำหนักตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ และวางผักตบชวาได้ไม่แน่นจนเกินไป ดังรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 แสดงการจัดเรียงผักขบขวาในถาด

ทำการชั่งปริมาณน้ำที่ออกจากตู้อบ โดยใช้เครื่องชั่งแบบตຸ້มน้ำหนัก เท่ากับ 2,975 g
บันทึกค่าเวลาที่ได้จากการอบ ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงเวลาที่ได้จากการทดลองอบแห้งเบื้องต้น

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วลม (m/s)	เวลาที่ใช้อบแห้ง (hr)
40	0.3	42
	0.6	39
	0.9	36
50	0.3	24
	0.6	21
	0.9	18
60	0.3	15
	0.6	12
	0.9	9

จากตารางที่ 4-2 พบว่า ช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมากที่สุด คือ 42 hr อบแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3 m/s รองลงมา คือ 39 hr อบแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.6 m/s และช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยที่สุด คือ 9 hr อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

4.2 ผลการศึกษาคูสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาก่อนและหลังการผ่านกระบวนการอบแห้ง

จากข้อมูล การทดลองเบื้องต้น นำเวลาที่ได้จากการอบแห้ง ทั้ง 9 เงื่อนไข มาแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา เพื่อทำการอบแห้งโดยใช้ผักตบชวา 3,330 g ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยศึกษาทางด้านกายภาพก่อนและหลังที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง ดังนี้

ผลการศึกษาด้านกายภาพของผักตบชวา

4.2.1 ผลการศึกษาด้านสีของผักตบชวาก่อนและหลังการผ่านกระบวนการอบแห้ง

ก่อนผ่านกระบวนการอบแห้ง จากการทดสอบการอบแห้งผักตบชวาแต่ละช่วงการทดลอง ได้ผลการศึกษาด้านสีของผักตบชวา โดยทำการเทียบสีของผักตบชวาก่อนทำการอบแห้งโดยใช้คู่มือ Process color chart ของผักตบชวาก่อนทำการอบแห้ง สีของผักตบชวาจะมีสีเขียวอ่อน ซึ่งตามคู่มือ Process color chart กำหนดรหัสไว้เป็น 100 % Yellow 20 % Black (40 % M 50 % C) รายละเอียดดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 แสดงสีของผักตบชวาหลังกระบวนการอบแห้ง

ลำดับที่	อุณหภูมิ (°C) ความเร็วลม (m/s)	เวลาในการ อบแห้ง (hr)	สีหลังอบ
1	40 °C 0.3 m/s	14	Pale Green 100 Y 20 B (40 M, 50 C)
		28	Pale Green 90 Y 30 B (40 M, 50 C)
		42	Pale Green 90 Y 30 B (40 M, 50 C)
2	40 °C 0.6 m/s	13	Pale Green 100 Y 20 B (40 M, 50 C)
		26	Pale Green 90 Y 30 B (40 M, 50 C)
		39	Pale Green 90 Y 30 B (40 M, 50 C)
3	40 °C 0.9 m/s	12	Pale Green 100 Y 20 B (40 M, 50C)
		24	Pale Green 90 Y 30 B (40 M, 50 C)
		36	Pale Green 90 Y 30 B (40 M, 50 C)
4	50 °C 0.3 m/s	8	Pale Green 100 Y 20 B (40 M, 50 C)
		16	Pale Green 80 Y 30 B (30 M, 30 C)
		24	Pale Green 80 Y 30 B (30 M, 30 C)

ตารางที่ 4-2 (ต่อ) แสดงสีของผักตบชวาหลังกระบวนการอบแห้ง

ลำดับที่	อุณหภูมิ (°C) ความเร็วลม (m/s)	ช่วงเวลาในการ อบแห้ง (hr)	สีหลังอบ
5	50 °C 0.6 m/s	7	Pale Green 100 Y 20 B (40 M, 50 C)
		14	Pale Green 80 Y 30 B (30 M, 30 C)
		21	Pale Green 80 Y 30 B (30 M, 30 C)
6	50 °C 0.9 m/s	6	Pale Green 100 Y 20 B (40 M, 50 C)
		12	Pale Green 80 Y 30 B (30 M, 30 C)
		18	Pale Green 80 Y 30 B (30 M, 30 C)
7	60 °C 0.3 m/s	5	Pale Green 100 Y 20 B (40 M, 50 C)
		10	Pale Green 70 Y 20 B (40 M, 30 C)
		15	Pale Green 70 Y 20 B (40 M, 30 C)
8	60 °C 0.6 m/s	4	Pale Green 100 Y 20 B (40 M, 50 C)
		8	Pale Green 70 Y 20 B (40 M, 30 C)
		12	Pale Green 70 Y 20 B (40 M, 30 C)

ตารางที่ 4-2 (ต่อ) แสดงสีของผักตบชวาหลังกระบวนการอบแห้ง

ลำดับที่	อุณหภูมิ (°C) ความเร็วลม (m/s)	ช่วงเวลาในการ อบแห้ง (hr)	สีหลังอบ
9	60 °C 0.9 m/s	3	Pale Green 100 Y 20 B (40 M, 50 C)
		6	Pale Green 70 Y 20 B (40 M, 30 C)
		9	Pale Green 70 Y 20 B (40 M, 30 C)

เมื่อ

M = มาเจนตา (magenta) สีม่วงแดง (แดง + น้ำเงิน)

C = ซายัน (cyan) สีน้ำเงินเหลือง (เขียว + น้ำเงิน)

Y = สีเหลือง (Yellow)

B = สีดำ (Black)

จากตารางที่ 4-2 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมที่ทำให้สีของผักตบชวามีการเปลี่ยนแปลง
ทำการทดสอบสีของผักตบชวาโดยใช้ Process color chart จากการทดสอบสีผักตบชวาสด จะมีสี
Pale green กลุ่ม 100 % Yellow 20 % Black (40 % M, 50 % C) และหลังจากการอบแห้งช่วง
ระยะเวลาต่างๆ พบว่า

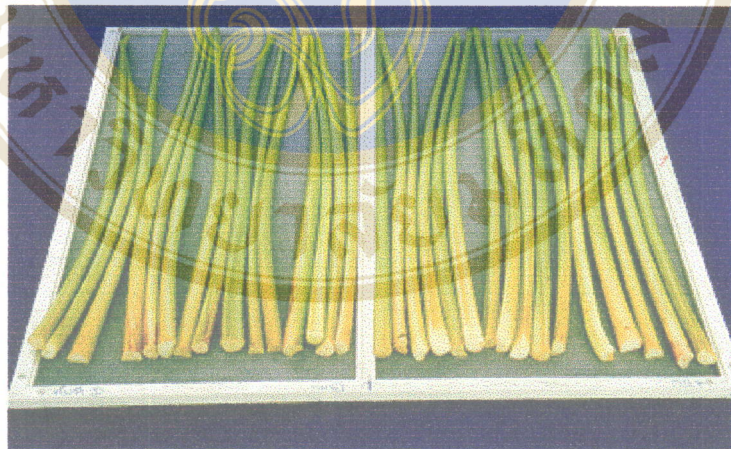
ก) เมื่ออุณหภูมิคงที่ ในช่วงระยะเวลาต่างๆ จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสีของผักตบชวา
คือ ณ อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 2 m/s ช่วงเวลาที่ 1 ช่วงเวลาที่ 2 และช่วงเวลาที่ 3 การ
เปลี่ยนแปลงสีของผักตบชวาเฉลี่ย คือ Pale green 100% Yellow 20% Black (40%M, 50%C)
90%Yellow 30%Black (40%M, 50%C) และ 90% Yellow 30% Black (40%M, 50%C) ตามลำดับ
ส่วนที่ความเร็วลม 4 m/s และ 6 m/s การทดสอบพบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจะทำให้สีของ
ผักตบชวามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สำหรับอุณหภูมิ 50 °C และ 60 °C จะมีการเปลี่ยนแปลงสี
ของผักตบชวาในลักษณะเดียวกัน

ข) เมื่ออุณหภูมิคงที่ ความเร็วลมต่างกันจากการทดสอบ พบว่า ความเร็วลมไม่มีผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของผักตบชวาคือ ก่อนอบแห้งผักตบชวาจะมีสีเขียวอ่อน เทียบสีกับ Process color chart จะได้ Pale green 100 % Yellow 20 % Black (40 % M, 50 % C) เมื่ออบแห้ง ณ อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 2, 4 และ 6 m/s เมื่อเทียบสีจะได้สี Pale green 90 % Yellow 30 % Black (40 % M, 50 % C) ส่วนที่อุณหภูมิ 50 °C และที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นในลักษณะเช่นเดียวกัน

ค) เมื่อความเร็วลมคงที่ อุณหภูมิต่างกัน มีผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสีของผักตบชวา คือ ณ อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C เทียบสีจะได้ Pale green 90 % Yellow 30 % Black (40 % M, 50 % C) 80 % Yellow (30 % M, 30 % C) และ 70 % Yellow 20 % Black (40 % M, 30 % C)

4.2.2 ผลการศึกษาด้านรูปทรงของผักตบชวาก่อนและหลังการผ่านกระบวนการอบแห้ง

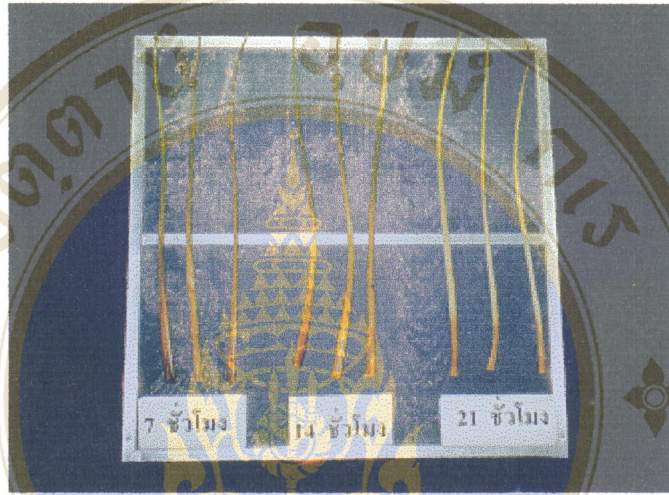
ก่อนนำผักตบชวาไปทำการอบแห้งด้านรูปทรงของผักตบชวาที่คัดเลือกโดยเฉลี่ย ลำต้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-2.5 cm มีความยาว 60 cm และมีลักษณะของลำต้นอวบตรงปลายเรียว มีลักษณะการอวบน้ำ ดังรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 แสดงรูปทรงของผักตบชวา

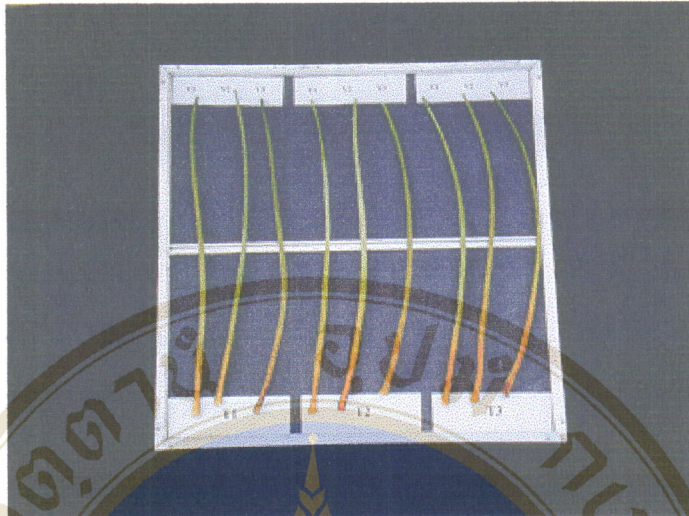
ภายหลังการอบแห้งในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่ต่างกัน พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงของรูปทรง ดังนี้

ก) ณ ระดับอุณหภูมิที่ 50°C และความเร็วลมที่ 0.6 m/s ในช่วงระยะเวลาต่างกัน พบว่า เมื่อทำการอบแห้งโดยใช้ระยะเวลานาน จะมีการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงผักตบชวา คือ ลำต้นมีลักษณะแห้งลง โดยเฉพาะปลายลำต้น และมีรูปทรงบิดโค้งด้านปลายค่อนข้างมาก ดังรูปที่ 4-3



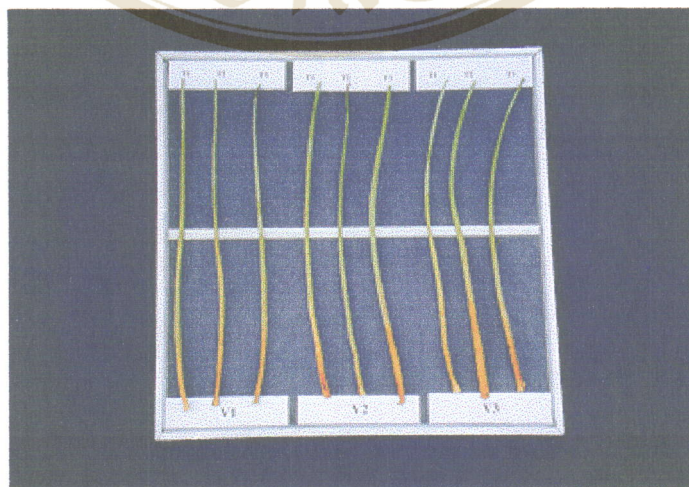
รูปที่ 4-3 แสดงการอบแห้งช่วงระยะเวลาต่าง ๆ

ข) ณ ระดับอุณหภูมิที่ 40°C , 50°C และ 60°C ความเร็วลม 0.3 , 0.6 และ 0.9 m/s พบว่า ระดับความเร็วลมที่ 0.9 m/s มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงผักตบชวา คือ มีลักษณะรูปทรงบิดโค้ง ด้านปลายของลำต้นมีลักษณะแห้งมากที่สุดกว่าส่วนอื่น รองลงมา ได้แก่ ความเร็วลม 0.6 และ 0.3 m/s ตามลำดับดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของฝักตบขวาที่ความเร็วลมต่างๆ

ค) ณ ระดับความเร็วลม 0.3 , 0.6 และ 0.9 m/s ตามลำดับ อุณหภูมิ 40 , 50 และ 60 °C พบว่า ณ ระดับอุณหภูมิ 60 °C จะมีผลทำให้รูปทรงของฝักตบขวาเปลี่ยนแปลงมากที่สุด คือ มีลักษณะบิดโค้งด้านปลาย บริเวณปลายลำต้นแห้งและงอ ลำต้นโดยรวมค่อนข้างแห้ง รong ลงมาที่อุณหภูมิ 50 °C และ 40 °C ตามลำดับ ดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของฝักตบขวาที่อุณหภูมิต่างๆ

ดังนั้น ในการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของฝักตบชวา ภายหลังจากการอบแห้ง พบว่า ปัจจัยสำคัญที่มีผลทำให้รูปทรงฝักตบชวาเปลี่ยนแปลง คือ ความเร็วลม รองลงมา คือ ปัจจัยด้าน อุณหภูมิ และเวลา ตามลำดับ

4.2.3 ผลการศึกษาด้านความชื้นของฝักตบชวาก่อนและหลังการผ่านกระบวนการอบแห้ง

จากการทดลองการอบแห้งฝักตบชวาในแต่ละช่วงเวลา ทุกการทดลองจะทำการ ชั่งน้ำหนักก่อนทำการอบแห้ง ซึ่งกำหนดให้มือน้ำหนักเท่ากับ 3,330 g โดยมีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 970 % db และความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 14 % db โดยทำการอบแห้ง ณ อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3, 0.6 และ 0.9 m/s ได้ผลการศึกษาทางด้านน้ำหนักและความชื้นของฝักตบชวา มีรายละเอียด ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 แสดงความชื้นของฝักตบชวาหลังกระบวนการอบแห้ง ณ อุณหภูมิ 40 °C

ความเร็วลม (m/s)	ช่วงเวลาในการอบแห้ง (hr)	น้ำหนักหลังอบ (g)	ความชื้นหลังอบ (% db)
0.3	14	1,356	335.72
	28	604	94.08
	42	355	14.07
0.6	13	1,345	332.18
	26	548	76.09
	39	355	14.07
0.9	12	980	214.89
	24	396	27.25
	36	355	14.07

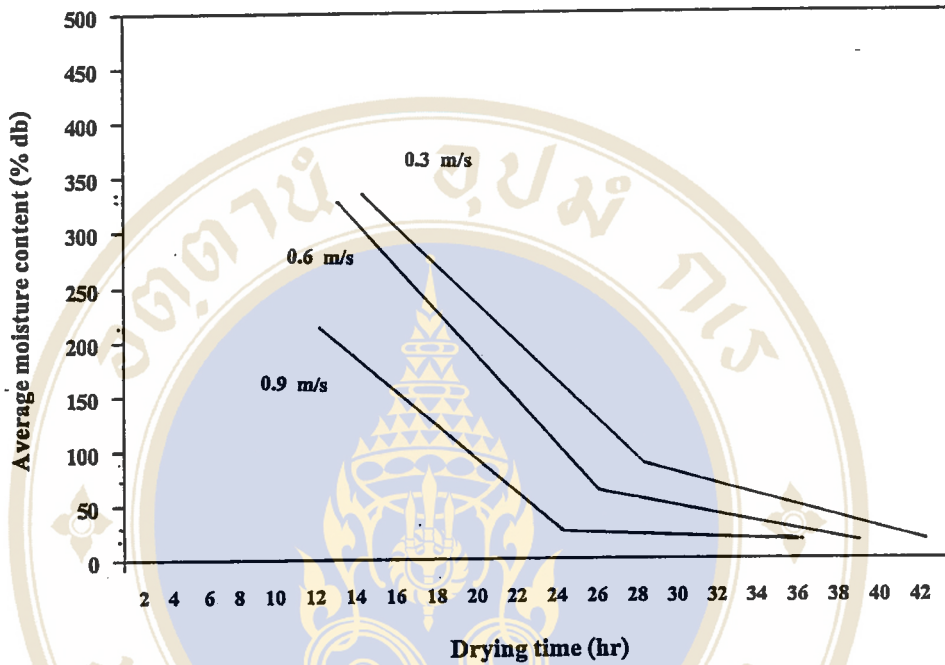
จากตารางที่ 4-3 พบว่า

ณ อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 14, 28 และ 42 hr วัดปริมาณความชื้นได้ 335.72, 94.08 และ 14.07 % db ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.6 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 13, 26 และ 36 hr วัดปริมาณความชื้นได้ 332.18, 76.09 และ 14.07 % db ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.9 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 12, 24 และ 36 hr
 วัดปริมาณความชื้นได้ 214.89, 27.25 และ 14.07 % db ตามลำดับ

โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลา ณ ระดับความเร็วลมต่างกัน ดังแผนภูมิที่ 4-1



แผนภูมิที่ 4-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเฉลี่ยแต่ละความเร็วลมกับเวลาที่ อุณหภูมิ 40 °C

จากแผนภูมิที่ 4-1 พบว่า การอบแห้งผักตบชวาที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม เท่ากับ 0.9 m/s สามารถดึงความชื้นออกจากผักตบชวาเหลือเพียง 14.07 % db ใช้เวลาน้อยที่สุด คือ 36 ชั่วโมง รองลงมาได้แก่ ที่ความเร็วลม 0.6 m/s ใช้เวลา 39 ชั่วโมง และที่ความเร็วลม 0.3 m/s ใช้เวลา 42 ชั่วโมง ตามลำดับ

ตารางที่ 4-4 แสดงความชื้นของฝักตบขวาหลังกระบวนการอบแห้ง ที่ อุณหภูมิ 50 °C

ความเร็วลม (m/s)	ช่วงเวลาในการอบแห้ง (hr)	น้ำหนักหลังอบ (g)	ความชื้นหลังอบ (% db)
0.3	8	1383	344.39
	16	422	35.59
	24	355	14.07
0.6	7	1539	394.52
	14	610	96.00
	21	355	14.07
0.9	6	1284	312.58
	12	452	45.24
	18	355	14.07

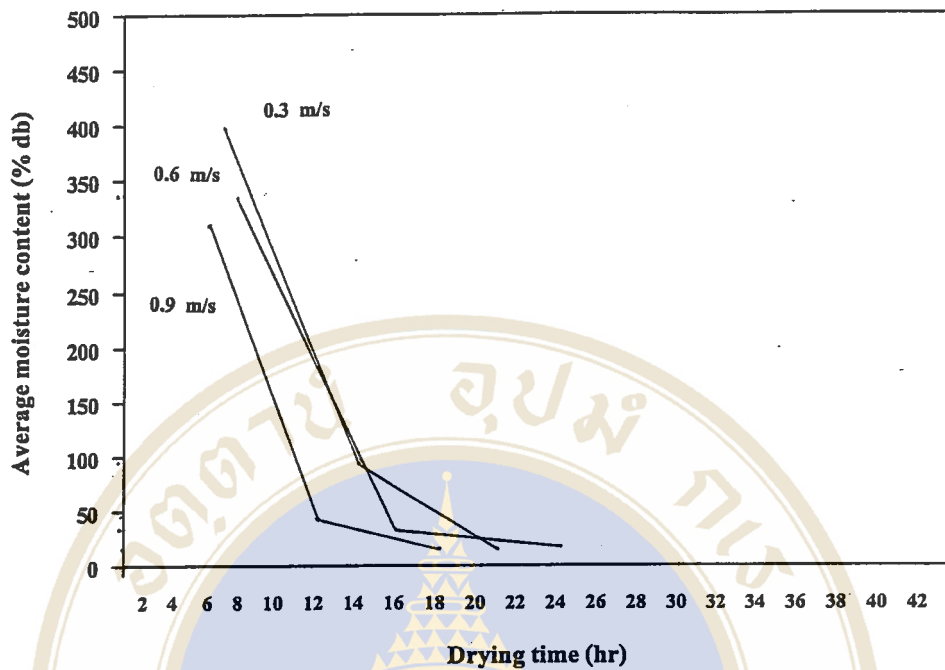
จากตารางที่ 4-4 พบว่า

ณ อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 8, 16 และ 24 hr วัดปริมาณความชื้นได้ 344.39, 35.59 และ 14.07 % db ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.6 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 7, 14 และ 21 hr วัดปริมาณความชื้นได้ 394.52, 96.00 และ 14.07 % db ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 6, 12 และ 18 hr วัดปริมาณความชื้นได้ 312.58, 45.24 และ 14.07 % db ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ของการอบแห้งฝักตบขวาที่อุณหภูมิ 50 °C ที่ความเร็วลมต่าง ๆ แสดงได้ดังแผนภูมิที่ 4-2



แผนภูมิที่ 4-2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเฉลี่ยแต่ละความเร็วลมกับเวลาที่อุณหภูมิ 50 °C

จากแผนภูมิที่ 4-2 พบว่า การอบแห้งผักตบชวาที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s สามารถดึงความชื้นออกจากผักตบชวาเหลือเพียง 14.07 %db ใช้เวลาน้อยที่สุด คือ 18 ชั่วโมง รองลงมา ได้แก่ ที่ความเร็วลม 0.6 m/s ใช้เวลา 21 ชั่วโมง และที่ความเร็วลม 0.3 m/s ใช้เวลา 24 ชั่วโมง ตามลำดับ

ตารางที่ 4-5 แสดงความชื้นของผักตบชวาหลังกระบวนการอบแห้ง ที่ อุณหภูมิ 60 °C

ความเร็วลม (m/s)	ช่วงเวลาในการอบแห้ง (hr)	น้ำหนักหลังอบ (g)	ความชื้นหลังอบ (% db)
0.3	5	1270	308.08
	10	405	30.14
	15	355	14.07
0.6	4	1609	417.01
	8	521	67.41
	12	355	14.07
0.9	3	1787	474.21
	6	640	105.65
	9	355	14.07

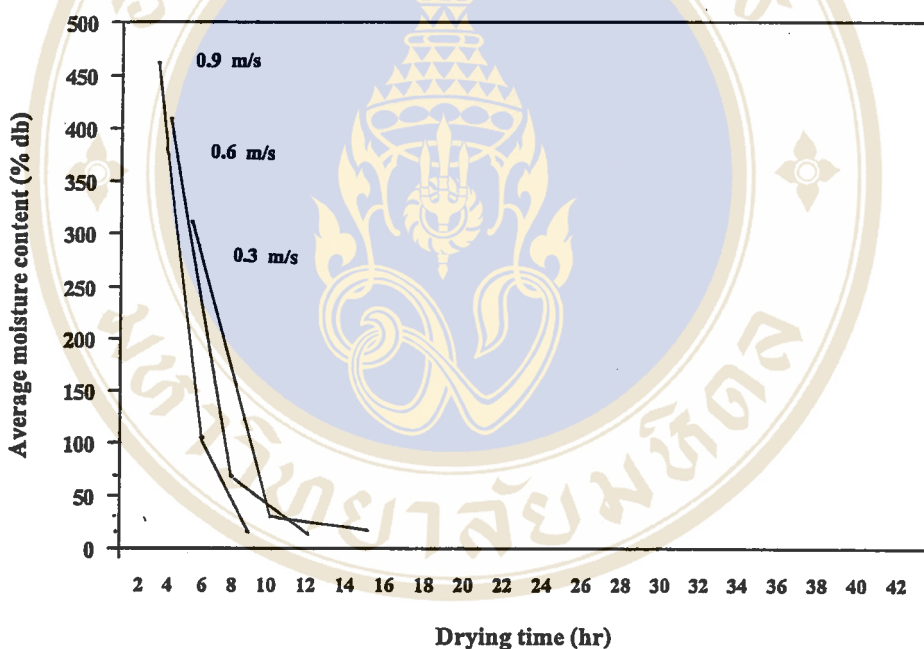
จากตารางที่ 4-5 พบว่า

ณ อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.3 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 5, 10 และ 15 hr วัดปริมาณความชื้นได้ 308.08, 30.14 และ 14.07 % db ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.6 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 4, 8 และ 12 hr วัดปริมาณความชื้นได้ 417.01, 67.41 และ 14.07 % db ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.9 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 3, 6 และ 9 hr วัดปริมาณความชื้นได้ 474.21, 105.65 และ 14.07 % db ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ของการอบแห้งผักตบชวาที่อุณหภูมิ 60 °C ที่ความเร็วลมต่าง ๆ แสดงได้ดังแผนภูมิที่ 4-3



แผนภูมิที่ 4-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเฉลี่ยแต่ละความเร็วลมกับเวลาที่อุณหภูมิ 60 °C

จากแผนภูมิที่ 4-3 พบว่า การอบแห้งผักตบชวาที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.9 m/s สามารถดึงความชื้นออกจากผักตบชวาเหลือเพียง 14.07 %db ใช้เวลาน้อยที่สุด คือ 9 ชั่วโมง รองลงมาได้แก่ที่ความเร็วลม 0.6 m/s ใช้เวลา 12 ชั่วโมง และที่ความเร็วลม 0.3 m/s ใช้เวลา 15 ชั่วโมง ตามลำดับ

4.2.4 ผลการศึกษาด้านความเค้นดึงของผักตบชวาก่อนและหลังที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง

จากการทดสอบการอบแห้งผักตบชวาแต่ละช่วงเวลา ทุกการทดลองได้ผลการศึกษาด้านความเค้นดึงของผักตบชวา มีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ 4-6 แสดงความเค้นดึงของผักตบชวาหลังกระบวนการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 40 °C

ความเร็วลม (m/s)	ช่วงเวลาในการอบแห้ง (hr)	ความเค้นดึงเฉลี่ย (N/mm ²)
0.3	14	0.62
	28	0.85
	42	1.95
0.6	13	0.65
	26	0.90
	39	2.00
0.9	12	0.68
	24	1.09
	36	2.13

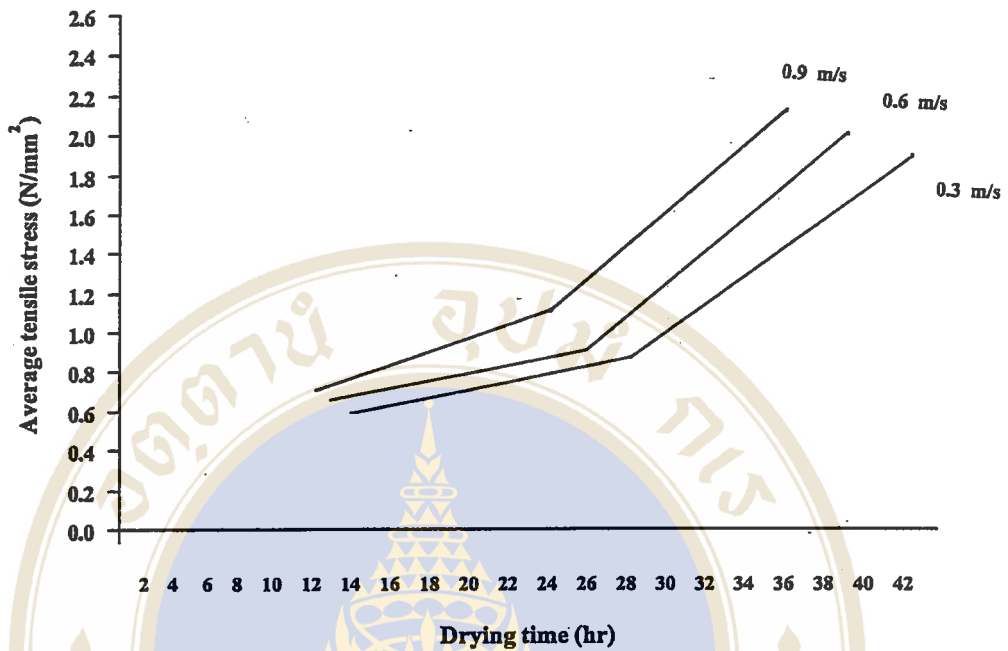
จากตารางที่ 4-6 แสดงความเค้นดึงของผักตบชวาก่อนและหลังกระบวนการอบแห้ง ได้ผลการทดลอง ดังนี้

ณ อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 14, 28 และ 42 hr ทดสอบความเค้นดึงได้ 0.62, 0.85 และ 1.95 N/mm² ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.6 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 13, 26 และ 39 hr ทดสอบความเค้นดึงได้ 0.65, 0.90 และ 2.00 N/mm² ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.9 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 12, 24 และ 36 hr ทดสอบความเค้นดึงได้ 0.68, 1.09 และ 2.13 N/mm² ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ของความเค้นดึงของผักตบชวา อบที่อุณหภูมิ 40 °C ที่ความเร็วลมต่าง ๆ แสดงได้ดังแผนภูมิที่ 4-4



แผนภูมิที่ 4-4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงเฉลี่ยแต่ละความเร็วลมกับเวลาเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C

จากแผนภูมิที่ 4-4 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C ที่ความเร็วลม 0.9 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 36 ชั่วโมง ความเค้นดึงของผักตบชวาเฉลี่ยเท่ากับ 2.13 N/mm² รองลงมา คือ ที่ความเร็วลม 0.6 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 39 ชั่วโมง ความเค้นดึงเฉลี่ยของผักตบชวา เท่ากับ 2.00 N/mm² และที่ความเร็วลม 0.3 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 42 ชั่วโมง ความเค้นดึงเฉลี่ยเท่ากับ 1.95 N/mm² ตามลำดับ

ตารางที่ 4-7 แสดงความเค้นดึงของผักตบชวาหลังกระบวนการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 50 °C

ความเร็วลม (m/s)	ช่วงเวลาในการอบแห้ง (hr)	ความเค้นดึงเฉลี่ย (N/mm ²)
0.3	8	0.70
	16	1.24
	24	2.15
0.6	7	0.75
	14	1.25
	21	2.06
0.9	6	0.76
	12	1.29
	18	2.04

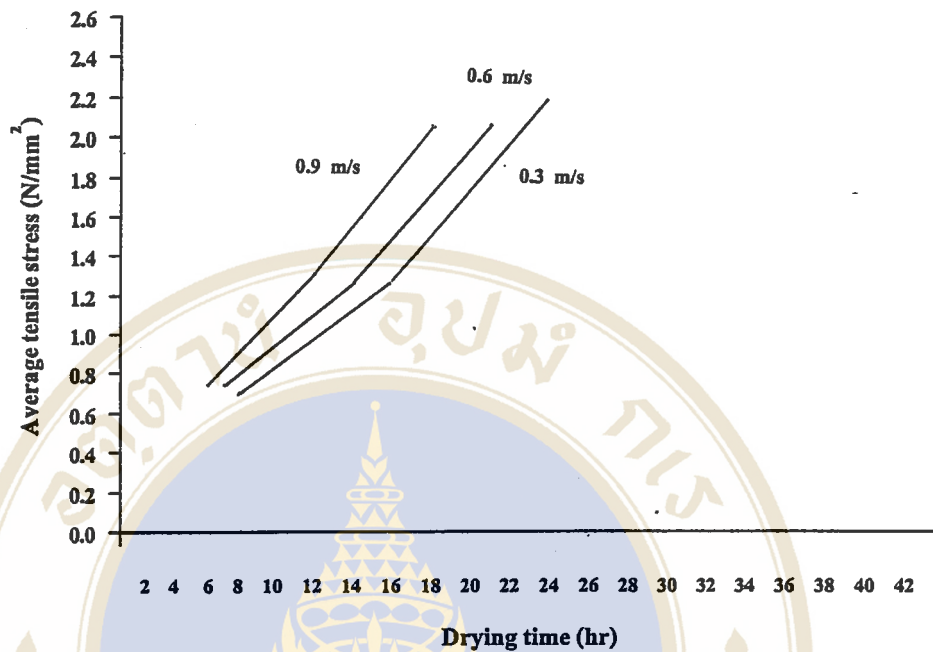
จากตารางที่ 4-7 แสดงความเค้นดึงของผักตบชวาก่อนและหลังกระบวนการอบแห้ง ได้ผลการทดลอง ดังนี้

ณ อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 8, 16 และ 24 hr ทดสอบความเค้นดึงได้ 0.70, 1.24 และ 2.15 N/mm² ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.6 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 7, 14 และ 21 hr ทดสอบความเค้นดึงได้ 0.75, 1.25 และ 2.06 N/mm² ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 6, 12 และ 18 hr ทดสอบความเค้นดึงได้ 0.76, 1.29 และ 2.04 N/mm² ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ของความเค้นดึงของผักตบชวา อบที่อุณหภูมิ 50 °C ที่ความเร็วลมต่าง ๆ แสดงได้ดังแผนภูมิที่ 4-5



แผนภูมิที่ 4-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงเฉลี่ยแต่ละความเร็วลมกับเวลาเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C

จากแผนภูมิที่ 4-5 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C ที่ความเร็วลม 0.9 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 18 ชั่วโมง ความเค้นดึงเฉลี่ยของผักตบชวาอบแห้ง เท่ากับ 2.04 N/mm² รองลงมาคือ ที่ความเร็วลม 0.6 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 21 ชั่วโมง ความเค้นดึงเฉลี่ยของผักตบชวาอบแห้ง เท่ากับ 2.06 N/mm² และที่ความเร็วลม 0.3 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 24 ชั่วโมง ความเค้นดึงเฉลี่ยของผักตบชวา เท่ากับ 2.15 N/mm² ตามลำดับ

ตารางที่ 4-8 แสดงความเค้นดึงของผักตบชวาหลังกระบวนการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 60 °C

ความเร็วลม (m/s)	ช่วงเวลาในการอบแห้ง (hr)	ความเค้นดึงเฉลี่ย (N/mm ²)
0.3	5	0.78
	10	1.46
	15	1.53
0.6	4	0.77
	8	1.30
	12	1.42
0.9	3	0.52
	6	0.98
	9	1.09

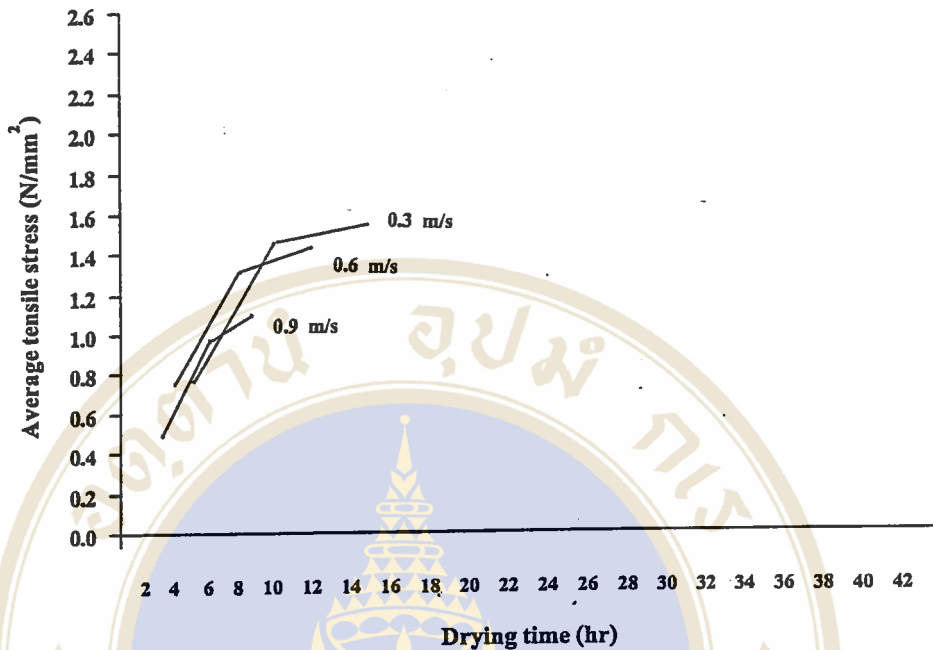
จากตารางที่ 4-8 แสดงความเค้นดึงของผักตบชวาก่อนและหลังกระบวนการอบแห้ง ได้ผลการทดลอง ดังนี้

ณ อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.3 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 5, 10 และ 15 hr ทดสอบความเค้นดึงได้ 0.78, 1.46 และ 1.53 N/mm² ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.6 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 4, 8 และ 12 hr ทดสอบความเค้นดึงได้ 0.77, 1.30 และ 1.42 N/mm² ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.9 m/s เมื่ออบแห้งในเวลา 3, 6 และ 9 hr ทดสอบความเค้นดึงได้ 0.52, 0.98 และ 1.09 N/mm² ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ของความเค้นดึงของผักตบชวา อบที่อุณหภูมิ 60 °C ที่ความเร็วลมต่าง ๆ แสดงได้ดังแผนภูมิที่ 4-6



แผนภูมิที่ 4-6 การเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงเฉลี่ยแต่ละความเร็วลมกับเวลาเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C

จากแผนภูมิที่ 4-6 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ที่ความเร็วลม 0.3 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 15 ชั่วโมง ความเค้นดึงเฉลี่ยของผักตบชวา เท่ากับ 1.53 N/mm² รองลงมา คือ ที่ความเร็วลม 0.6 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 12 ชั่วโมง ความเค้นดึงเฉลี่ยของผักตบชวา เท่ากับ 1.42 N/mm² และที่ความเร็วลม 0.9 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 9 ชั่วโมง ความเค้นดึงเฉลี่ยของผักตบชวา เท่ากับ 1.09 N/mm² ตามลำดับ

4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพผลกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ โดยใช้ป้มความร้อน

ในการศึกษาประสิทธิภาพผลของกระบวนการอบแห้งโดยใช้ผักตบชวาเป็นตัวอย่าง มีปัจจัยที่ใช้เป็นเกณฑ์การพิจารณาประสิทธิภาพผลของกระบวนการอบแห้ง ได้แก่

ด้านสีของผักตบชวา รูปทรง ความชื้น และความเค้นดึง พบว่า ปัจจัยด้านสี รูปทรง และความชื้นของผักตบชวาภายหลังการอบแห้ง ณ ระดับอุณหภูมิต่างกัน ไม่พบความแตกต่างในคุณสมบัติทั้ง 3 ประเด็นข้างต้น สำหรับปัจจัยด้านความเค้นดึง จากการศึกษาเปรียบเทียบ โดยนำผักตบชวาที่ผ่านการตากแดด จำนวน 3,330 g ทำการตากแดดช่วงเวลา 32 hr และทำการสุ่มตัวอย่าง จำนวน 9 ต้น นำมาตัดเป็น 3 ท่อน ๆ ละ 20 cm ได้จำนวนกลุ่มตัวอย่าง

ทั้งหมด 27 ตัวอย่าง นำมาวัดความเค้นดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine ได้ค่าความเค้นดึงเฉลี่ย 1.89 N/mm^2 จากนั้นนำค่าความเค้นดึงเฉลี่ยที่ได้จากการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อนไปเปรียบเทียบกับค่าความเค้นดึงเฉลี่ยที่ได้จากการตากแดด พบว่าความเค้นดึงเฉลี่ยที่มีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นดึงเฉลี่ย 1.89 N/mm^2 คือ การอบแห้งในช่วงอุณหภูมิที่ 60°C ณ ระดับความเร็วลม 0.3, 0.6 และ 0.9 m/s ตามลำดับ ดังแสดงตามแผนภูมิที่ 4-6

ดังนั้น จากการทดลองการอบแห้งผักตบชวาโดยใช้เครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อนอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน โดยพิจารณาจากคุณสมบัติด้านกายภาพ ได้แก่ สี รูปทรง ความชื้น และ ความเค้นดึง พบว่า การอบแห้งที่มีประสิทธิผล คือ ทำการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 40 และ 50°C ณ ระดับความเร็วลม 0.3, 0.6 และ 0.9 m/s นอกจากนั้นควรพิจารณาถึงระยะเวลาที่สั้นที่สุดที่ใช้ในการอบแห้ง จะช่วยให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งและประสิทธิผลการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 50°C ความเร็วลม 0.9 m/s

บทที่ 5

อภิปรายผลการศึกษา

จากการวิจัยเรื่องการออกแบบระบบการถ่ายเทความร้อนเพื่อการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ โดยใช้ปั๊มความร้อน สำหรับผลผลิตทางการเกษตร กรณีศึกษาอบแห้งผักตบชวา ได้ข้อมูลผลการวิจัยดังกล่าวมาแล้วสามารถ นำมาอภิปรายผลการศึกษา ในแต่ละประเด็น ดังนี้

- 5.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน
- 5.2 คุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาก่อนและหลังกระบวนการอบแห้ง
- 5.3 ประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน

5.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน

5.1.1 การออกแบบระบบปั๊มความร้อน

จากการคำนวณและเลือกใช้ขนาดของเครื่องอัดไอ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.6 kW และใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a ยี่ห้อ Maneurop และสามารถปรับระดับอุณหภูมิ ได้ค่า 60 °C ซึ่งสูงกว่าเครื่องอัดไอที่ใช้กับสารทำความเย็น ชนิด R 12 และ R 22

การเลือกใช้เครื่องควบแน่น ซึ่งมีจำนวน 2 ชุด คือ เครื่องควบแน่นชุดใน ขนาด 3.6 kW และเครื่องควบแน่นชุดนอก ขนาด 1.2 kW การคัดเลือกอุปกรณ์ดังกล่าว สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ว่าจ้างบริษัท ไอ.ซี กรุ๊ป จำกัด ดำเนินการผลิตเครื่องควบแน่นให้มีขนาดตามที่ต้องการ เพื่อให้เกิดความถูกต้อง เทียบตรง ตามแบบที่คำนวณได้

สำหรับการคัดเลือกอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ในระบบปั๊มความร้อน พิจารณาจากอุปกรณ์หลัก โดยคำนึงถึงขนาดที่เหมาะสม และได้รับความร่วมมือจากบริษัท แคนฟอส จำกัด ผู้นำเข้าเครื่องอัดไอเป็นผู้กำหนดขนาดของอุปกรณ์ จำนวน คุณภาพที่ใช้ ซึ่งช่วยประหยัดต้นทุนและเป็นอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

5.1.2 การออกแบบตู้อบแห้ง

การออกแบบตู้อบแห้งด้านใน มีขนาด กว้าง 1.2 m ยาว 2 m สูง 1.1 m มีขนาดปริมาตร 2.64 m³ และถาดบรรจุผลผลิตกัณฑ์ ขนาดกว้าง 0.9 m ยาว 0.9 m สูง 0.02 m จำนวน 18 ถาด สามารถทำการอบแห้งผลผลิตกัณฑ์ประเภท กล้วย สับปะรด มะละกอ ฯลฯ ได้สูงสุด

168 kg เมื่อนำมาใช้อบแห้งผักตบชวา สามารถบรรจุได้เพียง 25 kg เนื่องจากผักตบชวามีความยาว ใช้พื้นที่ในการวางตากมากกว่าผลิตภัณฑ์ตัวอื่น ดังนั้น การอบแห้งผักตบชวาให้ได้ปริมาณมาก ควรจัดวางผักตบชวาในรูปแบบอื่น ๆ เช่น การแขวน หรือ ออกแบบถาดผลิตภัณฑ์ให้ยาวและมีจำนวนชั้นมากขึ้น

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้อุปกรณ์ คือ เหล็ก และสังกะสี เป็นอุปกรณ์ในการสร้างตู้อบแห้ง ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนการผลิต ซึ่งการใช้เหล็กและสังกะสีเป็นส่วนประกอบ จะมีผลต่อการนำไปใช้อบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีเกลือเป็นองค์ประกอบหลัก อาจทำให้ผนังเครื่องอบแห้งเกิดการผุกร่อนได้ วิธีการแก้ไขควรใช้วัสดุประเภทอลูมิเนียม หรือ สเตนเลส แทน

5.1.3 การสร้างเครื่องอบแห้ง

จากการศึกษาครั้งนี้ ในการสร้างเครื่องอบแห้ง ผู้วิจัยดำเนินการโดยให้บริษัทสร้างขึ้นส่วน ได้แก่ โครงตู้อบแห้ง และท่อส่งลม โดยผู้วิจัยดำเนินการประกอบและติดตั้งระบบปั๊มความร้อนและหุ้มฉนวนใยแก้ว เนื่องจากอุปกรณ์หลักในการติดตั้งเครื่องอบแห้ง รวมทั้งขนาดของเครื่องอบแห้ง มีขนาดใหญ่กว่าและมีน้ำหนัก จำเป็นต้องใช้เครื่องมือช่วยในการขนย้ายและติดตั้ง ซึ่งต้องใช้แรงงานคนจำนวนมาก ดังนั้น ในการวางเครื่องอบแห้ง ควรคำนึงถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านค่าขนส่ง และค่าแรงงานด้วย

สำหรับขั้นตอนการหุ้มฉนวนใยแก้ว ผู้วิจัยเลือกใช้แบบติดฟอล์ยด้านเดียว โดยทำการทากาวยางที่ผนังท่อด้านนอกและติดฉนวนใยแก้วด้านที่ไม่มีฟอล์ยเข้าไปและทำการยึดรอยต่อด้านนอกโดยใช้เทปอลูมิเนียมติดกาว

5.2 คุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาก่อนและหลังกระบวนการอบแห้ง

จากการทดลองใช้ผักตบชวาเป็นผลิตภัณฑ์อบแห้ง จากการวิจัยสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

5.2.1 การศึกษาด้านสีของผักตบชวา

จากผลการศึกษาด้านสีของผักตบชวาก่อนและหลังที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ ความเร็วลม และระยะเวลาแตกต่างกัน จำนวน 81 การทดลอง พบว่าสีของผักตบชวาเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีของผักตบชวาสด ก่อนอบ มีสีเขียวอ่อน 100 % Yellow 20 % Black (40 % M , 50 % C) เมื่ออบแห้งจะมีสีเขียวอ่อนที่จางลงเป็น 70 % Yellow 20 % Black (40 % M , 30 % C) จากการทดลอง พบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผักตบชวาหลังการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ รองลงมาได้แก่ เวลาในการอบแห้ง ส่วนความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้ง ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผักตบชวา เนื่องมาจากผักตบชวาเป็นพืชที่ใช้คลอโรฟิลล์ในการ



สร้างสี เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจาก 40 , 50 และ 60 °C ตามลำดับ ทำให้คลอโรฟิลล์ของผักตบชวาเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้สีของผักตบชวาจางลง

5.2.2 การศึกษาด้านรูปทรงของผักตบชวา

จากผลการศึกษาด้านรูปทรงของผักตบชวา ก่อนและหลังการผ่านกระบวนการอบแห้ง ซึ่งทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ ความเร็วลม และระยะเวลาแตกต่างกัน จำนวน 81 การทดลอง พบว่า ตัวแปรที่ทำให้รูปทรงของผักตบชวา เกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด คือ ความเร็วลม รองลงมา ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลา ตามลำดับ เนื่องจาก ผักตบชวาเป็นพืชที่ประกอบไปด้วยเส้นใย และมีปริมาณน้ำในเส้นใยสูงกว่าพืชชนิดอื่น ทำให้เมื่อผ่านการอบแห้ง ปริมาณน้ำในเส้นใยลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้รูปทรงเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด และจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น ในช่วงการอบแห้งด้วยความเร็วลมสูงเพราะปริมาณลมร้อนในตู้อบแห้งจะช่วยให้การดึงน้ำในผักตบชวารวดเร็วยิ่งขึ้น ทำให้รูปทรงเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น

5.2.3 การศึกษาด้านความชื้นของผักตบชวา

จากผลการศึกษาด้านความชื้นของผักตบชวา ซึ่งทำการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้ง อุณหภูมิต่ำโดยใช้ปริมาณความร้อน จำนวน 81 การทดลอง เพื่อไปหาค่าปริมาณความชื้นที่ลดลงของผักตบชวา พบว่า ในระยะเริ่มแรกของการอบภายใต้เงื่อนไขทุกการทดลอง ปริมาณความชื้นจะถูกดึงออกจากผักตบชวาสูงมาก และเริ่มลดน้อยลงตามระยะเวลาที่อบ สำหรับปัจจัยด้านอุณหภูมิและความเร็วลมมีค่าต่ำ ปริมาณความชื้นที่ออกจากผักตบชวาจะมีค่าต่ำเช่นกัน แต่เมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมมีค่าสูงขึ้น ปริมาณความชื้นที่ออกจากผักตบชวาจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก อิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อการอบแห้ง ทำให้ผักตบชวาซึ่งโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน เมื่อได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นย่อมเกิดความแตกต่างระหว่างผิวและเนื้อวัสดุมากขึ้น ทำให้น้ำระเหยจากเนื้อมาสู่ผิวเร็วยิ่งขึ้น ส่วนความเร็วลมจะเป็นตัวช่วยดึงน้ำที่ออกมาจากผิวผักตบชวาไปสู่อากาศได้เร็วยิ่งขึ้น

5.2.4 การศึกษาด้านความเค้นดึงของผักตบชวา

จากผลการศึกษาด้านความเค้นดึงของผักตบชวาก่อนและหลังกระบวนการอบแห้ง โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ ความเร็วลม และระยะเวลาแตกต่างกันจำนวน 81 การทดลอง นำไปทดสอบความเค้นดึง โดยเครื่อง Universal testing machine พบว่า ตัวแปรที่ทำให้ความเค้นดึงของผักตบชวาเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น คือ เวลา เนื่องจาก ผักตบชวาก่อนและหลังการอบแห้ง มีปริมาณน้ำในเส้นใยมากเมื่อนำไปทดสอบความเค้นดึงจะมีค่าต่ำ และเมื่อผ่านการบวนการอบแห้ง

ปริมาณน้ำในเส้นใยลดลง ทำให้ผักตบชวามีความเหนียวมากขึ้น เมื่อนำไปทดสอบความเค้นดึงได้ค่าสูงขึ้น และเมื่อทำการอบแห้งไปจนกระทั่งความชื้นของผักตบชวาน้อยที่สุด จะทำให้ความเค้นดึงลดต่ำลง เนื่องจาก ผักตบชวา เกิดการกรอบและเปราะ

สำหรับอุณหภูมิและความเร็วลม มีผลทำให้ความเค้นดึงของผักตบชวาลดลง เนื่องมาจาก อุณหภูมิและความเร็วลมในช่วงสูง ๆ จะทำให้ปริมาณน้ำในผักตบชวา บริเวณผิวหนังนอกถูกดึงออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ผิวหนังนอกของผักตบชวาแห้งกรอบ เมื่อนำไปทดสอบความเค้นดึงจะได้ค่าความเค้นดึง มีปริมาณต่ำกว่าเมื่อนำไปอบแห้งด้วยอุณหภูมิและความเร็วลมในช่วงต่ำ ๆ

5.3 ประสิทธิภาพของการอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน

จากการศึกษาด้านประสิทธิภาพของการอบแห้ง โดยใช้เครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน ซึ่งพิจารณาคูณสมบัติทางกายภาพ คือ สี รูปทรง ความชื้น และความเค้นดึง พบว่าการอบแห้งผักตบชวา ควรใช้อุณหภูมิในช่วง 40°C ถึง 50°C เพราะจะทำให้ผักตบชวามีความเหนียวพอเหมาะ ไม่เปราะแห้ง สามารถนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ทางด้านหัตถกรรมได้เหมาะสม สำหรับด้านสี รูปทรง ความชื้น ไม่มีความแตกต่างกันสำหรับการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ และในการเลือกอุณหภูมิของการอบแห้งผักตบชวา รวมทั้งความเร็วลมที่เหมาะสม ก่อให้เกิดประสิทธิภาพการอบแห้งที่ดีที่สุด คือ การใช้อุณหภูมิในช่วง 50°C ความเร็วลม 0.9 m/s เนื่องจากการใช้อุณหภูมิดังกล่าว มีผลให้คุณสมบัติของผักตบชวา ด้าน รูปทรง สี ความชื้น ความเค้นดึง ได้มาตรฐาน และที่สำคัญใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ซึ่งมีผลโดยตรงต่อต้นทุนการใช้พลังงานต่ำด้วย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยเรื่องการออกแบบระบบการถ่ายเทความร้อน เพื่อการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ โดยใช้ปั๊มความร้อน สำหรับผลผลิตทางการเกษตร กรณีศึกษาอบแห้งผักตบชวา สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ ได้ดังนี้

6.1 สรุปผลการวิจัย

6.1.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน

6.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาก่อนและหลังการผ่านกระบวนการอบแห้ง

6.1.3 ประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

6.2.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งนี้

6.2.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

6.1 สรุปผลการวิจัย

6.1.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน

เครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อนที่ออกแบบและสร้างโดยใช้เหล็กกล่อง ขนาด $50 \times 50 \times 1.5$ mm ผนังตู้เป็นสังกะสี เบอร์ 18 บุด้วยฉนวนใยแก้ว ขนาดความหนาแน่น 32 Kg/m^3 หนา 40 mm มีขนาดด้านในตู้อบแห้ง กว้าง 1.2 m ยาว 2 m สูง 1.1 m ปริมาตรตู้อบแห้ง เท่ากับ 2.64 m^3 ภาชนะที่ใช้วางผลผลิตภัณฑ์เป็นแบบถาดสี่เหลี่ยม โค้งเป็นอลูมิเนียม พื้นถาดเป็นตะแกรงตาข่าย ขนาดกว้าง 0.9 m ยาว 0.9 m สูง 0.02 m จำนวน 18 ถาด โดยมีช่องว่างระหว่างชั้นของถาด 0.08 m ซึ่งการออกแบบเพื่อหาขนาดตู้อบแห้ง ได้ใช้วิธีการสุ่มหาค่าน้ำหนักที่เหมาะสม นำไปคำนวณหาขนาดตู้อบแห้ง ได้ใช้วิธีการสุ่มหาค่าน้ำหนักที่เหมาะสม นำไปคำนวณหาขนาดและจำนวนถาด เพื่อนำไปสู่การหาขนาดของตู้อบแห้ง

ขนาดของระบบปั๊มความร้อนประกอบด้วยเครื่องอัดไอ ขนาด 1.6 kW ใช้กับสารทำความเย็นชนิด R-134a ขนาดเครื่องควบแน่นชุดในขนาด 3.3 kW เครื่องควบแน่นชุดนอกขนาด 1.2 kW เครื่องทำระเหยขนาด 3.6 kW และท่อส่งลมทุกชิ้นหุ้มด้วยฉนวนใยแก้ว ซึ่งขนาดของระบบปั๊มความร้อนหาได้โดยอาศัยหลักพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ ตามทฤษฎีการทำงานของปั๊มความร้อน

6.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาก่อนและหลังการผ่านกระบวนการอบแห้ง

6.1.2.1 ด้านสีของผักตบชวา พบว่า ก่อนทำการอบแห้งผักตบชวา มีสีเขียวอ่อนเปรียบเทียบกับตาม Process color chart อยู่ที่รหัส Pale Green 100 % Yellow 20 % Black (40 % M , 50 % C) เมื่อทำการอบแห้ง ณ ระดับอุณหภูมิและความเร็วลมต่างกัน พบว่า สีของผักตบชวาลงการอบแห้งมีสีเขียวอ่อน แต่มีลักษณะจางลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่ารหัสตาม Process color chart คือ 90 % Yellow 30 % Black (40 % M , 50 % C) 80 % Yellow 30 % Black (30 % M , 30 % C) และ 70 % Yellow 20 % Black (40 % M , 50 % C)

6.1.2.2 ด้านรูปร่าง พบว่า ก่อนทำการอบแห้งผักตบชวา มีลักษณะลำต้นตรง อวบน้ำ ภายหลังทำการอบแห้งพบว่า รูปร่างของผักตบชวามีลักษณะคงเดิม ลำต้นแห้งมีขนาดเล็กลงบริเวณปลายลำต้นบิดงอโค้ง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผักตบชวามากที่สุด คือ ความเร็วลม รองลงมา ได้แก่ตัวแปรด้านอุณหภูมิและเวลา ตามลำดับ

6.1.2.3 ด้านความชื้น พบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณความชื้นในการอบแห้งผักตบชวา ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลม และเวลา โดยมีความชื้นเริ่มต้นก่อนการอบ 970 % db และความชื้นสุดท้ายหลังการอบ 14 % db

6.1.2.4 ด้านความเค้นดึง พบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อความเค้นดึงของผักตบชวา ภายหลังการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้ง คือ อุณหภูมิช่วง 40 °C ถึง 50 °C ความเค้นดึงเฉลี่ยช่วง 1.95 ถึง 2.15 N/mm²

6.1.3 ประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน

ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของการอบแห้งผักตบชวา คือ การใช้อุณหภูมิในช่วง 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 18 hr ผักตบชวาลงการอบแห้งมีสีเขียวอ่อนจาง 80% Yellow 30% Black (30%M 30%C) รูปร่างคงรูปมีขนาดเล็กลง ส่วนปลายบิดงอเล็กน้อย ความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 14.07 %db และมีค่าความเค้นดึงเฉลี่ย 2.04 N/mm²

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

6.2.1.1 จากการศึกษาครั้งนี้เครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อนซึ่งทำการทดลองอบแห้งผักตบชวา โดยทำการทดสอบทางด้านกายภาพ ได้แก่ สี รูปทรง ความชื้น และความเค้นดึง พบว่าเครื่องอบแห้งนี้สามารถทำได้ แต่อาจไม่เหมาะสมกับผู้ที่ต้องการนำไปอบแห้งรายย่อยซึ่งเป็นการอบแห้งปริมาณน้อย จะทำให้ไม่คุ้มกับการลงทุน เนื่องจากเครื่องอบแห้งนี้ยังมีราคาค่อนข้างสูง และต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก

6.2.1.2 สามารถนำผลการวิจัยด้านคุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาเป็นมาตรฐานสำหรับผลิตภัณฑ์เพื่อการหัตถกรรม โดยกำหนดให้ความชื้นสุดท้ายของผักตบชวามีค่า 14 %db ค่าความเค้นดึง เท่ากับ 1.09 ถึง 2.15 N/mm²

6.2.1.3 สามารถใช้เป็นแนวทางในพัฒนาเป็นเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อนไปใช้ในการ อบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอื่นๆ ได้ เช่น ผัก ผลไม้ เมล็ดพันธุ์พืช ฯลฯ

6.2.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งนี้

6.2.2.1 การออกแบบภาคที่ใช้กับเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อนเหมาะสมกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีรูปทรงขนาดเล็ก เช่น กลัวย พริก มะละกอ เป็นต้น การนำมาใช้อบผักตบชวาซึ่งมีลำต้นยาว ทำให้ออบได้ปริมาณน้อย ดังนั้นจึงควรออกแบบภาคที่ใส่ผลิตภัณฑ์ใหม่ หรือใช้วิธีการจัดวางโดยการแขวนในแนวตั้ง

6.2.2.2 การศึกษาด้านคุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวา ประสบปัญหาด้าน อายุพันธุ์ ขนาดของผักตบชวา ผู้วิจัยได้ทำการแก้ปัญหาโดยคัดเลือกผักตบชวาจากกลุ่มหัตถกรรมบ้านอ้อย อำเภอสรรพยา จังหวัดชัยนาท ซึ่งเป็นแหล่งเพาะปลูกผักตบชวาเพื่อการหัตถกรรมโดยเฉพาะ

6.2.3 ข้อเสนอแนะสำหรับในการวิจัยครั้งต่อไป

6.2.3.1 ควรทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อนขนาดมากกว่า หนึ่งตันความชื้น เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องต่อไป

6.2.3.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้ร่วมกันระหว่างการทำความชื้นและการอบแห้ง ในเครื่องอบแห้งโดยใช้ป้มความร้อนอุณหภูมิต่ำ

6.2.3.3 ควรมีการศึกษาวិเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านการลงทุนเกี่ยวกับการทำเครื่องอบแห้ง โดยนำป้มความร้อนไปใช้กับกลุ่มอุตสาหกรรมครัวเรือน และอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

รายการอ้างอิง

1. วรกาญจน์ โกศลพิศิษฐ์กุล. การส่งเสริมและพัฒนาการเกษตรไทย. วารสารส่งเสริมการลงทุน. 2540; 6:20-21.
2. กระทรวงพาณิชย์ กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์. องค์การการค้าโลก และกลุ่มเศรษฐกิจระหว่างประเทศ. กรุงเทพมหานคร: กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์; มปป.
3. สำนักนายกรัฐมนตรี สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ.2540-2544). กรุงเทพมหานคร: เม็ดทรายพริ้นติ้ง ; 2540.
4. กรมประชาสัมพันธ์ สำนักข่าว ส่วนข้อมูลและเอกสารข่าว. ประมวลพระบรมราโชวาทพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เนื่องในโอกาสพระราชพิธีมหามงคลเฉลิมพระชนมพรรษา 6 รอบ 5 ธันวาคม 2542. กรุงเทพมหานคร: ฝ่ายการพิมพ์ศูนย์ผลิตเอกสารและเผยแพร่ สำนักพัฒนาการประชาสัมพันธ์ กรมประชาสัมพันธ์; 2542.
5. อินฟอร์มเมชัน โพรไวเดอร์ แอนด์ คอนซัลแตนท์, บริษัทจำกัด. รายงานการศึกษาอุปทานสินค้าผักผลไม้แห้ง ดอง แช่แข็งและขนมหวานแบบไทย. กรุงเทพมหานคร; 2540.
6. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. ครั้งที่ 7. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2540.
7. ศานิต ชัชวาล. การศึกษาเบื้องต้นของการกำจัดน้ำเสียโดยใช้ผักตบชวา (วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทบัณฑิต แผนกวิชาวิศวกรรม สุขาภิบาล). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ; 2520.
8. รัชทิน ศยามานนท์. ปัญหาของผักตบชวาและแนวทางแก้ไขปัญหาในประเทศไทย. (เอกสารวิจัยส่วนบุคคล ลักษณะวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี). กรุงเทพฯ : วิทยาลัยป้องกันราชอาณาจักร ; 2540-2541.
9. วรวิทย์ รุ่งจิรวรรณ. การศึกษาระบบอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยแสงอาทิตย์ ขนาดอุตสาหกรรม. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ; 2538.

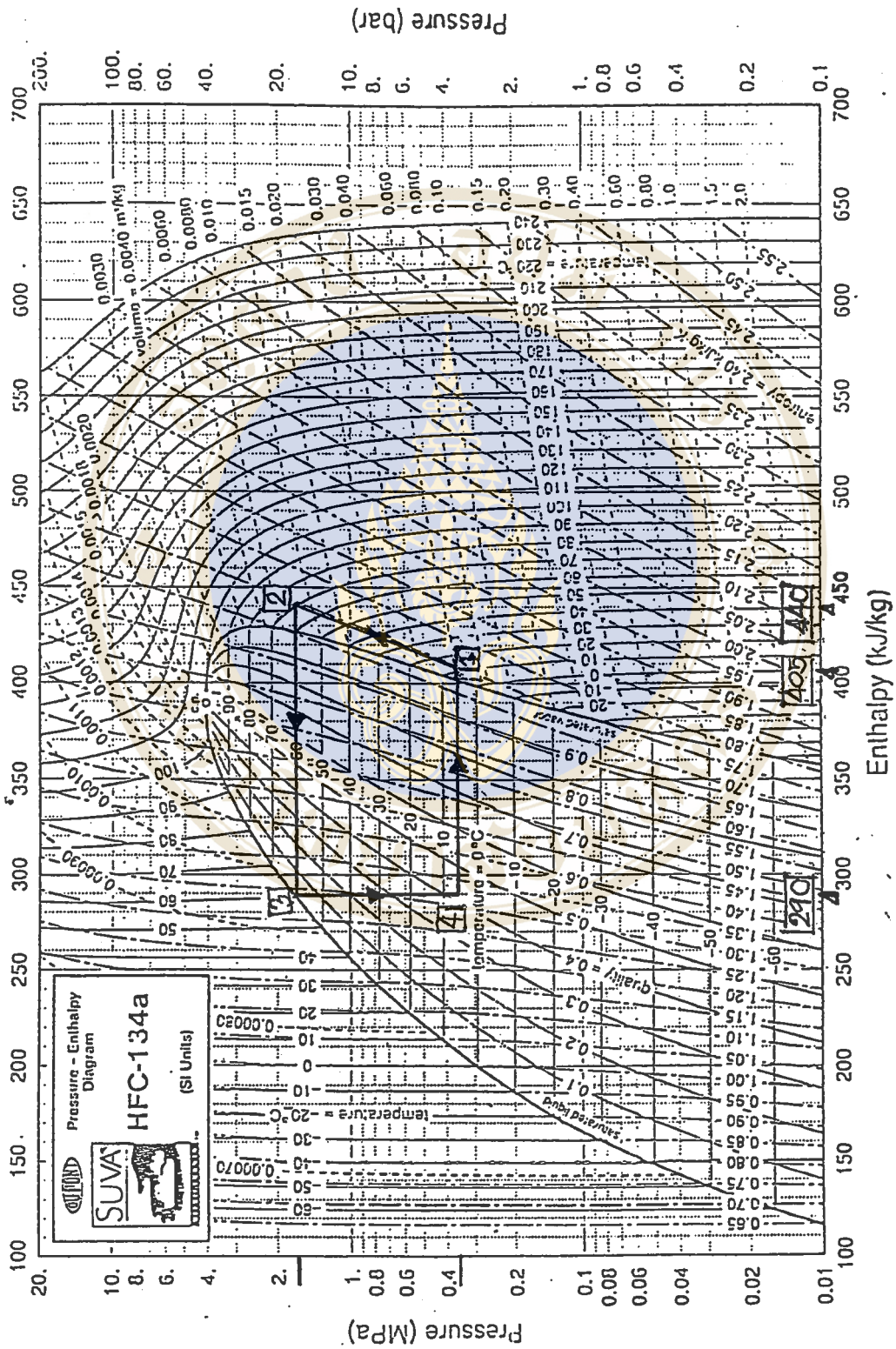
10. วัฒนพงษ์ รัชนีวิเชียร, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, วิลาศ ววงค์ และคณะ. รายงานเรื่องการพัฒนาเครื่องอบแห้งผลไม้ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดอุตสาหกรรม. ภาควิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ พิษณุโลก ; 2535.
11. ประทาน รักปรางค์. การอบแห้งผลไม้โดยใช้ป้มความร้อน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2539.
12. หลักการทำงานของระบบปรับอากาศ. วารสารเทคนิค. 2540; 143: 77-80.
13. วิวัฒน์ ตันชะพานิชกุล. อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น); 2525.
14. การตากแห้งโดยใช้ตู้อบแสงแดด. วารสารวิทยาศาสตร์. 2522; 33 : 59-61.
15. นฤตม บุญหลง. หลักการอุตสาหกรรมอาหาร. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2535.
16. ไพบุลย์ ชรรมรัตน์वासิก. กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โอ. เอส. พรินติ้ง เฮ้าส์; 2532.
17. สุรพล สายพานิช. ประโยชน์ของผักตบชวาด้านการเกษตรและวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. เอกสารประชุมวิชาการวิชาชีพแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2. จัดโดยสมาคมวิชาการวิชาชีพแห่งประเทศไทย; 2539.
18. ชนะ กสิการ. ความแข็งแรงของวัสดุ. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ชวนพิมพ์; 2528.
19. วีระวุฒิ ลิ้มตระกูล. การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งกล้วยแบบต่าง ๆ (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2538.
20. ทักษิณา ลอยจิรากุล. ลักษณะคุณสมบัติของการอบแห้งของผลิตภัณฑ์เกษตรบางชนิดในประเทศไทย (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2526.
21. ณัฐวุฒิ ดุษฎี. การพัฒนาระบบอบแห้งผลไม้โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานเสริม (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2534.

22. สุขฤดี สุขใจ. สมรรถนะของเครื่องอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยแสงอาทิตย์ : แบบหมุนเวียนและแบบต่อเนื่อง (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2525.
23. สมยศ จรรยาวิลาส, วายุห์ สนเทศ, มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์, สมบัติ มุกดา. ตู้อบแห้งแบบลดความชื้น. กรุงเทพฯ : สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2531.
24. อุษาวดี ผ่องลำเจียก. การศึกษาเปรียบเทียบระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์และปั๊มความร้อน (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2529.
25. Rossi SJ, Neves LC, Kieckbuseh TG. Thermodynamic and energetic evaluation of a heat pump applied to drying of vegetables. *Drying Technology* 1992 ; 10 : 1475-1484.
26. ฐานิตย์ เมธิยานนท์. การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนในระดับอุตสาหกรรม (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2541.
27. Chou SK, Howlader MNA, HO JC, Wijeysondera NE, Rajasekar S. Heat pump in the drying of food products. *International Journal of Energy Research* 1993 ; 14 : 397-406.
28. Clements S, Jia X, Jolly P. Experimental verification of a heat pump assisted continous dryer simulation model. *Internation Journal of Energy Research*, 1993 ; 17: 19-28.
29. ไพบุญย์ หังสพฤกษ์, เฮอิโซ ไชโต. การปรับอากาศ. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว; 2523.
30. Kenneth Wark JR. Table and figures to accompany thermodynamics. McGraw – Hill International Editions; 1989.
31. ARI Standard 410-72. Forced-Circulation Air-Cooling and Air-Heating Coils. Air-Conditioning and Refrigeration Institute; 1972.

32. **American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineering.**
ASHRAE Handbook 1981: 33.1-33.49.
33. Stoecker WF, Jones JW. **Refrigeration & Air Conditioning.** Singapore: McGraw-Hill
International Edition; 1982.
34. มณฑา ฝิวดำ . การวางแผนการทดลองและ สถิติที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร. อุดรธานี : สถาบัน
ราชภัฏอุดรธานี ; 2538.



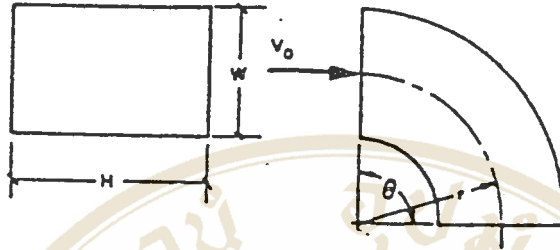




ตารางที่ ก-1 แสดงแรงดันและเอนทัลปีของระบบทำความร้อน

ตารางที่ ก-2 แสดงค่า Fitting Loss Coefficients

3-5 Elbow, Smooth Radius without Vanes, Rectangular



$$C_o = K_\theta K_{Re} C'_o$$

Coefficients for 90° Elbows

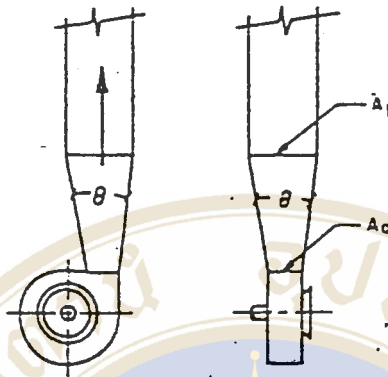
		C'_o										
		H/W										
r/W		0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0
0.5		1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	0.98	0.92	0.99	0.85	0.83
0.75		0.57	0.52	0.48	0.44	0.40	0.39	0.39	0.40	0.42	0.43	0.44
1.0		0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.27	0.21
1.5		0.22	0.20	0.19	0.17	0.15	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17
2.0		0.20	0.18	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15

4-3 Plane Diffuser, Rectangular



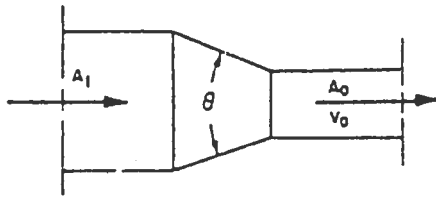
		C_o						
		θ , degrees						
A_1/A_0		14	20	30	45	60	90	180
2		0.09	0.12	0.20	0.34	0.37	0.38	0.35
4		0.16	0.25	0.42	0.60	0.68	0.70	0.66
6		0.19	0.30	0.48	0.65	0.76	0.83	0.80

4-9 Pyramidal Diffuser at Fan Outlet with Ductwork



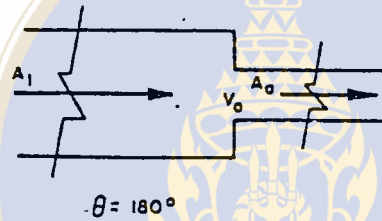
θ , deg	C_o					
	A_1/A_0					
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
10	0.10	0.18	0.21	0.23	0.24	0.25
15	0.23	0.33	0.38	0.40	0.42	0.44
20	0.31	0.43	0.48	0.53	0.56	0.58
25	0.36	0.49	0.55	0.58	0.62	0.64
30	0.42	0.53	0.59	0.64	0.67	0.69

5-1 Contraction, Round & Rectangular



C_c

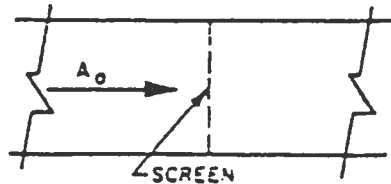
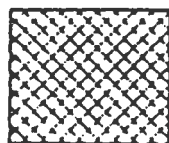
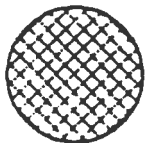
A_1/A_0	θ , degrees						
	10	15-40	50-60	90	120	150	180
2	0.05	0.05	0.06	0.12	0.18	0.24	0.26
4	0.05	0.04	0.07	0.17	0.27	0.35	0.41
6	0.05	0.04	0.07	0.18	0.28	0.36	0.42
10	0.05	0.05	0.08	0.19	0.29	0.37	0.43



C_c

A_1/A_0	θ , degrees						
	10	15-40	50-60	90	120	150	180
2	0.05	0.05	0.06	0.12	0.18	0.24	0.26
4	0.05	0.04	0.07	0.17	0.27	0.35	0.41
6	0.05	0.04	0.07	0.18	0.28	0.36	0.42
10	0.05	0.05	0.08	0.19	0.29	0.37	0.43

7-8 Obstruction, Screen in Duct, Round, and Rectangular



$$n = A_{or}/A_o$$

where

- n = free area ratio of screen, dimensionless.
- A_{or} = total flow area of screen, mm² (in.²).
- A_o = area of duct, mm² (in.²).

n	0.30	0.40	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.90	1.0
C_o	6.2	3.0	1.7	1.3	0.97	0.75	0.58	0.44	0.32	0.14	0

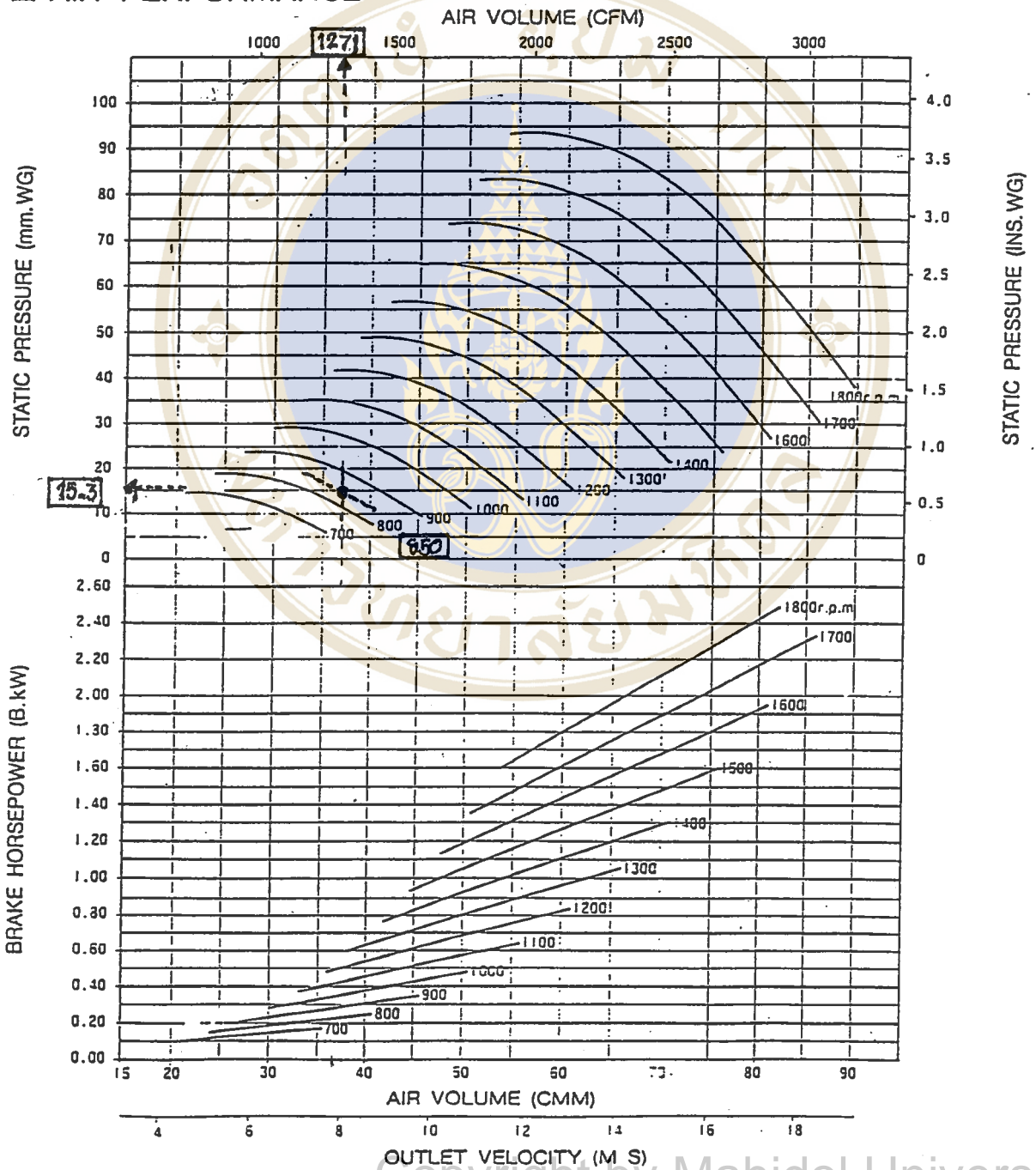
ตารางที่ ก-3 แสดงสมรรถนะของพัดลมยี่ห้อ National

SWSI CENTRIFUGAL FAN (FORWARD CURVED BLADE)

FY-10FCS-B

Floor-Mount Type Ceiling-Mount Type

AIR PERFORMANCE





ภาคผนวก ข

การหาน้ำหนักของผลิตภัณฑ์รวม

ในการหาน้ำหนักของผลิตภัณฑ์รวม จะแสดงถึงขีดความสามารถของเครื่องที่อบได้นั้นในเวลาที่กำหนด นอกจากนี้แล้วจะนำไปสู่ถึงการคำนวณจำนวนและขนาดถาดบรรจุผลิตภัณฑ์และขนาดตู้อบแห้ง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ข.1 กำหนดค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์

ค่าความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ 250 %db และความชื้นสุดท้าย 50 %db ซึ่งเป็นความชื้นของผลิตภัณฑ์ประเภทผักและผลไม้เช่น ถั่วเขียว มะละกอ สับปะรด จิง พริก เป็นต้น

ข.2 การคำนวณหาน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ โดยใช้วิธีการ Trial and error

วิธีการ Trial and error จะต้องทำการสุ่มค่า เพื่อหาค่าน้ำหนักมวลสุดท้ายให้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักมวลเริ่มต้น จำนวนจนกระทั่ง ค่า $|W_{i (new)} - W_{i (old)}| < 0.01$ จึงหยุดการคำนวณ ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณแสดงตาม Information flow Diagram ดังแผนภูมิที่ ข-1

ข.3 ผลการคำนวณโดยใช้วิธีการ Trial and error

เนื่องจากการคำนวณโดยใช้วิธีการ Trial and error เป็นการคำนวณ วนซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ผู้วิจัยได้แสดงการคำนวณในรอบที่ 1 ดังภาคผนวก ข.4 และขั้นตอนการคำนวณในรอบต่อไปก็ดำเนินการเช่นเดียวกันกับการคำนวณในรอบที่ 1 ดังนั้นเพื่อความสะดวกและรวดเร็ว ผู้วิจัยจึงใช้คอมพิวเตอร์โดย โปรแกรม Microsoft excel version 7.0 ช่วยในการคำนวณ ผลลัพธ์การคำนวณ ดังตารางที่ ข-1

ผลลัพธ์จากการคำนวณ ดังตารางที่ ข-1 จะได้ผลลัพธ์ของตัวแปรดังนี้

1. น้ำหนักของผลิตภัณฑ์รวม 168 kg
2. อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้ออบแห้ง 0.66 kg/s
3. อัตราการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ 96 kg
4. อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหย 0.195 kg/s

ตารางที่ ข-1 ผลลัพธ์การคำนวณโดยใช้วิธี Trial and error

W_i (old)	m_w (old)	m_w (old)	m_a	m_e	m_w (new)	m_w (new)	W_i (new)
50	28.5714286	0.0003307	0.1937765	0.0581329	0.0014027	121.1941861	212
212	121.1941714	0.0014027	0.8219602	0.2465881	0.0010007	86.4609003	151
151	86.4609143	0.0010007	0.5863931	0.1759179	0.0011515	99.4857807	174
174	99.4857714	0.0011515	0.6747300	0.2024190	0.0010949	94.6014934	166
166	94.6014857	0.0010949	0.6416039	0.1924812	0.0011161	96.4330877	169
169	96.4330857	0.0011161	0.6540262	0.1962078	0.0011082	95.7462425	168
168	96.0000000	0.0011111	0.6510889	0.1953267	0.0011101	95.9086485	168

เมื่อ

W_i (old) = น้ำหนักเก่าของผลิตภัณฑ์รวม, kg

m_e = อัตราการไหลของอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหย, kg/s ($m_e \cdot 0.3$)

m_w (old) = มวลน้ำที่ระเหยเก่าของผลิตภัณฑ์, kg (W_i (old) $\cdot 2/3.5$)

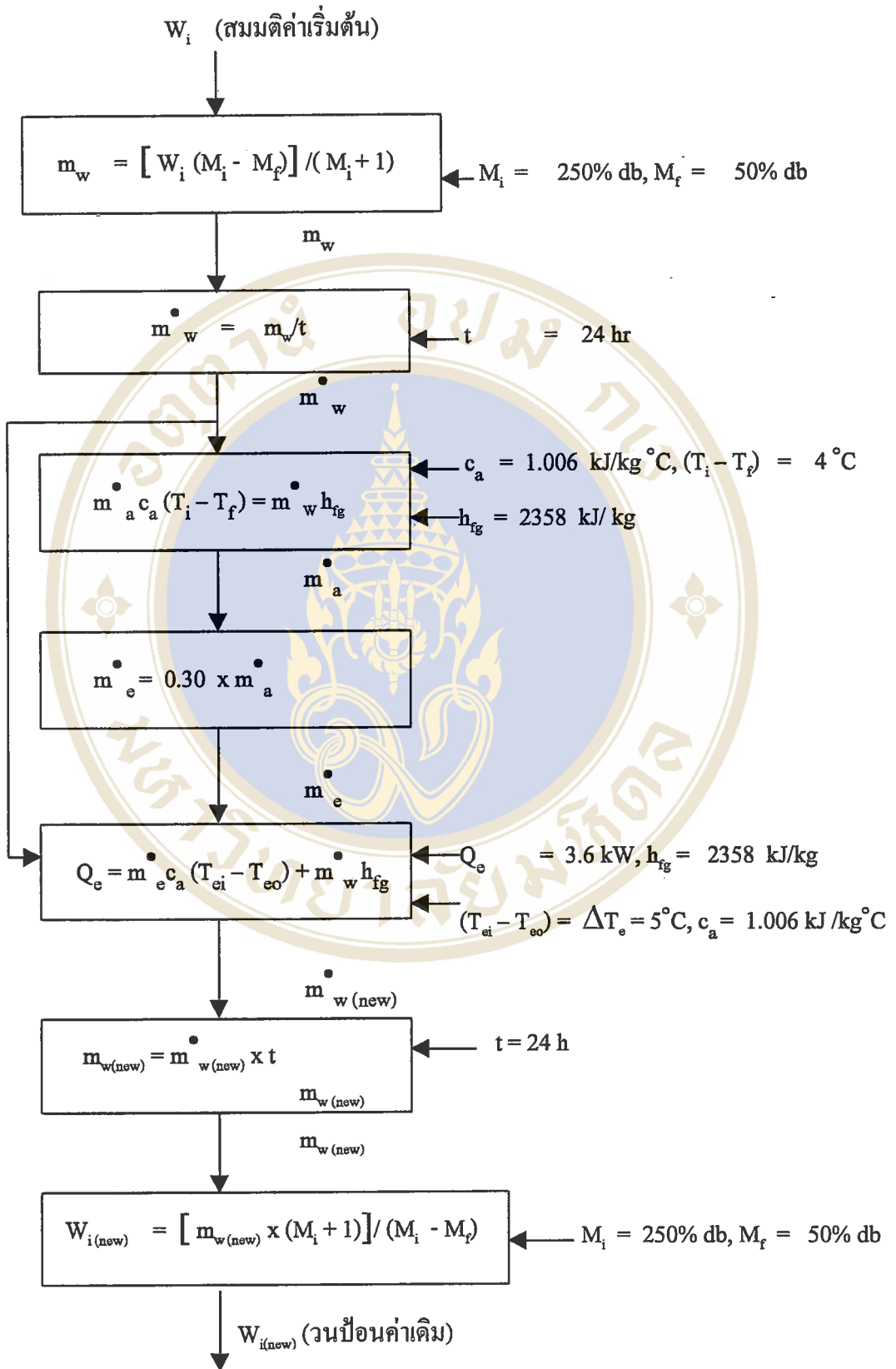
m_w (new) = อัตราการระเหยใหม่ของผลิตภัณฑ์, kg/s ($(3.6 - (5.03 \cdot m_e^2)) / 2,358$)

m_w (old) = อัตราการระเหยเก่าของผลิตภัณฑ์, kg/s (m_w (old) / (24 $\cdot 3,600$))

m_w (new) = มวลน้ำที่ระเหยใหม่ของผลิตภัณฑ์, kg (m_w (new) $\cdot 24 \cdot 3,600$)

m_a = อัตราการไหลของอากาศ, kg/s ($m_a \cdot 585.98$)

W_i (new) = น้ำหนักใหม่ของผลิตภัณฑ์รวม, kg (m_w (new) $\cdot 3.5/2$)



ข.4 ขั้นตอนการคำนวณโดยใช้วิธี Trial and error

ขั้นตอนการคำนวณที่แสดงนี้ เป็นตัวอย่างการคำนวณเพียงวนรอบที่ 1 เท่านั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. มวลน้ำที่ระเหยจากผลิตภัณฑ์ จากสมการของ Exce11 1980 (6) จะได้สมการที่ ข-1

$$m_{w(\text{old})} = [W_{i(\text{old})} (M_i - M_f)] / (M_i + 1) \quad (\text{ข-1})$$

เมื่อ

$$W_{i(\text{old})} = \text{น้ำหนักเก่าของผลิตภัณฑ์รวม, (สมมติค่า 50 kg)}$$

$$M_i = \text{ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์, (250 \% db)}$$

$$M_f = \text{ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์, (50 \% db)}$$

$$m_{w(\text{old})} = \text{มวลน้ำที่ระเหยเก่าของผลิตภัณฑ์, kg}$$

แทนค่าในสมการที่ ข-1 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} m_{w(\text{old})} &= [50 (2.5 - 0.5)] / (2.5 + 1) \\ &= 28.57 \text{ kg} \end{aligned}$$

2. อัตราการระเหยของมวลน้ำที่ออกจากผลิตภัณฑ์ จะได้จากสมการที่ ข-2

$$\dot{m}_{w(\text{old})} = m_{w(\text{old})} / t \quad (\text{ข-2})$$

เมื่อ

$$\dot{m}_{w(\text{old})} = \text{อัตราการระเหยเก่าของผลิตภัณฑ์, kg/s}$$

$$t = \text{เวลาที่ใช้อบแห้ง, 24 hr}$$

แทนค่าสมการที่ ข-2 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \dot{m}_{w(\text{old})} &= 28.57 / (24 \times 3600) \\ &= 0.33 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

3. อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

ที่ห้องอบแห้งทำการสมดุลพลังงานสำหรับการอบแห้ง (Energy Balance) ในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งเรามักสมมติกันว่า ความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์ เท่ากับ ความร้อนสัมผัสของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเมื่อไหลผ่านผลิตภัณฑ์ สามารถเขียนเป็นสมการ ได้ว่า

$$\dot{m}_w (\text{old}) h_{fg} = \dot{m}_a C_a (T_i - T_f) \quad (\text{ข-3})$$

จากสมการที่ ข-3 จัดสมการใหม่ จะได้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศดังสมการที่ ข-4

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_w (\text{old}) h_{fg}}{[C_a (T_i - T_f)]} \quad (\text{ข-4})$$

เมื่อ

$$\dot{m}_a = \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้ออบแห้ง, kg/s}$$

$$\dot{m}_w = \text{มวลของน้ำที่ระเหย, (0.33 x 10⁻³ kg/s)}$$

$$h_{fg} = \text{ความร้อนของการระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์, (2,358 kJ/kg ซึ่งได้จาก (30))}$$

$$C_a = \text{ความร้อนจำเพาะของอากาศ, (1.006 kJ/kg °C ซึ่งได้จากการเปิดตารางคุณสมบัติของอากาศ (30))}$$

$$(T_i - T_f) = \text{ความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศขาเข้า และออกจากห้องอบแห้ง, (4 °C ซึ่งได้จาก (6))}$$

แทนค่าสมการที่ ข-4 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= (0.33 \times 10^{-3} \times 2358) / (1.006 \times 4) \\ &= 0.1937 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

4. อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหย

จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า อัตราการไหลของมวลอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหย เป็น 30 % ของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ซึ่งได้จาก (28) ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ ข-5 ได้ว่า

$$\dot{m}_e = 0.3 \times \dot{m}_a \quad (ข-5)$$

เมื่อ

$$\dot{m}_e = \text{อัตราการไหลของมวลอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหย, kg/s}$$

$$\dot{m}_a = \text{อัตราการไหลของมวลอากาศ, (0.1937 kg/s)}$$

แทนค่าสมการที่ ข-5 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \dot{m}_e &= 0.3 \times 0.1937 \\ &= 0.0581 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

5. อัตราการระเหยของมวลน้ำจากผลิตภัณฑ์

สมดุลพลังงานสำหรับเครื่องทำระเหย ซึ่งความร้อนที่เครื่องทำระเหย เท่ากับ ผลรวมของความร้อนสัมผัสของอุณหภูมิที่ไหลผ่านเครื่องทำระเหยกับความร้อนแฝงการกลั่นตัวของอากาศ กลายเป็นหยดน้ำ ซึ่งเขียนเป็นสมการที่ ข-6 จะได้ว่า

$$Q_e = \dot{m}_e C_a \Delta T_e + \dot{m}_{w(new)} h_{fg} \quad (ข-6)$$

จากสมการที่ ข-6 จัดสมการใหม่ จะสามารถคำนวณอัตราการระเหยของมวลน้ำจากผลิตภัณฑ์ ได้จากสมการที่ ข-7 ซึ่งจะได้ว่า

$$\dot{m}_{w(new)} = (Q_e - \dot{m}_e C_a \Delta T_e) / h_{fg} \quad (ข-7)$$

เมื่อ

$$\dot{m}_{w(new)} = \text{อัตราการระเหยของมวลน้ำจากผลิตภัณฑ์, kg/s}$$

$$Q_e = \text{ความสามารถในการทำควมเย็นสุทธิของเครื่องทำระเหย, (3.6 kW)}$$

$$h_{fg} = \text{ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ, (2358 kJ/kg)}$$

$$\dot{m}_e = \text{อัตราการระเหยของมวลน้ำจากผลิตภัณฑ์, (0.0581 kg/s)}$$

$$C_a = \text{ความร้อนจำเพาะของอากาศ, (1.006 kJ/kg °C)}$$

$$\Delta T_e = \text{ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและขาออกเครื่องทำระเหย, (5 °C ซึ่งได้จาก ARI coil standard (31))}$$

แทนค่าสมการที่ ข-7 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \dot{m}_{w(new)} &= [3.6 - (0.0581 \times 1.006 \times 5)] / 2358 \\ &= 1.403 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

จากสมการที่ ข-2 จัดสมการใหม่จะได้ว่า

$$m_{w(new)} = \dot{m}_{w(new)} \times t \tag{ข-8}$$

เมื่อ

$$m_{w(new)} = \text{มวลน้ำที่ระเหยใหม่ของผลิตภัณฑ์ (kg)}$$

$$\dot{m}_{w(new)} = \text{อัตราการระเหยใหม่ของผลิตภัณฑ์, (1.403 x 10⁻³ kg/s)}$$

$$t = \text{เวลาที่ใช้อบแห้ง, (24 hr)}$$

แทนค่าสมการที่ ข-8 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} m_{w(new)} &= 1.403 \times 10^{-3} \times 24 \times 3600 \\ &= 121.2 \text{ kg} \end{aligned}$$

จากสมการที่ ข-1 จัดสมการใหม่ จะได้ว่า

$$W_{i(new)} = [m_{w(new)} \times (M_i + 1)] / (M_i - M_f) \quad (\text{ข-9})$$

เมื่อ

$$W_{i(new)} = \text{น้ำหนักใหม่ของผลิตภัณฑ์รวม, kg}$$

$$m_{w(new)} = \text{มวลน้ำที่ระเหยใหม่, (121.2 kg)}$$

$$M_i = \text{ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์, (250 \% db)}$$

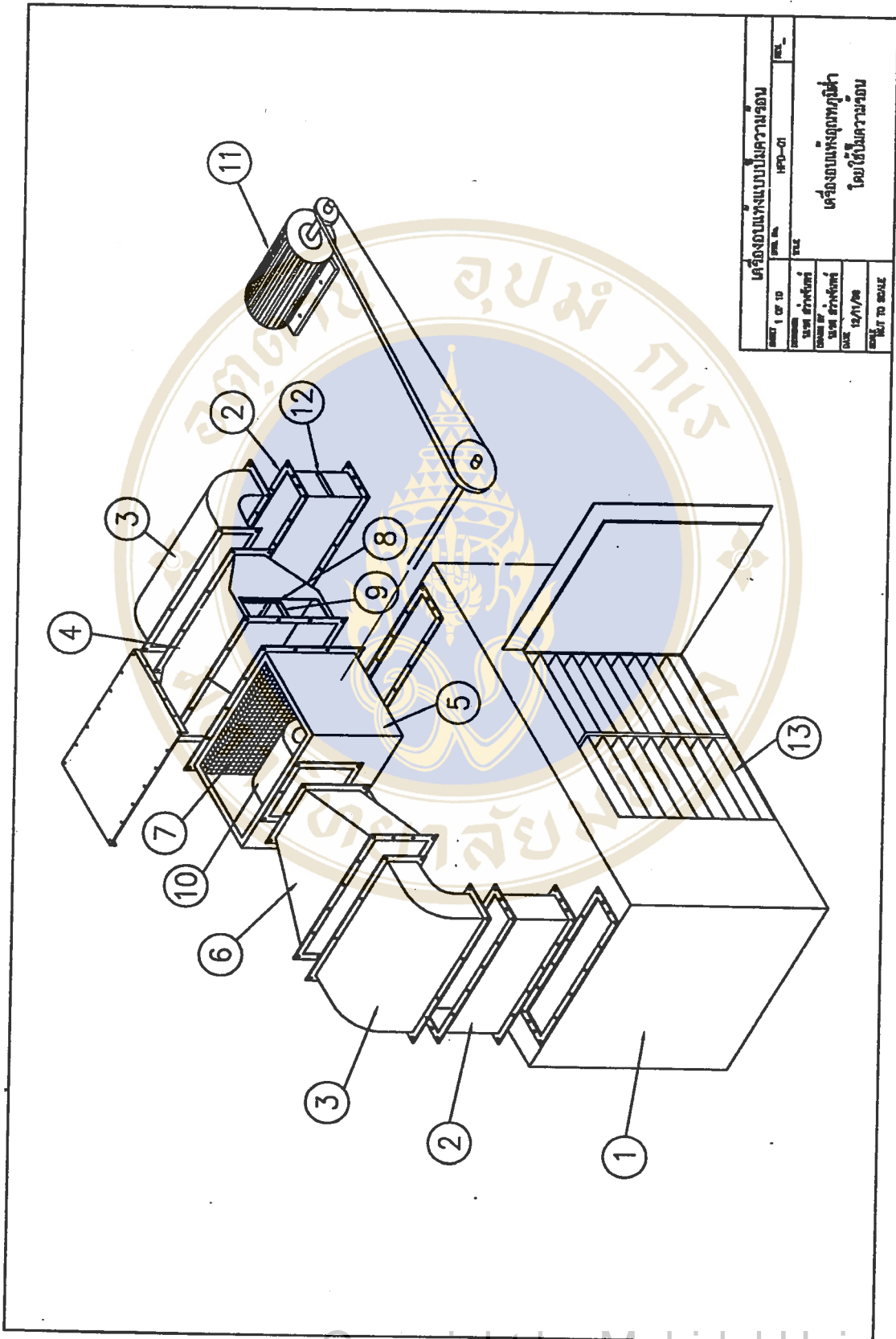
$$M_f = \text{ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์, (50 \% db)}$$

แทนค่าสมการที่ ข-9 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} W_{i(new)} &= [121.2 (2.5 + 1)] / (2.5 - 0.5) \\ &= 212.1 \text{ kg} \end{aligned}$$

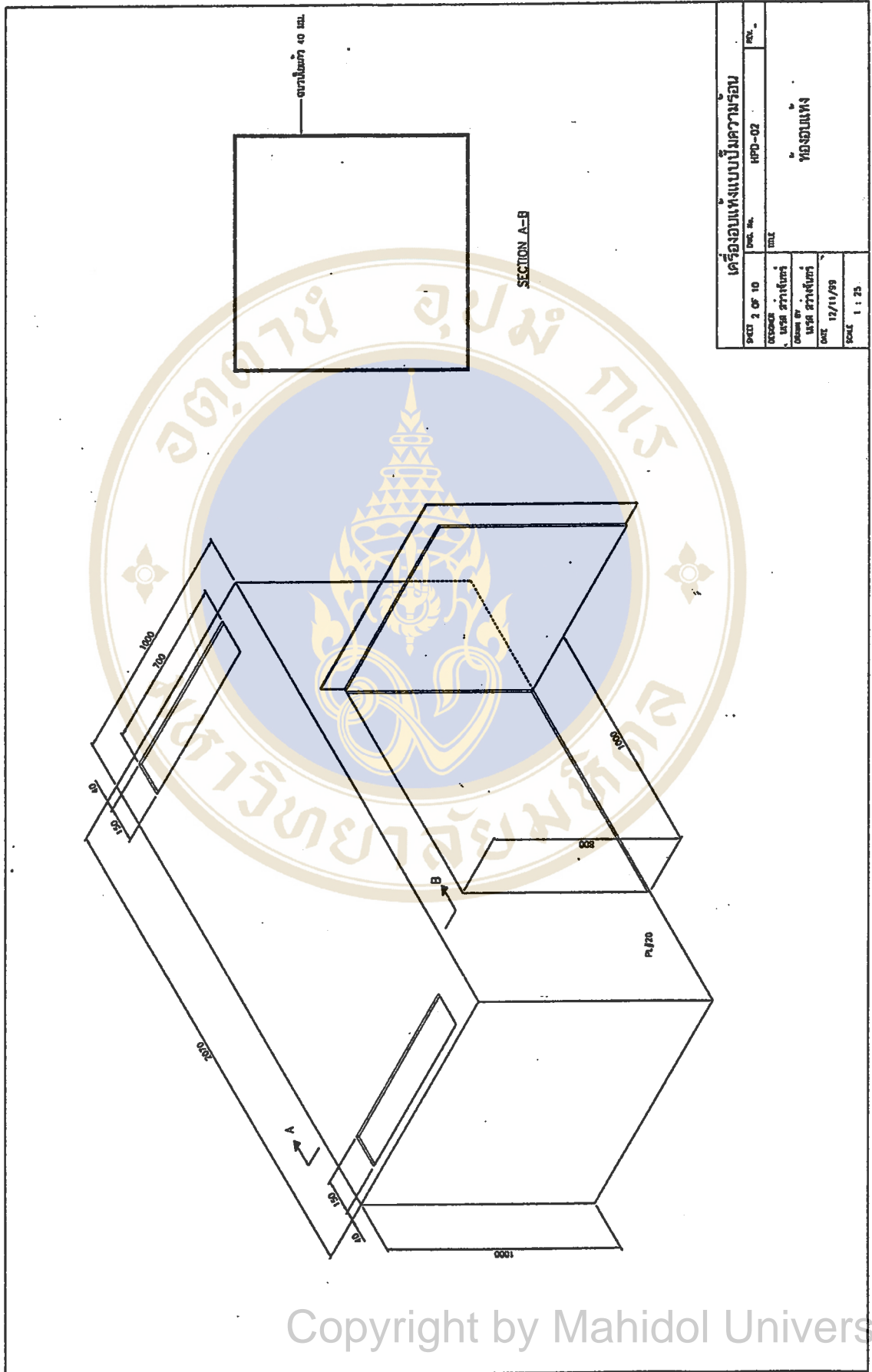
จากผลลัพธ์ การคำนวณในรอบที่ 1 จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณรอบที่ 2



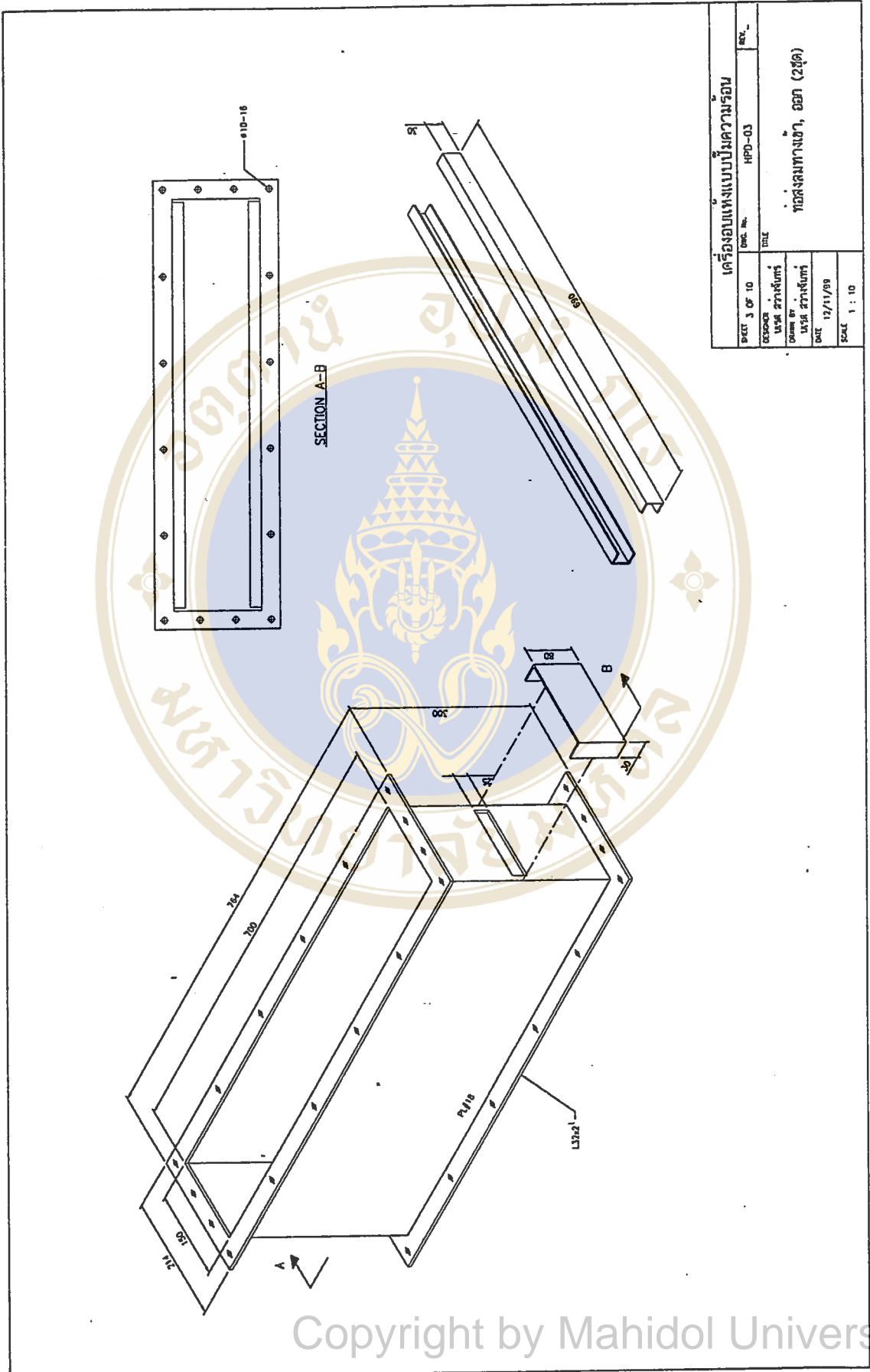


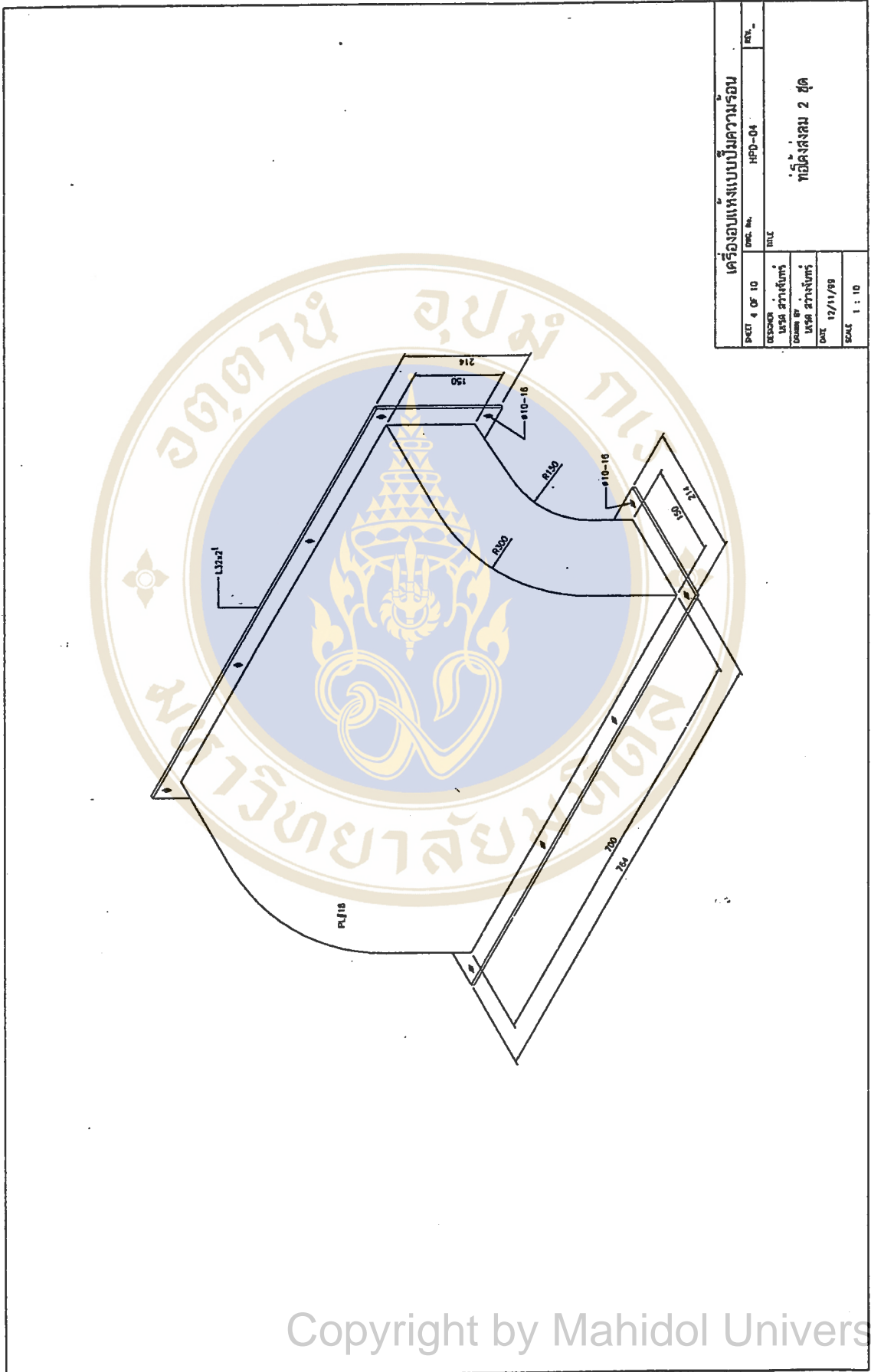
เครื่องแม่แบบพิมพ์ความรอบ	
ชื่อผู้จัดทำ	นเรศ ตว่าจันท์
ชื่ออาจารย์	ดร. อรุณรัตน์
ชื่อภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ชื่อคณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ชื่อมหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ชื่อปี/ภาค	ปี 2564 / ภาค 1
ชื่อวิชา	การเขียนแบบวิศวกรรม
ชื่ออาจารย์ผู้สอน	ดร. อรุณรัตน์
ชื่อผู้ตรวจ	ดร. อรุณรัตน์
ชื่อผู้ประเมิน	ดร. อรุณรัตน์

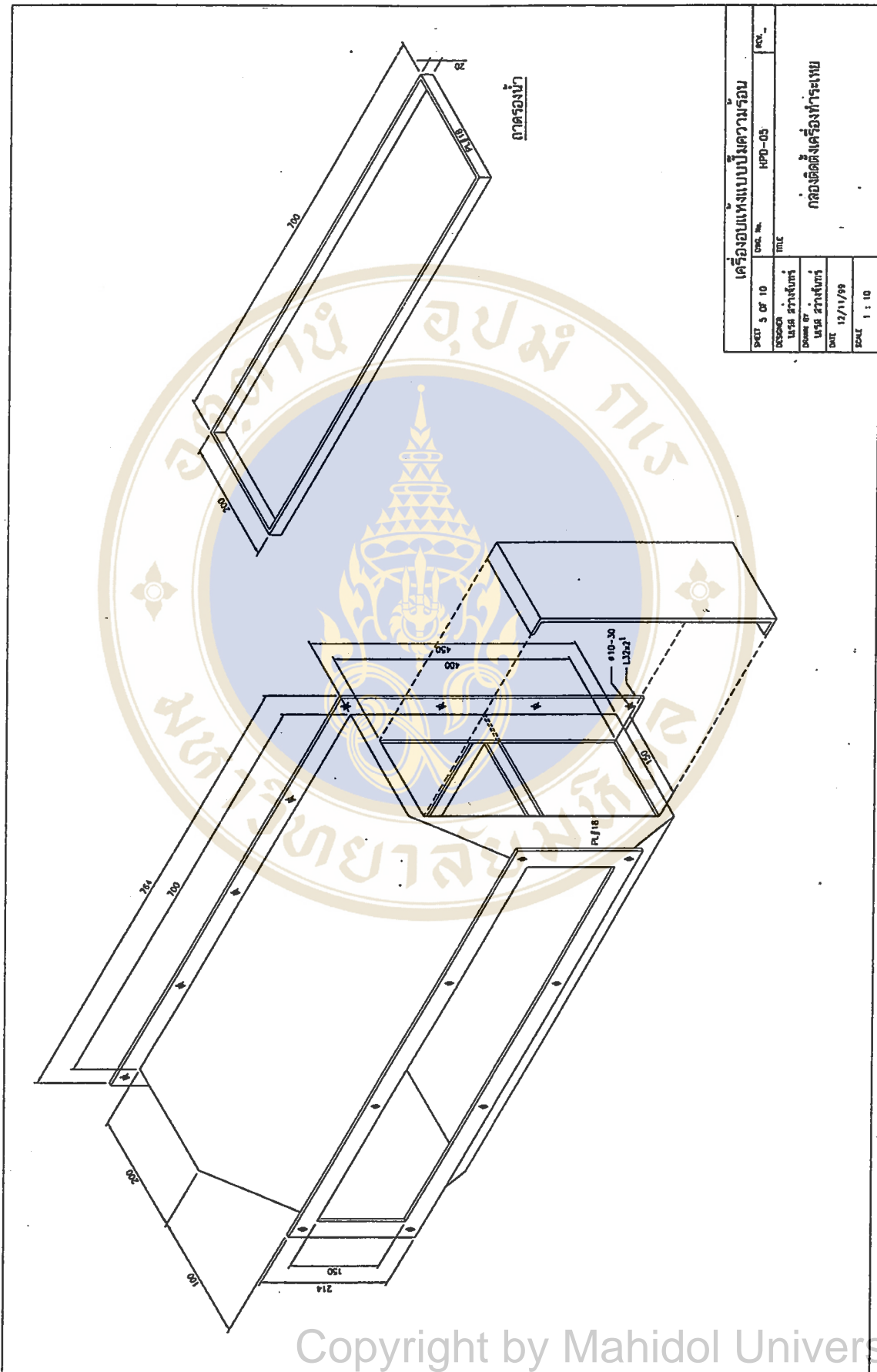
ชั้นที่	รายการ	หมายเลขแบบ	จำนวน (ชิ้น)
1	ตู้บั้ง	HPD-02	1
2	ทอสังฆษา, ออก	HPD-03	2
3	ตู้คังสงม	HPD-04	2
4	กลองตึงตึงเครื่องทำระเหย	HPD-05	1
5	กลองตึงตึงเครื่องความแบนและ ทัดลม	HPD-06	1
6	ทอขยายทางออกพัดลม	HPD-07	1
7	เครื่องควมนัน	HPD-08	1
8	เครื่องทำระเหย	HPD-08	1
9	ถาดรอนน้ำ ,	HPD-05	1
10	พัดลม	HPD-09	1
11	มอเตอร์ไฟฟ้า	HPD-09	1
12	ฟิลเตอร์	HPD-09	1
13	ถาดใส่ผลิตภัณฑ์	HPD-10	1



เครื่องแม่แบบแบบความรอบ	
Spec. 2 of 10	Doc. No. HPD-02
ผู้จัดทำ: นเรศ สว่างจันทร์	Rev.
ตรวจสอบ: นเรศ สว่างจันทร์	ชื่อ: ทองเอกแพง
DATE: 12/11/99	SCALE: 1 : 25

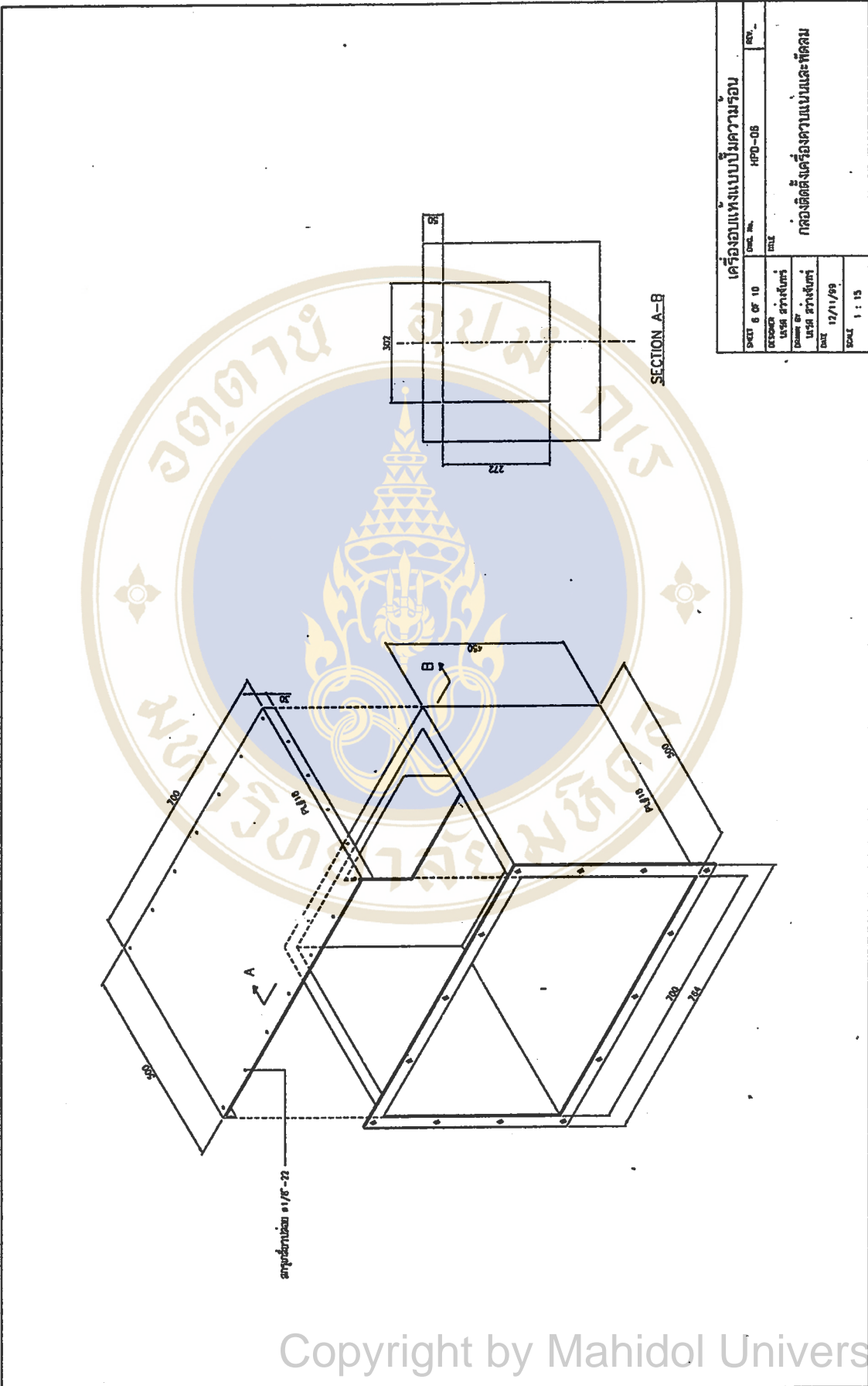






เครื่องแม่แบบพิมพ์ความรอบ	
Sheet 5 of 10	Doc. No. HPD-05
ชื่อผู้จัดทำ	ชื่อ
นางสาว อรุณ ราษฎร์	ชื่อ
นางสาว อรุณ ราษฎร์	ชื่อ
วันที่ 12/11/98	ชื่อ
Scale 1 : 10	ชื่อ

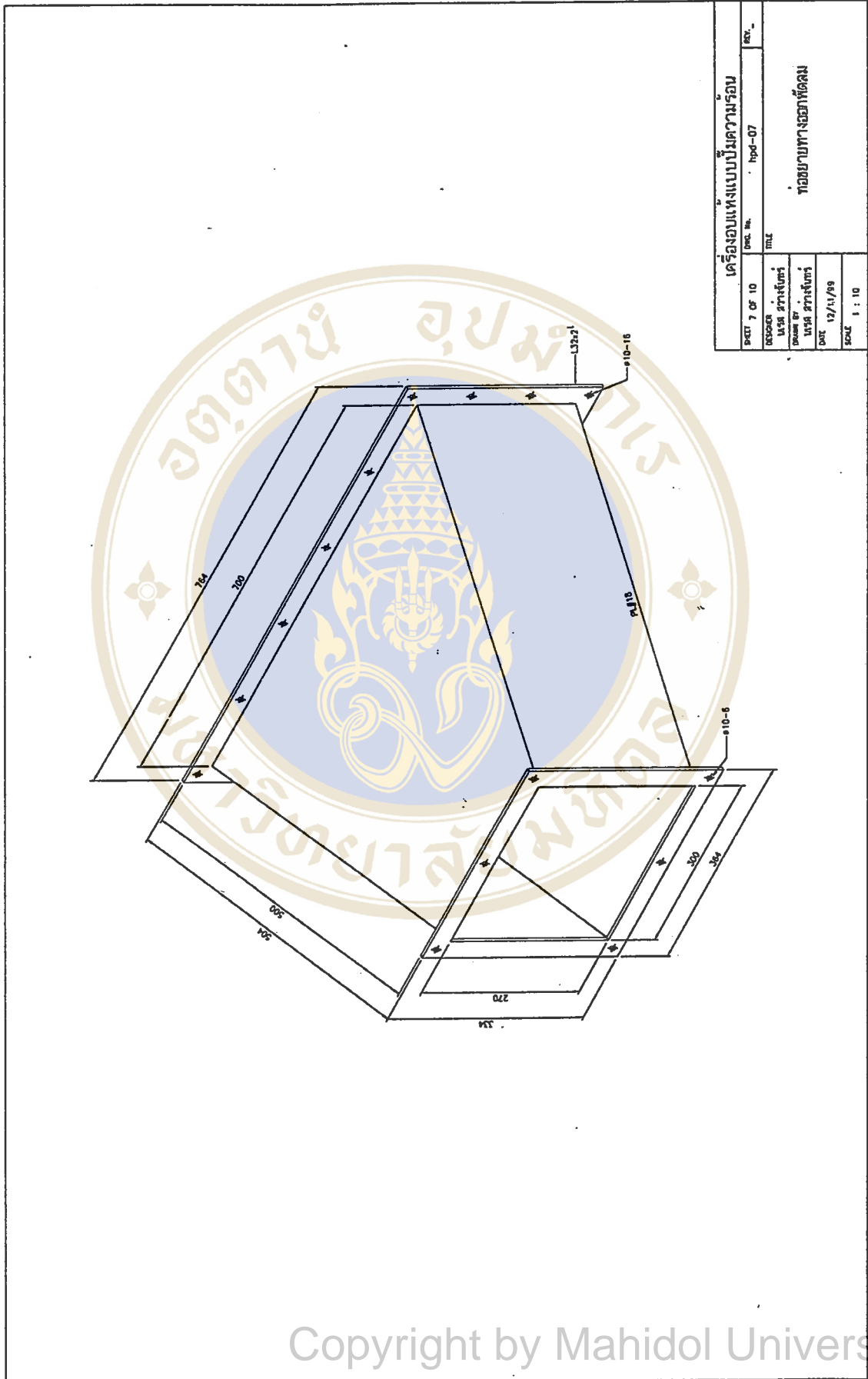
กล่องติดตั้งเครื่องทำระเหย



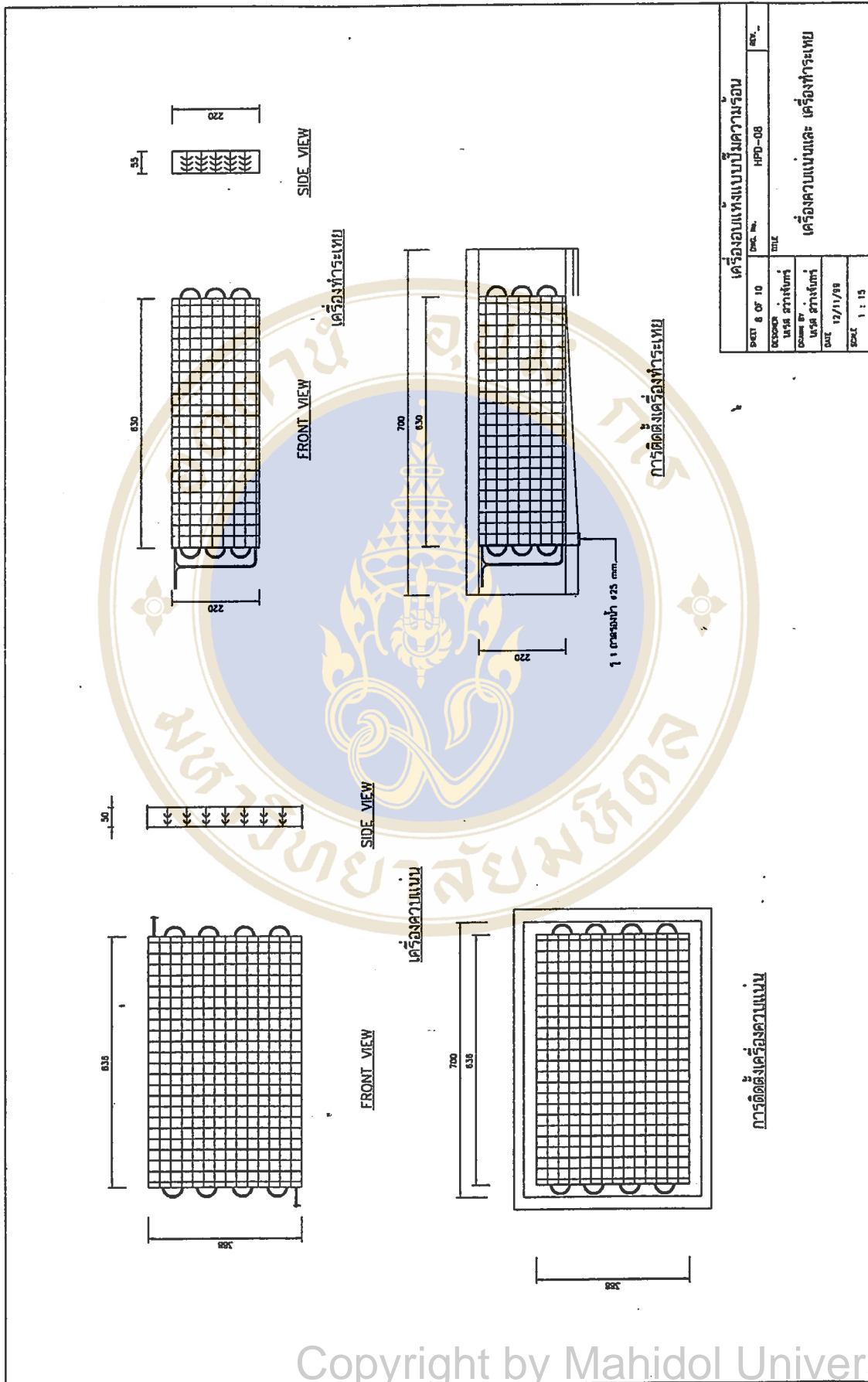
สามารถดาวน์โหลด ๑/๙-22

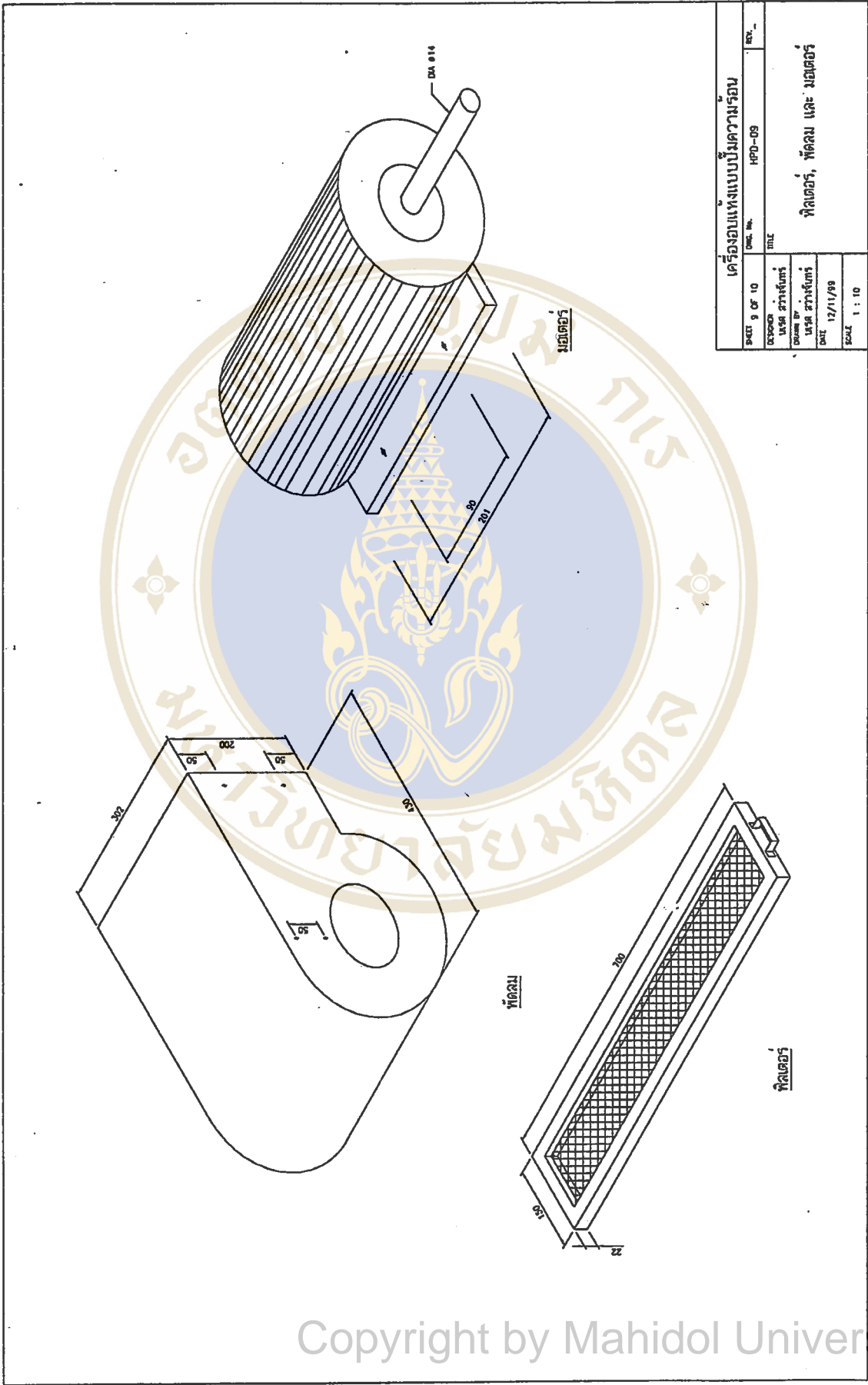
SECTION A-B

เครื่องแม่แบบความรอบ	
SHEET 6 OF 10	Doc. No. HPD-08
DESIGNER นเรศ ศว้างจันทร์	TITLE
DRAWN BY นเรศ ศว้างจันทร์	เครื่องแม่แบบความรอบและยึดลม
DATE 12/1/99	SCALE 1 : 15

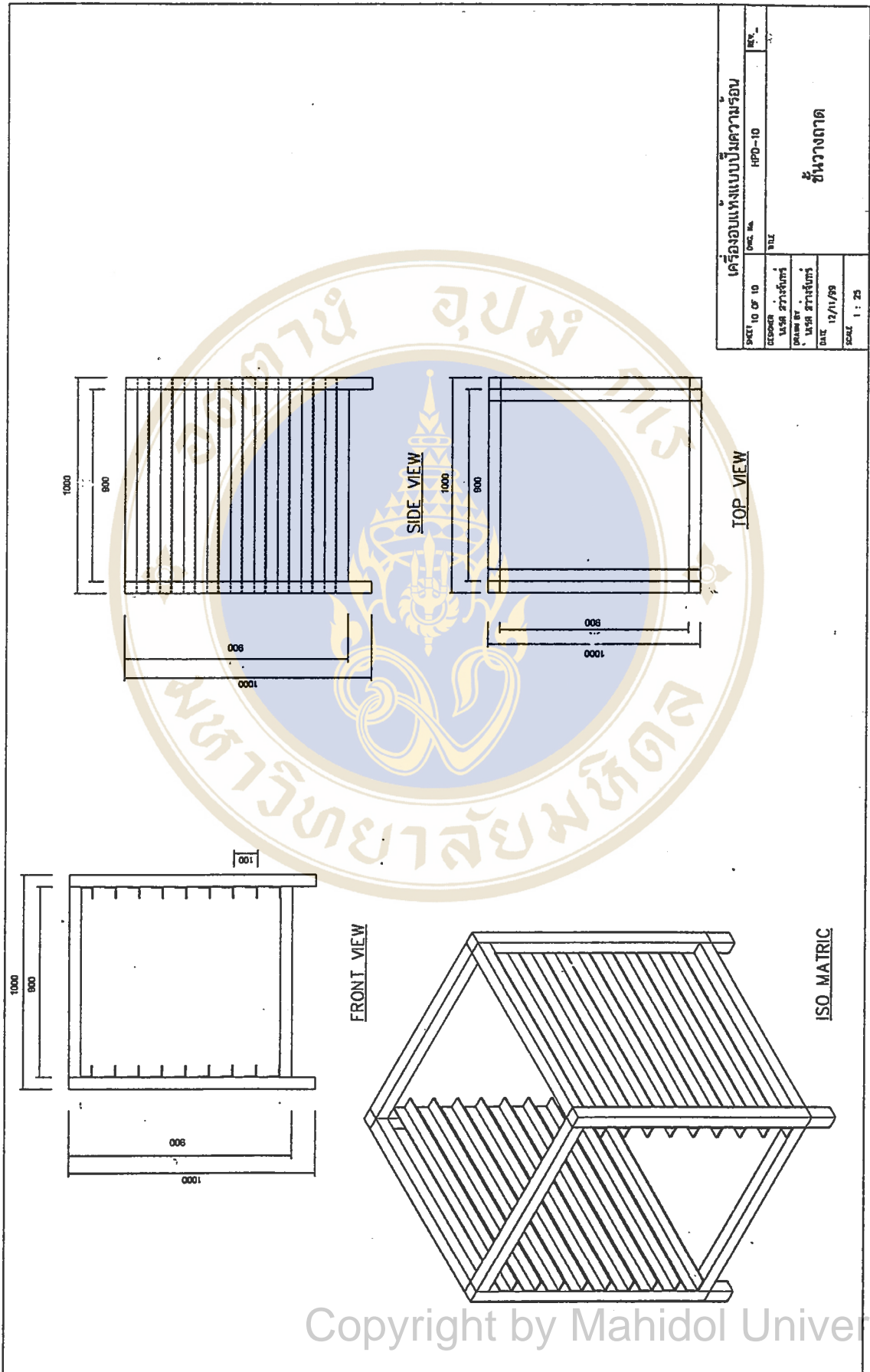


เครื่องแบบเบบความรอบ	
สเปค 7 of 10	Doc. No. hpd-07
DESIGNER	DATE
นาย สว่างจันทร์	
DATE 12/11/99	
SCALE 1 : 10	
ชื่อหน่วยงานที่ผลิต	





เครื่องอบแห้งแบบไม่ความร้อน		REV. --
Sheet 9 of 10	Doc. No. HFD-09	
Author	Unit	
Design by	Unit	
DATE 12/11/98		ฟิลเตอร์, พัดลม และ มอเตอร์
Scale 1 : 10		





ตารางที่ ง-1 สีของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

เงื่อนไข อบที่อุณหภูมิ 40°C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลองที่	ช่วงเวลา (hr)	สีหลังอบ
1	14	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
2	14	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
3	14	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		100 Y 20 B (40 M, 50 C)
1	28	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
2	28	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
3	28	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		90 Y 30 B (40 M, 50 C)
1	42	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
2	42	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
3	42	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		90 Y 30 B (40 M, 50 C)

หมายเหตุ: สีก่อนอบทุกการทดลอง : 100 Y 20 B (40 M, 50 C)

ตารางที่ ง-2 สีของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

เงื่อนไข อบที่ อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลองที่	ช่วงเวลา (hr)	- สีหลังอบ
1	13	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
2	13	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
3	13	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		100 Y 20 B (40 M, 50 C)
1	26	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
2	26	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
3	26	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		90 Y 30 B (40 M, 50 C)
1	39	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
2	39	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
3	39	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		90 Y 30 B (40 M, 50 C)

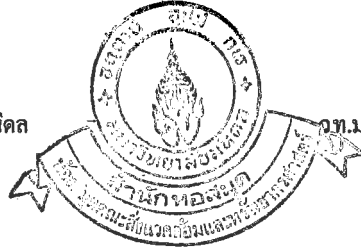
หมายเหตุ : สีก่อนอบทุกการทดลอง : 100 Y 20 B (40 M, 50 C)

ตารางที่ ง-3 สีสองฝักคอบขาวหลังการอบแห้ง

เงื่อนไข อบที่ อุณหภูมิ 40°C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลองที่	ช่วงเวลา (hr)	สีหลังอบ
1	12	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
2	12	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
3	12	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		100 Y 20 B (40 M, 50 C)
1	24	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
2	24	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
3	24	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		90 Y 30 B (40 M, 50 C)
1	36	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
2	36	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
3	36	90 Y 30 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		90 Y 30 B (40 M, 50 C)

หมายเหตุ: สีก่อนอบทุกการทดลอง : 100 Y 20 B (40 M, 50 C)



ตารางที่ ง-4 ลีของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

เงื่อนไข อบที่ อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3 m/s



การทดลองที่	ช่วงเวลา (hr)	ลีหลังอบ
1	8	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
2	8	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
3	8	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
ลีโดยเฉลี่ย		100 Y 20 B (40 M, 50 C)
1	16	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
2	16	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
3	16	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
ลีโดยเฉลี่ย		80 Y 30 B (30 M, 30 C)
1	24	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
2	24	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
3	24	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
ลีโดยเฉลี่ย		80 Y 30 B (30 M, 30 C)

หมายเหตุ : ลีก่อนอบทุกการทดลอง : 100 Y 20 B (40 M, 50 C)

ตารางที่ ง-5 สีของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

เงื่อนไข อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลองที่	ช่วงเวลา (hr)	สีหลังอบ
1	7	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
2	7	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
3	7	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		100 Y 20 B (40 M, 50 C)
1	14	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
2	14	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
3	14	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
สีโดยเฉลี่ย		80 Y 30 B (30 M, 30 C)
1	21	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
2	21	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
3	21	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
สีโดยเฉลี่ย		80 Y 30 B (30 M, 30 C)

หมายเหตุ : สีก่อนอบทุกการทดลอง : 100 Y 20 B (40 M, 50 C)

ตารางที่ ง-6 สีของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

เงื่อนไขอบที่ อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลองที่	ช่วงเวลา (hr)	สีหลังอบ
1	6	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
2	6	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
3	6	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		100 Y 20 B (40 M, 50 C)
1	12	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
2	12	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
3	12	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
สีโดยเฉลี่ย		80 Y 30 B (30 M, 30 C)
1	18	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
2	18	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
3	18	80 Y 30 B (30 M, 30 C)
สีโดยเฉลี่ย		80 Y 30 B (30 M, 30 C)

หมายเหตุ : สีก่อนอบทุกการทดลอง : 100 Y 20 B (40 M, 50 C)

ตารางที่ ง-7 สีของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

เงื่อนไข อบที่ อุณหภูมิ 60°C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลองที่	ช่วงเวลา (hr)	สีหลังอบ
1	5	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
2	5	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
3	5	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		100 Y 20 B (40 M, 50 C)
1	10	70 Y 20 B (30 M, 30 C)
2	10	70 Y 20 B (30 M, 30 C)
3	10	70 Y 20 B (30 M, 30 C)
สีโดยเฉลี่ย		70 Y 20 B (30 M, 30 C)
1	15	70 Y 20 B (30 M, 30 C)
2	15	70 Y 20 B (30 M, 30 C)
3	15	70 Y 20 B (30 M, 30 C)
สีโดยเฉลี่ย		70 Y 20 B (30 M, 30 C)

หมายเหตุ: สีก่อนอบทุกการทดลอง : 100 Y 20 B (40 M, 50 C)

ตารางที่ ง-8 สีของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

เงื่อนไขอบที่อุณหภูมิ 60°C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลองที่	ช่วงเวลา (hr)	สีหลังอบ
1	4	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
2	4	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
3	4	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		100 Y 20 B (40 M, 50 C)
1	8	70 Y 20 B (40 M, 30 C)
2	8	70 Y 20 B (40 M, 30 C)
3	8	70 Y 20 B (40 M, 30 C)
สีโดยเฉลี่ย		70 Y 20 B (40 M, 30 C)
1	12	70 Y 20 B (40 M, 30 C)
2	12	70 Y 20 B (40 M, 30 C)
3	12	70 Y 20 B (40 M, 30 C)
สีโดยเฉลี่ย		70 Y 20 B (40 M, 30 C)

หมายเหตุ : สีก่อนอบทุกการทดลอง : 100 Y 20 B (40 M, 50 C)

ตารางที่ ง-9 สีของฝักตบขวาหลังการอบแห้ง

เงื่อนไข อบที่ อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลองที่	ช่วงเวลา (hr)	สีหลังอบ
1	3	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
2	3	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
3	3	100 Y 20 B (40 M, 50 C)
สีโดยเฉลี่ย		100 Y 20 B (40 M, 50 C)
1	6	70 Y 20 B (40 M, 30 C)
2	6	70 Y 20 B (40 M, 30 C)
3	6	70 Y 20 B (40 M, 30 C)
สีโดยเฉลี่ย		70 Y 20 B (40 M, 30 C)
1	9	70 Y 20 B (40 M, 30 C)
2	9	70 Y 20 B (40 M, 30 C)
3	9	70 Y 20 B (40 M, 30 C)
สีโดยเฉลี่ย		70 Y 20 B (40 M, 30 C)

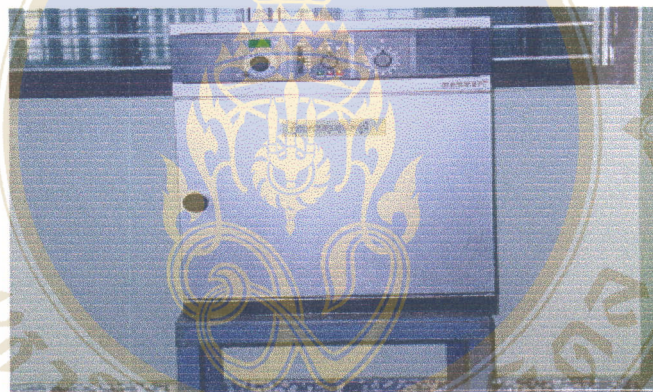
หมายเหตุ : สีก่อนอบทุกการทดลอง : 100 Y 20 B (40 M, 50 C)



ภาคผนวก จ

การหาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของผักตบชวา

การหาความชื้นเริ่มต้นของผักตบชวาสด และความชื้นสุดท้ายของผักตบชวาทากแดด ผู้วิจัยได้ใช้ตู้อบไฟฟ้าลดความชื้น จากห้องปฏิบัติการวิทยาลัยเทคนิคสระบุรี ดังรูปที่ จ-1 เป็นเครื่องมือในการหาความชื้นของผักตบชวา โดยมีลำดับขั้นตอนการหาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของผักตบชวา ดังนี้



Model 700 อุณหภูมิสูงสุด 200 °C ใช้กับแรงดันไฟฟ้า 220 V 50 Hz

รูปที่ จ-1 แสดงเครื่องอบแห้งไฟฟ้าลดความชื้น

จ.1 การหาค่าความชื้นเริ่มต้นของผักตบชวาสด

การหาค่าความชื้นเริ่มต้นของผักตบชวาสด มีวิธีการดังต่อไปนี้

1. นำผักตบชวาสด จำนวน 5 ตัน มาทำความสะอาด แล้วหั่นผักตบชวาให้ละเอียด ยาวท่อนละประมาณ 1 mm

2. ชั่งน้ำหนักด้วยเปล้าก่อนนำไปใส่ตู้อบไฟฟ้า จำนวน 5 ใบ จดบันทึกค่าพร้อมทั้งคิดสลากแต่ละถ้วย

3. นำผักตบชวาที่หั่นละเอียดตามข้อ 1 มาชั่งน้ำหนักใส่ถ้วยๆ ละ 50 กรัม และชั่งน้ำหนักผักตบชวา พร้อมถ้วย จดบันทึกค่า

4. ทำการจดบันทึกค่าน้ำหนักผักตบชวาแต่ละถ้วย โดยการนำน้ำหนักที่ชั่งผักตบชวา รวมกับถ้วย หักออกจากน้ำหนักถ้วยเปล่า
5. นำผักตบชวาที่ผ่านการชั่งน้ำหนักใส่ตู้อบไฟฟ้าลดความชื้น ตั้งอุณหภูมิของตู้ 103 °C อบใช้เวลาทั้งสิ้น 36 hr
6. นำผักตบชวาที่ผ่านการอบแห้ง นำออกมาใส่ภาชนะสูญญากาศ ทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิจนบรรยากาศปกติ แล้วนำมาชั่งน้ำหนักแต่ละถ้วย พร้อมจดบันทึก
7. การบันทึกค่าน้ำหนักของผักตบชวาแต่ละถ้วยที่ผ่านการอบแห้ง โดยการนำน้ำหนักที่ชั่งผักตบชวา รวมกับถ้วย หักออกจากน้ำหนักถ้วยเปล่า
8. จากค่าน้ำหนักผักตบชวา จำนวน 5 ถ้วย ทั้งก่อนอบแห้ง และหลังอบแห้ง ทำการคำนวณ หาค่าความชื้นเริ่มต้นของผักตบชวา โดยใช้สมการที่ จ-1

$$M_i = (W_i - d) / d \tag{จ-1}$$

เมื่อ

$$M_i = \text{ความชื้นเริ่มต้นของผักตบชวา, \% db}$$

$$W_i = \text{มวลของผักตบชวาก่อนการอบแห้ง, g}$$

$$d = \text{มวลของผักตบชวาแห้ง (ไม่มีความชื้น), g}$$

9. นำค่าความชื้นเริ่มต้นของผักตบชวาสดมาหาค่าเฉลี่ย ดังตารางที่ จ-1

ตารางที่ จ-1 การหาค่าความชื้นเริ่มต้นของผักตบชวาสด

ลำดับที่	W_i (g)	d (g)	M_i (% db)
1	50	4.7	963.83
2	50	5	900
3	50	4.5	1011.11
4	50	4.5	1011.11
5	50	4.7	963.83
ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย			969.976

จ.2 การหาค่าความชื้นสุดท้ายของผักตบชวาตากแห้ง

การหาค่าความชื้นสุดท้ายของผักตบชวาแห้ง หาได้โดยการนำผักตบชวาที่ผ่านการตากแดด ซึ่งเป็นผักตบชวาที่พร้อมนำไปใช้งานหัตถกรรม การหาค่าความชื้นสุดท้ายของผักตบชวาแห้ง มีขั้นตอนการทำงานเหมือนกับขั้นตอนการหาค่าความชื้นเริ่มต้นของผักตบชวาสด โดยใช้สมการที่ จ-2

$$M_f = (W_i - d) / d \quad (จ-2)$$

เมื่อ

$$M_f = \text{ความชื้นสุดท้ายของผักตบชวาที่ผ่านการตากแดด, \% db}$$

$$W_i = \text{มวลของผักตบชวาก่อนการอบแห้ง, g}$$

$$d = \text{มวลของผักตบชวาแห้ง (ไม่มีความชื้น), g}$$

และนำค่าความชื้นสุดท้ายของผักตบชวาทากแดดมาหาค่าเฉลี่ย ดังตารางที่ จ-2

ตารางที่ จ-2 การหาค่าความชื้นสุดท้ายของผักตบชวาแห้ง

ลำดับที่	W_i (g)	d (g)	M_f (% db)
1	20	17.5	14.29
2	20	17.4	14.94
3	20	17.5	14.29
4	20	17.7	12.99
5	20	17.6	13.64
ความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย			14.03

ตารางที่ จ-3 ข้อมูลความชื้นของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา	น้ำหนักหลังอบแห้ง (g.)					ความชื้นหลัง อบแห้ง (% db) Mf
		ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4	รวม	
1	14	350	380	321	285	1,336	
2	14	321	386	299	276	1,282	
3	14	372	412	348	317	1,449	
เฉลี่ย						1,356	335.72
1	28	159	179	152	137	627	
2	28	145	163	139	125	596	
3	28	149	168	144	129	590	
เฉลี่ย						604	94.08
1	42	86	91	88	90	355	
2	42	86	92	90	87	355	
3	42	89	92	90	84	355	
เฉลี่ย						355	14.07

หมายเหตุ :- น้ำหนักก่อนอบ

ถาด 1 : 833 กรัม ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น : 970 % db

ถาด 2 : 833 กรัม

ถาด 3 : 833 กรัม

ถาด 4 : 831 กรัม

น้ำหนักรวม 3,330 กรัม

ตารางที่ จ-4 ข้อมูลความชื้นของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา	น้ำหนักหลังอบแห้ง (g.)					ความชื้นหลัง อบแห้ง (% db) Mf
		ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4	รวม	
1	13	333	395	322	362	1,412	
2	13	314	372	304	342	1,332	
3	13	304	361	295	331	1,291	
เฉลี่ย						1,345	332.18
1	26	150	181	55	173	559	
2	26	137	165	50	158	510	
3	26	154	186	57	179	576	
เฉลี่ย						548	76.19
1	39	84	97	90	84	355	
2	39	90	89	86	90	355	
3	39	82	93	88	92	355	
เฉลี่ย						355	14.07

หมายเหตุ :- น้ำหนักก่อนอบ

ถาด 1 : 833 กรัม ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น : 970 % db
 ถาด 2 : 833 กรัม
 ถาด 3 : 833 กรัม
 ถาด 4 : 831 กรัม

น้ำหนักรวม 3,330 กรัม

ตารางที่ จ-5 ข้อมูลความชื้นของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา	น้ำหนักหลังอบแห้ง (g.)					ความชื้นหลัง อบแห้ง (% db) Mf
		ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4	รวม	
1	12	279	302	314	222	1,117	
2	12	221	239	248	176	884	
3	12	235	254	264	187	940	
เฉลี่ย						980	214.89
1	24	133	135	39	108	415	
2	24	118	120	37	110	385	
3	24	121	128	44	94	387	
เฉลี่ย						396	27.25
1	36	89	82	94	90	355	
2	36	85	80	95	95	355	
3	36	87	92	90	86	355	
เฉลี่ย						355	14.07

หมายเหตุ :- น้ำหนักก่อนอบ

ถาด 1 : 833 กรัม ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น : 970 % db

ถาด 2 : 833 กรัม

ถาด 3 : 833 กรัม

ถาด 4 : 831 กรัม

น้ำหนักรวม 3,330 กรัม

ตารางที่ จ-6 ข้อมูลความชื้นของฝักตบขวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา	น้ำหนักหลังอบแห้ง (g.)					ความชื้นหลัง อบแห้ง (% db)
		ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4	รวม	Mf
1	8	326	324	361	276	1,287	
2	8	357	355	396	303	1,411	
3	8	368	365	407	312	1,452	
เฉลี่ย						1,383	344.39
1	16	110	117	47	105	379	
2	16	121	129	52	116	418	
3	16	135	144	58	130	467	
เฉลี่ย						422	35.60
1	24	75	87	95	66	323	
2	24	84	102	104	69	359	
3	24	88	105	115	74	382	
เฉลี่ย						355	14.07

หมายเหตุ :- น้ำหนักก่อนอบ

ถาด 1 : 833 กรัม ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น : 970 % db

ถาด 2 : 833 กรัม

ถาด 3 : 833 กรัม

ถาด 4 : 831 กรัม

น้ำหนักรวม 3,330 กรัม

ตารางที่ จ-7 ข้อมูลความชื้นของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา	น้ำหนักหลังอบแห้ง (g.)					ความชื้นหลัง อบแห้ง (% db) Mf
		ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4	รวม	
1	7	415	366	422	321	1,524	
2	7	365	322	371	282	1,340	
3	7	478	422	486	369	1,755	
เฉลี่ย						1,539	394.52
1	14	180	202	50	191	623	
2	14	158	178	44	168	548	
3	14	190	214	53	202	659	
เฉลี่ย						610	96.01
1	21	89	90	108	88	375	
2	21	90	88	98	78	354	
3	21	79	80	97	79	335	
เฉลี่ย						355	14.07

หมายเหตุ :- น้ำหนักก่อนอบ

ถาด 1 : 833 กรัม ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น : 970 % db

ถาด 2 : 833 กรัม

ถาด 3 : 833 กรัม

ถาด 4 : 831 กรัม

น้ำหนักรวม 3,330 กรัม

ตารางที่ จ-8 ข้อมูลความชื้นของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา	น้ำหนักหลังอบแห้ง (g.)					ความชื้นหลัง อบแห้ง (% db) Mf
		ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4	รวม	
1	6	341	422	326	259	1,348	
2	6	302	374	288	230	1,194	
3	6	332	410	316	252	1,310	
เฉลี่ย						1,284	312.58
1	12	119	181	44	117	461	
2	12	112	170	42	110	434	
3	12	119	181	44	117	461	
เฉลี่ย						452	45.24
1	18	90	116	89	73	368	
2	18	85	111	84	72	352	
3	18	84	107	87	66	344	
เฉลี่ย						355	14.07

หมายเหตุ :- น้ำหนักก่อนอบ

ถาด 1 : 833 กรัม ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น : 970 % db

ถาด 2 : 833 กรัม

ถาด 3 : 833 กรัม

ถาด 4 : 831 กรัม

น้ำหนักรวม 3,330 กรัม

ตารางที่ จ-9 ข้อมูลความชื้นของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา	น้ำหนักหลังอบแห้ง (g.)					ความชื้นหลัง อบแห้ง (% db) Mf
		ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4	รวม	
1	5	438	372	372	342	1,524	
2	5	350	298	298	274	1,220	
3	5	307	260	260	239	1,066	
เฉลี่ย						1,270	308.08
1	10	150	135	47	143	475	
2	10	131	117	41	124	413	
3	10	104	93	32	99	328	
เฉลี่ย						405	30.14
1	15	118	108	105	77	408	
2	15	104	99	90	65	358	
3	15	86	80	75	57	298	
เฉลี่ย						355	14.07

หมายเหตุ :- น้ำหนักก่อนอบ

ถาด 1 : 833 กรัม ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น : 970 % db

ถาด 2 : 833 กรัม

ถาด 3 : 833 กรัม

ถาด 4 : 831 กรัม

น้ำหนักรวม : 3,330 กรัม

ตารางที่ จ-10 ข้อมูลความชื้นของฝักตบขวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา	น้ำหนักหลังอบแห้ง (g.)					ความชื้นหลัง อบแห้ง (% db) Mf
		ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4	รวม	
1	4	412	444	437	349	1,642	
2	4	364	392	385	308	1,449	
3	4	436	470	462	369	1,737	
เฉลี่ย						1,609	417.01
1	8	151	184	60	152	547	
2	8	138	168	55	139	500	
3	8	143	173	56	144	516	
เฉลี่ย						521	67.41
1	12	88	92	96	85	361	
2	12	87	88	93	84	352	
3	12	86	87	94	85	352	
เฉลี่ย						355	14.07

หมายเหตุ :- น้ำหนักก่อนอบ

ถาด 1 : 833 กรัม ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น : 970 % db

ถาด 2 : 833 กรัม

ถาด 3 : 833 กรัม

ถาด 4 : 831 กรัม

น้ำหนักรวม 3,330 กรัม

ตารางที่ จ-11 ข้อมูลความชื้นของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา	น้ำหนักหลังอบแห้ง (g.)					ความชื้นหลัง อบแห้ง (% db) Mf
		ถาด 1	ถาด 2	ถาด 3	ถาด 4	รวม	
1	3	470	537	464	352	1,823	
2	3	415	473	410	311	1,609	
3	3	498	568	491	373	1,930	
เฉลี่ย						1,787	474.21
1	6	191	263	68	150	672	
2	6	153	210	54	120	537	
3	6	202	278	72	159	711	
เฉลี่ย						640	105.65
1	9	86	120	94	78	378	
2	9	75	98	75	66	314	
3	9	88	118	92	76	374	
เฉลี่ย						355	14.07

หมายเหตุ :- น้ำหนักก่อนอบ

ถาด 1 : 833 กรัม ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น : 970 % db

ถาด 2 : 833 กรัม

ถาด 3 : 833 กรัม

ถาด 4 : 831 กรัม

น้ำหนักรวม 3,300 กรัม



ตารางที่ จ-1 ข้อมูลค่าความเค้นดึงของผักตบชวาสด

ลำดับ ที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm.)			ϕ เฉลี่ย (mm.)	A เฉลี่ย (mm. ²)	F (N)			F (N) เฉลี่ย	σ_t (N/mm. ²)
	ต้น	กลาง	ปลาย			ต้น	กลาง	ปลาย		
1	20.50	18.50	15.00	18.00	252.72	84	60	48	64	0.25
2	21.25	19.75	14.75	18.58	269.27	78	58	40	58.67	0.22
3	22.00	19.00	14.50	18.50	266.96	90	75	40	68.33	0.26
4	21.50	18.50	13.50	17.83	247.97	86	60	42	62.67	0.25
5	20.25	17.75	12.50	16.83	220.93	70	40	40	50	0.23
6	20.50	18.00	14.00	17.50	238.88	102	66	50	72.67	0.30
7	21.25	19.00	14.50	18.25	259.79	80	40	35	51.67	0.20
8	19.50	16.50	11.50	15.83	195.46	80	48	36	54.67	0.28
9	19.00	16.50	11.50	15.67	191.53	100	80	60	80	0.42
ค่าเฉลี่ยรวม					238.17	85.56	58.56	43.44	62.52	0.26

ตารางที่ ง-2 ข้อมูลค่าความเค้นดึงของผักตบชวาตากแดด

ลำดับ ที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm.)			ϕ เฉลี่ย (mm.)	A เฉลี่ย (mm. ²)	F (N)			F (N) เฉลี่ย	σ_t (N/mm. ²)
	ต้น	กลาง	ปลาย			ต้น	กลาง	ปลาย		
1	10.5	8.5	5.5	8.17	52.42	120	90	80	96.66	1.84
2	10	8.25	5	7.75	47.17	110	80	80	90	1.91
3	10	8.5	5.25	7.92	49.26	120	110	100	110	2.23
4	10	8.5	6	8.17	52.42	120	90	100	103.33	1.97
5	11	9.5	6	8.83	61.23	130	120	110	120	1.96
6	10	8.75	6	8.25	53.46	120	90	90	100	1.87
7	11.5	9.75	6.25	9.17	66.04	130	110	100	113.33	1.71
8	12	10.25	6.5	9.5	70.88	140	120	110	123.33	1.74
9	11	9.5	6	8.83	61.23	130	120	100	116.66	1.91
ค่าเฉลี่ยรวม					57.123	124.44	103.33	96.66	108.14	1.89

ตารางที่ ฉ-3 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลอง ครั้งที่	จำนวนเวลา (hr)	แรงดึง (N)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	σ_t (N/mm ²)
1	14	80.93	116.13	
2	14	88.67	129.70	
3	14	72.15	142.67	
ค่าเฉลี่ย		80.58	129.50	0.62
1	28	88.93	101.14	
2	28	98.48	107.34	
3	28	92.04	118.39	
ค่าเฉลี่ย		93.15	108.96	0.85
1	42	151.04	72.45	
2	42	143.52	70.80	
3	42	126.37	72.09	
ค่าเฉลี่ย		140.31	71.78	1.95

ตารางที่ ฉ-4 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของฝักตบขวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลอง ครั้งที่	จำนวนเวลา (hr)	แรงดึง (N)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	σ_t (N/mm ²)
1	13	99.22	159.23	
2	13	89.93	131.54	
3	13	79.81	124.61	
ค่าเฉลี่ย		89.65	138.46	0.65
1	26	118.70	131.73	
2	26	97.81	107.77	
3	26	89.78	99.97	
ค่าเฉลี่ย		102.10	113.16	0.90
1	39	139.19	69.00	
2	39	109.22	57.00	
3	39	109.56	53.39	
ค่าเฉลี่ย		119.32	59.80	2.00

ตารางที่ ๓-5 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลอง ครั้งที่	จำนวนเวลา (hr)	แรงดึง (N)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	σ_t (N/mm ²)
1	12	79.81	113.23	
2	12	69.52	100.88	
3	12	59.96	94.70	
ค่าเฉลี่ย		69.76	102.94	0.68
1	24	100.00	90.83	
2	24	89.93	80.92	
3	24	79.81	75.96	
ค่าเฉลี่ย		89.91	82.57	1.09
1	36	139.44	66.48	
2	36	129.74	59.81	
3	36	119.85	56.15	
ค่าเฉลี่ย		129.68	60.81	2.13

ตารางที่ จ-6 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของฝักตบขวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลอง ครั้งที่	จำนวนเวลา (hr)	แรงดึง (N)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	σ_t (N/mm ²)
1	8	79.89	113.15	
2	8	89.70	131.43	
3	8	69.85	98.29	
ค่าเฉลี่ย		79.81	114.29	0.70
1	16	109.93	87.82	
2	16	129.89	102.02	
3	16	89.74	76.29	
ค่าเฉลี่ย		109.85	88.71	1.24
1	24	139.74	64.47	
2	24	159.74	74.89	
3	24	119.81	56.00	
ค่าเฉลี่ย		139.76	65.12	2.15

ตารางที่ ฉ-7 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลอง ครั้งที่	จำนวนเวลา (hr)	แรงดึง (N)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	σ_t (N/mm ²)
1	7	79.59	104.54	
2	7	69.70	90.67	
3	7	89.81	124.80	
ค่าเฉลี่ย		79.70	106.67	0.75
1	14	109.78	86.24	
2	14	89.85	74.80	
3	14	129.89	102.96	
ค่าเฉลี่ย		109.84	88.00	1.25
1	21	129.81	61.85	
2	21	109.93	53.64	
3	21	149.81	73.84	
ค่าเฉลี่ย		129.85	63.11	2.06

ตารางที่ จ-8 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของฝักตบขวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลอง ครั้งที่	จำนวนเวลา (hr)	แรงดึง (N)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	σ_t (N/mm ²)
1	6	100.00	123.76	
2	6	59.85	84.21	
3	6	79.70	105.26	
ค่าเฉลี่ย		79.85	104.41	0.76
1	12	109.70	83.72	
2	12	69.48	55.41	
3	12	89.26	69.77	
ค่าเฉลี่ย		89.48	69.63	1.29
1	18	129.52	64.70	
2	18	89.81	43.14	
3	18	109.96	53.92	
ค่าเฉลี่ย		109.76	53.92	2.04

ตารางที่ ๑-๑ แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลอง ครั้งที่	จำนวนเวลา (hr)	แรงดึง (N)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	σ_t (N/mm ²)
1	5	100.00	126.92	
2	5	79.74	103.84	
3	5	100.00	126.92	
ค่าเฉลี่ย		93.25	119.23	0.78
1	10	119.26	82.33	
2	10	100.00	67.81	
3	10	119.93	82.87	
ค่าเฉลี่ย		113.06	77.67	1.46
1	15	119.89	78.80	
2	15	100.00	64.71	
3	15	119.78	79.09	
ค่าเฉลี่ย		113.22	74.20	1.53

ตารางที่ จ-10 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลอง ครั้งที่	จำนวนเวลา (hr)	แรงดึง (N)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	σ_t (N/mm ²)
1	4	75.78	100.51	
2	4	92.48	118.66	
3	4	111.26	143.69	
ค่าเฉลี่ย		93.17	120.95	0.77
1	8	80.48	63.07	
2	8	100.00	75.38	
3	8	119.37	92.30	
ค่าเฉลี่ย		99.95	76.92	1.30
1	12	80.00	57.74	
2	12	100.00	69.01	
3	12	119.89	84.50	
ค่าเฉลี่ย		99.96	70.42	1.42



ตารางที่ ฉ-11 แรงดึง พื้นที่หน้าตัด และความเค้นดึงของผักตบชวาหลังการอบแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลอง ครั้งที่	จำนวนเวลา (hr)	แรงดึง (N)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	σ_t (N/mm ²)
1	3	82.30	160.83	
2	3	89.81	145.49	
3	3	76.19	175.18	
ค่าเฉลี่ย		82.77	160.50	0.52
1	6	90.52	96.39	
2	6	93.74	87.06	
3	6	92.52	100.37	
ค่าเฉลี่ย		92.26	94.61	0.98
1	9	101.89	94.74	
2	9	95.41	84.22	
3	9	91.11	86.58	
ค่าเฉลี่ย		96.14	88.51	1.09

ข้อมูลแรงดึงของกัมตบขวาทังการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลองที่	ตำแหน่งที่วัด	แรงดึง (N)																																																																																
		ช่วงเวลา 14 ชั่วโมง														ช่วงเวลา 28 ชั่วโมง														ช่วงเวลา 42 ชั่วโมง																																																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9																																																						
1	ต้น	89	93	97	91	93	90	93	99	92	98	103	107	100	103	99	102	109	101	195	198	197	194	194	195	184	195	194	81	81	77	88	77	80	80	85	87	89	89	85	96	85	86	88	94	95	136	138	136	139	135	138	137	140	139	73	69	69	65	73	74	71	59	59	80	76	76	71	80	81	78	65	65	120	126	124	123	123	115	121	122	120
	กลาง	80.93																																																																																
	ปลาย	88.93																																																																																
	เฉลี่ย	151.04																																																																																
2	ต้น	101	97	106	101	99	98	108	101	100	113	108	118	113	110	109	119	112	111	180	182	183	181	182	180	181	175	180	88	88	84	84	95	86	93	87	94	98	98	93	106	96	103	97	105	135	137	135	135	135	132	138	127	124	75	79	75	79	71	80	77	77	71	83	88	83	88	78	89	85	85	78	120	120	118	115	120	121	122	109	108	
	กลาง	88.67																																																																																
	ปลาย	98.48																																																																																
	เฉลี่ย	143.52																																																																																
3	ต้น	86	79	83	80	80	83	81	82	88	110	101	105	102	102	105	103	104	112	170	169	171	168	165	170	171	169	172	68	68	72	70	78	68	77	71	75	87	92	92	90	99	87	98	91	96	120	120	119	118	118	120	122	120	121	61	65	61	65	57	65	57	62	62	78	82	78	83	73	82	73	80	80	90	90	91	90	85	90	92	89	92
	กลาง	72.15																																																																																
	ปลาย	92.04																																																																																
	เฉลี่ย	126.37																																																																																

ข้อมูลแรงดึงของฝักตบขวาทังการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลองที่	ตำแหน่งที่วัด	แรงดึง (N)																																			
		ช่วงเวลา 13 ชั่วโมง									ช่วงเวลา 26 ชั่วโมง									ช่วงเวลา 39 ชั่วโมง									เฉลี่ย								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9									
1	ต้น	119	129	114	111	123	126	121	116	120	144	140	138	134	145	149	145	135	142	167	181	160	156	173	177	170	163	168	เฉลี่ย	99.22	118.70	139.19					
	กลาง	99	94	99	97	98	111	113	96	113	120	114	120	117	119	134	137	116	137	139	132	139	136	138	156	159	135	159	เฉลี่ย	99.22	118.70	139.19					
	ปลาย	80	75	84	89	77	61	64	85	65	96	90	102	108	92	73	77	103	78	111	104	118	125	107	85	89	120	91	เฉลี่ย	99.22	118.70	139.19					
	เฉลี่ย																																				
2	ต้น	117	108	103	112	101	114	105	110	109	115	120	115	114	112	118	117	116	117	142	131	126	135	122	139	128	133	132	เฉลี่ย	89.93	97.81	109.22					
	กลาง	85	90	90	89	88	101	87	103	103	95	111	100	99	98	110	97	95	112	104	109	109	108	107	122	106	125	125	เฉลี่ย	89.93	97.81	109.22					
	ปลาย	67	72	76	69	81	55	77	58	58	75	77	85	77	90	61	86	64	65	82	87	93	84	98	67	94	70	71	เฉลี่ย	89.93	97.81	109.22					
	เฉลี่ย																																				
3	ต้น	92	96	104	101	89	99	96	97	93	103	108	117	114	101	111	109	110	105	126	131	142	139	123	136	133	134	128	เฉลี่ย	79.81	89.78	109.56					
	กลาง	80	80	76	89	78	79	91	91	77	90	90	85	101	88	89	102	102	87	110	110	104	123	107	108	125	106	106	เฉลี่ย	79.81	89.78	109.56					
	ปลาย	68	64	60	49	72	61	52	52	69	76	72	67	55	81	69	58	57	77	93	88	82	67	99	84	71	70	94	เฉลี่ย	79.81	89.78	109.56					
	เฉลี่ย																																				

ข้อมูลแรงดึงของผักตบชวาหลังการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลองที่	ตำแหน่งที่วัด	แรงดึง (N)																										
		ช่วงเวลา 8 ชั่วโมง								ช่วงเวลา 16 ชั่วโมง								ช่วงเวลา 24 ชั่วโมง										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24			
1	ต้น	96	104	92	91	100	98	102	107	98	132	143	126	125	137	141	147	135	168	182	161	159	175	172	179	187	172	
	กลาง	72	72	80	78	89	88	78	78	78	99	99	110	107	123	121	108	107	126	126	140	135	156	154	137	135	137	
	ปลาย	72	64	68	71	50	54	59	55	63	99	88	93	98	69	74	81	76	87	126	112	119	124	88	94	103	96	110
	เฉลี่ย	79.89																										
2	ต้น	117	108	103	112	102	110	120	115	110	169	156	149	162	148	160	174	166	208	192	184	200	182	196	214	204	196	
	กลาง	81	81	90	100	87	99	87	88	88	117	117	130	145	126	143	126	127	144	144	160	179	155	176	155	156	156	
	ปลาย	72	81	76	56	80	60	62	66	71	104	117	110	82	116	87	90	96	103	128	144	136	101	142	107	110	118	126
	เฉลี่ย	139.74																										
3	ต้น	80	84	91	86	80	87	86	89	94	103	108	117	110	102	112	110	115	120	138	144	156	147	137	150	147	153	160
	กลาง	70	63	63	77	68	78	68	68	68	90	81	81	99	87	100	88	88	87	120	108	108	132	116	134	117	117	116
	ปลาย	59	63	56	47	62	44	55	52	48	76	81	72	60	80	57	71	66	62	102	108	96	80	107	75	95	89	83
	เฉลี่ย	89.74																										
		89.70								129.89								159.74										
		69.85																										
		119.81																										

ข้อมูลแรงดึงของผักตบชวาหลังการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลองที่	ตำแหน่งที่วัด	แรงดึง (N)																										
		ช่วงเวลา 7 ชั่วโมง							ช่วงเวลา 14 ชั่วโมง							ช่วงเวลา 21 ชั่วโมง												
		1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
1	ต้น	87	95	103	102	111	101	110	99	106	121	132	143	140	153	139	151	137	146	143	156	169	166	182	165	179	162	172
	กลาง	87	80	80	89	72	76	79	87	75	121	110	110	123	99	104	109	121	103	143	130	130	145	117	123	128	143	122
	ปลาย	64	64	56	48	56	62	50	52	58	88	88	77	66	77	86	69	71	80	104	104	91	78	91	101	82	84	95
	เฉลี่ย	79.59							109.78							129.81												
2	ต้น	84	77	91	97	89	88	88	87	96	108	99	117	126	115	114	112	124	119	132	121	143	154	141	140	137	152	146
	กลาง	70	77	70	63	78	78	66	77	69	90	99	90	81	100	85	99	89	84	110	121	110	99	123	104	121	109	103
	ปลาย	56	56	49	49	42	42	54	45	44	72	72	63	63	54	70	58	57	66	88	88	77	77	66	86	71	69	80
	เฉลี่ย	69.70							89.85							109.93												
3	ต้น	117	99	108	114	115	126	119	124	112	169	143	156	165	166	182	173	179	162	195	165	180	190	192	209	199	207	187
	กลาง	90	99	90	85	100	81	84	89	99	130	143	130	123	145	117	122	129	143	150	165	150	142	168	135	141	148	165
	ปลาย	63	72	72	70	54	63	65	57	58	91	104	104	101	78	91	95	82	84	105	120	120	117	90	105	109	94	97
	เฉลี่ย	89.81							129.89							149.81												

ข้อมูลแรงดึงของผักตบชวาหลังการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลองที่	ตำแหน่งที่วัด	แรงดึง (N)																										
		ช่วงเวลา 6 ชั่วโมง						ช่วงเวลา 12 ชั่วโมง						ช่วงเวลา 18 ชั่วโมง														
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
1	ต้น	125	121	123	130	127	122	128	131	124	136	133	135	143	139	134	140	144	162	157	159	168	164	158	166	170	161	
	กลาง	115	100	97	99	112	99	97	112	96	105	110	106	109	123	109	106	106	123	149	129	126	145	128	126	145	124	
	ปลาย	60	79	80	71	61	79	75	57	80	88	87	88	78	67	87	82	82	62	78	102	104	92	79	102	97	104	
	เฉลี่ย	100.00						109.70						129.52														
2	ต้น	72	75	74	76	78	73	78	77	74	84	87	85	88	90	85	91	89	86	109	112	110	114	117	109	118	115	111
	กลาง	60	69	58	67	59	59	67	58	57	69	80	67	78	69	69	78	67	67	90	103	87	101	89	89	101	87	86
	ปลาย	47	36	48	37	43	47	34	45	48	55	42	56	42	49	55	40	52	56	71	54	72	55	64	71	51	67	72
	เฉลี่ย	59.85						69.48						89.81														
3	ต้น	98	100	96	97	104	101	99	102	104	110	112	108	109	116	114	111	115	117	135	137	133	134	143	140	136	141	144
	กลาง	77	92	80	79	79	89	76	77	89	87	103	90	89	89	100	86	87	100	107	126	110	109	109	123	106	107	123
	ปลาย	64	48	63	63	57	49	64	60	45	72	54	71	71	64	55	72	57	51	88	66	87	87	78	67	88	82	63
	เฉลี่ย	79.70						89.26						109.96														

ข้อมูลแรงดึงของผักตบชวาหลังการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลองที่	ตำแหน่งที่วัด	แรงดึง (N)																										
		ช่วงเวลา 5 ชั่วโมง						ช่วงเวลา 10 ชั่วโมง						ช่วงเวลา 15 ชั่วโมง														
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
1	ต้น	130	125	110	122	132	115	129	123	126	155	149	131	146	158	137	154	147	150	156	150	132	146	158	138	155	147	151
	กลาง	90	95	100	92	99	99	100	110	97	107	113	119	110	118	118	119	131	116	108	114	120	110	119	119	120	132	116
	ปลาย	80	80	90	86	69	86	71	67	77	95	95	107	103	82	103	85	80	92	96	96	108	103	83	103	85	80	92
	เฉลี่ย	100.00						119.26						119.89														
2	ต้น	100	104	88	105	97	92	98	103	100	125	130	110	132	122	115	123	129	126	125	130	110	132	122	115	123	129	126
	กลาง	76	72	80	79	73	79	88	80	77	95	90	100	99	92	99	110	100	97	95	90	100	99	92	99	110	100	97
	ปลาย	64	64	72	55	68	68	53	57	61	80	80	90	69	86	86	67	71	77	80	80	90	69	86	86	67	71	77
	เฉลี่ย	79.74						100.00						100.00														
3	ต้น	110	130	125	115	122	132	126	129	123	132	156	150	138	146	158	151	155	148	132	156	150	138	146	158	151	154	147
	กลาง	100	90	95	99	92	99	97	100	110	120	108	114	119	110	119	116	120	132	120	108	114	118	110	118	116	120	132
	ปลาย	90	80	80	86	86	69	77	71	67	108	96	96	103	103	83	92	85	80	108	96	96	103	103	83	92	85	80
	เฉลี่ย	100.00						119.93						119.78														

ข้อมูลแรงดึงของผักตบชวาหลังการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลองที่	ตำแหน่งที่วัด	แรงดึง (N)																											
		ช่วงเวลา 4 ชั่วโมง						ช่วงเวลา 8 ชั่วโมง						ช่วงเวลา 12 ชั่วโมง						เฉลี่ย									
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		7	8	9						
1	ต้น	83	85	92	94	89	87	90	89	95	92	96	100	100	93	98	97	100	96	92	96	100	101	94	98	100	97	80.00	
	กลาง	72	76	79	71	81	73	72	75	79	80	80	72	79	77	75	78	80	88	80	80	72	79	78	75	78	80	88	80.00
	ปลาย	64	62	64	58	63	62	62	64	65	68	64	68	60	68	66	64	66	68	68	68	64	60	69	66	64	60	55	80.00
	เฉลี่ย	75.78						80.48						80.00						80.00									
2	ต้น	111	103	112	105	113	110	112	109	108	120	115	125	117	126	123	125	122	121	120	115	125	117	126	123	125	122	121	100.00
	กลาง	98	90	85	87	89	92	90	99	95	100	100	90	97	99	94	100	98	110	100	100	90	97	99	94	100	98	110	100.00
	ปลาย	77	78	80	81	67	82	81	72	71	80	85	85	86	75	83	75	80	69	80	85	85	86	75	83	75	80	69	100.00
	เฉลี่ย	92.48						100.00						100.00						100.00									
3	ต้น	137	126	132	138	142	129	138	134	141	149	137	143	147	150	140	144	146	149	150	138	144	147	151	140	145	146	150	119.37
	กลาง	101	110	110	108	109	107	121	111	112	107	119	119	112	118	116	131	117	119	108	120	120	113	119	116	132	117	120	119.37
	ปลาย	94	94	92	91	82	94	81	88	82	102	102	96	99	90	103	82	96	90	102	102	96	99	90	103	83	96	90	119.37
	เฉลี่ย	111.26						119.37						119.37						119.37									

ข้อมูลแรงดึงของผักตบชวาหลังการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลองที่	ตำแหน่งที่วัด	แรงดึง (N)																										
		ช่วงเวลา 3 ชั่วโมง						ช่วงเวลา 6 ชั่วโมง						ช่วงเวลา 9 ชั่วโมง														
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
1	ต้น	101	96	95	99	107	91	102	100	107	108	98	115	127	116	99	111	108	141	121	129	127	140	123	131	132	136	
	กลาง	75	80	84	80	81	77	78	90	82	84	100	87	88	84	84	87	89	88	89	102	99	91	96	101	97	95	
	ปลาย	75	64	76	65	67	62	78	55	64	81	82	84	71	73	68	84	58	69	85	87	73	74	81	86	67	71	
	เฉลี่ย	82.30																		101.89								
2	ต้น	102	107	102	106	107	115	111	98	107	112	117	107	116	118	110	122	108	119	114	119	110	122	119	112	124	113	120
	กลาง	92	80	89	91	91	90	95	85	89	100	81	89	86	88	84	101	86	92	100	82	90	87	89	85	103	87	93
	ปลาย	60	79	79	72	71	69	80	87	71	73	80	80	72	79	74	81	80	76	74	81	81	74	80	74	82	79	
	เฉลี่ย	89.81																		95.41								
3	ต้น	85	94	87	97	89	90	92	95	97	102	111	107	119	112	110	113	103	116	103	111	96	97	102	111	108	105	106
	กลาง	80	81	79	68	71	71	72	68	80	85	84	102	87	91	92	93	88	102	86	85	102	87	92	92	94	89	103
	ปลาย	69	68	54	55	68	62	60	70	55	84	84	70	71	75	76	73	87	61	85	85	73	71	75	77	75	88	62
	เฉลี่ย	76.19																		91.11								

ข้อมูลพื้นที่นำตัดของไม้ตามช่วงการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลองที่	ตำแหน่งที่วัด	พื้นที่นำตัด (mm ²)																																				
		ช่วงเวลา 14 ชั่วโมง							ช่วงเวลา 28 ชั่วโมง							ช่วงเวลา 42 ชั่วโมง																						
		1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	ต้น	127.74	133.55	139.36	130.07	133.55	128.90	132.39	141.68	131.23	104.82	109.58	114.35	106.72	109.58	105.77	108.63	116.25	107.68	90.10	90.04	85.23	91.27	95.03	97.18	94.55	98.73	101.87										
	กลาง	116.13	116.13	110.32	123.42	110.32	113.81	114.97	121.94	124.26	100.01	101.58	105.42	102.91	90.37	93.38	95.37	100.05	102.57	75.55	70.15	69.22	81.46	78.47	80.25	80.11	76.43	77.28										
	ปลาย	104.52	98.71	98.71	92.90	104.52	103.68	101.03	84.77	92.90	99.05	98.12	95.76	97.42	98.75	86.71	90.21	89.88	99.63	43.18	53.47	42.16	56.87	42.74	43.09	45.16	49.78	46.89										
	เฉลี่ย				116.13										101.14															72.45								
2	ต้น	148.38	141.93	154.84	148.38	144.51	145.22	137.42	147.09	145.80	121.76	116.47	127.06	121.76	118.59	117.53	129.17	128.70	119.64	98.52	97.41	99.06	98.14	96.36	97.45	99.57	90.11	97.45										
	กลาง	129.03	129.03	122.58	122.58	139.35	126.45	135.48	127.74	138.06	105.88	105.88	100.59	100.86	114.35	103.76	115.50	114.23	115.78	74.15	68.23	67.55	66.89	71.41	75.46	79.23	78.14	77.03										
	ปลาย	109.68	116.13	109.68	116.13	103.22	117.42	112.26	112.26	112.26	90.00	95.29	90.00	95.29	84.70	96.35	92.12	92.12	92.87	42.84	45.87	42.27	42.97	51.87	37.48	36.87	37.48	35.87										
	เฉลี่ย				129.70										107.34															70.80								
3	ต้น	170.32	156.12	163.22	157.54	158.96	163.22	160.38	161.80	173.15	139.76	135.21	133.94	129.28	130.45	133.94	131.61	132.78	142.09	101.23	99.97	102.46	98.47	99.09	100.46	101.47	99.46	101.44										
	กลาง	134.83	141.93	141.93	139.09	133.28	134.83	151.87	140.51	149.03	110.65	114.21	118.54	114.14	125.79	124.58	124.62	115.51	122.29	73.15	71.47	70.55	62.49	70.47	75.03	71.14	74.56	70.49										
	ปลาย	120.64	127.74	120.64	129.16	113.54	127.74	113.54	123.48	123.48	99.00	104.82	101.22	105.99	93.18	104.82	105.77	101.33	101.33	45.17	43.58	42.13	40.18	49.87	45.16	44.39	47.46	45.18										
	เฉลี่ย				142.67										118.39															72.09								

ข้อมูลพื้นที่หน้าตัดของถังความดันเชิงกลตามช่วงเวลาที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การต่อท่อที่ ตำแหน่งที่วัด	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)																																																																																			
	ช่วงเวลา 13 ชั่วโมง												ช่วงเวลา 26 ชั่วโมง												ช่วงเวลา 39 ชั่วโมง																																																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9																																																
1	ต้น	191.08	207.00	183.11	178.34	197.45	202.22	194.26	186.30	192.67	166.11	161.11	159.87	158.45	162.28	155.89	149.50	154.61	82.80	89.70	79.35	77.28	85.56	87.63	84.18	80.73	83.49	ต้น	159.23	151.27	159.23	156.05	157.64	178.34	181.32	154.45	181.32	134.42	136.55	127.78	125.22	126.50	143.11	145.67	123.95	145.67	69.00	65.55	69.00	67.62	68.31	77.28	78.66	66.93	78.66	ปลาย	127.38	119.42	135.55	143.31	122.61	97.13	101.91	136.94	103.50	111.51	112.01	108.61	115.00	114.11	77.95	81.78	109.89	83.06	55.20	51.75	56.65	62.10	53.13	42.09	44.16	59.34	44.85	
	เฉลี่ย	159.23												131.73												69.00																																																										
	2	ต้น	171.00	157.85	151.27	163.11	147.32	167.06	133.90	160.48	159.16	137.22	126.66	121.38	130.88	118.22	134.05	127.32	128.77	127.72	74.10	68.40	65.55	70.68	63.84	72.39	66.69	69.54	68.97	กลาง	124.96	131.54	131.54	130.22	128.91	147.32	127.59	149.96	149.96	108.21	105.55	105.55	104.49	103.44	118.22	114.11	120.33	120.33	54.15	57.00	57.00	56.43	55.86	63.84	55.29	64.98	64.98	ปลาย	98.66	105.23	111.81	101.29	118.39	80.24	113.12	84.19	85.50	87.11	84.44	89.72	81.27	95.00	92.78	90.77	67.55	68.61	42.75	45.60	48.45	43.89	51.30	34.77	49.02	36.48
เฉลี่ย	131.54												107.77												57.00																																																											
3	ต้น	143.30	149.53	161.99	158.25	139.56	154.52	150.78	152.02	145.79	114.97	119.96	129.96	126.96	111.97	123.96	120.96	121.96	116.96	62.10	64.80	68.57	68.58	60.48	66.96	65.34	65.88	63.18	กลาง	124.61	124.61	118.38	139.56	122.12	123.36	142.06	142.06	120.87	99.97	99.97	94.97	111.97	97.97	98.97	113.97	96.97	50.98	50.98	51.30	60.48	52.92	53.46	52.87	61.56	52.38	ปลาย	105.92	99.69	93.46	76.01	112.15	95.95	81.00	79.75	107.16	84.97	79.98	74.98	60.98	89.97	76.98	64.98	63.98	85.97	45.90	43.20	40.50	32.94	48.60	41.58	34.56	46.44		
	เฉลี่ย	124.61												99.97												53.99																																																										

ข้อมูลพื้นที่แห้งจัดของฝักขามราชผานึ่งที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลองที่	ตำแหน่งที่จัด	พื้นที่แห้งจัด (mm ²)																											
		ช่วงเวลา 8 ชั่วโมง								ช่วงเวลา 16 ชั่วโมง								ช่วงเวลา 24 ชั่วโมง											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	ต้น	133.78	147.10	130.12	128.99	141.44	139.17	144.83	151.62	139.17	103.38	114.17	100.99	100.11	109.78	108.02	112.41	117.68	103.02	77.36	83.81	74.14	73.50	80.59	79.30	82.52	86.39	79.30	
	กลาง	101.84	101.84	113.15	109.76	126.73	124.47	110.89	109.76	110.89	79.04	79.04	87.82	85.19	98.36	96.60	86.06	85.19	86.06	58.02	58.02	64.47	62.54	72.21	70.92	63.18	62.54	63.18	
	ปลาย	101.84	90.52	96.18	100.70	71.28	75.81	83.73	78.07	89.59	79.04	70.26	74.65	78.16	53.33	38.84	64.99	60.60	69.38	58.02	51.38	54.80	37.38	40.62	43.19	47.71	44.48	50.93	
	เฉลี่ย	113.15								87.82								64.47											
2	ต้น	170.86	157.72	151.14	164.29	149.83	161.66	176.12	168.23	161.66	132.63	122.42	117.32	127.53	116.30	125.48	136.71	130.59	125.43	97.36	89.87	86.12	93.61	83.37	92.11	100.33	95.86	92.11	
	กลาง	118.29	118.29	131.43	147.20	127.49	144.57	127.49	128.80	128.80	91.82	91.82	102.02	114.26	98.96	112.22	98.96	99.98	99.98	67.40	67.40	74.89	83.88	72.64	82.38	72.64	73.39	73.39	
	ปลาย	105.14	118.29	111.72	82.80	116.97	88.06	90.69	97.26	103.83	81.62	91.82	86.72	64.27	90.80	68.35	70.39	75.49	80.60	59.91	67.40	63.66	47.18	66.65	50.18	51.67	55.42	59.16	
	เฉลี่ย	131.43								102.02								74.89											
3	ต้น	113.03	117.95	127.78	120.90	112.05	122.86	120.90	125.81	131.71	87.73	91.55	99.18	93.84	86.97	95.36	93.84	97.65	102.23	64.40	67.20	72.80	68.88	63.84	70.00	68.88	71.68	75.04	
	กลาง	98.29	88.46	88.46	108.12	95.34	110.08	96.32	96.32	93.34	76.29	68.66	68.66	83.92	74.00	85.44	74.76	74.76	74.00	56.00	50.40	50.40	61.60	54.32	62.72	54.88	54.32		
	ปลาย	83.55	88.46	78.63	65.85	87.48	61.92	77.65	72.73	67.82	64.83	68.66	61.03	51.11	67.90	48.06	60.27	56.45	52.64	47.60	50.40	44.80	37.52	49.84	35.28	44.24	41.44	38.64	
	เฉลี่ย	98.29								76.29								56.00											

ข้อมูลพื้นที่แห้งแล้งของดินทรายที่การอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลองที่	ตำแหน่งที่วัด	พื้นที่แห้งแล้ง (mm ²)																										
		ช่วงเวลา 7 ชั่วโมง							ช่วงเวลา 14 ชั่วโมง							ช่วงเวลา 21 ชั่วโมง												
		1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	ต้น	114.99	125.45	135.90	133.81	146.36	132.77	144.27	130.68	139.04	94.86	103.49	112.11	110.39	120.74	109.52	119.01	107.80	114.70	68.04	74.22	80.41	79.17	86.59	78.55	83.55	77.31	82.26
	กลาง	114.99	104.54	104.54	117.08	94.09	99.31	103.49	114.99	98.27	94.86	86.24	86.24	96.59	77.62	81.93	83.38	94.86	81.07	68.04	61.85	61.85	69.27	55.67	58.76	61.23	68.04	58.14
	ปลาย	83.63	83.63	73.18	62.72	73.18	81.54	65.86	67.95	76.31	68.99	68.99	60.37	51.74	60.37	67.27	54.33	56.06	62.96	49.48	49.48	43.30	37.11	43.30	48.24	38.97	40.20	45.15
	เฉลี่ย	104.54							86.24							61.85												
2	ต้น	108.80	99.74	117.87	126.94	116.06	115.15	113.34	125.12	126.59	89.76	82.28	97.24	104.72	95.74	95.00	103.22	99.48	64.37	59.00	69.73	75.10	68.66	68.12	67.05	74.02	71.34	
	กลาง	90.67	99.74	90.67	81.60	101.55	86.14	99.74	89.76	83.23	74.80	82.28	74.80	67.32	83.78	71.06	82.28	74.05	53.64	59.00	53.64	48.28	60.08	50.96	59.00	53.10	50.42	
	ปลาย	72.54	72.54	63.47	63.47	54.40	70.72	58.94	57.12	66.19	59.84	59.84	52.36	52.36	44.88	58.54	48.62	47.12	54.60	42.91	42.91	37.55	37.55	32.18	41.84	34.87	33.79	39.16
	เฉลี่ย	90.67							74.80							53.64												
3	ต้น	162.24	137.28	149.76	158.50	159.74	174.72	165.98	172.22	156.00	133.85	113.26	123.55	130.76	131.79	144.14	136.94	142.08	128.70	95.99	81.22	88.61	93.78	94.52	103.38	98.21	101.90	92.30
	กลาง	124.80	137.28	124.80	118.56	139.78	112.32	117.31	123.55	137.28	102.96	113.26	102.96	97.81	113.32	92.66	96.78	101.93	113.26	73.84	81.22	73.84	70.15	82.70	66.46	69.41	73.10	81.22
	ปลาย	87.36	99.84	99.84	97.34	74.88	87.36	91.10	78.62	81.12	72.07	82.37	82.37	80.31	61.78	72.07	75.16	64.86	66.92	51.69	59.07	59.07	57.60	44.30	51.69	53.90	46.52	48.00
	เฉลี่ย	124.80							102.96							73.84												

ข้อมูลพื้นที่หน้าตัดของชนิดบรอนซ์การอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดสอบที่	ตำแหน่งที่วัด	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)																										
		ช่วงเวลา 6 ชั่วโมง						ช่วงเวลา 12 ชั่วโมง						ช่วงเวลา 18 ชั่วโมง														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	พื้น	161.57	152.84	155.36	164.20	160.41	154.10	164.25	165.47	106.14	104.65	101.30	102.98	108.84	106.32	102.14	107.16	109.67	103.81	80.88	78.29	79.38	84.11	82.17	78.93	82.82	84.76	80.23
	กลาง	143.26	126.31	122.52	125.05	141.47	125.05	139.11	141.47	99.37	96.28	83.72	81.21	82.88	93.77	82.88	81.21	93.77	80.37	74.41	64.70	62.76	64.05	72.46	64.05	62.76	72.46	62.11
	ปลาย	88.68	99.78	101.05	89.68	77.05	99.78	98.77	72.00	64.25	50.23	65.14	66.98	59.44	51.07	66.14	62.79	47.72	66.98	38.82	51.11	51.76	45.94	39.47	51.11	48.53	36.88	51.76
	เฉลี่ย	123.76						83.72						64.70														
2	พื้น	101.89	105.26	103.58	106.95	109.47	102.74	110.32	107.79	104.42	67.54	69.78	68.66	69.11	72.37	68.10	73.12	71.45	69.22	52.20	51.93	53.06	54.79	56.08	52.63	56.51	55.22	53.49
	กลาง	84.21	96.84	81.68	94.32	83.37	83.37	94.32	81.68	80.84	53.82	64.19	54.15	33.23	55.26	55.26	62.32	54.15	53.59	43.14	49.61	41.85	48.32	42.71	42.71	48.32	41.85	41.41
	ปลาย	66.53	50.53	67.97	51.37	59.79	66.53	48.00	63.16	67.37	44.10	33.49	44.66	34.05	39.63	44.10	31.82	41.87	44.66	34.08	25.88	34.51	26.32	30.63	34.08	24.59	32.36	34.51
	เฉลี่ย	84.21						55.41						43.14														
3	พื้น	129.47	131.58	127.36	128.42	136.84	133.68	130.32	134.73	137.89	83.82	87.21	84.42	85.12	90.70	88.61	86.51	89.31	91.40	66.32	67.40	65.24	65.78	70.10	68.48	66.86	69.02	70.64
	กลาง	102.10	121.05	105.26	104.21	104.21	117.89	101.05	102.10	117.89	67.68	80.24	69.77	69.07	69.07	78.14	66.98	67.68	78.14	52.30	62.01	53.92	53.38	53.38	60.39	51.76	52.30	60.39
	ปลาย	84.21	63.16	80.16	83.16	74.73	64.21	84.21	78.95	60.00	55.82	41.86	55.12	55.12	49.54	42.56	55.82	39.77	43.14	43.14	32.35	42.60	42.60	38.28	32.89	43.14	40.44	30.73
	เฉลี่ย	105.26						69.77						53.92														

ข้อมูลพื้นที่หน้าตัดของถังเก็บรวบรวมหลังการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.5 m/s

การทดลองที่	ค่าหนึ่งซึ่ง	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)																										
		ช่วงเวลา 5 ชั่วโมง					ช่วงเวลา 10 ชั่วโมง					ช่วงเวลา 15 ชั่วโมง																
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
1	ต้น	165.00	158.65	139.61	154.84	167.53	145.96	163.73	156.11	159.92	105.11	103.59	91.16	101.10	109.39	95.30	101.38	101.93	104.42	102.82	98.86	87.00	96.49	104.40	90.95	94.12	97.28	99.65
	กลาง	114.23	120.57	126.92	116.77	125.65	125.65	126.92	139.61	123.11	74.58	72.25	82.87	76.24	82.04	82.04	82.87	91.16	80.38	71.18	75.14	79.09	72.76	78.30	78.30	79.09	87.00	76.72
	ปลาย	101.54	101.54	114.23	109.15	87.57	109.15	90.11	85.04	97.73	66.30	66.30	74.58	71.27	57.18	71.27	58.84	55.52	63.81	63.27	63.27	71.18	68.02	54.57	68.02	56.15	52.99	60.90
	เฉลี่ย	126.92					82.93					78.80																
2	ต้น	129.80	134.99	114.22	137.07	126.68	119.42	127.72	133.95	130.84	83.44	88.15	74.59	89.51	82.73	77.98	77.98	83.41	87.47	80.89	84.12	71.18	83.42	78.55	74.42	79.59	83.48	81.53
	กลาง	98.65	93.46	103.84	102.80	95.53	102.80	114.22	103.84	100.72	63.78	61.03	67.81	67.13	62.39	67.13	67.13	74.59	67.81	61.47	58.24	64.71	64.06	59.53	64.06	71.18	64.71	62.77
	ปลาย	83.07	83.07	93.46	71.65	89.30	89.30	69.57	73.73	79.96	52.21	54.23	61.03	46.79	58.32	58.32	58.32	45.43	48.15	51.77	51.77	58.24	44.65	55.62	55.65	45.94	49.83	
	เฉลี่ย	103.84					67.81					64.71																
3	ต้น	139.61	165.00	158.65	145.96	154.84	167.53	159.92	163.73	156.11	91.16	107.73	103.59	95.30	101.10	109.39	104.42	106.90	101.93	87.00	102.82	98.86	90.95	96.49	104.40	95.65	102.03	97.28
	กลาง	125.92	114.23	120.57	125.65	116.77	125.65	123.11	126.92	139.61	82.87	74.58	78.73	82.04	76.24	82.04	80.38	82.87	91.16	79.09	71.18	75.14	78.30	72.76	78.30	76.72	79.09	87.00
	ปลาย	114.23	101.54	101.54	109.15	109.15	87.57	97.73	90.11	85.04	74.58	66.30	66.30	71.27	71.27	57.18	63.81	58.84	55.52	71.18	63.27	63.27	68.02	68.02	54.57	60.90	56.15	52.99
	เฉลี่ย	126.92					82.87					79.09																

ข้อมูลพื้นที่หน้าตัดของไม้ตามตารางข้างล่างนี้ ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลองที่	ส่วนแบ่งที่หัก	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)																																																																																				
		ช่วงเวลา 4 ชั่วโมง												ช่วงเวลา 8 ชั่วโมง												ช่วงเวลา 12 ชั่วโมง																																																												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9																																																	
1	ต้น	112.98	123.87	124.22	131.19	121.82	128.07	127.03	124.85	125.99	72.53	75.68	78.84	79.47	73.79	77.58	76.95	78.84	76.31	66.40	69.29	72.18	72.75	67.56	71.02	70.44	72.18	69.87	99.54	83.21	87.36	103.08	101.00	97.87	102.04	83.54	101.67	63.07	63.07	56.76	62.44	61.18	59.29	61.81	63.07	69.38	57.74	51.97	57.16	56.01	54.28	56.59	57.74	63.51	82.57	81.67	85.69	78.09	89.54	86.42	80.97	78.09	71.84	53.61	50.46	53.61	47.30	54.24	52.35	50.46	47.30	43.52	49.08	46.19	49.08	43.31	49.66	47.92	46.19	43.31	39.84	100.51	63.07	57.74		
	กลาง	149.33	143.11	142.64	145.59	141.88	153.06	133.87	151.82	150.57	90.46	86.69	94.23	88.19	94.98	92.72	94.23	91.96	91.21	82.81	79.36	86.26	80.74	86.95	84.88	86.26	84.19	83.50	117.68	115.31	109.87	120.71	112.37	116.97	124.44	121.95	114.97	83.38	75.38	67.84	73.12	74.63	70.86	75.38	73.87	82.92	69.01	69.01	62.11	66.94	68.32	64.87	69.01	67.63	73.91	99.55	82.46	95.87	99.97	87.31	90.45	93.33	87.11	81.67	60.30	54.07	64.07	64.83	56.54	62.57	56.54	60.30	52.01	55.21	58.66	46.19	49.08	43.31	49.66	47.92	46.19	43.31	39.84	118.66	75.38	69.01
	ปลาย	155.43	138.47	175.68	179.52	172.11	178.28	184.38	179.55	172.58	115.38	106.15	110.76	113.53	116.30	107.99	111.68	112.61	115.38	105.63	97.18	101.40	103.94	106.47	98.87	102.25	103.09	105.63	137.14	149.87	152.38	143.24	132.67	147.81	167.62	149.33	147.22	83.07	92.30	92.30	86.76	91.38	89.53	101.53	90.45	92.30	76.05	84.50	84.50	79.43	83.66	81.97	92.95	82.81	84.50	111.65	104.79	115.96	113.87	112.47	116.87	114.88	100.14	105.67	78.46	78.46	73.84	76.61	69.23	79.38	63.69	73.84	69.23	71.83	71.83	67.60	70.14	63.38	72.67	58.31	67.60	63.38	143.69	92.30	84.50	
	เฉลี่ย	111.65	104.79	115.96	113.87	112.47	116.87	114.88	100.14	105.67	78.46	78.46	73.84	76.61	69.23	79.38	63.69	73.84	69.23	71.83	71.83	67.60	70.14	63.38	72.67	58.31	67.60	63.38	143.69	92.30	84.50																																																							
2	ต้น	149.33	143.11	142.64	145.59	141.88	153.06	133.87	151.82	150.57	90.46	86.69	94.23	88.19	94.98	92.72	94.23	91.96	91.21	82.81	79.36	86.26	80.74	86.95	84.88	86.26	84.19	83.50	117.68	115.31	109.87	120.71	112.37	116.97	124.44	121.95	114.97	83.38	75.38	67.84	73.12	74.63	70.86	75.38	73.87	82.92	69.01	69.01	62.11	66.94	68.32	64.87	69.01	67.63	73.91	99.55	82.46	95.87	99.97	87.31	90.45	93.33	87.11	81.67	60.30	54.07	64.07	64.83	56.54	62.57	56.54	60.30	52.01	55.21	58.66	46.19	49.08	43.31	49.66	47.92	46.19	43.31	39.84	100.51	63.07	57.74
	กลาง	117.68	115.31	109.87	120.71	112.37	116.97	124.44	121.95	114.97	83.38	75.38	67.84	73.12	74.63	70.86	75.38	73.87	82.92	69.01	69.01	62.11	66.94	68.32	64.87	69.01	67.63	73.91	99.55	82.46	95.87	99.97	87.31	90.45	93.33	87.11	81.67	60.30	54.07	64.07	64.83	56.54	62.57	56.54	60.30	52.01	55.21	58.66	46.19	49.08	43.31	49.66	47.92	46.19	43.31	39.84	118.66	75.38	69.01																											
	ปลาย	155.43	138.47	175.68	179.52	172.11	178.28	184.38	179.55	172.58	115.38	106.15	110.76	113.53	116.30	107.99	111.68	112.61	115.38	105.63	97.18	101.40	103.94	106.47	98.87	102.25	103.09	105.63	137.14	149.87	152.38	143.24	132.67	147.81	167.62	149.33	147.22	83.07	92.30	92.30	86.76	91.38	89.53	101.53	90.45	92.30	76.05	84.50	84.50	79.43	83.66	81.97	92.95	82.81	84.50	111.65	104.79	115.96	113.87	112.47	116.87	114.88	100.14	105.67	78.46	78.46	73.84	76.61	69.23	79.38	63.69	73.84	69.23	71.83	71.83	67.60	70.14	63.38	72.67	58.31	67.60	63.38	143.69	92.30	84.50	
	เฉลี่ย	111.65	104.79	115.96	113.87	112.47	116.87	114.88	100.14	105.67	78.46	78.46	73.84	76.61	69.23	79.38	63.69	73.84	69.23	71.83	71.83	67.60	70.14	63.38	72.67	58.31	67.60	63.38	143.69	92.30	84.50																																																							
3	ต้น	155.43	138.47	175.68	179.52	172.11	178.28	184.38	179.55	172.58	115.38	106.15	110.76	113.53	116.30	107.99	111.68	112.61	115.38	105.63	97.18	101.40	103.94	106.47	98.87	102.25	103.09	105.63	137.14	149.87	152.38	143.24	132.67	147.81	167.62	149.33	147.22	83.07	92.30	92.30	86.76	91.38	89.53	101.53	90.45	92.30	76.05	84.50	84.50	79.43	83.66	81.97	92.95	82.81	84.50	111.65	104.79	115.96	113.87	112.47	116.87	114.88	100.14	105.67	78.46	78.46	73.84	76.61	69.23	79.38	63.69	73.84	69.23	71.83	71.83	67.60	70.14	63.38	72.67	58.31	67.60	63.38	143.69	92.30	84.50	
	กลาง	137.14	149.87	152.38	143.24	132.67	147.81	167.62	149.33	147.22	83.07	92.30	92.30	86.76	91.38	89.53	101.53	90.45	92.30	76.05	84.50	84.50	79.43	83.66	81.97	92.95	82.81	84.50	111.65	104.79	115.96	113.87	112.47	116.87	114.88	100.14	105.67	78.46	78.46	73.84	76.61	69.23	79.38	63.69	73.84	69.23	71.83	71.83	67.60	70.14	63.38	72.67	58.31	67.60	63.38	143.69	92.30	84.50																												
	ปลาย	111.65	104.79	115.96	113.87	112.47	116.87	114.88	100.14	105.67	78.46	78.46	73.84	76.61	69.23	79.38	63.69	73.84	69.23	71.83	71.83	67.60	70.14	63.38	72.67	58.31	67.60	63.38	143.69	92.30	84.50																																																							
	เฉลี่ย	111.65	104.79	115.96	113.87	112.47	116.87	114.88	100.14	105.67	78.46	78.46	73.84	76.61	69.23	79.38	63.69	73.84	69.23	71.83	71.83	67.60	70.14	63.38	72.67	58.31	67.60	63.38	143.69	92.30	84.50																																																							

ข้อมูลพื้นที่หน้าตัดของผักตบชวาที่รวมแห้ง ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลองที่	ตำแหน่งที่วัด	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)																										
		ช่วงเวลา 3 ชั่วโมง						ช่วงเวลา 6 ชั่วโมง						ช่วงเวลา 9 ชั่วโมง														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ต้น	192.25	199.04	190.39	199.47	205.97	202.47	192.12	199.54	195.72	119.42	114.78	101.02	111.13	110.28	119.39	118.36	119.33	121.58	118.41	107.89	101.33	110.24	124.32	110.07	117.29	118.54	120.36
	กลาง	151.13	166.57	165.24	169.62	171.35	162.70	164.43	190.39	173.08	91.74	101.02	91.84	90.00	90.92	89.23	87.25	101.02	91.84	89.23	101.02	89.57	89.57	87.69	87.51	86.13	99.57	90.36
	ปลาย	100.14	110.47	103.57	125.43	129.57	112.11	122.02	112.50	135.00	82.66	74.65	82.66	74.39	81.43	80.11	87.12	85.21	84.27	79.22	73.15	80.11	72.68	79.46	78.15	86.17	78.09	81.15
	เฉลี่ย	160.83						96.39						94.74														
2	ต้น	179.14	170.26	164.25	185.37	175.54	182.43	154.25	172.90	176.39	145.26	99.19	90.93	98.37	100.02	107.46	103.33	91.75	100.85	138.79	98.26	89.15	98.45	99.15	106.78	102.69	90.46	99.68
	กลาง	145.35	152.14	149.23	146.01	152.65	146.42	142.11	147.98	152.87	120.44	74.39	82.66	81.83	81.01	77.70	90.93	78.53	85.14	116.57	71.69	79.16	79.46	79.12	76.15	88.45	78.01	80.09
	ปลาย	115.24	112.36	124.78	124.89	114.21	101.58	101.25	122.87	115.88	98.54	74.39	74.39	67.78	66.95	62.82	53.73	77.70	64.47	95.16	63.49	70.48	65.98	54.18	60.48	52.17	76.89	63.12
	เฉลี่ย	145.49						87.06						84.22														
3	ต้น	198.54	197.85	197.25	201.59	210.57	199.75	221.71	195.23	199.84	111.12	121.22	116.17	131.33	122.23	120.21	123.24	112.13	126.28	110.00	120.58	114.19	130.57	119.69	117.03	114.08	110.78	119.68
	กลาง	162.64	171.35	171.48	172.36	186.58	180.23	175.36	169.23	174.54	98.16	90.92	111.12	94.96	99.00	99.28	101.02	95.97	97.16	89.57	82.46	84.09	75.99	85.46	86.28	89.56	84.67	87.16
	ปลาย	140.23	141.27	142.79	144.70	154.22	156.12	156.12	135.44	152.78	90.92	90.92	75.77	76.78	81.83	82.84	78.80	94.96	65.66	34.19	55.87	69.13	60.19	56.48	55.87	54.18	52.68	57.18
	เฉลี่ย	175.18						100.37						86.58														



ตารางที่ ข-1 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของการอบแห้งผักตบชวา ที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา (hr)	อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ (°C)				
		Ti	Tf	Teo	Δ Td	Δ Te
1	14	40	38	28	2	10
2	14	40	38	28	2	10
3	14	40	38	28	2	10
เฉลี่ย		40	38	28	2	10
1	28	40	38	28	2	10
2	28	40	38	28	2	10
3	28	40	38	28	2	10
เฉลี่ย		40	38	28	2	10
1	42	40	38	28	2	10
2	42	40	38	28	2	10
3	42	40	38	28	2	10
เฉลี่ย		40	38	28	2	10

หมายเหตุ :

Ti = อุณหภูมิเข้าตู้อบ

Tf = อุณหภูมิออกจากตู้อบ

Teo = อุณหภูมิออกจากเครื่องทำระเหย

Δ Td = ความแตกต่างอุณหภูมิของตู้อบ

Δ Te = ความแตกต่างอุณหภูมิของเครื่องทำระเหย

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของการอบแห้งผักตบชวา ที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา (hr)	อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ (°C)				
		Ti	Tf	Teo	Δ Td	Δ Te
1	13	40	38	28	2	10
2	13	40	38	28	2	10
3	13	40	38	28	2	10
เฉลี่ย		40	38	28	2	10
1	26	40	38	28	2	10
2	26	40	38	28	2	10
3	26	40	38	28	2	10
เฉลี่ย		40	38	28	2	10
1	39	40	38	28	2	10
2	39	40	38	28	2	10
3	39	40	38	28	2	10
เฉลี่ย		40	38	28	2	10

หมายเหตุ :

Ti = อุณหภูมิเข้าตู้อบ

Tf = อุณหภูมิออกจากตู้อบ

Teo = อุณหภูมิออกจากเครื่องทำระเหย

Δ Td = ความแตกต่างอุณหภูมิของตู้อบ

Δ Te = ความแตกต่างอุณหภูมิของเครื่องทำระเหย

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของการอบแห้งผักตบชวา ที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา (hr)	อุณหภูมิที่จุดต่างๆ (°C)				
		Ti	Tf	Teo	Δ Td	Δ Te
1	12	40	38	28	2	10
2	12	40	38	28	2	10
3	12	40	38	28	2	10
เฉลี่ย		40	38	28	2	10
1	24	40	38	28	2	10
2	24	40	38	28	2	10
3	24	40	38	28	2	10
เฉลี่ย		40	38	28	2	10
1	36	40	38	28	2	10
2	36	40	38	28	2	10
3	36	40	38	28	2	10
เฉลี่ย		40	38	28	2	10

หมายเหตุ :

Ti = อุณหภูมิเข้าตู้อบ

Tf = อุณหภูมิออกจากตู้อบ

Teo = อุณหภูมิออกจากเครื่องทำระเหย

Δ Td = ความแตกต่างอุณหภูมิของตู้อบ

Δ Te = ความแตกต่างอุณหภูมิของเครื่องทำระเหย

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของการอบแห้งผักตบชวา ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา (hr)	อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ (°C)				
		Ti	Tf	Teo	Δ Td	Δ Te
1	8	50	46	30	4	16
2	8	50	46	30	4	16
3	8	50	46	30	4	16
เฉลี่ย		50	46	30	4	16
1	16	50	46	30	4	16
2	16	50	46	30	4	16
3	16	50	46	30	4	16
เฉลี่ย		50	46	30	4	16
1	24	50	46	30	4	16
2	24	50	46	30	4	16
3	24	50	46	30	4	16
เฉลี่ย		50	46	30	4	16

หมายเหตุ :

Ti = อุณหภูมิเข้าตู้อบ

Tf = อุณหภูมิออกจากตู้อบ

Teo = อุณหภูมิออกจากเครื่องทำระเหย

Δ Td = ความแตกต่างอุณหภูมิของตู้อบ

Δ Te = ความแตกต่างอุณหภูมิของเครื่องทำระเหย

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของการอบแห้งผักตบชวา ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา (hr)	อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ (°C)				
		Ti	Tf	Teo	Δ Td	Δ Te
1	7	50	48	35	2	13
2	7	50	48	35	2	13
3	7	50	48	35	2	13
เฉลี่ย		50	48	35	2	13
1	14	50	48	35	2	13
2	14	50	48	35	2	13
3	14	50	48	35	2	13
เฉลี่ย		50	48	35	2	13
1	21	50	48	35	2	13
2	21	50	48	35	2	13
3	21	50	48	35	2	13
เฉลี่ย		50	48	35	2	13

หมายเหตุ :

Ti = อุณหภูมิเข้าตู้อบ

Tf = อุณหภูมิออกจากตู้อบ

Teo = อุณหภูมิออกจากเครื่องทำระเหย

Δ Td = ความแตกต่างอุณหภูมิของตู้อบ

Δ Te = ความแตกต่างอุณหภูมิของเครื่องทำระเหย

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของการอบแห้งผักตบชวา ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา (hr)	อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ (°C)				
		Ti	Tf	Teo	Δ Td	Δ Te
1	6	50	47	35	3	12
2	6	50	47	35	3	12
3	6	50	47	35	3	12
เฉลี่ย		50	47	35	3	12
1	12	50	47	35	3	12
2	12	50	47	35	3	12
3	12	50	47	35	3	12
เฉลี่ย		50	47	35	3	12
1	18	50	47	35	3	12
2	18	50	47	35	3	12
3	18	50	47	35	3	12
เฉลี่ย		50	47	35	3	12

หมายเหตุ :

Ti = อุณหภูมิเข้าตู้อบ

Tf = อุณหภูมิออกจากตู้อบ

Teo = อุณหภูมิออกจากเครื่องทำระเหย

Δ Td = ความแตกต่างอุณหภูมิของตู้อบ

Δ Te = ความแตกต่างอุณหภูมิของเครื่องทำระเหย

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของการอบแห้งผักตบชวา ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.3 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา (hr)	อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ (°C)				
		Ti	Tf	Teo	Δ Td	Δ Te
1	5	60	55	37	5	18
2	5	60	55	37	5	18
3	5	60	55	37	5	18
เฉลี่ย		60	55	37	5	18
1	10	60	55	37	5	18
2	10	60	55	37	5	18
3	10	60	55	37	5	18
เฉลี่ย		60	55	37	5	18
1	15	60	55	37	5	18
2	15	60	55	37	5	18
3	15	60	55	37	5	18
เฉลี่ย		60	55	37	5	18

หมายเหตุ :

Ti = อุณหภูมิเข้าตู้อบ

Tf = อุณหภูมิออกจากตู้อบ

Teo = อุณหภูมิออกจากเครื่องทำระเหย

Δ Td = ความแตกต่างอุณหภูมิของตู้อบ

Δ Te = ความแตกต่างอุณหภูมิของเครื่องทำระเหย

ตารางที่ ช-8 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของการอบแห้งผักตบชวา ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.6 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา (hr)	อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ (°C)				
		Ti	Tf	Teo	Δ Td	Δ Te
1	4	60	55	44	5	11
2	4	60	55	44	5	11
3	4	60	55	44	5	11
เฉลี่ย		60	55	44	5	11
1	8	60	55	44	5	11
2	8	60	55	44	5	11
3	8	60	55	44	5	11
เฉลี่ย		60	55	44	5	11
1	12	60	55	44	5	11
2	12	60	55	44	5	11
3	12	60	55	44	5	11
เฉลี่ย		60	55	44	5	11

หมายเหตุ :

Ti = อุณหภูมิเข้าตู้อบ

Tf = อุณหภูมิออกจากตู้อบ

Teo = อุณหภูมิออกจากเครื่องทำระเหย

Δ Td = ความแตกต่างอุณหภูมิของตู้อบ

Δ Te = ความแตกต่างอุณหภูมิของเครื่องทำระเหย

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของการอบแห้งผักตบชวา ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.9 m/s

การทดลอง ครั้งที่	ช่วงเวลา (hr)	อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ (°C)				
		Ti	Tf	Teo	Δ Td	Δ Te
1	3	60	57	43	3	14
2	3	60	57	43	3	14
3	3	60	57	43	3	14
เฉลี่ย		60	57	43	3	14
1	6	60	57	43	3	14
2	6	60	57	43	3	14
3	6	60	57	43	3	14
เฉลี่ย		60	57	43	3	14
1	9	60	57	43	3	14
2	9	60	57	43	3	14
3	9	60	57	43	3	14
เฉลี่ย		60	57	43	3	14

หมายเหตุ :

Ti = อุณหภูมิเข้าตู้อบ

Tf = อุณหภูมิออกจากตู้อบ

Teo = อุณหภูมิออกจากเครื่องทำระเหย

Δ Td = ความแตกต่างอุณหภูมิของตู้อบ

Δ Te = ความแตกต่างอุณหภูมิของเครื่องทำระเหย



ตารางที่ ข ข้อมูลค่าวัสดุและค่าแรงในการสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน

รายการ ที่	ชื่อรายการ	หน่วย	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
(1) รายการเหล็กรูปพรรณ					
1	เหล็กกล่อง □ 50 x 50 x 1.5 ^t mm	เส้น	10	300	3,000
2	เหล็กฉาก L 40 x 40 x 3.2 ^t mm	เส้น	5	130	650
3	เหล็กแบน □ 50 x 2 ^t mm	เส้น	2	120	240
4	สังกะสี เบอร์ 18 (1.2 m x 2.4 m)	แผ่น	15	560	8,400
5	วัสดุสิ้นเปลือง		เหมา		<u>3,000</u>
	รวมเงินในหมวดที่ 1				<u>15,290</u>
(2) รายการอุปกรณ์ระบบปั๊มความร้อน และอุปกรณ์ไฟฟ้า					
(2.1) อุปกรณ์หลัก					
1	เครื่องอัดไอ ขนาด 1.6 kW	ชุด	1	16,050	16,050
2	พัดลมหลัก	ชุด	1	2,659	2,659
3	มอเตอร์พร้อมใบพัดสำหรับเครื่องควบแน่น ชุดนอก	ชุด	1	1,300	1,300
4	มอเตอร์ของพัดลมหลัก 1/2 HP	ชุด	1	1,500	1,500
5	เครื่องทำระเหย	ชุด	1	900	900
6	เครื่องควบแน่นชุดใน	ชุด	1	1,000	1,000
7	เครื่องควบแน่นชุดนอก	ชุด	1	1,000	<u>1,000</u>
	รวม				<u>24,409</u>

ตารางที่ ข (ต่อ) ข้อมูลค่าวัสดุและค่าแรงในการสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ป้มความร้อน

รายการ ที่	ชื่อรายการ	หน่วย	จำนวน	ราคาต่อ หน่วย (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
(2.2) อุปกรณ์สำหรับวงจรมอเตอร์					
1	โซลีนอยด์วาล์ว	ชุด	2	1,500	3,000
2	วาล์วกันกลับ	ชุด	2	340	680
3	กระจกมองน้ำยา	ชุด	1	444	444
4	ฟิวเตอร์ ๑๕แอมป์	ชุด	1	219	219
5	วาล์วควบคุมน้ำยา	ชุด	1	1,758	1,758
6	เกจวัดแรงดัน	ชุด	2	300	600
7	ท่อทองแดง และข้อต่อ			เหมา	1,500
8	สารทำความเย็น	กิโลกรัม	1	5,000	5,000
	รวม				<u>13,201</u>
(2.3) อุปกรณ์ไฟฟ้าและควบคุม					
1	ชุดควบคุมอุณหภูมิ	ชุด	1	9,000	9,000
2	ตู้ควบคุมไฟฟ้าพร้อมอุปกรณ์			จ้างเหมา	7,580
	รวม				<u>16,580</u>
(2.4) อุปกรณ์อื่นๆ					
1	แผงกรองอากาศ	ชุด	1	500	500
2	ฉนวน หนา 40 mm ความหนาแน่น 32 kg/m ³	แผ่น	4	400	1,600
	รวม				<u>2,100</u>
	รวมเงินในหมวดที่ (2)				<u>56,290</u>

ตารางที่ ข (ต่อ) ข้อมูลค่าวัสดุและค่าแรงในการสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน

รายการ ที่	ชื่อรายการ	หน่วย	จำนวน	ราคาต่อ หน่วย (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
	(3) ชั้นวางถาดและถาด				
1	โครงวางถาด และถาด เหม่าจ่าย	ชุด	2	2,240	<u>4,480</u>
	รวมเงินในหมวดที่ (3)				<u>4,480</u>
1	(4) รายการค่าแรงสร้างเครื่องและแปรรูปวัสดุ			จ้างเหมา	<u>11,000</u>
	รวมเป็นเงินทั้งสิ้น				<u>87,060</u>

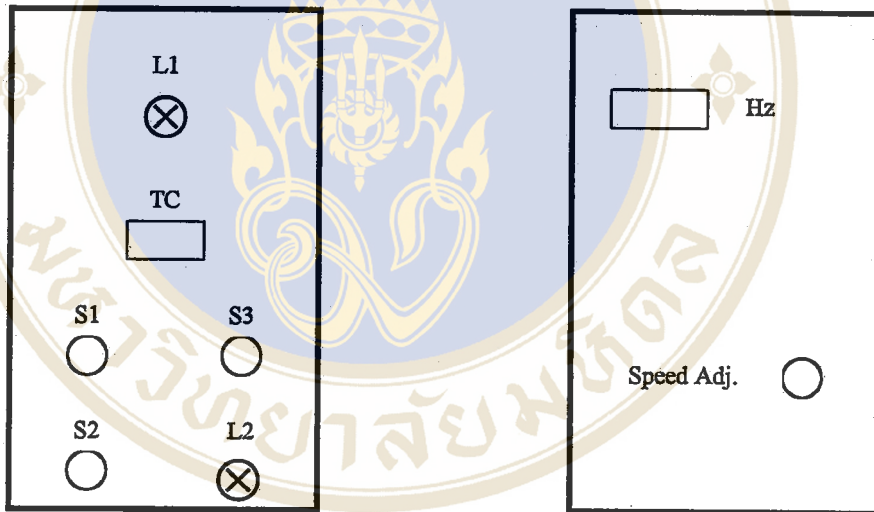


ภาคผนวก ฉ

คำแนะนำการใช้เครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อน ได้ออกแบบเพื่อการอบแห้ง ซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิได้ถึง 60 °C และสามารถปรับความเร็วลมในระดับต่าง ๆ ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาอบแห้ง ดังนั้นก่อนทำการอบแห้งควรปฏิบัติตามขั้นตอน ดังนี้

1. กดสวิทช์ S1 จะทำให้สัญญาณไฟสีเขียวสว่าง (L1) ดังรูปที่ ก
2. ทำการปรับความเร็วของมอเตอร์ โดยหมุน Volume เพื่อปรับความถี่ที่ 43 Hz, 48 Hz และ 53 Hz จะทำให้ได้ความเร็วลมภายในตู้อบแห้งประมาณ 0.3 m/s, 0.6 m/s และ 0.9 m/s ซึ่งเครื่องปรับความเร็วมอเตอร์สามารถปรับความถี่ได้ 1-120 Hz ดังรูปที่ ข



รูปที่ ก แสดงตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า รูปที่ ข แสดงเครื่องปรับความเร็วลมของมอเตอร์พัดลม

3. การปรับค่าอุณหภูมิ

3.1 กดปุ่ม (SET) จะทำให้ตัวเลขของ SV ซึ่งเป็นสี่สั้มปรากฏขึ้น เป็นเลข 4 หลัก

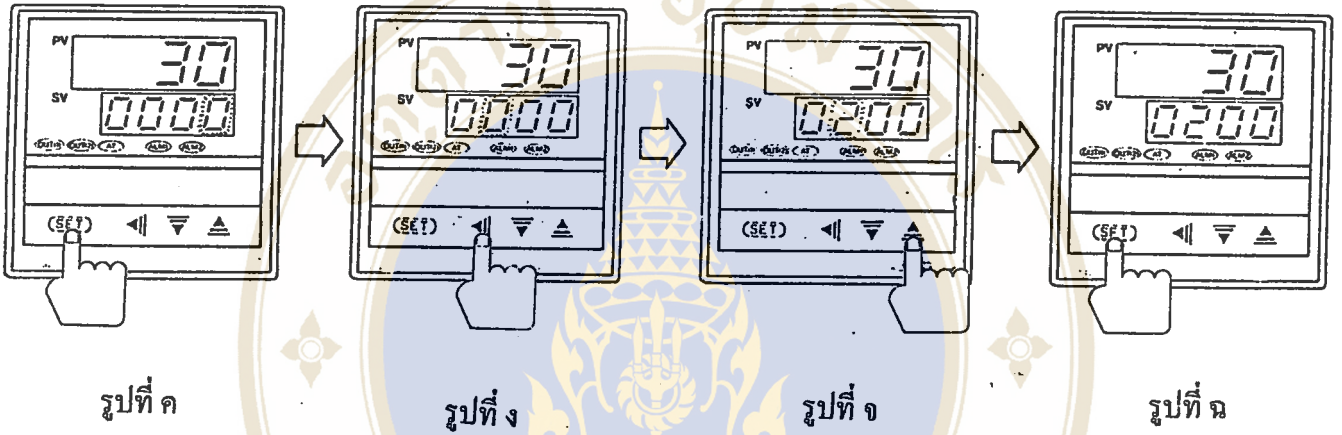
ดังรูปที่ ค

3.2 เลข 4 หลักนี้ มี 1 หลัก ที่มีสี่ขีดมากกว่าหลักอื่น แสดงว่า เป็นเลขหลักที่พร้อมจะทำการปรับค่า และถ้าต้องการปรับค่าเลขหลักอื่น ก็ให้กดปุ่ม ◀ เลขหลักก็จะเคลื่อนจากขวาไปซ้ายทีละ 1 เลขหลัก ต่อการกดปุ่ม ◀ 1 ครั้ง ดังรูปที่ ง

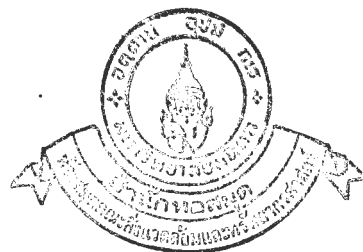
3.3 จากนั้นจะปรับค่าของเลขหลักนั้นก็ให้กดปุ่ม ▲ หมายถึงปรับค่าขึ้น และ ถัดกดปุ่ม ▼ หมายถึงปรับค่าลง ดังรูปที่ ๑

3.4 เมื่อปรับค่าของเลขหลักต่าง ๆ ได้ครบทุกตัว หรือตรงตามค่าที่ต้องการแล้ว ให้กดปุ่ม (SET) เพื่อให้สิ้นสุดการปรับค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ดังรูปที่ ๓

4. กดสวิทช์ S2 ทำให้สัญญาณไฟสีเขียวสว่าง (L2) เพื่อเริ่มเดินเครื่องอัดไอ และ เมื่อต้องการหยุดการทำงานของเครื่องอบแห้งให้กดสวิทช์ S3



ประวัติผู้วิจัย



ชื่อ

นายนเรศ สว่างจันทร์

วัน เดือน ปีเกิด

3 มิถุนายน 2512

สถานที่เกิด

จังหวัดอุดรดิตถ์ ประเทศไทย

ประวัติการศึกษา

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน, พ.ศ. 2533-2535

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (ไฟฟ้ากำลัง)
มหาวิทยาลัยมหิดล, พ.ศ. 2539-2543

ทุนวิจัย

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
(เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร)

ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์บางส่วน

ประจำปีการศึกษา 2543 จากกองทุนเพื่อส่งเสริม
การอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานคณะกรรมการ
นโยบายพลังงานแห่งชาติ

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

พ.ศ. 2535 – ปัจจุบัน

วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี กรมอาชีวศึกษา

กระทรวงศึกษาธิการ

ตำแหน่ง : อาจารย์ 1 ระดับ 5

