การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศสำหรับกระบวนการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

นายกานต์ เกตุเอี่ยม

นายธรรมนูญ อุดมมั่น

นายธีรภัท พนมกิจ

วัน เดือน ปี -4 ต.ค. 2541

เลขทะเบียน 038649

เลขเรียกหนังสือ T 660.2842 ก

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038649

Design of a Vacuum Dryer for the Pilot Scale Production of Carboxymethyl Cellulose

Karn Kateiam

Teerapat Panomkid

Tamanoon Udomman

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Bachelor of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศสำหรับกระบวนการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

โดย นายกานต์ เกตุเอี่ยม

นายธรรมนูญ อุดมมั่น

นายธีรภัท พนมกิจ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัศวรัตน์[1]

ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ[2]

1. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร. ธีรวัฒน์ มงคลอัศวรัตน์)

.....กรรมการ
(อ. สุรัตน์ อารีรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศสำหรับกระบวนการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

โดย นายกานต์ เกตุเอี่ยม
นายธรรมนูญ อุดมมั่น
นายธีรภัท พนมกิจ

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัศวรัตน์[1]
ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ[2]

1. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศสำหรับกระบวนการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีกำลังการผลิต 12.5 กิโลกรัมต่อวัน สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 ซ.ม. และยาว 70 ซ.ม. มีพื้นที่การอบแห้งและปริมาตรของเครื่องอบแห้ง 0.63 ตารางเมตร และ 0.075 ลูบบาศก์เมตร ตามลำดับ เครื่องอบแห้งนี้มีเครื่องควบแน่นไอของตัวทำละลายซึ่งจะใช้ในกรณีที่ต้องการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ แต่ทั้งนี้จะต้องสร้างส่วนที่จะทำให้ตัวทำละลายบริสุทธิ์เพิ่มเติมต่อไป และยังมีท่อทองแดงที่พันรอบห้องสุญญากาศในกรณีที่ต้องการให้ความร้อนแก่วัสดุที่อบแห้งด้วยน้ำร้อนหรือไอน้ำ

การอบแห้งทำที่ความดันสัมบูรณ์ 560 และ 660 ม.ม.ปรอท โดยที่ซีเอ็มซีที่ได้จากการอบแห้งไม่สูญเสียสมบัติและมีลักษณะภายนอกที่ดี พบว่าที่ปริมาณการอบแห้งที่ใกล้เคียงกัน การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 560 ม.ม.ปรอท จะใช้เวลาในการอบแห้งซีเอ็มซีให้มีความชื้นต่ำกว่า 8 % (%โดยน้ำหนัก) น้อยกว่าการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 660 ม.ม.ปรอท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Design of a Vacuum Dryer for the Pilot Scale Production of Carboxymethyl Cellulose

By Mr. Karn Kateiam

Mr. Teerapat Panomkid

Mr. Tamanoon Udomman

Advisor Dr. Anchaleeporn Waritswat

Co-Advisor Asst.Prof.Dr. Theerawat Mongkolausawarat[1]

Dr. Gobboon Lothongkum[2]

1. Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

2. Department of Metallurgical Engineer, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

A vacuum dryer for the production of carboxymethyl cellulose (CMC) with a production rate of 12.5 kg/day, was made from stainless steel grade 304. The cylindrical dryer had a diameter of 40 cm and length of 70 cm. The drying area and drying volume of the vacuum dryer were 0.63 m^2 and 0.075 m^3, respectively. The vacuum dryer is also equipped with a condenser for solvent recovery, however, the solvent purification unit is still needed. A part of the vacuum dryer contains copper tubes which roll along the vacuum chamber in order to heat the CMC using either hot water or steam.

Drying was operated at the absolute pressures of 560 mmHg and 660 mmHg. The dried CMC retained its quality and still had a good appearance. At the same quantity of CMC, to reach the moisture content less than 8 % (wt. %), drying at the absolute pressure of 560 mmHg showed a better performance than at 660 mmHg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

บริษัท ไทยเซลลูโลสโปรดักส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และนำชมโรงงาน

คุณพนัส อินทรพาณิชย์ ห้างหุ้นส่วนจำกัดโปร - คอนเว เอ็นจิเนียริ่ง ที่ให้คำปรึกษาและคำแนินการสร้างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

ดร.ตะวัน สุขน้อย ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาในการทำโครงงานพิเศษนี้มาตลอด

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ที่ให้การสนับสนุนปริญญานิพนธ์นี้

เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในระหว่างการทำโครงงานพิเศษนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัศวรัตน์ และดร.กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขโครงงาน ทำให้โครงงานฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ถ้ามีสิ่งผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

นายกานต์ เกตุเอี่ยม

นายธรรมนูญ อุดมมั่น

นายธีรภัท พนมกิจ

11 มีนาคม 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ญ
สัญลักษณ์	ฑ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานพิเศษ	1
1.3 ขอบเขตของโครงงานพิเศษ	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานของโครงงานพิเศษ	2
บทที่ 2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	3
2.1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	3
2.2 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	4
2.3 คุณสมบัติหลักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	4
2.4 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแห้ง	5
2.5 ประโยชน์และการใช้งานของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	5
บทที่ 3 ทฤษฎีและความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการอบแห้ง	7
3.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง	7
3.2 กลไกอบแห้ง	9
3.3 ประเภทของเครื่องอบแห้ง	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ	20
4.1 ขั้นตอนการออกแบบ	20
4.2 รายละเอียดการออกแบบ	28
4.3 ขั้นตอนการสร้างและประกอบเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ	39
บทที่ 5 การดำเนินการทดลอง	43
5.1 การสังเคราะห์ซีเอ็มซีจากเซลลูโลสชนิดผง	43
5.2 การเก็บข้อมูลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ	44
บทที่ 6 ผลการทดลอง	46
6.1 ผลการทดลองการอบแห้ง	46
6.2 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลอง	55
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	68
7.1 สรุปผลการทดลอง	68
7.2 ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารอ้างอิง	70
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง	72
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ	82
ภาคผนวก ค ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ	83
ภาคผนวก ง การประเมินค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ซีเอ็มซี และการเดินเครื่องอบแห้ง	84
ภาคผนวก จ เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ	86
ภาคผนวก ฉ เครื่องปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร และอุปกรณ์ประกอบ	93
ภาคผนวก ช แผนผังวงจรไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 6.1 แสดงการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure) 660 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 °ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.	46
ตารางที่ 6.2 แสดงการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure) 560 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 °ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.	50
ตารางที่ ก.1 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 1	72
ตารางที่ ก.2 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 2	73
ตารางที่ ก.3 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 3	74
ตารางที่ ก.4 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 4	75
ตารางที่ ก.5 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 5	76
ตารางที่ ก.6 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 6	77
ตารางที่ ก.7 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 7	78
ตารางที่ ก.8 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 8	79
ตารางที่ ก.9 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 9	80
ตารางที่ ก.10 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 10	81
ตารางที่ ค.1 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ	83
ตารางที่ ง.1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีเอ็มซี และการประเมินราคา	84
ตารางที่ ง.2 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีเอ็มซี และการประเมินราคา	85
ตารางที่ ง.3 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้และการประเมินค่าใช้จ่ายในการอบแห้งแบบสุญญากาศ	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	4
รูปที่ 3.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของมวลและอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้ง	9
รูปที่ 3.2 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง	10
รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งแบบถาด	11
รูปที่ 3.4 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์	12
รูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งแบบหมุน	13
รูปที่ 3.6 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง	14
รูปที่ 3.7 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	15
รูปที่ 3.8 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด	16
รูปที่ 3.9 เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ	17
รูปที่ 3.10 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดป้อนวัสดุเข้าโดยตรง	17
รูปที่ 3.11 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดมีเครื่องกระจายวัสดุ	18
รูปที่ 3.12 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดมี Disintegrator	19
รูปที่ 4.1 แผนภาพกระบวนการผลิตและอบแห้งซีเอ็มซี	21
รูปที่ 4.2 แสดง Single-Compartment Vacuum Tray Dryer	22
รูปที่ 4.3 แสดง Multi-Compartment Vacuum Tray Dryer	23
รูปที่ 4.4 แบบร่างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศแบบที่ 1	24
รูปที่ 4.5 แบบร่างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศแบบที่ 2	26
รูปที่ 4.6 เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ	27
รูปที่ 4.7 ห้องสุญญากาศ (Vacuum chamber)	29
รูปที่ 4.8 ภาพขยายตัดขวางด้านข้างห้องสุญญากาศ	30
รูปที่ 4.9 ภาพขยายด้านล่างของห้องสุญญากาศ	31
รูปที่ 4.10 ภาพขยายชั้นวางถาดใส่ซีเอ็มซี	32
รูปที่ 4.11 ภาพขยายฝาปิดห้องสุญญากาศ	33
รูปที่ 4.12 ที่ติดตั้งเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 ภาพตัดแนวขวางของเครื่องควบแน่นไอของตัวทำละลาย (Condenser) 35
รูปที่ 4.14 ภาพด้านบนเครื่องควบแน่นไอของตัวทำละลาย (Condenser) 36
รูปที่ 4.15 แสดงการติดตั้งห้องสุญญากาศ 37
รูปที่ 4.16 แผนผังกระบวนการอบแห้งแบบสุญญากาศ 38
รูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ 47
ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท
อุณหภูมิ 45 °ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.
รูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ 48
ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท
อุณหภูมิ 45 °ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.
รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย 49
ที่ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 °ซ และ
ความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.
รูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ 51
ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท
อุณหภูมิ 45 °ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.
รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ 52
ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท
อุณหภูมิ 45 °ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.
รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย 53
ที่ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 °ซ และ
ความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.
รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ 55
ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท
ปริมาณการอบแห้ง 55.9 และ 64.9 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 °ซ
และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.
รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ 56
ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท
ปริมาณการอบแห้ง 142.1 และ 104.9 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 °ซ
และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ 57
ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท
ปริมาณการอบแห้ง 274.0 และ 249.7 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 °ซ
และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.
รูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ 58
ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท
ปริมาณการอบแห้ง 846.7 และ 611.1 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 °ซ
และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.
รูปที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ 59
ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท
ปริมาณการอบแห้ง 55.9 และ 64.9 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 °ซ
และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.
รูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ 60
ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท
ปริมาณการอบแห้ง 142.1 และ 104.9 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 °ซ
และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.
รูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ 61
ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท
ปริมาณการอบแห้ง 274.0 และ 249.7 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 °ซ
และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.
รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ 62
ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท
ปริมาณการอบแห้ง 846.7 และ 611.1 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 °ซ
และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.
รูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ 63
ความชื้นเฉลี่ยที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท
ปริมาณการอบแห้ง 55.9 และ 64.9 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 °ซ
และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 142.1 และ 104.9 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 °ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม. 64

รูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 274.0 และ 249.7 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 °ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม. 65

รูปที่ 6.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 846.7 และ 611.1 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 °ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม. 66

รูปที่ จ.1 แสดงภาพห้องสุญญากาศ 86

รูปที่ จ.2 แสดงภาพการพันท่อทองแดงรอบห้องสุญญากาศ 87

รูปที่ จ.3 แสดงภาพการตัดช่องใส่แผ่นอะคริลิกชนิดใสบนฝาปิดห้องสุญญากาศ 88

รูปที่ จ.4 แสดงภาพเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ 89

รูปที่ จ.5 แสดงภาพชั้นวางของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ 90

รูปที่ จ.6 แสดงภาพระบบท่อและวาล์วปรับความดันของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ 91

รูปที่ จ.7 แสดงภาพเกจวัดความดันสุญญากาศและวงจรไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ 92

รูปที่ ฉ.1 แสดงภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีเอ็มซี 93

รูปที่ ฉ.2 แสดงภาพตู้ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และมอเตอร์ในการปั่นกวน (ขวา) และภาพเครื่องทำน้ำร้อนและน้ำเย็นสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมี (ซ้าย) 94

รูปที่ ฉ.3 แสดงภาพเครื่องปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร พร้อมมอเตอร์กระแสสลับ 95

รูปที่ ฉ.4 แสดงภาพฝาถัง ครีบ ใบพัด มอเตอร์ และขาตั้ง 96

รูปที่ ช.1วงจรไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ 97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

H : เอนทาลปีของอากาศชื้น

H_R : ความชื้นสัมพัทธ์

L : ความยาวทรงกระบอก (เมตร)

P_v : ความดันไอ

P_{vs} : ความดันไออิ่มตัว

r : รัศมีทรงกระบอก (เมตร)

R : ความเร็วของการอบแห้ง

R_w : ความเร็วของการอบแห้งที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก

T : อุณหภูมิกระเปาะแห้ง

T_{do} : อุณหภูมิจุดน้ำค้าง

T_{wb} : อุณหภูมิกระเปาะเปียก

v : ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น

W_d : อัตราส่วนความชื้นต่อมวลของวัสดุแห้ง

W_w : ปริมาณความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC) เป็นสารอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาอีเทอริฟิเคชันระหว่างเซลลูโลสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับกรดคลอโรอะซีติกที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเฟสทรานเฟอร์ ซีเอ็มซีใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมกาว และอุตสาหกรรมน้ำมัน เป็นต้น แต่โรงงานที่ทำการผลิตในประเทศมีอยู่เพียงแห่งเดียวคือ บริษัท ไทยเซลลูโลสโปรดักส์ จำกัด จากประโยชน์ดังกล่าวข้างต้น การพัฒนาการผลิตซีเอ็มซีจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในกระบวนการผลิตซีเอ็มซีนั้นจะต้องใช้น้ำและแอลกอฮอล์ เช่น ไอโซโพรพานอลหรือเอธานอลเป็นตัวทำละลาย ขั้นตอนการอบแห้งเพื่อไล่น้ำและแอลกอฮอล์ออกจากซีเอ็มซีก่อนการบรรจุเพื่อส่งจำหน่าย เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการผลิต ปริมาณน้ำและแอลกอฮอล์ในซีเอ็มซีจะต้องไม่เกิน 8 % โดยน้ำหนัก (ปริมาณน้ำและแอลกอฮอล์ต่อซีเอ็มซีแห้ง ในที่นี้จะเรียกว่าความชื้น)

โครงงานนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศเพื่ออบแห้งซีเอ็มซีชื้นในระดับกำลังผลิต 12.5 กิโลกรัมต่อวัน ปริมาณความชื้นแอลกอฮอล์ในซีเอ็มซีก่อนการอบแห้งมีค่าระหว่าง 30 - 70 % โดยน้ำหนัก

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานพิเศษ

1.2.1 ใช้ทฤษฎีของการอบแห้งและความรู้ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

1.2.2 คำนวณขนาด สร้าง และทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศที่เหมาะสมกับกำลังการผลิตซีเอ็มซีแบบครั้ง (Batch operation) ที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ

1.3 ขอบเขตของโครงงานพิเศษ

1.3.1 ศึกษาความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับซีเอ็มซีและกระบวนการผลิตซีเอ็มซี

1.3.2 ศึกษาลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 เตรียมซีเอ็มซีเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลการอบแห้งภายใต้ระบบสุญญากาศ

1.3.4 ออกแบบและคำนวณขนาดของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศสำหรับกระบวนการผลิตซีเอ็มซีในระดับกำลังผลิต 12.5 กิโลกรัมต่อวัน

1.3.5 สร้างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ (Pilot scale)

1.3.6 ทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศที่สร้างขึ้น โดยการทดลองอบแห้งซีเอ็มซีที่เตรียมได้จากห้องปฏิบัติการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะและหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ

1.4.2 เรียนรู้พื้นฐานการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งแบบสุญญากาศ

1.4.3 มีความเข้าใจในการทำงานเกี่ยวกับการออกแบบและการเก็บข้อมูลในการทำงานวิจัย

1.4.4 สามารถออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศเพื่ออบแห้งซีเอ็มซี

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานของโครงงานพิเศษ

1.5.1 ศึกษาสมบัติของซีเอ็มซีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ศึกษาลักษณะและหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ

1.5.3 ศึกษาเรื่องเทคโนโลยีสุญญากาศ

1.5.4 ศึกษากระบวนการผลิตและทดลองเตรียมซีเอ็มซีเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลการอบแห้ง

1.5.6 ออกแบบ สร้าง และทดลองการใช้งานเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

1.5.7 คำนวณค่าพื้นฐานจากข้อมูลการอบแห้ง

1.5.8 สรุปและเขียนรายงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

2.1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [1]

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถสังเคราะห์ได้ตามขั้นตอนปฏิกิริยาดังนี้

ก.ปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลส (Cellulose, Cell-OH) ในวัฏภาคตัวทำละลายอินทรีย์คือ ไอโซโพรพานอล (Isopropanol, $(CH_3)_2CHOH$) กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)ในวัฏภาคน้ำ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาคือ เททระเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Tetramethyl ammonium chloride, $(CH_3)_4N^+Cl^-$) เป็นสารนำพาระหว่างสองวัฏภาค แสดงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

ข.ปฏิกิริยาการเกิดอีเทอร์ระหว่างเซลลูโลสที่ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วกับสารละลายกรดคลอโรอะซีติก (Chloroacetic acid, Cl^-CH_2COOH) ในไอโซโพรพานอล จากนั้นทำให้เป็นกลางด้วยกรดอะซีติกเข้มข้นเพื่อหยุดปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, Cell-OCH_2COOH) โดยมีโซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมไกลคลอเรตเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา นำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ได้จากปฏิกิริยาไปทำให้บริสุทธิ์โดยใช้เมทานอล เอทานอล หรือแอซีโทน สกัดแยกเกลือโซเดียม แสดงดังสมการที่ 2.3

2.1.1 ปฏิกิริยาเฟสทรานเฟอร์ (Phase transfer reaction)

$$(CH_3)_4N^+Cl^- + NaOH \longrightarrow (CH_3)_4N^+OH^- + NaCl \qquad (2.1)$$

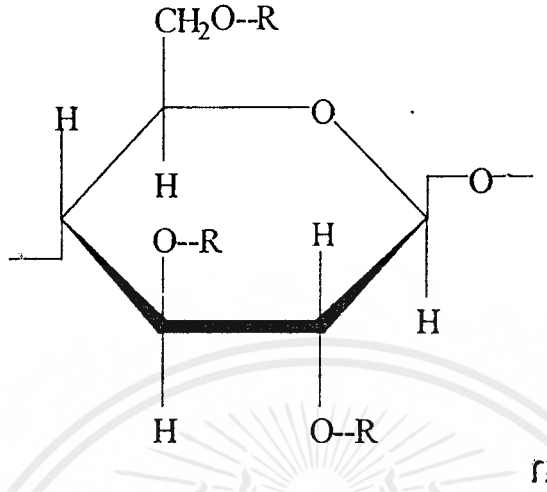
$$(CH_3)_4N^+OH^- + \text{Cell-OH} \longrightarrow \text{Cell-O}^-N^+(CH_3)_4 + H_2O \qquad (2.2)$$

2.1.2 ปฏิกิริยาการเกิดอีเทอร์ (Etherification)

$$\text{Cell-O}^-N^+(CH_3)_4 + Cl^-CH_2COOH \longrightarrow \text{Cell-}OCH_2COOH + (CH_3)_4N^+Cl^- \qquad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [2]

n : ความยาวโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

R : H หรือ $CH_2COO^-Na^+$

2.3 คุณสมบัติหลักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [3]

2.3.1 เป็นสารเพิ่มความหนืดและช่วยในการยึดเกาะ

2.3.2 ละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ น้ำมัน และไข สามารถละลายในสารละลายผสมระหว่างน้ำกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำ เช่น เอทานอล หรือ อะซีโทน ได้สารละลายที่มีความหนืด

2.3.3 มีค่าความเป็นกรดด่างประมาณ 6.5 - 8.0

2.3.4 ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นอันตราย ไม่เป็นพิษ และไม่ระคายเคืองผิวหนัง

2.3.5 สารละลายซีเอ็มซีในน้ำแม้จะทิ้งไว้นาน ๆ จะไม่เปลี่ยนแปลงความหนืด

2.3.6 ทำหน้าที่เป็นสารคงสภาพ (Stabilizer) สารแขวนลอย (Suspending aid) สารกระจายอนุภาค (Dispersant) สารทำให้ข้น (Thickener) และสารยึดเกาะ (Binder)

2.3.7 มีความคงทนต่อสารเคมีและเชื้อจุลินทรีย์สูงกว่าสารธรรมชาติ

2.3.8 ไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติแม้จะเก็บไว้เป็นเวลานาน ดูดและเก็บน้ำได้ดี

2.3.9 ความหนืดลดลงเมื่อถูกแรงเฉือนและการกวนสารละลาย

2.3.10 เป็นสารเพิ่มเนื้อสำหรับอาหารและเครื่องดื่มแคลอรีต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแห้ง [3]

ความบริสุทธิ์ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (%โดยน้ำหนัก)	72 - 99.5 %
ความชื้น (%โดยน้ำหนัก)	7 - 8 %
อุณหภูมิที่ทำให้เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล (Browning temperature, °ซ)	180 - 225
อุณหภูมิที่ทำให้เป็นถ่าน (Chaming temperature, °ซ)	210 - 250
ความหนาแน่น (Bulk density, กรัม/มล.)	0.65 - 0.75
บีโอดี (Biological Oxygen Demand, ppm)	10,000 - 18,000

2.5 ประโยชน์และการใช้งานของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [4]

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารที่นิยมใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น

2.5.1 อุตสาหกรรมอาหาร

- ใช้เป็นสารป้องกันการตกผลึกในไอศกรีม น้ำเชื่อม น้ำตาลปั่น (Icing) อาหารพวกที่ฉาบน้ำตาล
- ใช้เป็นสารช่วยในการแขวนลอยในผลิตภัณฑ์อาหาร นม น้ำผลไม้
- ใช้เป็นสารทำให้ข้นในสลัด เครื่องดื่ม อาหารสัตว์
- ใช้เป็นสารทำให้เป็นวุ้นในเยลลี่ ขนมพุดดิ้ง (Pudding)
- ใช้เป็นสารทำให้ขึ้นฟูในไอศกรีม (Whipping cream)

2.5.2 อุตสาหกรรมยา

- ใช้เคลือบเม็ดยาเพื่อให้คงตัว และใช้เป็นสารควบคุมการออกฤทธิ์ของยา เนื่องจากซีเอ็มซีไม่ละลายในสภาวะที่เป็นกรดเช่นในกระเพาะอาหาร แต่ละลายในสภาวะที่เป็นด่างเช่นในลำไส้
- ใช้เป็นสารป้องกันการแยกตัวของยาที่มีส่วนผสมของสารแขวนลอยหรืออิมัลชั่น

2.5.3 อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

- ใช้เป็นสารทำให้ข้น สารช่วยทำให้การแขวนลอยคงตัว สารก่อฟิล์มในผลิตภัณฑ์จำพวกครีม โลชั่น แชมพู เจล ยาสีฟัน

2.5.4 อุตสาหกรรม ผงซักฟอก

- ใช้ผสมในผงซักฟอกเพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกที่หลุดจากผ้ากลับไปติดบนเนื้อผ้า

2.5.5 อุตสาหกรรมสีและวานิช

- ใช้เป็นสารทำให้ข้น และสารช่วยในการแขวนลอยของผงสี ใช้เป็นสารก่อฟิล์มในวานิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.6 อุตสาหกรรมพอลิเมอร์

- ใช้เป็นสารป้องกันการแยกตัว และช่วยทำให้การแขวนลอยคงตัวในปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของไวนิลคลอไรด์

2.5.7 อุตสาหกรรมสิ่งทอ

- ใช้เป็นสารช่วยให้ด้ายดิบมีความแข็งแรง ทน เรียบ และมีน้ำหนัก
- ใช้เป็นสารทำให้ข้นในสีพิมพ์ผ้า

2.5.8 อุตสาหกรรมกาว

- ใช้เป็นสารทำให้ข้นในกาวสูตรน้ำ

2.5.9 อุตสาหกรรมกระดาษ

- ใช้เป็นสารเคลือบกระดาษเพื่อให้การพิมพ์หมึกดีขึ้น ไม่ดูดซึมน้ำมัน

2.5.10 อุตสาหกรรมน้ำมัน

- ใช้เป็นสารผสมทำน้ำโคลน (Mud) สำหรับหล่อลื่นเครื่องขุดเจาะน้ำมัน เนื่องจากซีเอ็มซีอุ้มน้ำได้ปริมาณสูงจึงทำให้การแขวนลอยของน้ำโคลนคงตัว

2.5.11 อุตสาหกรรมเซรามิก

- ใช้เป็นสารช่วยทำให้ข้น และสารช่วยในการแขวนลอยส่วนผสมของดิน

2.5.12 อุตสาหกรรมยาฆ่าแมลง

- ใช้เป็นสารช่วยในการแขวนลอยในยาฆ่าแมลงจำพวกสูตรน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีและความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการอบแห้ง

3.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง [5]

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทไปยังวัสดุชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุชื้นโดยการระเหย ความร้อนที่วัสดุชื้นได้รับนี้จะนำไปเป็นความร้อนแฝงของการระเหยเพื่อไล่ความชื้นออก ในกระบวนการอบแห้งจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของอากาศชื้น ดังนั้นจึงควรที่จะมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณสมบัติของอากาศชื้น แม้ว่านิยามของคำต่าง ๆ ที่จะกล่าวถึงเป็นนิยามที่ใช้กับระบบอบแห้งไล่น้ำออกจากวัสดุ แต่ก็สามารถประยุกต์ใช้กับระบบอบแห้งไล่น้ำและแอลกอฮอล์ออกจากซีเอ็มซี คำว่าความชื้นในที่นี้หมายถึง ปริมาณน้ำและแอลกอฮอล์ที่มีอยู่ในซีเอ็มซี

3.1.1 ความดันไอ (Vapour pressure, P_v)

ความดันไอ คือ ส่วนของความดันย่อย (Partial pressure) ที่กระทำโดยโมเลกุลของไอน้ำที่อยู่ในอากาศชื้น ถ้าอากาศชื้นนี้อิ่มตัวด้วยไอน้ำเรียกความดันไอนี้ว่า ความดันไออิ่มตัว (Saturated vapour pressure, P_w) ค่าความดันไออิ่มตัวนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

3.1.2 ความชื้นสมดุล (Equilibrium humidity)

ความชื้นสมดุล คือ ปริมาณความชื้นในวัสดุชื้นที่มีปริมาณเท่ากับความชื้นของอากาศภายนอก ทำให้อัตราการแพร่เข้าและออกของความชื้นเข้าไปในวัสดุชื้นมีค่าเท่ากันเมื่อทิ้งไว้ที่ความดันบรรยากาศภายนอก

3.1.3 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, H_R)

ความชื้นสัมพัทธ์ คือ ความชื้นที่มีอยู่ในอากาศโดยคิดจากสัดส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริง ณ อุณหภูมินั้นต่อสัดส่วนของปริมาณไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน ค่าความชื้นสัมพัทธ์มักจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ มีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 %

3.1.4 ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น (Specific volume, v)

ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น คือ ปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของอากาศแห้ง

3.1.5 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-bulb temperature, T)

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง คือ อุณหภูมิของอากาศชื้นภายในห้องที่ทำการวัดในขณะนั้นโดยนำเทอร์โมมิเตอร์ไปแขวนอย่างอิสระที่ใดที่หนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet-bulb temperature, T_{wb})

อุณหภูมิกระเปาะเปียก คือ อุณหภูมิของอากาศชื้นที่ชี้บอกโดยเทอร์โมมิเตอร์ที่กระเปาะถูกหุ้มด้วยผ้าชุบน้ำหรือสำลีเปียก และมีลมพัดผ่านกระเปาะเปียกนี้ด้วยความเร็วอย่างน้อย 4.6 เมตร/วินาที อุณหภูมิกระเปาะเปียกนี้อาจเรียกว่า อุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงไซโครเมตริกหรืออุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงเทอร์โมไดนามิกส์ (T_{wb}) อุณหภูมินี้ได้จากการทำให้อากาศชื้นเป็นอากาศอิ่มตัว โดยพ่นละอองน้ำภายในสถานที่ที่จะวัด (หุ้มฉนวนอย่างดี) น้ำจะระเหยจนกระทั่งอากาศขณะนั้นอิ่มตัว อุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงไซโครเมตริกและอุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงเทอร์โมไดนามิกส์นี้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ในทางปฏิบัตินิยมใช้ค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงไซโครเมตริกในการคำนวณ

3.1.7 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-point temperature, T_{do})

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง คือ อุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศเริ่มควบแน่นเมื่ออากาศนั้นถูกทำให้เย็นลงที่อัตราส่วนความชื้นและความดันบรรยากาศคงที่

3.1.8 เอนทาลปีของอากาศชื้น (Enthalpy, H)

เอนทาลปีของอากาศชื้น คือ ค่าปริมาณความร้อนของอากาศชื้นที่สูงกว่าอุณหภูมิอ้างอิงที่กำหนดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง ในทางปฏิบัตินิยมใช้อุณหภูมิอ้างอิงของน้ำ 32 °ฟ และของอากาศแห้ง 0 °ฟ (ในระบบอังกฤษ) และอุณหภูมิอ้างอิงของทั้งน้ำและอากาศแห้งเท่ากับ 0 °ซ (ในระบบเมตริก และระบบสากล) ในการคำนวณเกี่ยวกับความแตกต่างของเอนทาลปีของอากาศชื้นนิยมใช้อุณหภูมิอ้างอิงของระบบอังกฤษหรือระบบสากล แต่สามารถกำหนดอุณหภูมิอ้างอิงใด ๆ ก็ได้เพื่อความสะดวกในการคำนวณ

3.1.9 อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio, W_d)

อัตราส่วนความชื้น คือ มวลของไอน้ำที่อยู่ในอากาศแห้งหนึ่งหน่วยมวล

โดยทั่วไปจะนิยามปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในวัสดุอบแห้งดังนี้

W_d = อัตราส่วนความชื้นต่อมวลวัสดุแห้งซึ่งเป็นมาตรฐานในการคำนวณหาความชื้น

W_w = ปริมาณความชื้นโดยมวลของวัสดุเปียกที่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ดังนั้นจึงนิยมที่จะใช้มวลของวัสดุแห้งเป็นมาตรฐานในการคำนวณความชื้น

W_d สัมพันธ์กับ W_w ดังนี้

$$W_d = W_w/(1-W_w) \quad (3.1)$$

หรือ $$W_w = W_d/(1+W_d) \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

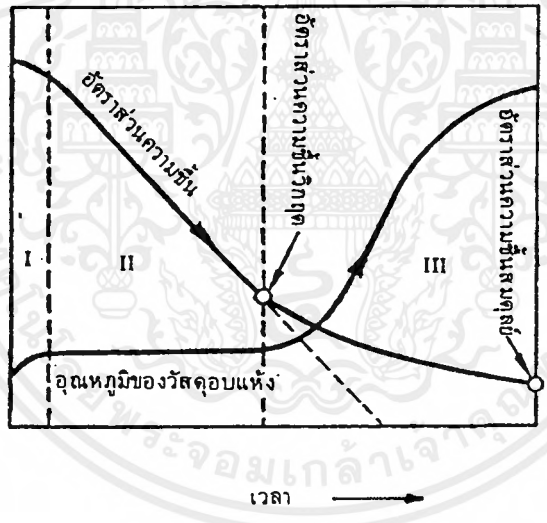
3.2 กลไกอบแห้ง [5]

เงื่อนไขการอบแห้ง แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

3.2.1 เงื่อนไขภายนอกวัสดุ เช่น วิธีถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุ วิธีกำจัดความชื้นที่ระเหยออกมาจากวัสดุ ความอิ่มตัวของอากาศร้อน ความดันและอุณหภูมิของการอบแห้ง

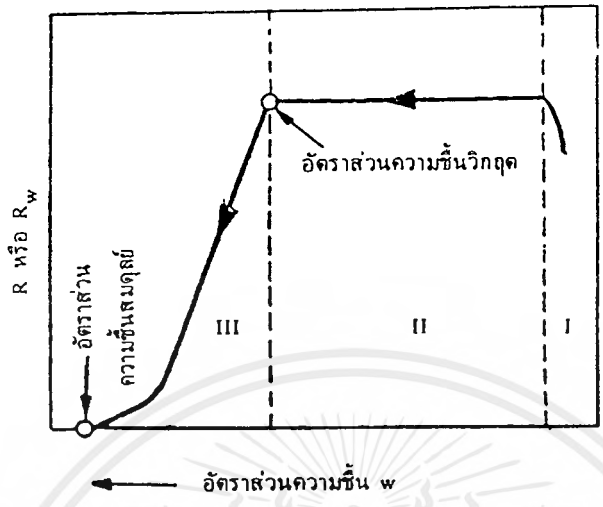
3.2.2 เงื่อนไขภายในวัสดุ เช่น ความพรุนของของแข็ง การนำความร้อนของวัสดุชื้น อุณหภูมิของวัสดุชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราส่วนความชื้นสมดุล เป็นต้น

ในการอบแห้งวัสดุเปียกชื้นจะกระทำภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งที่คงที่ เช่น ความชื้น ความเร็วลม อุณหภูมิ ความดัน ฯลฯ ถ้าทำการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลาจะได้เส้นกราฟมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 หรือวัดอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นจะได้เส้นกราฟที่เรียกว่า "เส้นลักษณะเฉพาะการอบแห้ง" แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของมวลและอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้ง [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง [5]

จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 พบว่า การอบแห้งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงใหญ่ ๆ ดังนี้

ก. ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ

ข. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่

ค. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก. ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ

ที่ผิวของวัสดุชื้นความชื้นจะอยู่ในรูปของเหลว ถ้านำเอาวัสดุชื้นนี้มาอบภายใต้สภาวะการอบแห้งคงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของกระแสลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกนี้คือ ช่วง 1 ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2

ข. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่

เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทจากอากาศมายังวัสดุชื้น ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลขึ้นพร้อมกัน ในช่วงนี้ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับ จะถูกใช้ในการระเหยน้ำหรือของเหลวออกจากวัสดุชื้น ความร้อนที่วัสดุได้รับในช่วงนี้คือ ความร้อนแฝงในการระเหยนั่นเอง อัตราการอบแห้งในช่วงนี้จึงไม่ขึ้นกับเงื่อนไขภายในวัสดุ แต่ขึ้นกับเงื่อนไขภายนอกวัสดุที่ใช้ในการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

ในขั้นตอนนี้เมื่อความชื้นในรูปของเหลวที่ผิววัสดุระเหยหมด เนื่องจากการถ่ายเทของเหลวจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของของเหลวหรือน้ำจากผิววัสดุ ทำให้อัตราการอบแห้งในวัสดุลดลง และเรียกจุดเปลี่ยนอัตราส่วนความชื้นที่อัตราการอบแห้งที่การอบแห้งคงที่ในช่วงที่อัตราการอบแห้งลดลง เรียกว่า "อัตราส่วนความชื้นวิกฤติ" วัสดุจึงแห้ง และอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้นจนสมดุลกับอากาศขาเข้า เรียกอัตราส่วนความชื้นที่จุดนี้ว่า "อัตราส่วนความชื้นสมดุล"

3.3 ประเภทของเครื่องอบแห้ง [5]

เครื่องอบแห้งที่ใช้กันในระดับอุตสาหกรรม แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

ก. เครื่องอบแห้งที่ระบบการทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous dryer)

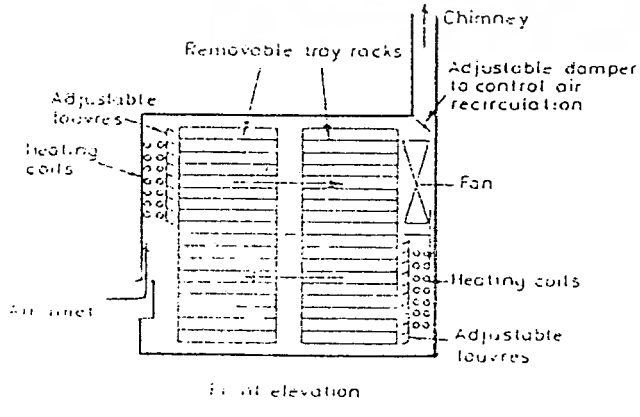
ข. เครื่องอบแห้งที่ระบบการทำงานแบบครั้ง (Batch dryer)

เมื่อแบ่งตามลักษณะของการทำงานของเครื่องอบแห้งสามารถแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

3.3.1 เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryer)

หลักการทำงาน

ทำให้อากาศร้อนแล้วให้ไหลผ่านวัสดุชื้นในเครื่องอบแห้ง ลมร้อนที่เข้าไปจะระเหยเอาของเหลวออกจากวัสดุชื้น การไหลของลมร้อนจะขนานกับถาดบรรจุวัสดุชื้น หรือ อาจจะตั้งฉากกับตัวถาดก็ได้แล้วแต่การออกแบบ เหมาะสำหรับวัสดุชื้นในรูปของแข็งที่ไม่สามารถอบแห้งแบบกองรวมกันในปริมาณมาก ๆ ได้ เครื่องอบแห้งแบบถาดมีข้อเสียคือ การกระจายของลมร้อนไม่ทั่วถึงทำให้วัสดุชื้นที่จุดต่าง ๆ แห้งไม่เท่ากัน และวัสดุชื้นตรงทางเข้าของลมร้อนจะแห้งมากกว่าวัสดุชื้นที่อยู่ตรงทางออกของลมร้อน รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องอบแห้งแบบถาด



รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งแบบถาด [6]

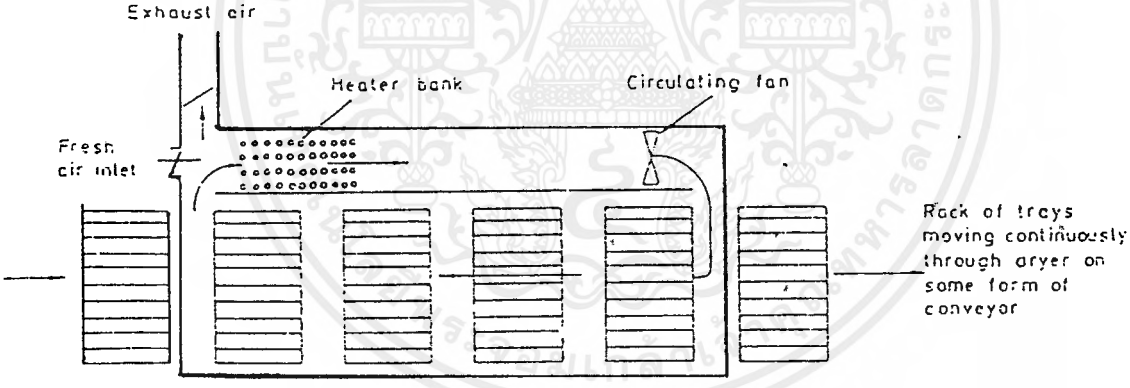
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ (Tunnel dryer)

หลักการทำงาน

วัสดุชื้นจะอยู่บนสายพาน แล้วให้สายพานเลื่อนเข้าไปในอุโมงค์ที่มีอากาศร้อนไหลสวนทางกับการเคลื่อนที่ของสายพาน หรือจะให้อากาศร้อนไหลขนานทางเดียวกับวัสดุก็ได้ ขึ้นอยู่กับว่าต้องการอัตราการอบแห้งที่เร็วเพียงใด และการทนต่ออุณหภูมิสูง ๆ ของวัสดุชื้นได้มากเพียงใด เครื่องอบแห้งแบบนี้ใช้ในอุตสาหกรรมไม้อัด เส้นหมี่ รองเท้า และการฟอกหนัง เป็นต้น

ผู้ควบคุมเครื่องมือหรือผู้ออกแบบเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์จะต้องคำนวณหรือพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องให้รอบคอบ เพราะถ้าพิจารณาไม่ดีจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ได้ตามมาตรฐานที่ต้องการ ตัวแปรที่สำคัญ เช่น เวลาที่สายพานเคลื่อนที่ในอุโมงค์ ปริมาณของวัสดุชื้นที่อยู่บนสายพาน ปริมาณความชื้นในวัสดุชื้น ความชื้นของอากาศในวันที่ที่ทำการอบแห้ง ความเร็วของลมร้อน สิ่งเหล่านี้จะต้องสัมพันธ์กันอย่างดีจึงจะได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ตรงตามมาตรฐาน รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์



รูปที่ 3.4 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ [6]

3.3.3 เครื่องอบแห้งแบบหมุน (Rotary dryer)

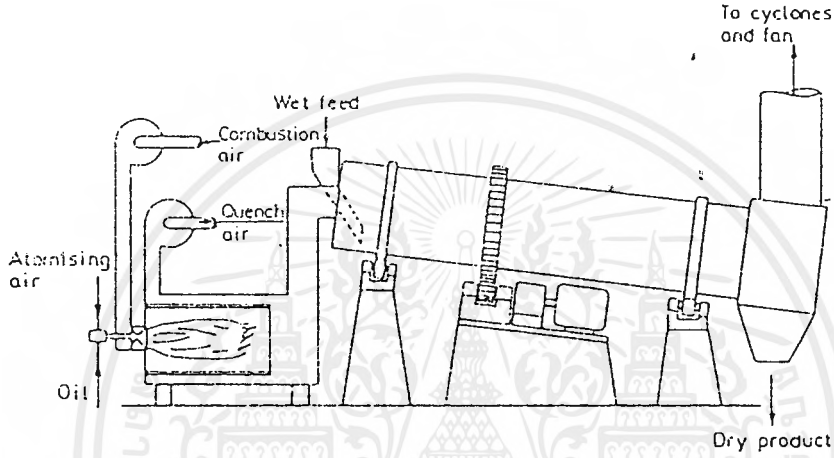
หลักการทำงาน

มีลักษณะเป็นทรงกระบอกหมุนได้ ทำให้วัสดุชื้นที่อยู่ภายในมีการพลิกตัวเองอย่างสม่ำเสมอ ทุกส่วนของวัสดุชื้นได้สัมผัสกับอากาศร้อนอย่างทั่วถึง ทรงกระบอกนี้จะวางในแนวนอนสูงข้างหนึ่งต่ำข้างหนึ่ง หมุนได้ด้วยแรงขับของมอเตอร์ วัสดุชื้นถูกป้อนเข้าสู่ทรงกระบอกทางด้านสูงก่อนแล้วค่อย ๆ กลิ้งลงตามการหมุนของทรงกระบอก วัสดุที่แห้งแล้วจะออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านต่ำ อากาศชื้นจะออกทางด้านสูง ภายในเครื่องอบแห้งยังมีการติดตั้งครีบหรือก้างปลาไว้ภายใน เพื่อให้วัสดุเคลื่อนที่ขึ้นลงและกลับตัวเองได้ดี

เครื่องอบแห้งแบบนี้สามารถใช้ได้กับวัสดุชื้นที่มีความชื้นสูงถึง 70 % และลดปริมาณความชื้นลงเหลือต่ำกว่า 10 % อุตสาหกรรมที่นิยมใช้เครื่องอบแห้งแบบหมุน เช่น อุตสาหกรรมปูนซิเมนต์ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมถลุงแร่ อุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องอบแห้งแบบหมุน



รูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งแบบหมุน [6]

3.3.4 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer)

หลักการทำงาน

เครื่องอบแห้งแบบนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่เป็นแผ่นหรือถูกทำให้เป็นแผ่นพร้อมกับการทำให้แห้ง ใช้ลูกกลิ้งขนาดใหญ่ตรงแกนด้านหนึ่งใช้ไอน้ำเป็นแหล่งให้ความร้อนเข้าสู่ภายในลูกกลิ้ง ความร้อนจะผ่านผนังลูกกลิ้งไปถ่ายเทให้กับฟิล์มของเหลวที่ติดกับผนังลูกกลิ้งด้านนอกที่หมุนช้า ๆ พอครบรอบวัสดุชื้นจะเป็นแผ่นแห้งพอดี ด้านล่างของลูกกลิ้งจะมีแผ่นโลหะลักษณะคล้ายใบมีดวางทาบติดอยู่กับลูกกลิ้ง เพื่อใช้ขูดของแข็งที่เป็นแผ่นให้ลอกออกจากผนังลูกกลิ้ง

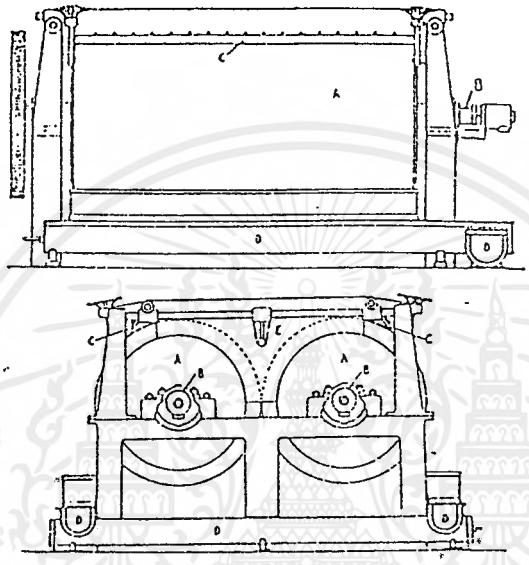
เครื่องอบแห้งแบบนี้ใช้งานได้ทั้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยว และแบบลูกกลิ้งคู่ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของวัสดุที่จะใช้ดังนี้

ก. เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยว ใช้ได้ดีกับอุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ ใช้ได้ดีกับอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมยาง

ในการใช้งานของเครื่องแห้งแบบลูกกลิ้ง เพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ต้องคำนึงถึงความเร็วลูกกลิ้ง ปริมาณความร้อนจากไอน้ำ ชนิดของผนังลูกกลิ้ง ความหนาของชั้นฟิล์ม รูปที่ 3.6 แสดงเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง



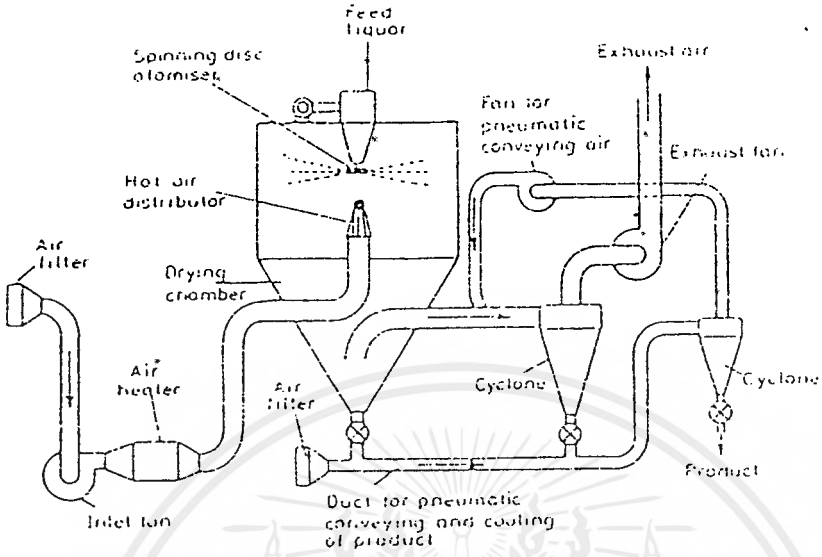
รูปที่ 3.6 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง [7]

3.3.5 เครื่องอบแห้งแบบหัวฉีดพ่นฝอย (Spray dryer)

หลักการทำงาน

การป้อนวัสดุชื้นเข้าไปในเครื่องผ่านหัวฉีด หมุนด้วยความเร็วรอบสูงประมาณ 10,000 รอบต่อนาที สามารถทำให้ของเหลวแห้งเป็นผงในเวลาไม่นานนัก จุดประสงค์ของการทำงานผ่านหัวฉีดคือ ต้องการให้วัสดุชื้นกลายเป็นละอองเล็ก ๆ ลอยอยู่ในเครื่องอบแห้งที่มีลมร้อนไหลสวนทางขึ้นมา ความร้อนของลมร้อนทำให้ของเหลวระเหยออกได้อย่างรวดเร็ว เมื่อละอองของวัสดุชื้นลอยลงมาถึงส่วนล่างของเครื่องอบแห้ง จะกลายเป็นผงเล็ก ๆ แล้วถูกดูดออกจากเครื่องด้วยพัดลมดูด เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมีต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการทำงานสูง สินค้าที่ใช้เครื่องอบแห้งแบบนี้จึงมีราคาแพง ส่วนมากใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น กาแฟผง สำเร็จรูป ไข่ผง นมผง เป็นต้น รูปที่ 3.7 แสดงเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



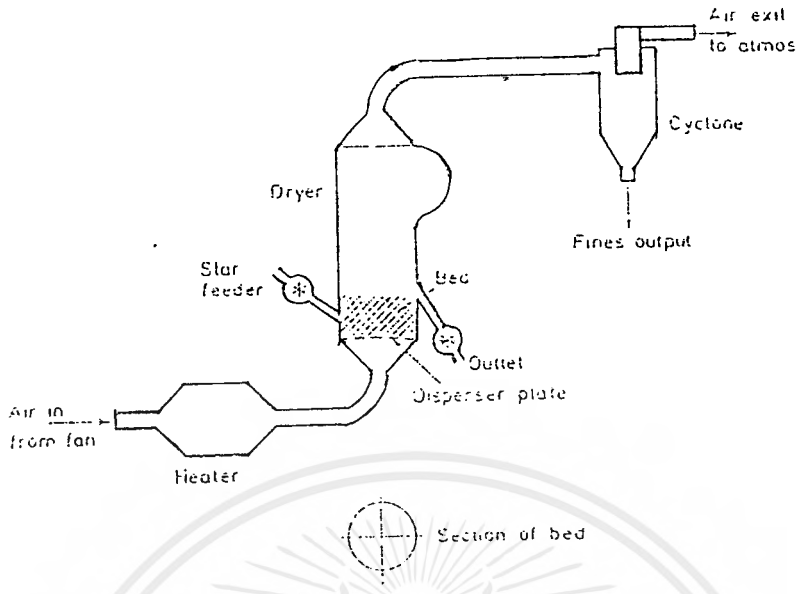
รูปที่ 3.7 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย [6]

3.3.6 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized-bed dryer)

หลักการทำงาน

มีลักษณะเป็นหอหรือถังซึ่งภายในบรรจุด้วยอนุภาคของวัสดุชื้น ที่พื้นของถังจะมีแผ่นรองรับที่เจาะรูพรุนไว้ เพื่อให้สามารถเป่าอากาศหรือลมร้อนผ่านวัสดุชื้นจากด้านล่าง ถ้าความเร็วถึงระดับหนึ่งวัสดุชื้นจะเคลื่อนไหว การเคลื่อนไหวของวัสดุชื้นมีลักษณะเหมือนกำลังแขวนลอยอยู่ในลมร้อนที่ไหลผ่าน การที่ชิ้นวัสดุชื้นเปลี่ยนสภาพจากอยู่นิ่งมาเป็นแขวนลอย เรียกว่า เกิดฟลูอิไดซ์ (Fluidized) เป็นสภาพกึ่งกลางระหว่างสภาพเบดนิ่ง (Fixed bed) และสภาพถูกพัดพาด้วยอากาศ (Pneumatic conveyor) กล่าวคือ เม็ดของแข็งจะกระจัดกระจายในลักษณะแขวนลอย และมีคุณสมบัติในการไหลคล้ายของเหลว เมื่อมองจากภายนอกจะเห็นว่าที่ผิวของฟลูอิไดซ์เบดนั้น จะมีลักษณะคล้ายของเหลวที่กำลังเดือด เนื่องจากการเคลื่อนไหวของเม็ดของแข็งมีลักษณะคล้ายของเหลว อุตสาหกรรมที่นิยมเครื่องอบแห้งแบบนี้ ส่วนมากผลิตภัณฑ์เป็นเม็ดหรือผงละเอียด เช่น อุตสาหกรรมยา อาหารสัตว์ พลาสติก เมล็ดพืช น้ำตาลทราย เป็นต้น รูปที่ 3.8 แสดงเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด [6]

3.3.7 เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum dryer) [6]

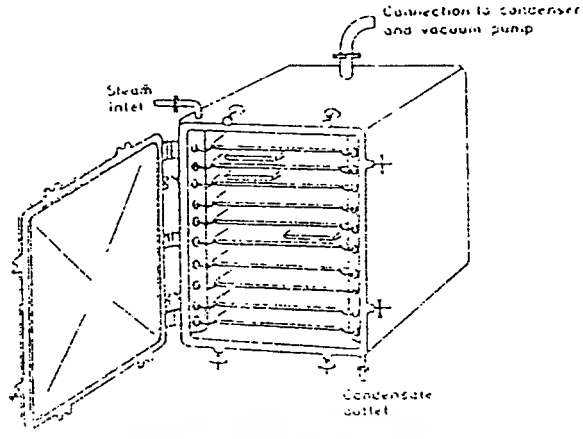
หลักการทำงาน

เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศเป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการอบแห้งภายใต้สภาวะความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ โดยให้ความร้อนในการอบแห้งทางอ้อม เหมาะสำหรับการอบแห้งวัสดุเปียกพวก Liquid slurry หรือ Paste ตัวอย่างเครื่องอบแห้งแบบนี้ เช่น เครื่องอบแห้งแบบ Vacuum shelf dryer และ Agitator pan dryer หรือ Agitated vacuum dryer

Vacuum shelf dryer เป็นเครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนทางอ้อม ประกอบด้วยส่วนที่เป็น Vacuum tight chamber, Heated chamber, Supporting shelf และส่วน Condenser เครื่องอบแห้งแบบนี้ใช้ในการอบแห้งวัสดุที่ใช้ในทางเภสัชกรรม วัสดุที่ถูกออกซิไดส์ได้ง่าย และวัสดุที่ต้องนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่เนื่องจากราคาแพง

Agitator pan dryer หรือ Agitated vacuum dryer เครื่องอบแห้งแบบนี้เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ใช้อบแห้งวัสดุประเภทของเหลว สเลอรี่ เครื่องอบแห้งแบบนี้ตัวทำละลายจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ รูปที่ 3.9 แสดงเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



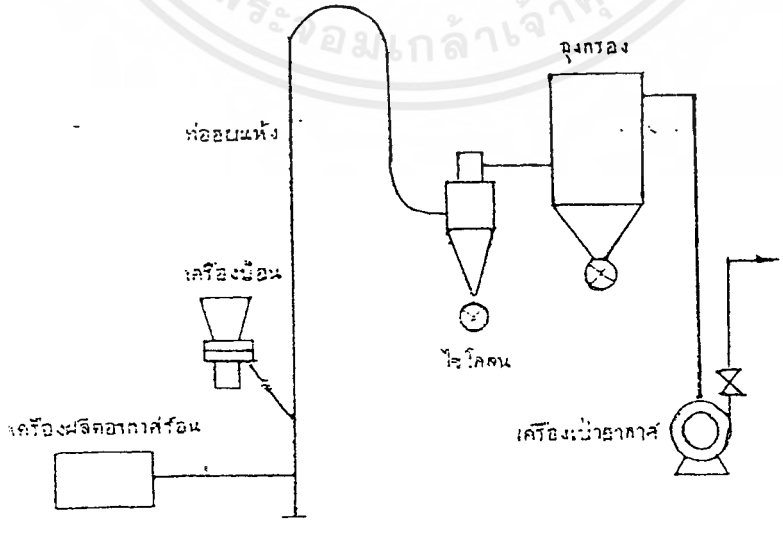
รูปที่ 3.9 เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ [6]

3.3.8 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic conveying dryer)

ประเภทเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม แบ่งตามวิธีป้อนวัสดุชื้นเข้าเครื่องอบแห้งได้ดังนี้

ก. ชนิดป้อนวัสดุเข้าโดยตรง (Direct feed type)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้ไม่ใช้เครื่องกระจายวัสดุ (Disperser) ในการป้อนวัสดุเปียกเข้าเครื่อง วัสดุถูกป้อนโดยตรงผ่านชู้ท (Chute) เข้าไปในหลอดเร่งความเร็ว (Acceleration tube) ลมร้อนไหลผ่านด้วยความเร็ว 20-40 เมตร/วินาที การกระจายวัสดุจะเกิดจากแรงปะทะกับลมร้อน เครื่องอบแห้งชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับวัสดุผงที่ง่ายต่อการกระจาย รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดป้อนวัสดุเข้าโดยตรง

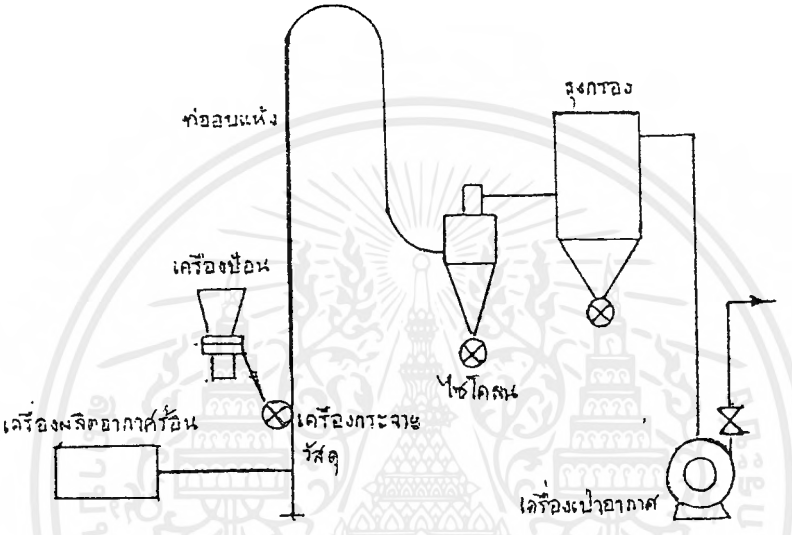


รูปที่ 3.10 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดป้อนวัสดุเข้าโดยตรง [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ชนิดมีเครื่องกระจายวัสดุ (Disperser-attached type)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้วัสดุจะถูกป้อนผ่านเครื่องกระจายวัสดุเข้าไปในกระแสลมร้อน เครื่องกระจายวัสดุทำหน้าที่กระจายวัสดุผงที่รวมตัวเป็นก้อนเนื่องจากความชื้นและไม่สามารถกระจายได้โดยปะทะกับกระแสลมเพียงอย่างเดียว รูปที่ 3.11 แสดงเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดมีเครื่องกระจายวัสดุ

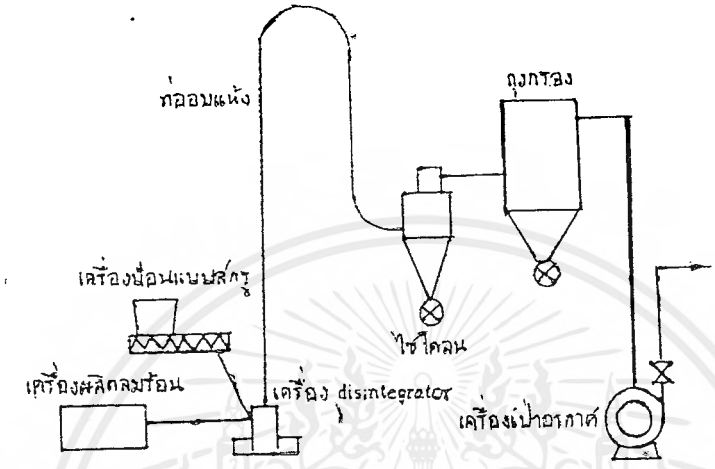


รูปที่ 3.11 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดมีเครื่องกระจายวัสดุ [5]

ค. ชนิดมีเครื่อง Disintegrator (Disintegrator-attached type)

เครื่องชนิดนี้ใช้เครื่อง Disintegrator เพื่อทำให้วัสดุก้อนที่ค่อนข้างนิ่มแตกกระจายช่วยกวนวัสดุให้เข้ากับลมร้อนอย่างดี สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงมาก และสามารถลดความชื้นได้ 50-80 % ของความชื้นทั้งหมดใน Disintegrator รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดมี Disintegrator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดมี Disintegrator [5]

038638649

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

การออกแบบเครื่องอบแห้งเพื่ออบแห้งซีเอ็มซีนั้นต้องพิจารณาถึงสมบัติของซีเอ็มซีที่จะเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง ซีเอ็มซีที่ได้จากกระบวนการผลิตจะมีปริมาณความชื้นสูงและความชื้นที่อยู่ในซีเอ็มซีเป็นสารจำพวกแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล ไอโซโพรพานอล ที่มีความไวต่อการลุกติดไฟมาก ขณะอบแห้งนั้นเนื่องจากวัสดุที่อบแห้งมีสภาพเป็นผง มีโอกาสที่จะเกิดการระเบิดของอนุภาค (Dust explosion) ซึ่งเป็นสิ่งที่อันตรายมาก ดังนั้นเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศเป็นทางเลือกที่เหมาะสมทางหนึ่งที่ช่วยแก้ปัญหาที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สิ่งสำคัญในการออกแบบที่ต้องคำนึงถึง คือ ขนาดของเครื่องอบแห้ง ความปลอดภัยและความมั่นคงแข็งแรงของเครื่องอบแห้งในการทดลอง หน่วยเสริมที่จำเป็นต่อการทดลอง ราคาวัสดุและอุปกรณ์ในการสร้างเครื่องมือ เป็นต้น

4.1 ขั้นตอนการออกแบบ

4.1.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับซีเอ็มซีและตัวทำละลายไอโซโพรพานอล

ก. สมบัติของซีเอ็มซีแห้ง [3]

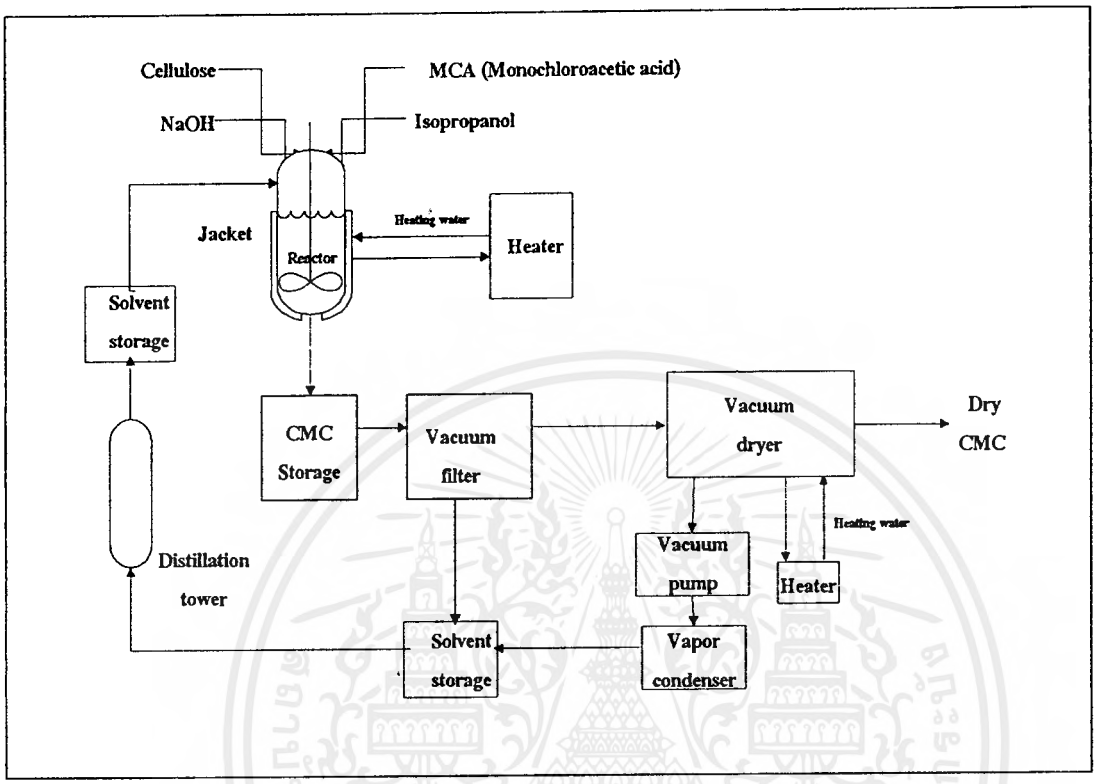
- เมื่อละลายน้ำมีค่า pH	6.5 - 8.0
- ความบริสุทธิ์อยู่ในช่วง (% โดยน้ำหนัก)	72 - 99.5 %
- ความชื้น (% โดยน้ำหนัก)	7 - 8 %
- อุณหภูมิที่ทำให้เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล (Browning temp, °ซ)	180 - 225
- อุณหภูมิที่ทำให้เป็นถ่าน (Charring temp, °ซ)	210 - 250
- ความหนาแน่น (Bulk density, กรัม/มิลลิลิตร)	0.65 - 0.75

ข. สมบัติของตัวทำละลายไอโซโพรพานอลที่เกี่ยวกับการลุกติดไฟและการระเบิด

- ช่วงการระเบิด (Explosion limit) เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในอากาศ	2 - 12 %
- จุดวาบไฟ (Flash point, °ซ)	12
- จุดเดือด (Boiling point, °ซ)	82
- อุณหภูมิลุกติดไฟ (Autoignition temperature, °ซ)	425

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 เขียนแผนผังกระบวนการผลิตซีเอ็มซีและการอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพกระบวนการผลิตและอบแห้งซีเอ็มซี

4.1.3 ศึกษาหลักการทำงานและโครงสร้างของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ [6]

ประเภทของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศแบ่งได้ 2 ประเภท

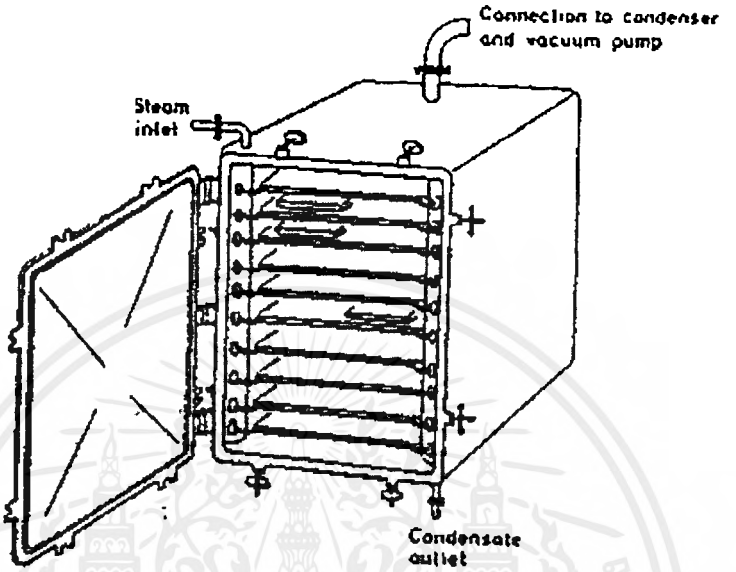
ก. Single-Compartment Vacuum Tray Dryer (SVT)

SVT เป็นเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศที่ง่ายที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.2 ออกแบบให้มีจำนวนชั้น 14 - 20 ชั้น แต่ละชั้นจะมีถาดใส่วัสดุชื้น 2 - 8 ถาด ขึ้นอยู่กับขนาดของชั้น วัสดุที่ใช้ทำเครื่องอบแห้งนั้นมักทำจาก Mild steel หรืออาจทำจาก Stainless steel และ Treated mild steel เปลือกหุ้มและประตูจะใช้ Cast iron และ Mild steel แต่ต้องเคลือบเพื่อป้องกันสนิม

การปฏิบัติงาน โดยทั่วไปจะอบแห้งที่ความดัน 0.067 - 0.27 บาร์ ใช้น้ำร้อนหรือไอน้ำ อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับความไวต่อความร้อนของวัสดุที่อบแห้ง แต่การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำควรใช้ที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 60°ซ น้ำร้อนจะเหมาะในช่วง 40 - 70°ซ ความจุของเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วงประมาณ 10 - 35 กิโลกรัมวัสดุชื้นต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อควรระวัง การเกิดจุดที่ร้อนผิดปกติ (Hot spot) ถ้าอบแห้งวัสดุที่ไวต่อความร้อน และต้องตรวจสอบการรั่วของน้ำร้อนหรือไอน้ำเป็นประจำ



รูปที่ 4.2 แสดง Single-Compartment Vacuum Tray Dryer [6]

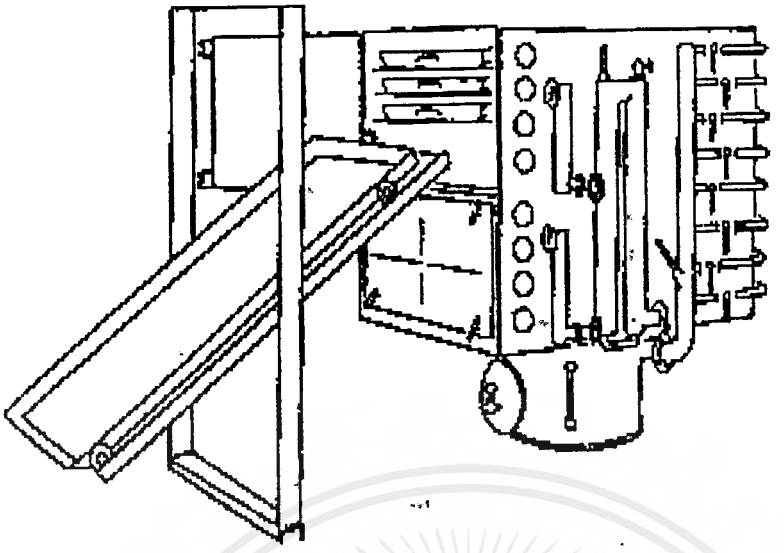
ข. Multi-Compartment Vacuum Tray Dryer (MCVT)

MCVT เป็นเครื่องอบแห้งที่ออกแบบให้มีหลายห้องในเครื่องเดียวกันมีขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 4.3 เครื่องอบแห้งแบบนี้จะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้นกว่าแบบ SVT

การปฏิบัติงาน การอบแห้งทำที่ความดันสุญญากาศ และอุณหภูมิไม่สูงนัก ให้ความร้อนโดยไอน้ำ (35 - 95°ซ) ผ่านเข้าสู่ชั้นที่บรรจุวัสดุชื้น นอกจากนี้ยังอาจออกแบบโดยให้ไอน้ำผ่านในเปลือกหุ้มได้ ใช้ปั๊มสุญญากาศดูดไอน้ำและน้ำที่ควบแน่นออกจากเครื่องอบแห้ง ความจุของเครื่องอบแห้งประมาณ 25 กก./ตร.ม.

ข้อควรระวัง เมื่ออบแห้งเสร็จแล้วภายในไม่เป็นสุญญากาศ ไอน้ำหรือไอน้ำควบแน่นจะทำให้วัสดุที่อบแล้วมีความชื้นมากขึ้น ดังนั้นก่อนการหยุดทำสุญญากาศควรดึงไอน้ำและไอน้ำควบแน่นออกให้หมดเสียก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดง Multi-Compartment Vacuum Tray Dryer [6]

4.1.4 กำหนดตัวแปรที่จะศึกษา

ตัวแปรอิสระ คือ ความดันสุญญากาศ อุณหภูมิ และปริมาณการอบแห้ง

ตัวแปรตาม คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และอัตราการอบแห้ง

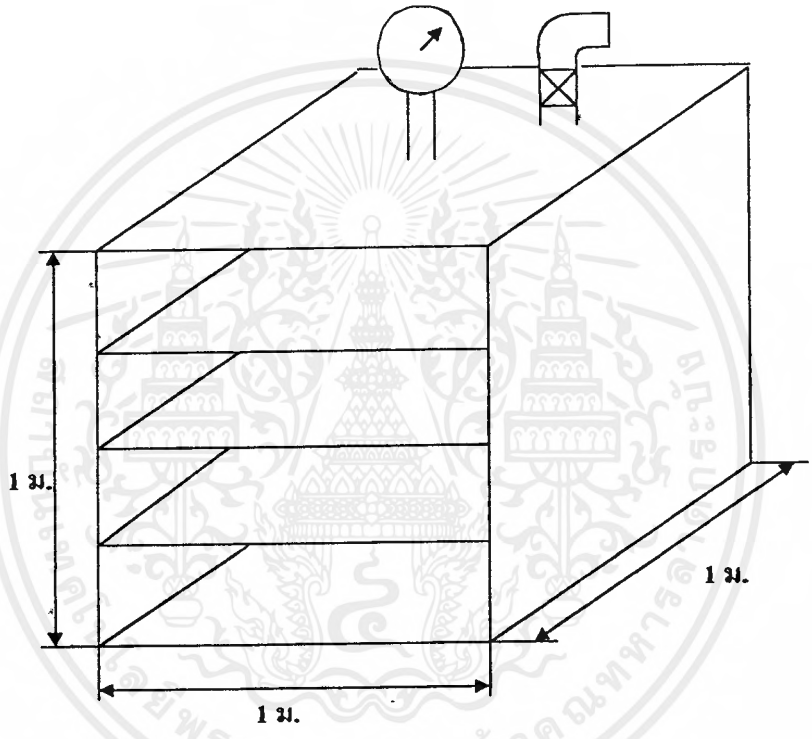
4.1.5 ร่างแบบโครงสร้างของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศและเลือกแบบที่เหมาะสม

ก. แบบร่างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.4

รูปร่างลักษณะเป็นเครื่องอบแห้งแบบครั้ง (Batch dryer) มีจำนวนชั้น ความจุและพื้นที่การอบแห้งของเครื่องอบแห้งขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องอบแห้ง มีท่อสำหรับต่อกับปั๊มสุญญากาศและติดตั้งเกจวัดความดันสุญญากาศ โครงสร้างทุกส่วนเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ต้องมีความหนามาก ซีลป้องกันอากาศเข้าสู่ตัวเครื่องอบแห้งขณะทำงานเป็นยางพิเศษ

แบบร่างนี้มีข้อเสียคือ มีรอยเชื่อมต่อมากซึ่งทำให้ยุ่งยากในการสร้าง และต้องมีการเสริมโครงสร้างเพื่อป้องกันการยุบตัวขณะที่เป็นสุญญากาศ ต้องใช้โลหะจำนวนมากทำให้ต้นทุนการสร้างสูง ต้องเลือกปั๊มที่มีความสามารถในการดูดอากาศสูงซึ่งมีราคาแพง มีปัญหาเรื่องการขนย้ายและดูแลรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แบบร่างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. แบบร่างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.5

รูปร่างลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวนอนมีรอยเชื่อมน้อยกว่าแบบแรก และให้ความแข็งแรงมากกว่าแบบแรก ทำให้โลหะที่ใช้มีความหนาลดลง ปั๊มสุญญากาศที่ใช้มีขนาดเล็กลง ต้นทุนการสร้างจึงถูกลง ดังนั้นในการสร้างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ แบบที่สองจะมีความเหมาะสมมากกว่าในแบบแรก การให้ความร้อนแก่วัสดุโดยการนำความร้อนโดยใช้ท่อเล็ก ๆ ที่อยู่ใต้ชั้นวางวัสดุชั้นโดยใช้น้ำร้อนหรือไอน้ำเป็นแหล่งความร้อน (Heating fluid) แก่วัสดุที่นำมาอบแห้ง สำหรับการทดลองนี้จะใช้น้ำร้อน ภายนอกของเครื่องอบแห้งหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้ายเครื่องอบแห้งจึงมีส่วนเพื่อใช้ในการเคลื่อนย้าย ดังแสดงในรูปที่ 4.6

หลังจากพิจารณาแบบร่างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศแบบที่ 2 ผู้จัดทำได้เปลี่ยนแปลงวิธีการให้ความร้อนแก่วัสดุที่อบแห้งจากใช้ท่อทองแดงขดไว้ใต้ชั้นวางถาดเป็นการพันท่อทองแดงไว้รอบห้องสุญญากาศ แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 เนื่องจากวิธีใช้ท่อทองแดงขดไว้ใต้ชั้นวางถาดทำให้การควบคุมอุณหภูมิของห้องสุญญากาศทำได้ยาก และการทำความสะอาดทำได้ไม่สะดวก นอกจากนี้ยังได้ออกแบบให้มีเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อใช้ควบแน่นไอของตัวทำละลายให้เป็นของเหลวเพื่อนำตัวทำละลายกลับไปใช้ และป้องกันไม่ให้ไอตัวทำละลายเข้าสู่ปั๊มสุญญากาศ เพราะจะทำให้อายุการใช้งานของปั๊มลดลง

จากการศึกษากระบวนการผลิตซีเอ็มซีด้วยเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 24.7 ลิตร สามารถทำการผลิตซีเอ็มซีได้ 12.5 กก./วัน การออกแบบได้ออกแบบให้เครื่องอบแห้งมีความจุของการอบแห้ง 12.5 กก./ครั้ง จากหลักการทำงานของเครื่ออบแห้งแบบสุญญากาศ ความจุของการอบแห้งต่อพื้นที่มีค่าอยู่ในช่วง 10 - 35 กก./ตร.ม. [6] ในการออกแบบจะใช้ค่าความจุของการอบแห้งต่อพื้นที่เท่ากับ 20 กก./ตร.ม. ซึ่งเป็นค่าโดยเฉลี่ยจากค่าในเอกสารอ้างอิงที่ 6 ดังนั้น

พื้นที่การอบแห้งที่ต้องการ = ความจุเครื่องอบแห้ง/ความจุกิโลกรัมต่อตารางเมตร

= 12.5/20

= 0.625 ตร.ม.

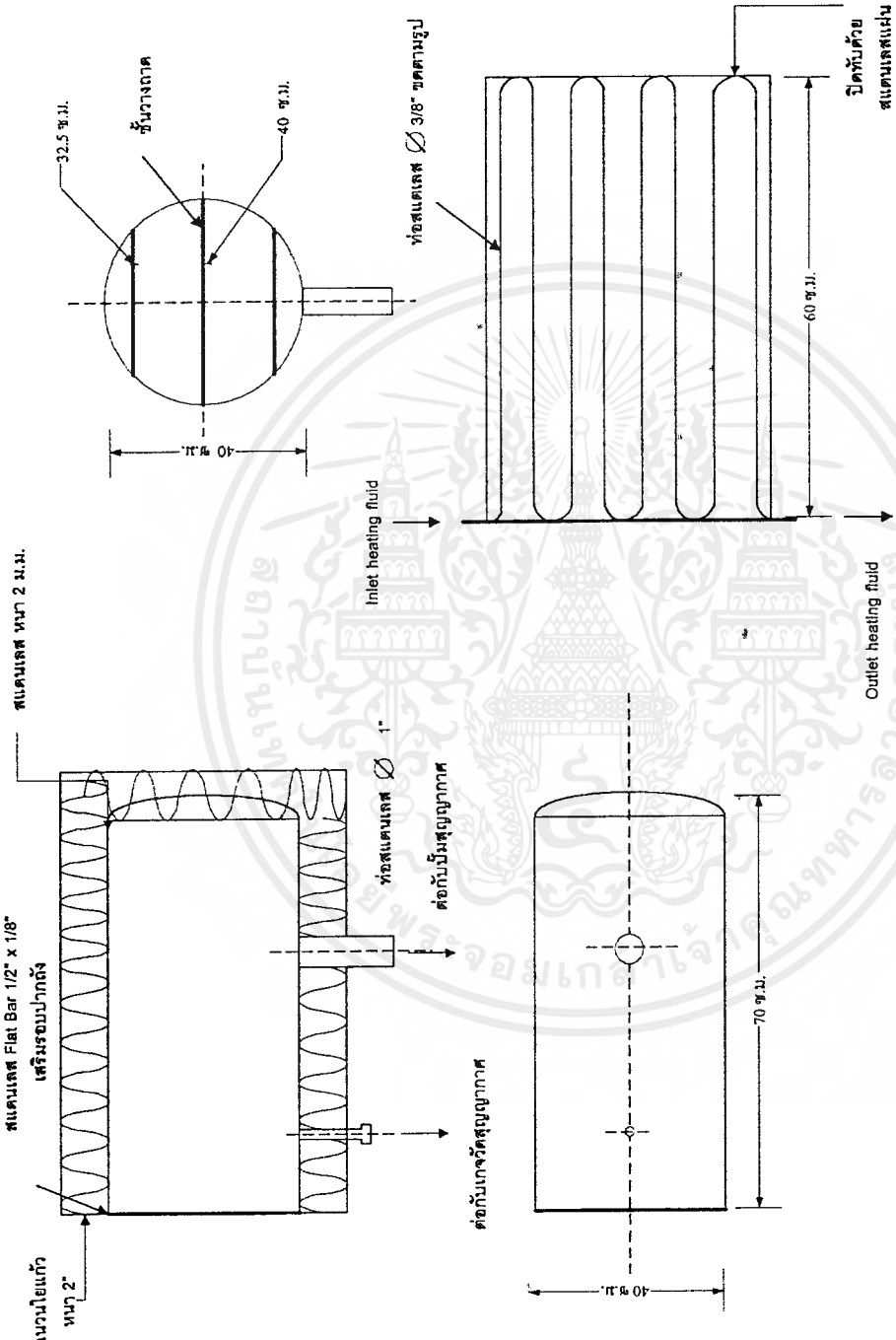
ถ้ากำหนดให้จำนวนชั้นของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศมี 3 ชั้น แต่ละชั้นห่างกัน 10 ซ.ม. และถ้าให้ทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 ซ.ม. ความยาว 60 ซ.ม. (ไม่รวมความยาวด้านท้ายที่เป็นส่วนโค้งของทรงกระบอก) ลองคำนวณพื้นที่การอบแห้ง

พื้นที่การอบแห้งคือ ผลรวมทั้งหมดของ ความกว้าง×ความยาวชั้นวาง

ความยาวชั้นวาง = 0.6 เมตร

ถ้าความกว้างของถาดชั้นกลาง = 0.382 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แบบร่างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศแบบที่ 2และถ้าความกว้างของถาดชั้นล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความกว้างของถาดชั้นล่างและบน = 0.325 เมตร

จะได้พื้นที่การอบแห้ง = 0.6×(2×0.325+0.382)

= 0.62 ตร.ม.

ซึ่งพื้นที่การอบแห้งนี้จะสอดคล้องกับค่าพื้นที่การอบแห้งที่ต้องการ

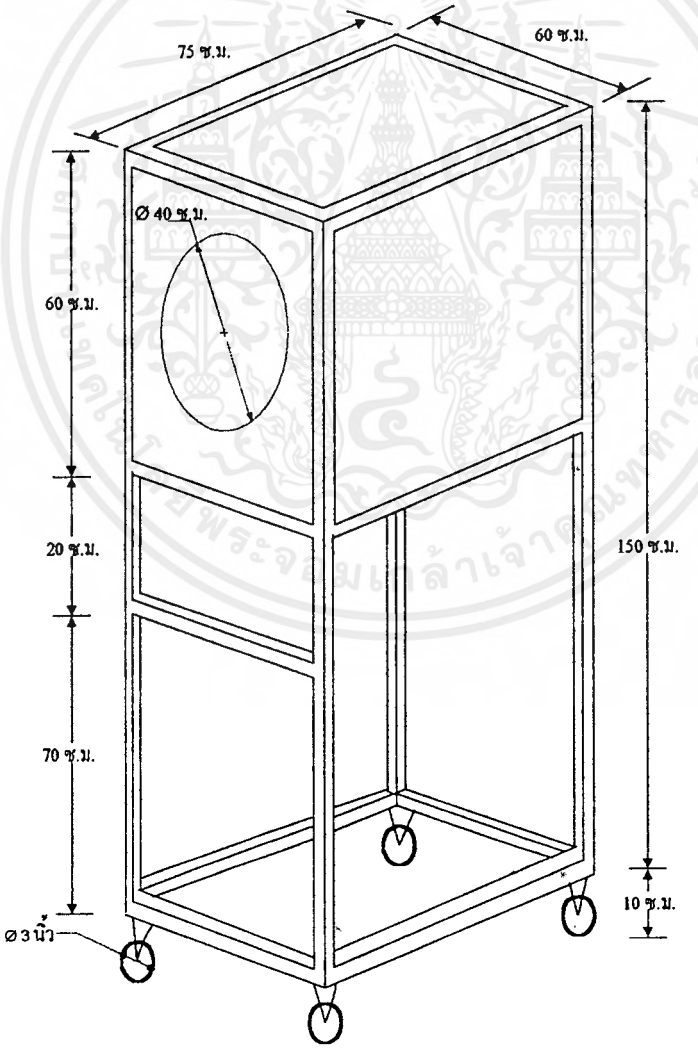
สำหรับปริมาตรของเครื่องอบแห้ง = พื้นที่หน้าตัด×ความยาว

= $\pi r^2 L$

r = 0.2 เมตร L = 0.6 เมตร

ปริมาตรของเครื่องอบแห้ง = $3.14\times(0.2)^2\times0.6$

= 0.075 ลบ.ม.



รูปที่ 4.6 เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 รายละเอียดการออกแบบ

4.2.1 ส่วนของการเขียนแบบ

ก. ห้องสุญญากาศ (Vacuum chamber) ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ข. ภาพขยายตัดขวางด้านข้างห้องสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.8

ค. ภาพขยายด้านล่างของห้องสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

ง. ภาพขยายชั้นวางถาดใส่ซีเอ็มซี (Tray) ดังแสดงในรูปที่ 4.10

จ. ภาพขยายฝาปิดห้องสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.11

ฉ.ที่ติดตั้งเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.12

ช. ภาพตัดขวางด้านข้างเครื่องควบแน่นไอของตัวทำละลาย ดังแสดงในรูปที่ 4.13

ซ. ภาพด้านบนเครื่องควบแน่นไอของตัวทำละลาย ดังแสดงในรูปที่ 4.14

ฌ. แสดงการติดตั้งห้องสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.15

ญ. แผนผังกระบวนการอบแห้งแบบสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.16

4.2.2 วัสดุที่ใช้

ก. วัสดุที่ใช้สร้างห้องสุญญากาศ (Vacuum chamber) และชั้นวางถาด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เกรด 304

ข. วัสดุที่ใช้สร้างฝาปิดห้องสุญญากาศคือ เหล็กธรรมดาเคลือบด้วยสังกะสี

ค. วัสดุที่ใช้ทำท่อสำหรับ Heating fluid คือ ท่อทองแดง

ง. วัสดุที่ใช้สร้างที่ติดตั้งเครื่องอบแห้งคือ เหล็กธรรมดา

ฉ. วัสดุที่ใช้ทำฉนวนความร้อนคือ ใยแก้ว

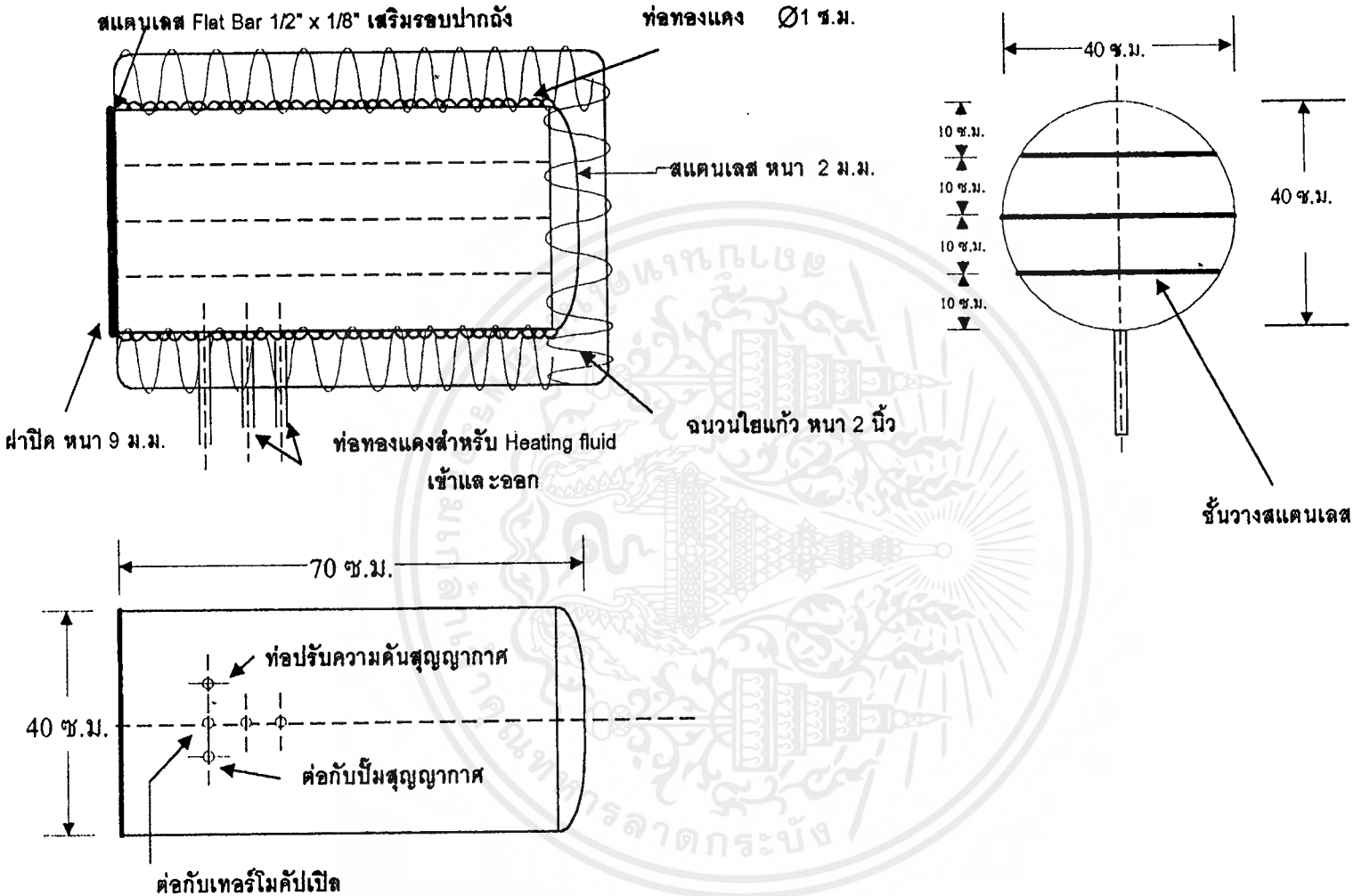
ช. วัสดุที่ใช้ทำช่องมองภายในเครื่องอบแห้งคือ อะคริลิกชนิดใส

ซ. วัสดุที่ใช้สร้างเครื่องควบแน่นไอของตัวทำละลายคือ เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304

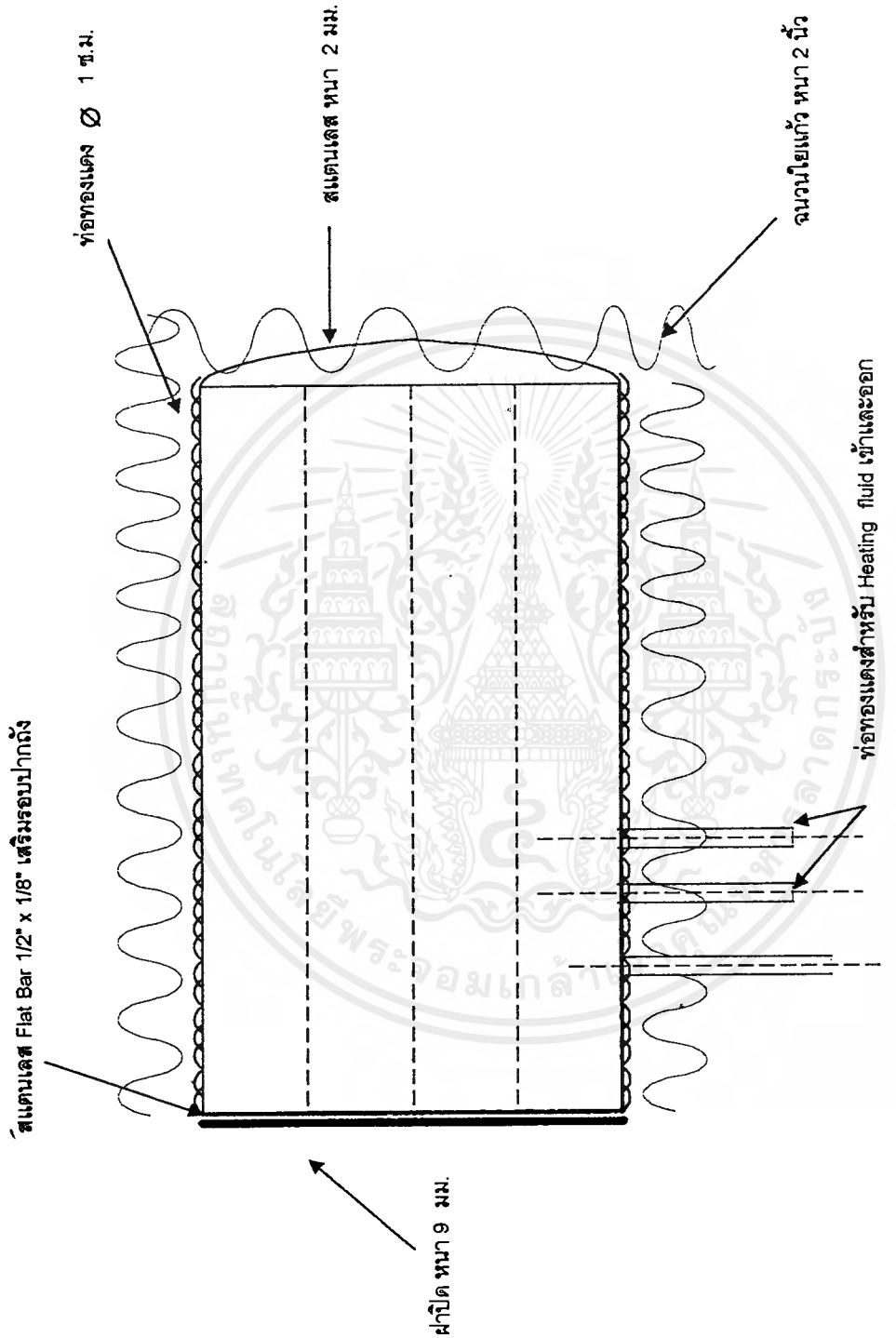
ฌ. วัสดุที่ใช้ทำซีล (Seal) ของห้องสุญญากาศคือ ยางธรรมดา (NR)

ญ. วัสดุที่ใช้เป็นถาดใส่ซีเอ็มซีขณะอบแห้งคือ อะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

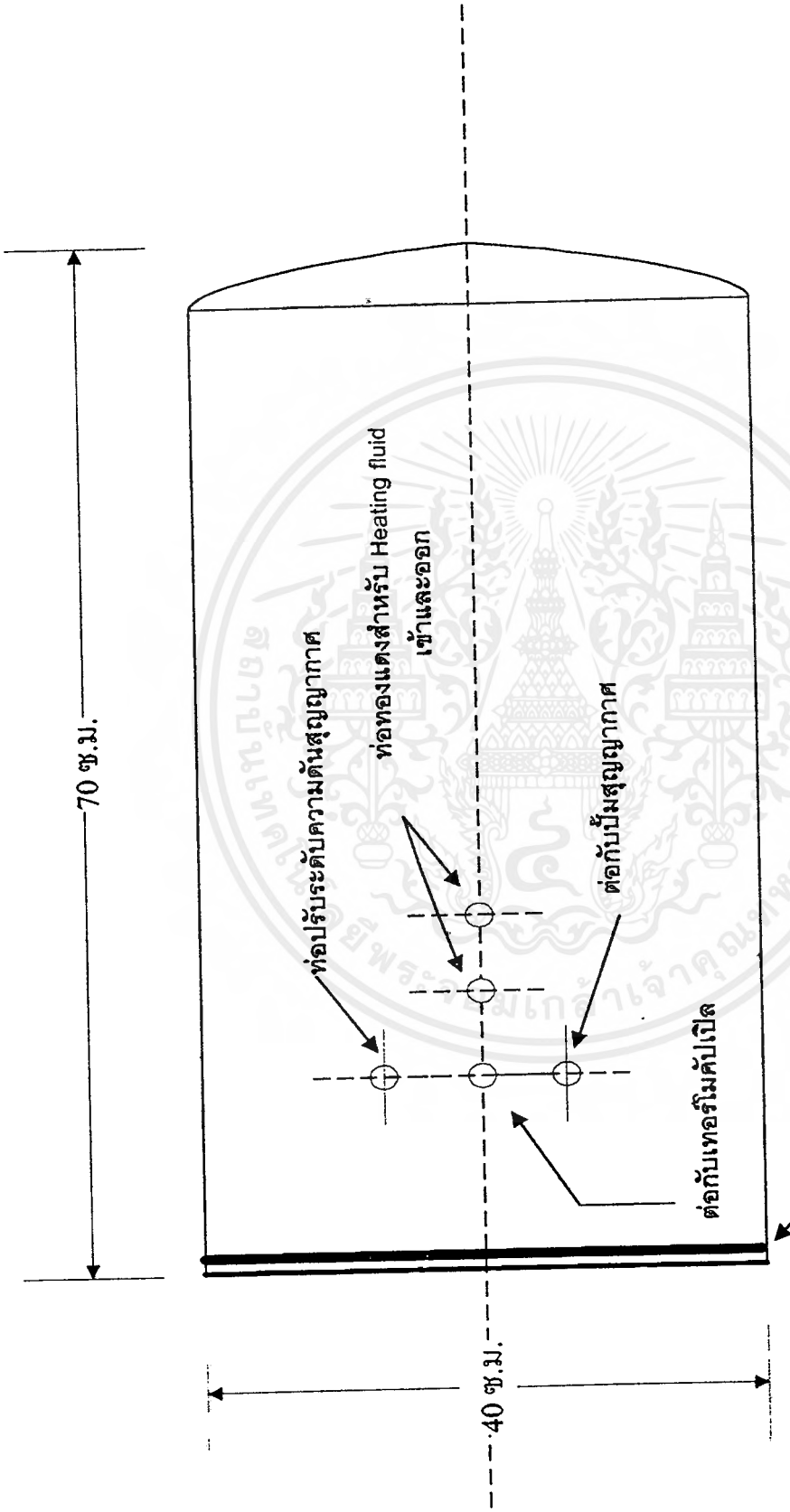


รูปที่ 4.7 ห้องสุญญากาศ (Vacuum chamber)



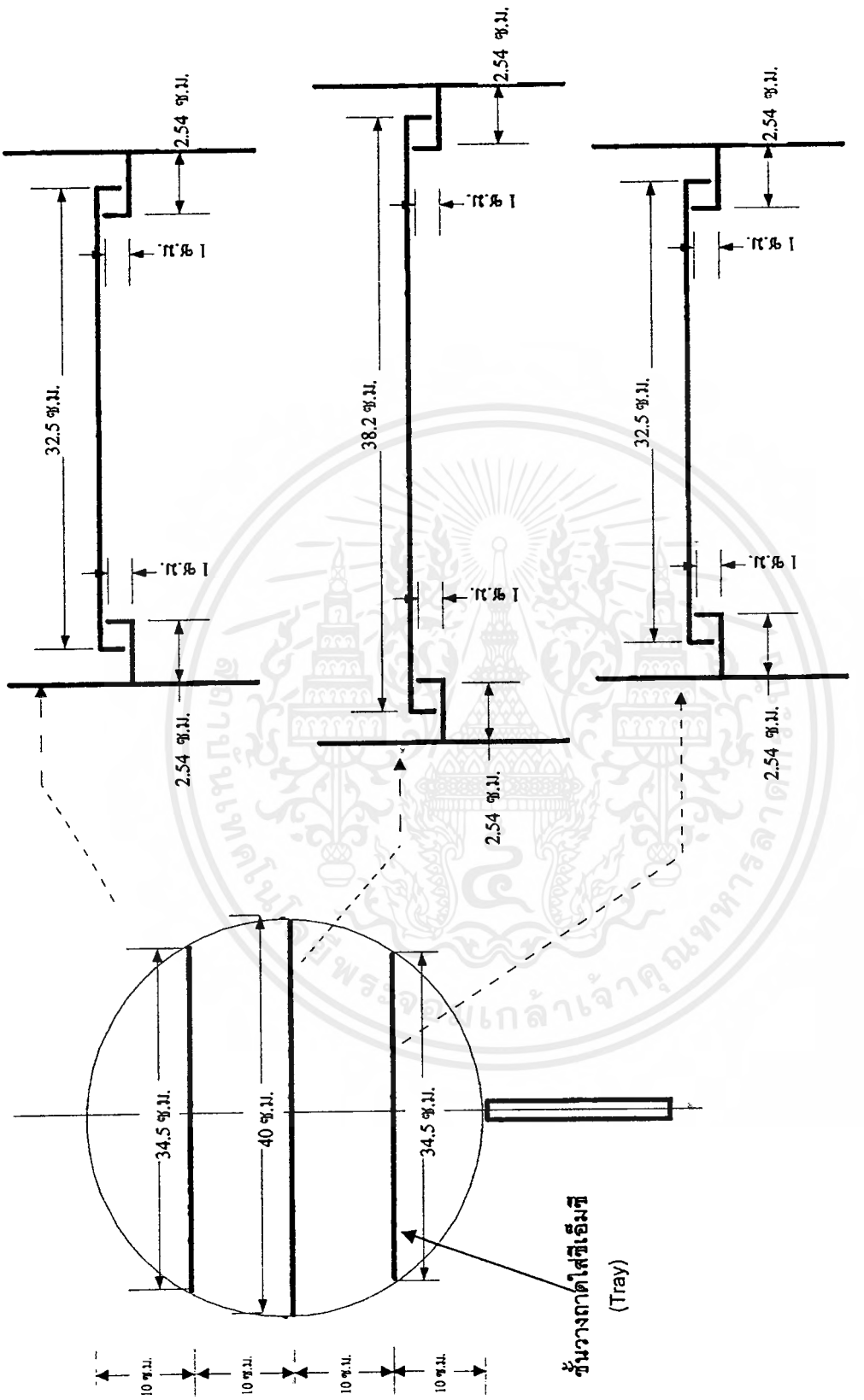
รูปที่ 4.8 ภาพขยายตัดบางด้านข้างห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



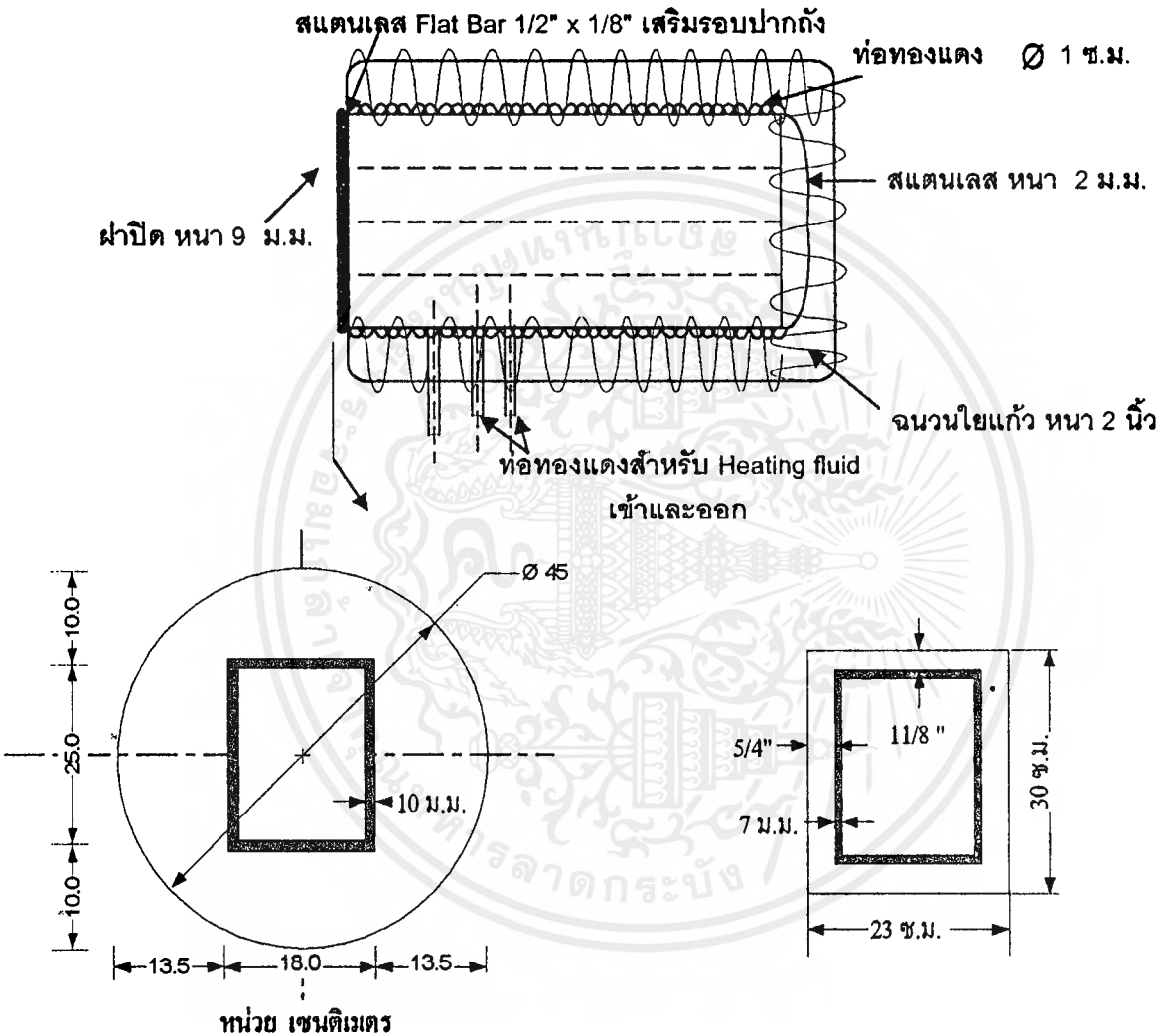
รูปที่ 4.9 ภาพขยายด้านล่างของห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

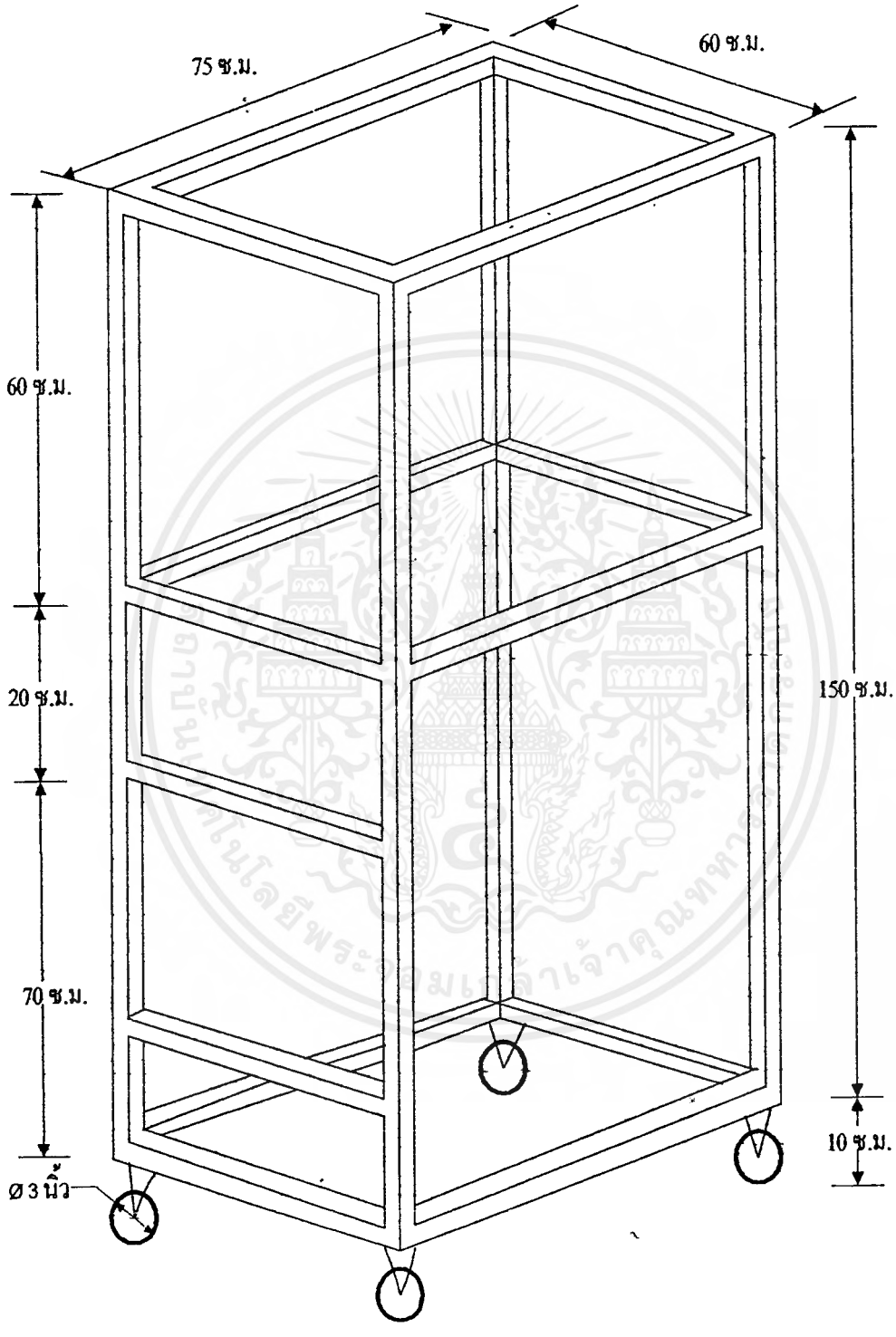


รูปที่ 4.10 ภาพขยายชั้นวางถาดใส่ซีเอ็มซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

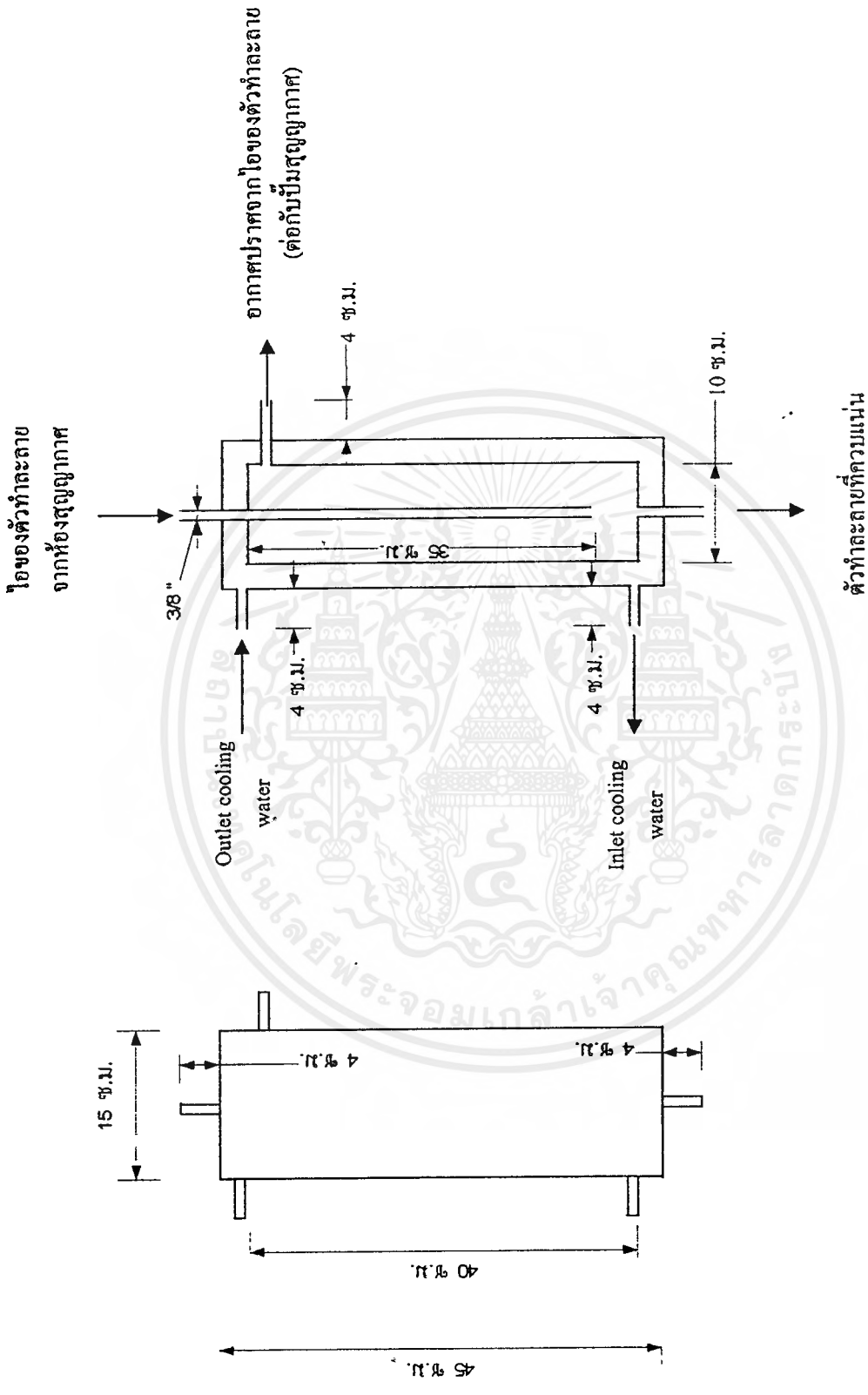


รูปที่ 4.11 ภาพขยายฝาปิดห้องสุญญากาศ



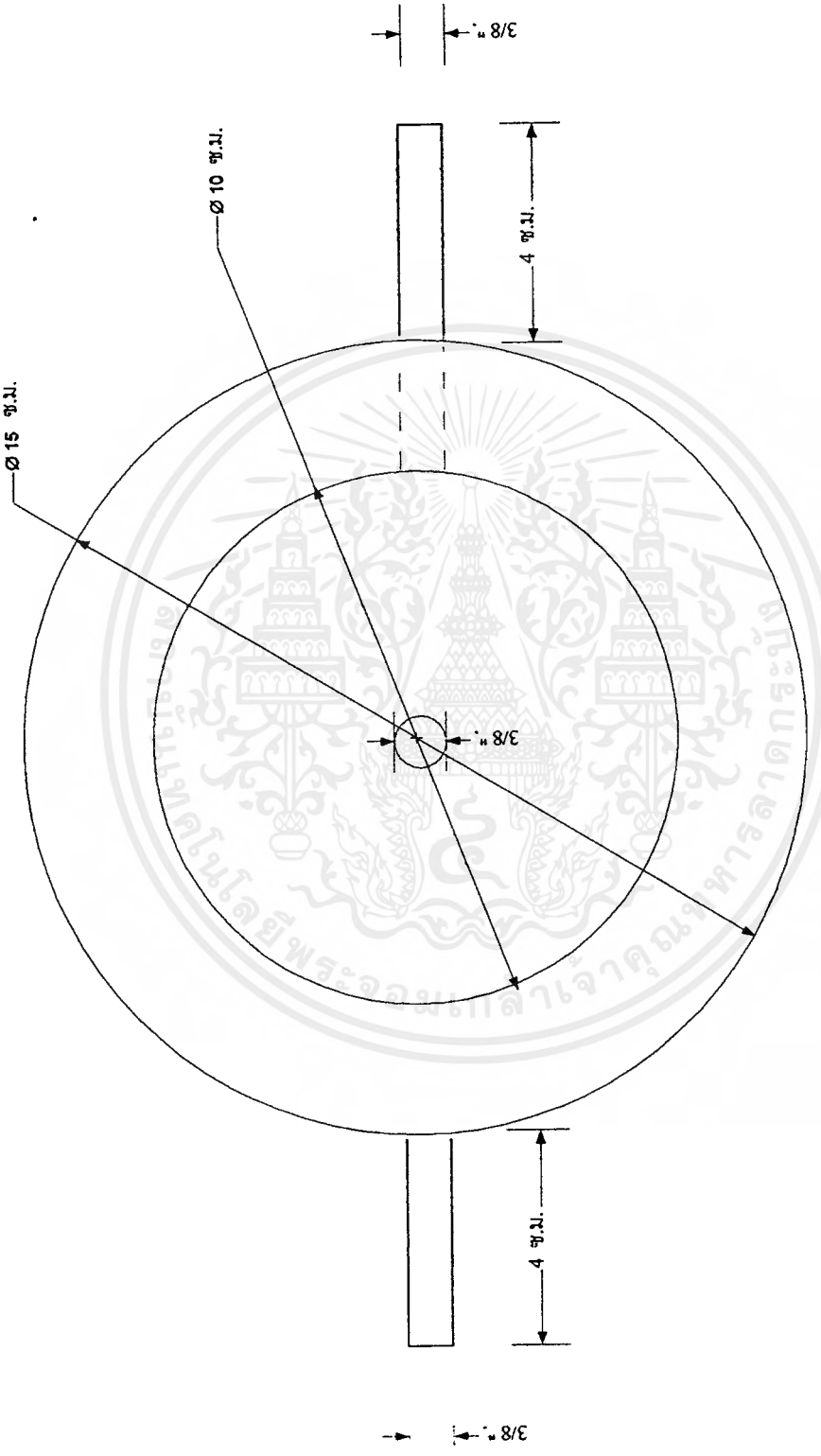
รูปที่ 4.12 ที่ติดตั้งเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



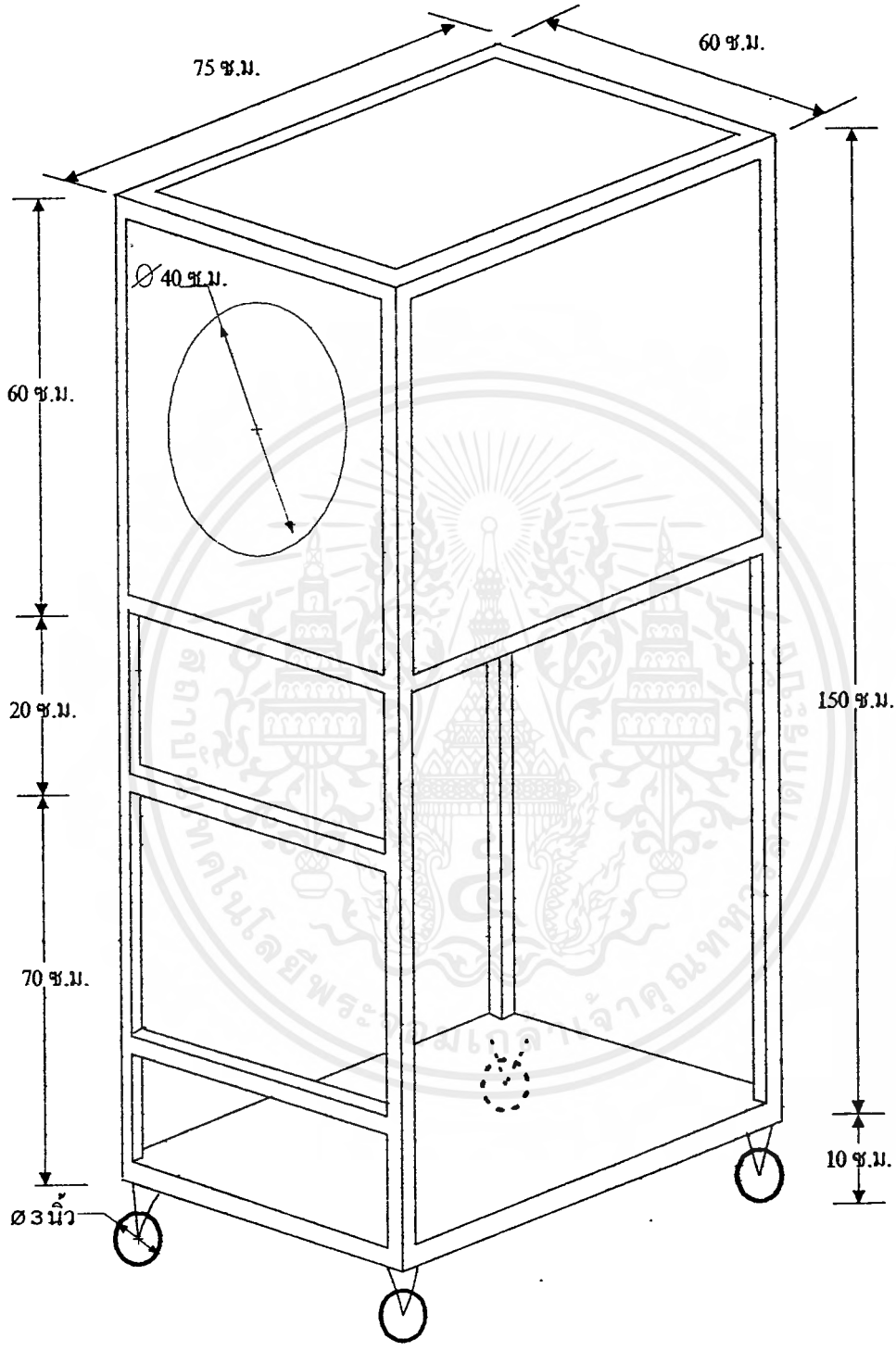
รูปที่ 4.13 ภาพตัดแนวขวางของเครื่องควบแน่นไอของตัวทำละลาย (Condenser)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



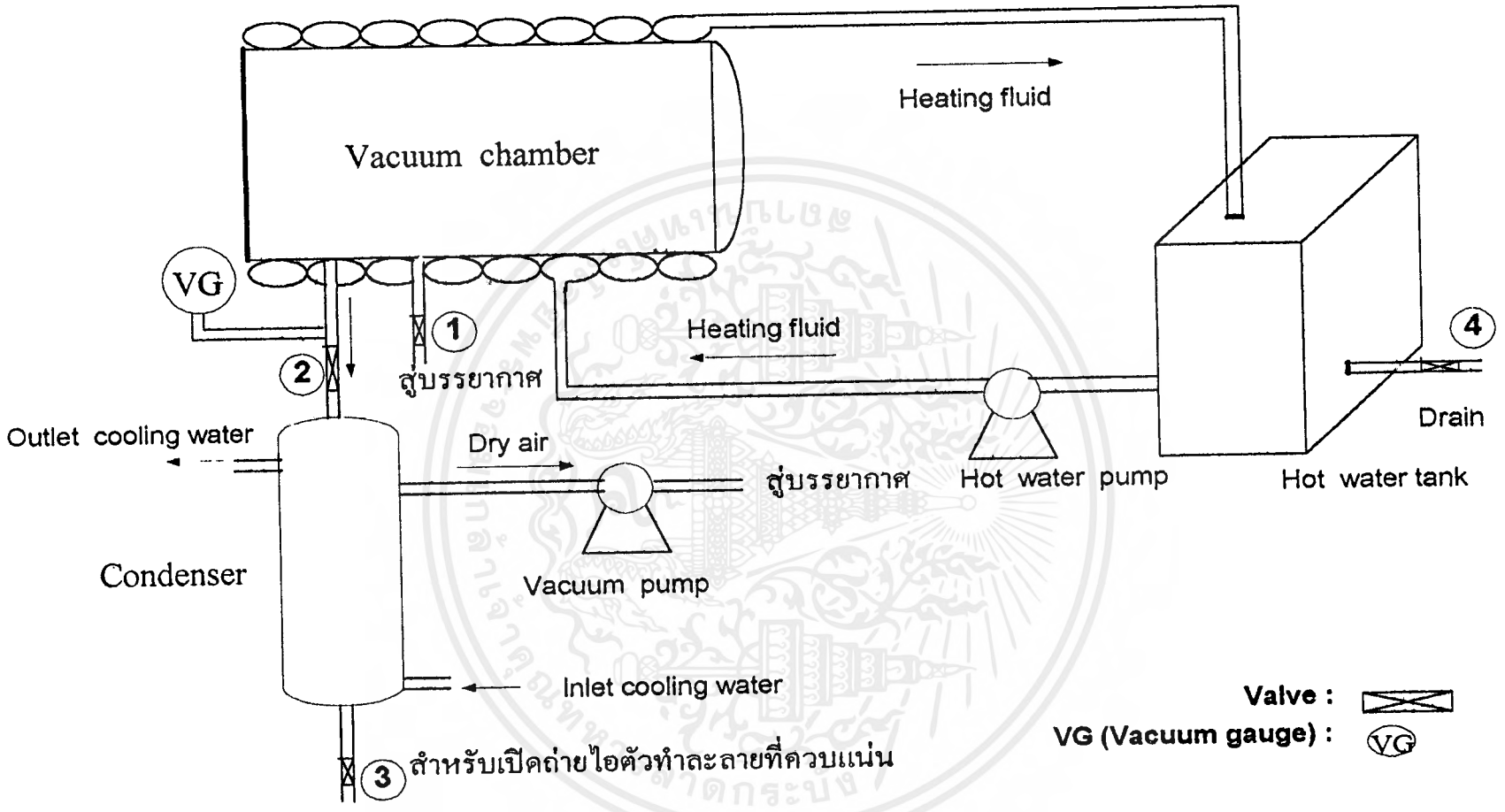
รูปที่ 4.14 ภาพด้านบนเครื่องควบแน่นไอของตัวทำละลาย (Condenser)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงการติดตั้งห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แผนผังกระบวนการอบแห้งแบบสุญญากาศ

4.3 ขั้นตอนการสร้างและประกอบเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

4.3.1 วิธีการสร้างห้องสุญญากาศ (Vacuum chamber)

ก. ตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 125.5 ซ.ม.×60 ซ.ม.

ข. ม้วนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมให้เป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 ซ.ม.

ค. เชื่อมเป็นจุดตลอดรอยต่อด้วยการเชื่อมไฟฟ้า จะได้ทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 ซ.ม. ยาว 60 ซ.ม. ม้วนอีกครั้งเพื่อให้ได้วงกลมอย่างแท้จริง

ง. เชื่อมด้วยแก๊สอาร์กอนตลอดแนวรอยต่อจะได้วงกลมอย่างสมบูรณ์

จ. ขึ้นรูปแผ่นเหล็กวงกลมเป็นส่วนโค้งโดยใช้แบบแม่พิมพ์กด เพื่อใช้เป็นส่วนท้ายของห้องสุญญากาศ เมื่อได้ขนาดตามที่ต้องการแล้วเชื่อมจุดด้วยการเชื่อมไฟฟ้าเข้ากับส่วนที่เป็นวงกลมทรงกระบอกให้พออยู่ จากนั้นใช้การเชื่อมแก๊สจุดสลับกันตรงข้ามจนเต็มรอยต่อ

ฉ. เจาะรูวงกลมขนาด 3/8 นิ้ว 3 รู เพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล วาล์วปรับความดันสุญญากาศ และต่อกับปั๊มสุญญากาศ

ช. ทำน้ำยากัดผิวที่รอยเชื่อมเพื่อกำจัดรอยสกปรกจากการเชื่อม และลบรอยการเชื่อมเพื่อไม่ให้เห็นรอยเชื่อม

4.3.2 วิธีการสร้างชั้นวางถาด

ก. ตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดดังนี้

ขนาด 40.2 ซ.ม.×60 ซ.ม. จำนวน 1 แผ่น

ขนาด 34.5 ซ.ม.×60 ซ.ม. จำนวน 2 แผ่น

ขนาด 3.54 ซ.ม.×61 ซ.ม. จำนวน 6 แผ่น

ข. นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 40.2 ซ.ม.×60 ซ.ม. จำนวน 1 แผ่น และขนาด 34.5 ซ.ม.×60 ซ.ม. จำนวน 2 แผ่น มาพับขอบด้านข้างทั้งสองข้าง 90 องศา ขนาด 1 ซ.ม. จะได้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 38.2 ซ.ม.×60 ซ.ม. จำนวน 1 แผ่น และขนาด 32.5 ซ.ม.×60 ซ.ม. จำนวน 2 แผ่น แสดงดังรูปที่ 4.10

ค. นำเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 3.54 ซ.ม.×60 ซ.ม. ทั้ง 6 แผ่นมาพับขอบด้านข้างด้านเดียว 90 องศา ขนาด 1 ซ.ม. จะได้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 2.54 ซ.ม.×60 ซ.ม. ที่มีขอบขนาด 1 ซ.ม.

ง. นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมในข้อ ค. ไปเชื่อมจุดโดยใช้การเชื่อมไฟฟ้ากับผิวภายในห้องสุญญากาศ แสดงดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 วิธีการสร้างฝาปิดห้องสุญญากาศ

ก. ตัดแผ่นเหล็กธรรมดาหนา 1 ซ.ม. ด้วยแก๊สเป็นรูปวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 ซ.ม.

ข. กลึงแต่งผิวหน้าแผ่นเหล็กธรรมดาให้เรียบทั้งสองหน้า แผ่นเหล็กธรรมดาเรียบจะมีความหนา 9 ม.ม.

ค. ตัดแผ่นเหล็กเป็นช่องสี่เหลี่ยมพื้นผ้า ดังรูปที่ 4.11 ส่วนที่แรเงาจะกัดเป็นร่องลึกจากผิวปกติ 5 ม.ม. กว้าง 1 ซ.ม. และส่วนที่อยู่ภายในกรอบแรเงาจะตัดเป็นช่องว่างเพื่อใส่แผ่นอะคริลิกใสที่ขนาดมี 17.8 ซ.ม.×24.9 ซ.ม. หนา 10 ม.ม.

ง. ตัดแผ่นเหล็กเป็นช่องสี่เหลี่ยมพื้นผ้าขนาด 23 ซ.ม.×30 ซ.ม. ดังรูปที่ 4.12 ส่วนที่แรเงาจะกัดเป็นร่องลึกจากผิวปกติ 5 ม.ม. กว้าง 7 ม.ม. และส่วนที่อยู่ภายในกรอบแรเงาจะตัดเป็นช่องว่างเพื่อประกบแผ่นอะคริลิกใส

จ. การประกอบแผ่นอะคริลิกใส เริ่มจากนำแผ่นเหล็กในข้อ ค. มาทาสารกันรั่ว (Sealant) ซึ่งเป็นสารจำพวกซิลิโคน บริเวณที่กัดเป็นร่องให้ทั่วโดยก่อนที่จะทาซิลิโคนจะต้องเช็ดร่องโลหะให้สะอาดปราศจากคราบสกปรกและไขมัน แล้วรีบนำแผ่นอะคริลิกใสมาประกบทันทีเพราะซิลิโคนจะแห้งภายใน 10 นาที จากนั้นนำแผ่นเหล็กในข้อ ง. มาทาซิลิโคนที่ร่องเช่นกันแล้วนำมาประกบกับส่วนแรกที่ทำไว้แล้ว ยึดแผ่นเหล็กทั้งสองด้วยน็อตชนิดฝังหัว

4.3.4 วิธีการสร้างท่อทองแดงสำหรับ Heating fluid เข้าและออก

นำท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซ.ม. มาพันเป็นวงกลมรอบห้องสุญญากาศแล้วพันด้วยเทปฟอยล์เพื่อให้อยู่คงรูปแทนการเชื่อม เนื่องจากการเชื่อมอาจทำให้ท่อทองแดงที่มีความหนาไม่มากเกิดการรั่วได้

4.3.5 วิธีการหุ้มฉนวนความร้อน

เมื่อพันท่อทองแดงรอบห้องสุญญากาศแล้วก็หุ้มห้องสุญญากาศด้วยฉนวนใยแก้วที่หนา 1 นิ้ว โดยนำใยแก้วมา ตัดให้มีขนาดเท่ากับผิวด้านนอกของห้องสุญญากาศ แล้วนำไปพันรอบห้องสุญญากาศเป็นชั้นแรกและติดด้วยเทปฟอยล์ สำหรับฉนวนชั้นที่สองจะแตกต่างจากชั้นแรกคือ เมื่อตัดใยแก้วแล้ว จะหุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ จากนั้นจึงนำไปพันทับชั้นแรกและติดด้วยเทปฟอยล์ ไม่ควรให้ใยแก้วถูกผิวหนังเพราะจะทำให้ระคายเคืองและคันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 วิธีการสร้างที่ติดตั้งเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

ก. ตัดเหล็กธรรมดา หน้าตัด 5/4 นิ้ว×5/4 นิ้ว หนา 3 ม.ม. ขนาดดังนี้

ยาว 150	ซ.ม.	จำนวน	4	ชิ้น
ยาว 74.4	ซ.ม.	จำนวน	6	ชิ้น
ยาว 59.4	ซ.ม.	จำนวน	8	ชิ้น

ข. ตัดแผ่นเหล็กธรรมดาที่หนา 2 ม.ม. ขนาดดังนี้

ขนาด 53.3 ซ.ม.×68.5 ซ.ม.	จำนวน	5	ชิ้น
ขนาด 53.3 ซ.ม.×53.3 ซ.ม.	จำนวน	2	ชิ้น

ค. นำเหล็กในข้อ ก. มาเชื่อมด้วยไฟฟ้า และนำแผ่นเหล็กในข้อ ข. มาพ่นสีรองพื้นชั้นแรก เมื่อชั้นแรกแห้งก็พ่นสีรองพื้นทับอีกครั้ง และเมื่อสีรองพื้นแห้งจึงพ่นสีจริงทับ

ง. นำโครงเหล็กและแผ่นเหล็กมาประกอบจะได้ดังรูปที่ 4.12

4.3.7 วิธีการสร้างเครื่องควบแน่นไอของตัวทำละลาย

ก. ตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม หนา 3 ม.ม. ขนาดดังนี้

ขนาด	94.2 ซ.ม.×45 ซ.ม.	จำนวน	1	แผ่น
ขนาด	62.8 ซ.ม.×40 ซ.ม.	จำนวน	1	แผ่น
แผ่นวงกลมรัศมี	10 ซ.ม.	จำนวน	2	แผ่น
แผ่นวงกลมรัศมี	15 ซ.ม.	จำนวน	2	แผ่น

ข. นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 94.2 ซ.ม.×45 ซ.ม. และขนาด 62.8 ซ.ม.×40 ซ.ม. ม้วนเป็นวงกลมจะได้เหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกรัศมี 15 ซ.ม. ยาว 45 ซ.ม. และทรงกระบอกรัศมี 10 ซ.ม. ยาว 40 ซ.ม. ตามลำดับ

ค. เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกด้วยวิธีเชื่อมแก๊สตลอดแนวรอยต่อ

ง. เจาะรูขนาด 3/8 นิ้วจำนวน 3 รู ที่ด้านข้างของทรงกระบอกขนาดรัศมี 15 ซ.ม. และ 3 รู ที่ด้านข้างของทรงกระบอกขนาดรัศมี 10 ซ.ม จากนั้นนำท่อขนาด 3/8 นิ้ว มาเชื่อมกับรูที่เจาะด้วยวิธีการเชื่อมแก๊ส แสดงดังรูปที่ 4.13

จ. นำแผ่นวงกลมในข้อ ก. มาเจาะรูวงกลมตรงกลางแผ่นขนาด 3/8 นิ้ว ทั้ง 4 แผ่น เพื่อใช้ปิดปลายทรงกระบอกรัศมี 10 ซ.ม. และทรงกระบอกรัศมี 15 ซ.ม.

ฉ. เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกรัศมี 15 ซ.ม. กับแผ่นวงกลมรัศมี 15 ซ.ม. ในข้อ จ. แต่เชื่อมปิดเพียงด้านเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช. เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกรัศมี 10 ซ.ม. กับแผ่นวงกลมรัศมี 10 ซ.ม. ในข้อ จ. แต่เชื่อมปิดเพียงด้านเดียว จากนั้นนำท่อขนาด 3/8 นิ้ว มาเชื่อมกับรูที่เจาะด้วยวิธีการเชื่อมแก๊ส

ซ. สวมเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกรัศมี 10 ซ.ม. เข้ากับเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกรัศมี 15 ซ.ม. โดยให้ท่อที่เชื่อมไว้สวมเข้ากับแผ่นปิดวงกลมของรัศมี 15 ซ.ม. แล้วเชื่อมให้ติดกันด้วยวิธีการเชื่อมแก๊ส

ฌ. สวมท่อขนาด 3/8 นิ้ว เข้ากับรูด้านข้างของเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกรัศมี 15 ซ.ม. ที่เหลืออีก 1 รู ซึ่งจะตรงกับรูด้านข้างของเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกรัศมี 10 ซ.ม. จากนั้นเชื่อมให้ติดกันด้วยวิธีการเชื่อมแก๊ส

ญ. นำท่อขนาด 3/8 นิ้ว ยาวประมาณ 43 ซ.ม. สวมติดกับแผ่นวงกลมขนาด 10 ซ.ม.ที่เจาะรูแล้ว ให้ด้านหนึ่งมีความยาว 35 ซ.ม. จากนั้นนำไปเชื่อมปิดปากทรงกระบอกรัศมีขนาด 10 ซ.ม.ที่เหลือ

ฎ. เชื่อมแผ่นวงกลมขนาด 15 ซ.ม.ที่เจาะรูแล้วเข้ากับปากทรงกระบอกรัศมีขนาด 15 ซ.ม.ที่เหลือ จะได้ตัวควบแน่นไอตัวทำละลาย

ฏ. ทำการลบรอยเชื่อมของตัวควบแน่นไอตัวทำละลาย จะได้เครื่องควบแน่นไอของตัวทำละลายที่สมบูรณ์

4.3.8 ขั้นตอนการประกอบเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

ก. ติดตั้งห้องสุญญากาศเข้ากับที่ติดตั้งเครื่องอบแห้ง หุ้มฉนวนใยแก้วกันการสูญเสียความร้อนจากห้องสุญญากาศ และติดตั้งฝาปิดห้องสุญญากาศ

ข. ติดตั้งปั๊มสุญญากาศ ปั๊มน้ำร้อน และเครื่องทำน้ำร้อน

ค. เดินระบบท่อของปั๊มสุญญากาศ ปั๊มน้ำร้อน และเครื่องทำน้ำร้อน

ง. ติดตั้งเกจวัดความดันสุญญากาศ เทอร์โมคัปเปิล ชุดแสดงและควบคุมอุณหภูมิ และระบบไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การดำเนินการทดลอง

ขั้นตอนการทดลอง แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ

ก. การสังเคราะห์ซีเอ็มซีจากเซลลูโลสชนิดผง (Powdered cellulose) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ขนาดความจุ 24.7 ลิตร

ข. การเก็บข้อมูลการอบแห้งซีเอ็มซีด้วยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศที่สร้างขึ้น

5.1 การสังเคราะห์ซีเอ็มซีจากเซลลูโลสชนิดผง

5.1.1 อุปกรณ์ในการสังเคราะห์ซีเอ็มซี

ก. เครื่องปฏิกรณ์เคมีขนาดความจุ 24.7 ลิตร

ข. มอเตอร์กระแสสลับขนาด 1.5 กิโลวัตต์

ค. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K

ง. ชุดกรองสารแบบสุญญากาศและกระดาษกรอง

จ. เทอร์โมมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิได้ในช่วง 0-100 ^{o}ซ

ฉ. กระดาษลิตมัส

ช. เครื่องทำน้ำร้อนและน้ำเย็น (Cooling and heating Aid) ขนาด 2.0 กิโลวัตต์

ซ. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ 80 ^{o}ซ

ฌ. เครื่องควบคุมมอเตอร์และแสดงค่าอุณหภูมิแบบ PD (PD Controller)

ญ. นาฬิกาจับเวลา

5.1.2 สารเคมี

ก. กรดคลอโรอะซีติก ($ClCH_2COOH$)

ข. กรดอะซีติก (CH_3COOH)

ค. เซลลูโลสชนิดผง (Powdered cellulose)

ง. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

จ. เททระเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ ($(CH_3)_4N^+Cl^-$)

ฉ. ไอโซโพรพานอล ($(CH_3)_2CHOH$)

ช. น้ำกลั่น (Distilled water)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ขั้นตอนการเตรียมซีเอ็มซี

ก. ชั่งเซลลูโลส 930 กรัม เททระเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ 11.11 กรัม และไอโซโพรพานอล 18,100 มิลลิลิตร ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

ข. กวนของผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนเชิงกล โดยใช้ใบพัดแบบ Anchor ค่อย ๆ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 36% โดยน้ำหนัก จำนวน 2,325 กรัม ให้หมดในเวลา 15 นาที

ค. กวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเริ่มให้ความร้อน รอจนอุณหภูมิของของผสมขึ้นจนอยู่ในช่วง 75-85 °ซ กวนต่อเป็นเวลา 20 นาที

ง. ใส่สารละลายกรดคลอโรอะซีติก (ชั่งกรดคลอโรอะซีติก 950 กรัม นำไปละลายในไอโซโพรพานอล 2,840 มิลลิลิตร) ทำการปั่นกวนต่ออีก 60 นาที หลังจากนั้นหยุดปฏิกิริยาโดยการทำให้อุณหภูมิต่ำกว่า 10 °ซ

จ. ปรับสภาพสารละลายให้เป็นกลางด้วยกรดอะซีติกเข้มข้น แล้วจึงกรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศแยกไอโซโพรพานอลจะได้ซีเอ็มซีที่มีความชื้นในช่วง 30 - 70 % โดยน้ำหนัก

5.2 การเก็บข้อมูลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

5.2.1 ตัวแปรที่ศึกษา

ก. ความดันสัมบูรณ์.(ม.ม.ปรอท) 560 และ 660

ข. อุณหภูมิ (°ซ) 45

ค. ปริมาณการอบแห้งต่อครั้ง (กรัม) 55.9, 64.9, 70.2, 104.9, 142.1, 249.7, 274.0, 611.1, 846.7 และ 1209.6

5.2.2 ขั้นตอนการอบแห้ง

ก. เริ่มเดินเครื่องอบแห้งตามขั้นตอนดังนี้

1. จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ระบบไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศได้แก่ ปั๊มน้ำร้อน ปั๊มสุญญากาศ และเครื่องทำน้ำร้อน

2. ต่อเครื่องทำน้ำเย็นเข้ากับเครื่องควบแน่นไอ และเปิดน้ำเย็นเข้าหล่อเครื่องควบแน่น เติมน้ำสะอาดลงในเครื่องทำความน้ำร้อน และเปิดสวิทช์เริ่มให้ความร้อนแก่น้ำที่เติมลงไป เมื่อน้ำร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 80° ซ เปิดปั๊มน้ำร้อนเพื่อให้ความร้อนแก่ห้องสุญญากาศ การเปิดสวิทช์เครื่องทำน้ำร้อนทำให้ตัวควบคุมอุณหภูมิทำงานโดยอัตโนมัติ

3. วัดอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศซึ่งทำได้ 2 แบบคือ ดูจากชุดควบคุมอุณหภูมิ และดูจากเทอร์โมมิเตอร์ที่วางอยู่ในห้องสุญญากาศ เมื่ออุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่ต้องการจึงเริ่มทำการอบแห้ง ในการทดลองนี้คือ 45 °ซ

ข. การอบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศ

1. ชั่งน้ำหนักถาดที่มีซีเอ็มซีที่เตรียมสำหรับอบแห้ง แล้ววางบนชั้นของเครื่องอบแห้ง และวางเทอร์โมมิเตอร์บนซีเอ็มซี เพื่อไว้วัดอุณหภูมิที่แท้จริงของการอบแห้ง

2. ปิดฝาปิดของเครื่องอบแห้ง และวาล์วที่ 1 และ 3 ในรูปที่ 4.16 ให้สนิท

3. เปิดสวิทช์ให้ปั๊มสุญญากาศทำงานและเริ่มจับเวลา เมื่อความดันสุญญากาศถึงค่าที่ต้องการแล้วต้องคอยปรับวาล์วที่ 1 เพื่อรักษาความดันสุญญากาศให้คงที่

4. เมื่อครบ 30 นาที ปิดปั๊มสุญญากาศ เปิดวาล์วที่ 1 เปิดฝาปิดเครื่องอบแห้ง แล้วนำถาดซีเอ็มซีมาชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึกน้ำหนัก และตรวจดูอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ว่ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการทำการทดลองคือที่ 45 °ซ หรือไม่ เพราะว่าเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศ ยังทำการติดตั้งไม่ดีทำให้อุณหภูมิที่วัดได้ไม่ตรงกับอุณหภูมิจริง ๆ ของห้องสุญญากาศ ซึ่งจะต้องแก้ไขตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลต่อไป

5. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 4 จนกว่าน้ำหนักที่ชั่งได้จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

6. นำซีเอ็มซีที่น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากแล้วไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักของซีเอ็มซีแห้ง

5.2.3 สร้างกราฟความสัมพันธ์จากข้อมูลการอบแห้ง

ก. นำข้อมูลการอบแห้งมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นและอัตราการอบแห้ง

ข. เขียนกราฟความสัมพันธ์ต่อไปนี้

- กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง
- กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง
- กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการทดลอง

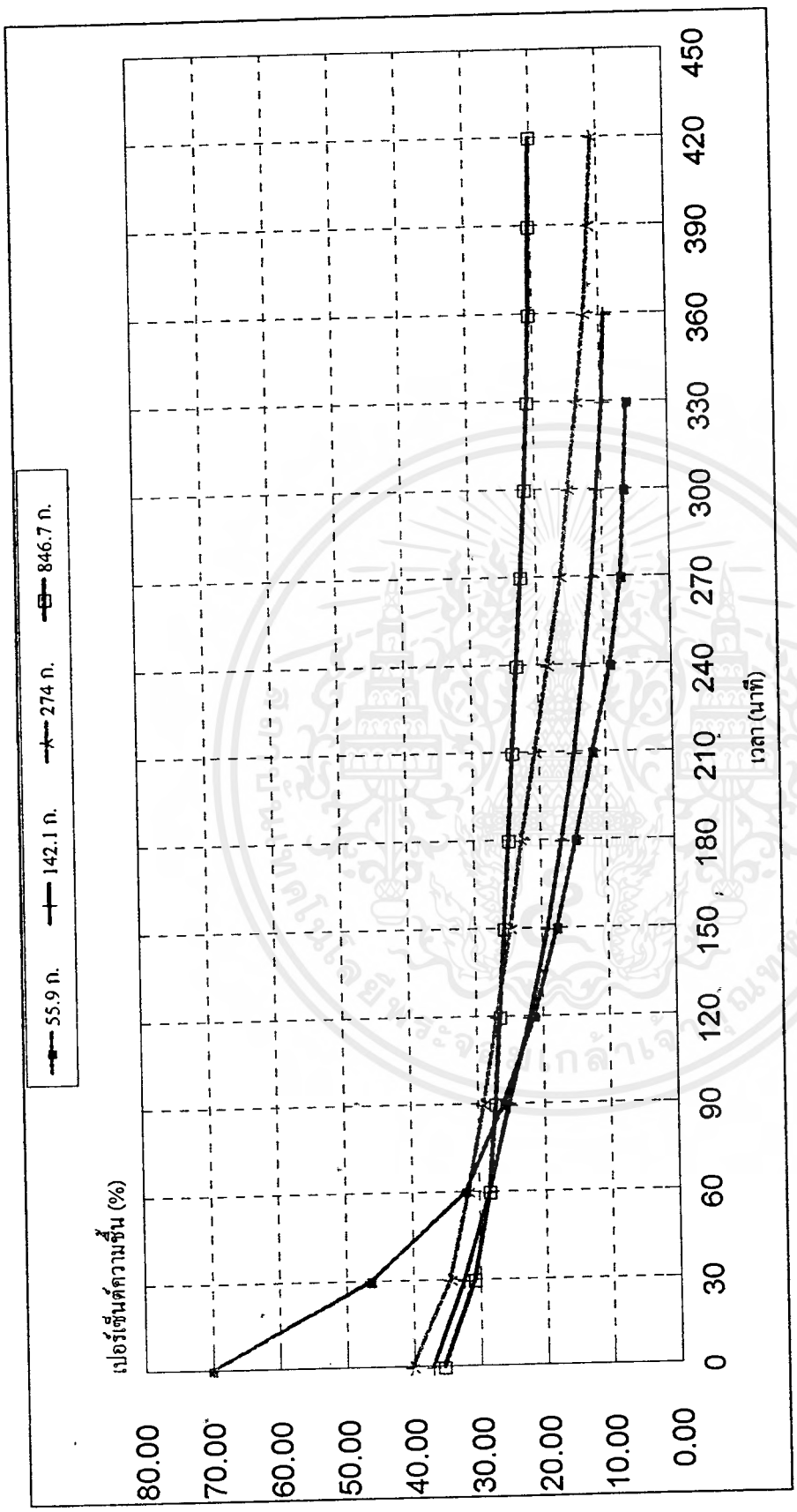
6.1 ผลการทดลองการอบแห้ง

6.1.1 การอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ (Absolute pressure) 660 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม. แสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ (Absolute pressure) 660 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

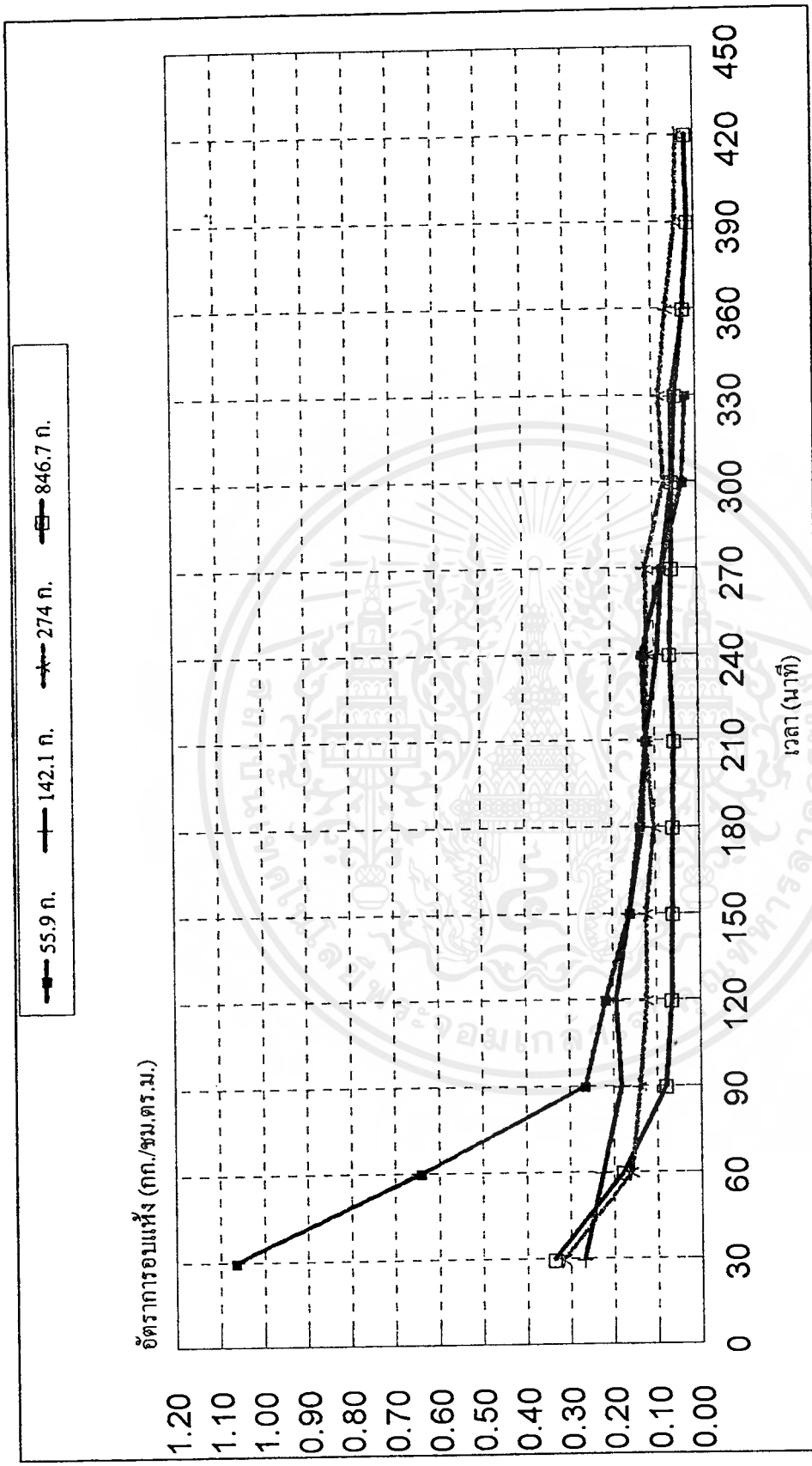
การทดลองครั้งที่	น้ำหนักซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซีแห้ง (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้น (%)
1	95.10	55.90	70.13
2	194.80	142.10	37.09
3	384.30	274.00	40.26
4	1147.20	846.70	35.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



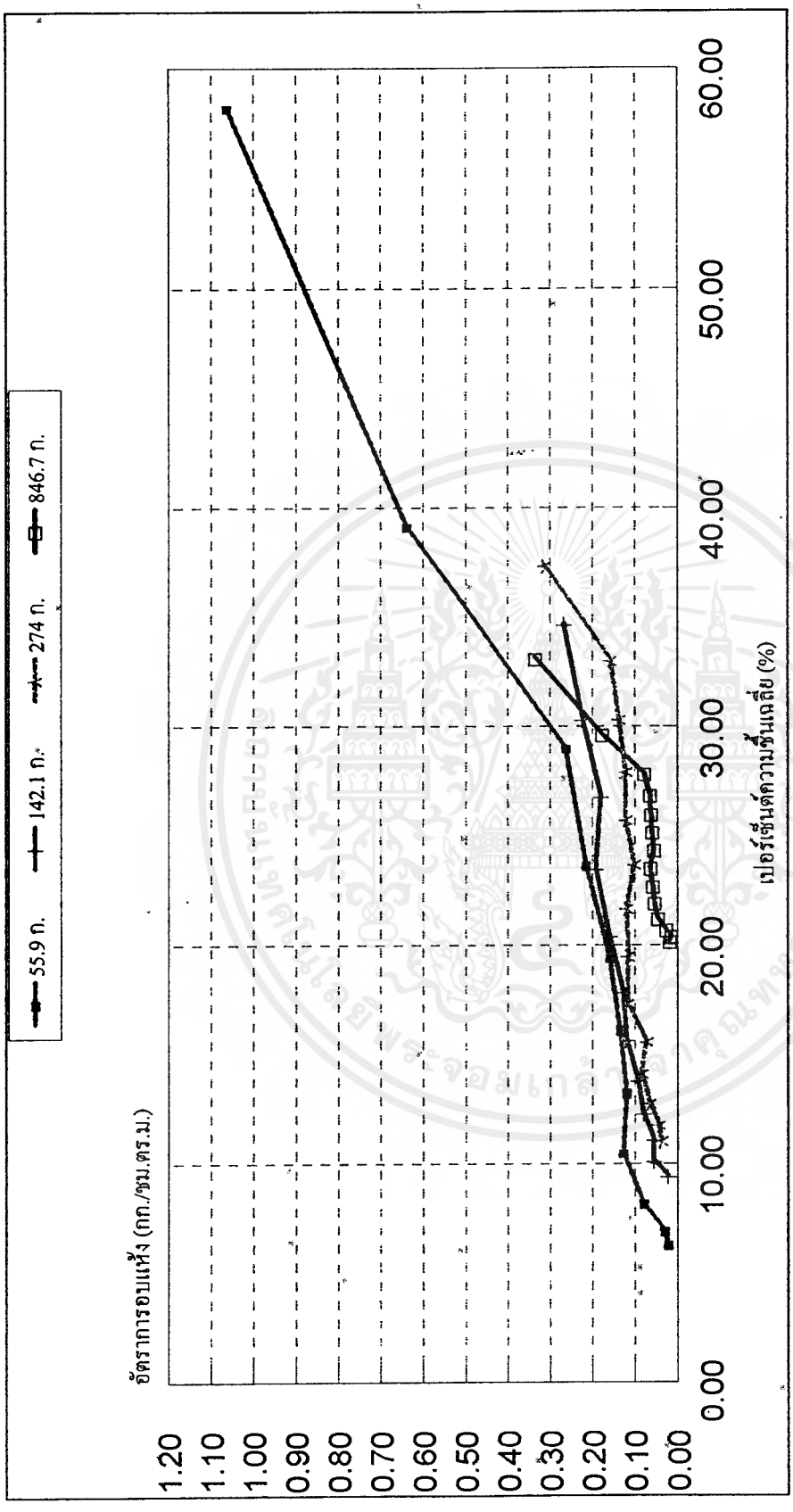
รูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 660 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 °ซ
และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 660 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 °ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยที่ความดันสัมบูรณ์ 660 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นเยื่อมีซี 1.5 ซ.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอธิบายต่อไปนี้ "ปริมาณการอบแห้ง" คือคิดเป็นน้ำหนักของซีเอ็มซีแห้ง

จากรูปที่ 6.1 จะให้เห็นว่าที่ปริมาณการอบแห้ง 846.7 กรัม มีความชื้นเริ่มต้น 35 % และที่เวลาการอบแห้งเท่ากับ 330 นาที ซีเอ็มซีจะเหลือความชื้นประมาณ 21 % แต่ที่ปริมาณการอบแห้ง 55.9 กรัม มีความชื้นเริ่มต้น 70 % และที่เวลาการอบแห้งเท่ากับ 330 นาที ซีเอ็มซีจะเหลือความชื้นประมาณ 5 % นั่นคือที่ปริมาณการอบแห้งมาก ๆ ความชื้นในซีเอ็มซีจะลดลงได้ช้ากว่าที่ปริมาณการอบแห้งน้อย ๆ ทำให้ต้องใช้เวลามากในการอบแห้งเพื่อให้ซีเอ็มซีมีความชื้นตามที่กำหนดคือไม่เกิน 8 % (% โดยน้ำหนัก)

จากรูปที่ 6.2 จะเห็นว่าในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งจะมีอัตราการอบแห้งมากที่สุดแล้วจะลดลงเรื่อย ๆ ซีเอ็มซีที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงอัตราการอบแห้งเริ่มต้นก็จะมีค่าสูงด้วย เมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้น พบว่าทุกปริมาณการอบแห้งจะมีอัตราการอบแห้งใกล้เคียงกัน นั่นคืออัตราการอบแห้งไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณการอบแห้ง

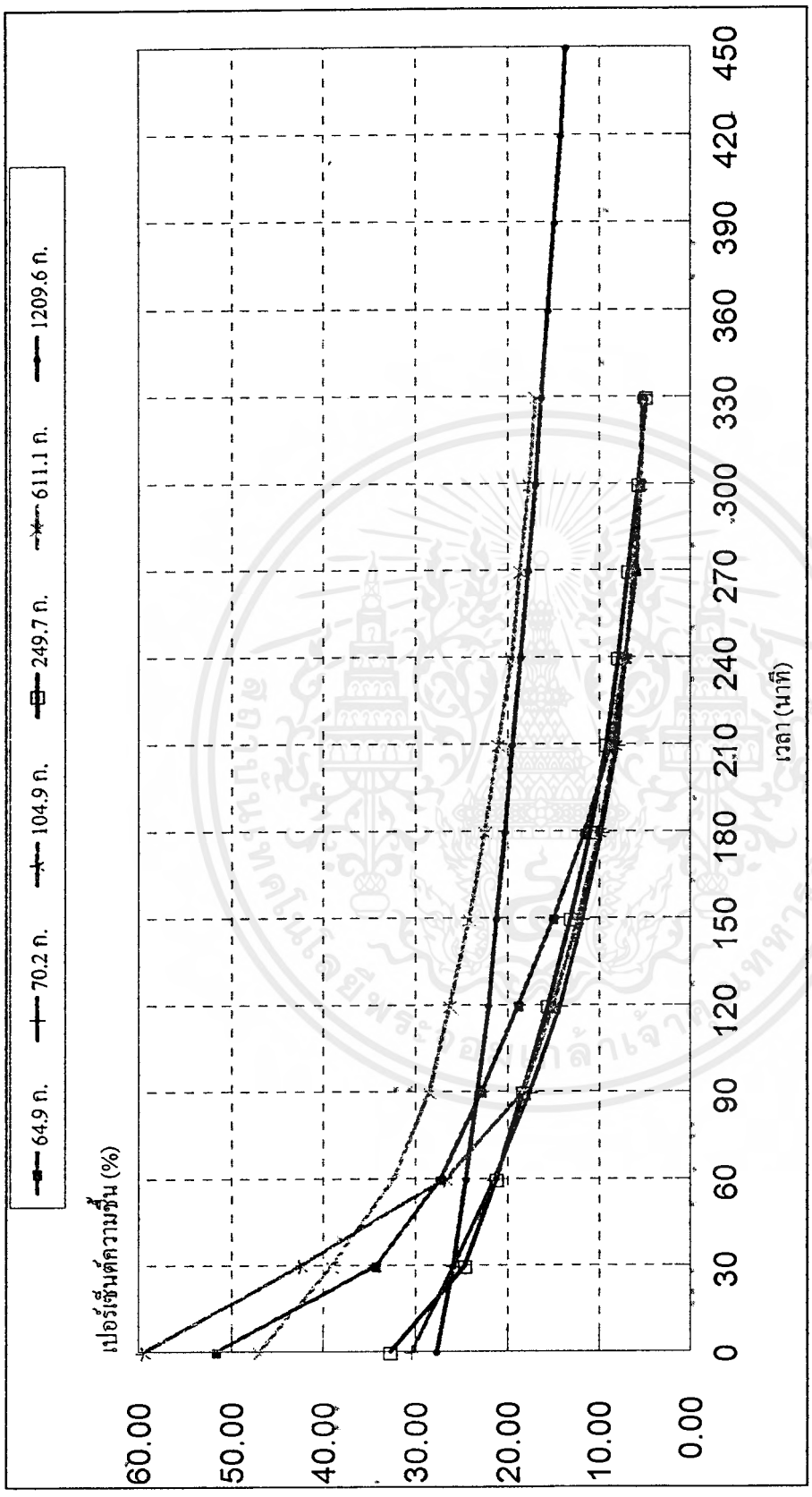
จากรูปที่ 6.3 จะเห็นว่าอัตราการอบแห้งมีแนวโน้มมีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของซีเอ็มซีมีค่าลดลง ที่ปริมาณการอบแห้งมาก ๆ จะมีอัตราการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งที่มีปริมาณการอบแห้งน้อย ๆ เมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของซีเอ็มซีมีค่าเท่ากัน

6.1.2 การอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ (Absolute pressure) 560 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 °ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม. แสดงดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 แสดงการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ (Absolute pressure) 560 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 °ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

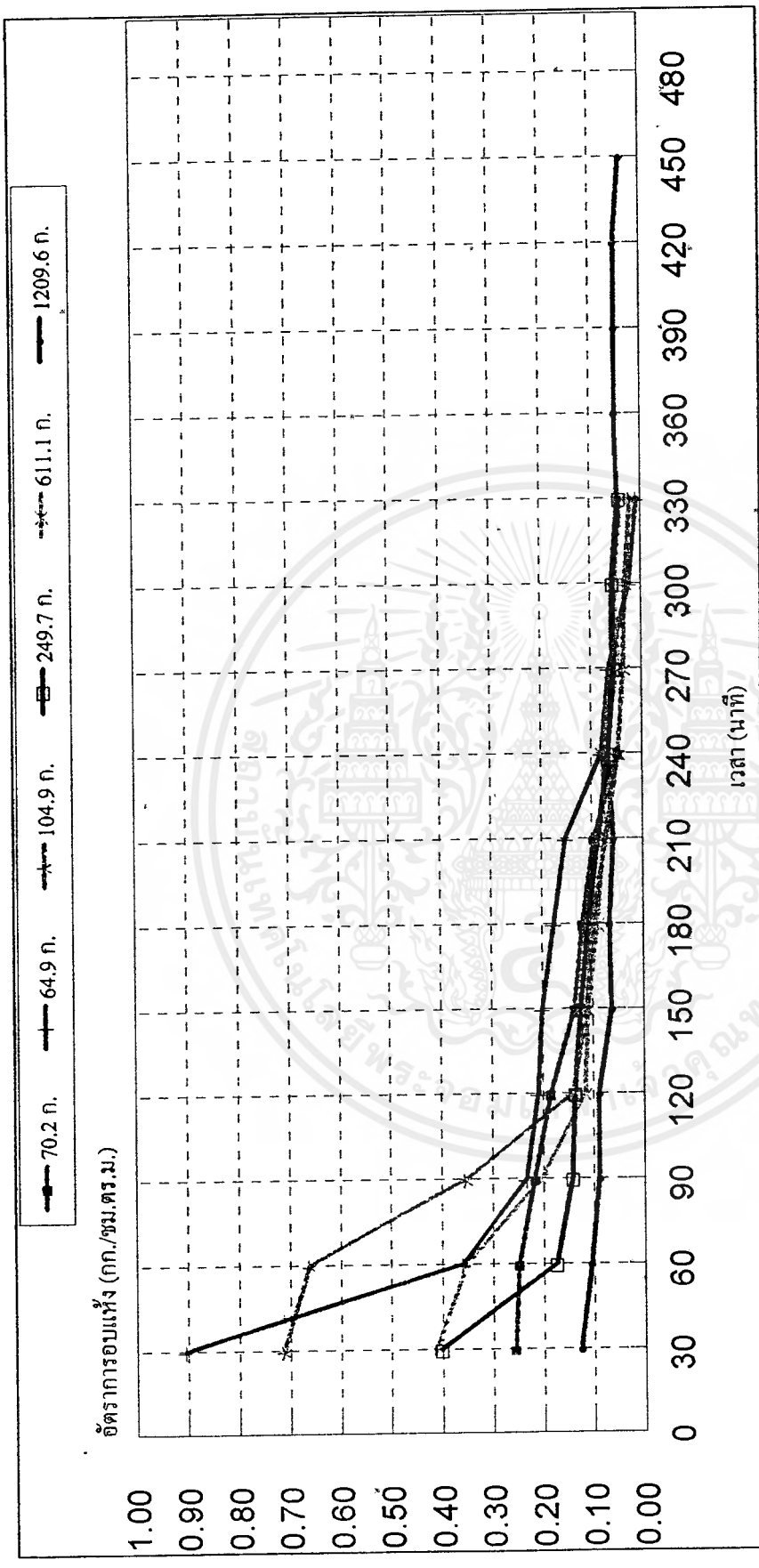
การทดลองครั้งที่	น้ำหนักซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซีแห้ง (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้น (%)
5	91.50	70.20	30.34
6	98.40	64.90	51.62
7	167.20	104.90	59.39
8	331.30	249.70	32.68
9	897.60	611.10	46.88
10	1544.00	1209.60	27.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



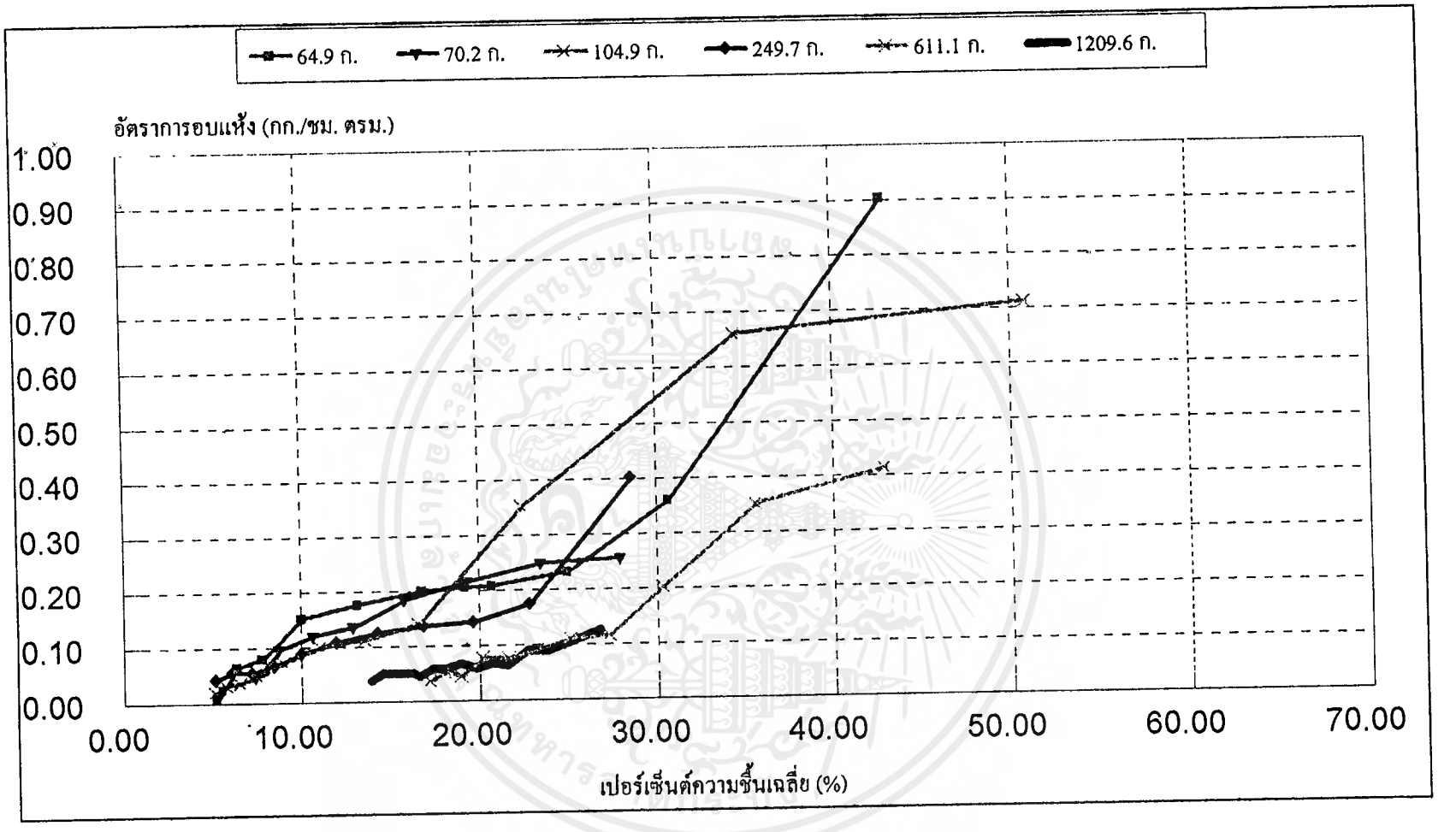
รูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 560 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 560 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยที่ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

จากรูปที่ 6.4 จะให้เห็นว่าที่ปริมาณการอบแห้ง 1209.6 กรัม มีความชื้นเริ่มต้น 28 % และที่เวลาการอบแห้งเท่ากับ 330 นาที ซีเอ็มซีจะเหลือความชื้นประมาณ 16 % แต่ที่ปริมาณการอบแห้ง 64.9 กรัม มีความชื้นเริ่มต้น 52 % ที่เวลาการอบแห้งเท่ากับ 330 นาที ซีเอ็มซีจะเหลือความชื้นประมาณ 5 % นั่นคือที่ปริมาณการอบแห้งมาก ๆ ความชื้นในซีเอ็มซีจะลดลงได้ช้ากว่าที่ปริมาณการอบแห้งน้อย ๆ ทำให้ต้องใช้เวลามากในการอบแห้งเพื่อให้ซีเอ็มซีมีความชื้นตามที่กำหนดคือไม่เกิน 8 % และแนวโน้มของเส้นกราฟจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ การอบแห้งที่ปริมาณการอบแห้ง 70.2 64.9 และ 104.9 กรัม กับการอบแห้งที่ปริมาณการอบแห้ง 611.1 และ 1209.6 กรัม เส้นกราฟจะใกล้กันมากจนเกือบเป็นเส้นเดียวกันเมื่อเวลาในการอบแห้งมีค่ามากขึ้น

จากรูปที่ 6.5 จะเห็นว่าในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งจะมีอัตราการอบแห้งมากที่สุดแล้วจะลดลงเรื่อย ๆ ซีเอ็มซีที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงอัตราการอบแห้งเริ่มต้นก็จะมีค่าสูงด้วย เมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้น พบว่าทุกปริมาณการอบแห้งจะมีอัตราการอบแห้งใกล้เคียงกันมาก นั่นคืออัตราการอบแห้งไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท

จากรูปที่ 6.6 จะเห็นว่าอัตราการอบแห้งมีแนวโน้มมีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของซีเอ็มซีมีค่าลดลง ที่ปริมาณการอบแห้งมาก ๆ จะมีอัตราการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งที่มีปริมาณการอบแห้งน้อย ๆ เมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของซีเอ็มซีมีค่าเท่ากัน

จากรูปที่ 6.1 ถึง 6.6 แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งซีเอ็มซีที่ความดันสัมบรูณ์ 560 และ 660 ม.ม.ปรอท มีแนวโน้มที่เหมือนกันคือ

ก. ปริมาณการอบแห้งจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ถ้าปริมาณในการอบแห้งมากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งให้ซีเอ็มซีมีความชื้นไม่เกินค่าที่กำหนดไว้คือ 8 % ก็จะยิ่งมากขึ้นด้วย โดยไม่ขึ้นกับความชื้นเริ่มต้นของซีเอ็มซีที่นำมาทำการอบแห้งแบบสุญญากาศ

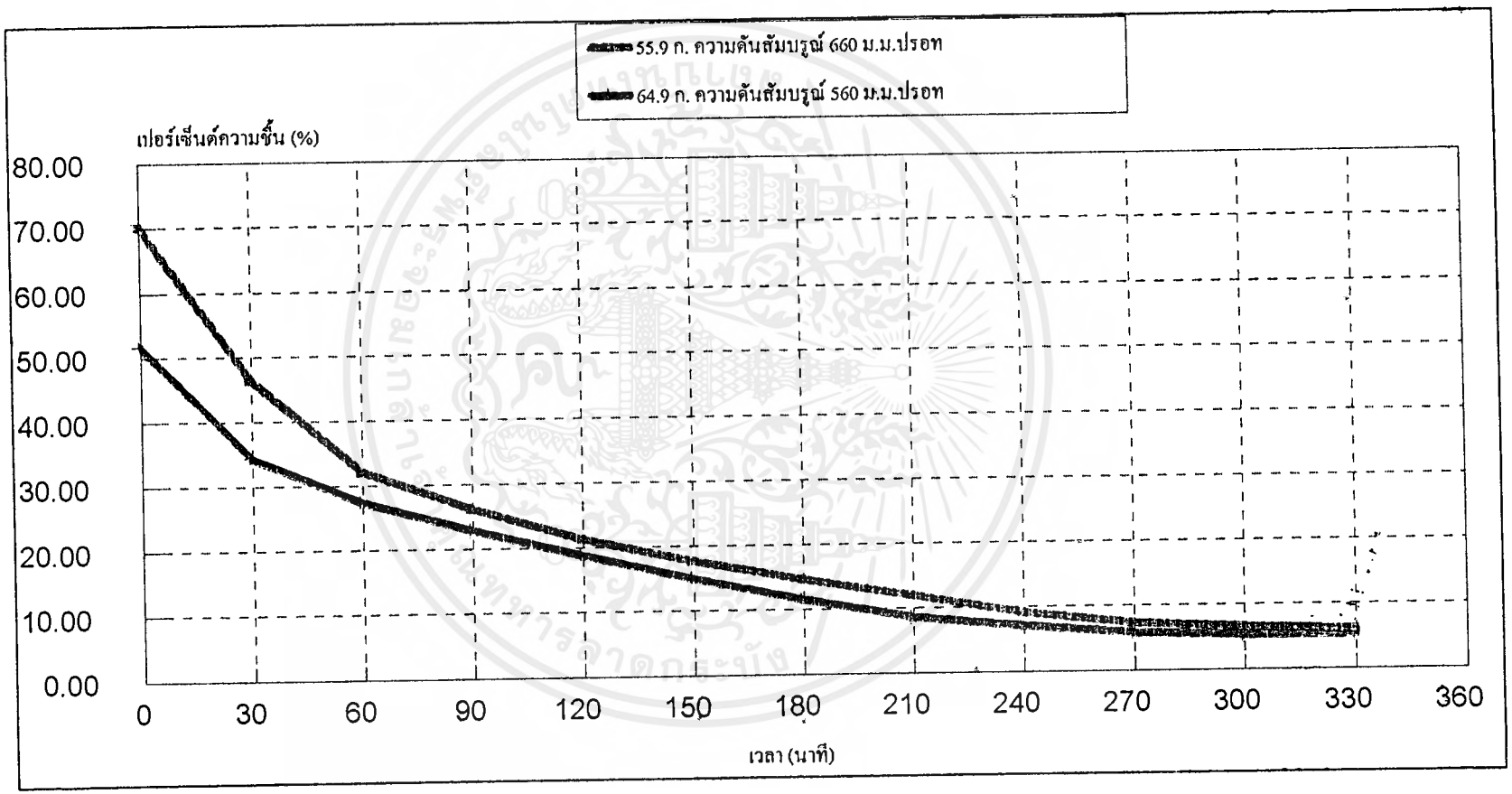
ข. อัตราการอบแห้งจะมีค่ามากที่สุดในช่วงเริ่มต้นการอบแห้งและจะลดลงเมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้น และอัตราการอบแห้งในช่วงเริ่มต้นจะมีค่ามากเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นเริ่มต้นของซีเอ็มซี ถ้าความชื้นของซีเอ็มซีมีค่ามากอัตราการอบแห้งในช่วงเริ่มต้นจะมีค่ามากด้วย

ค. อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มมีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของซีเอ็มซีมีค่าลดลง ที่ปริมาณการอบแห้งมาก ๆ จะมีอัตราการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งที่มีปริมาณการอบแห้งน้อย ๆ เมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของซีเอ็มซีมีค่าเท่ากัน

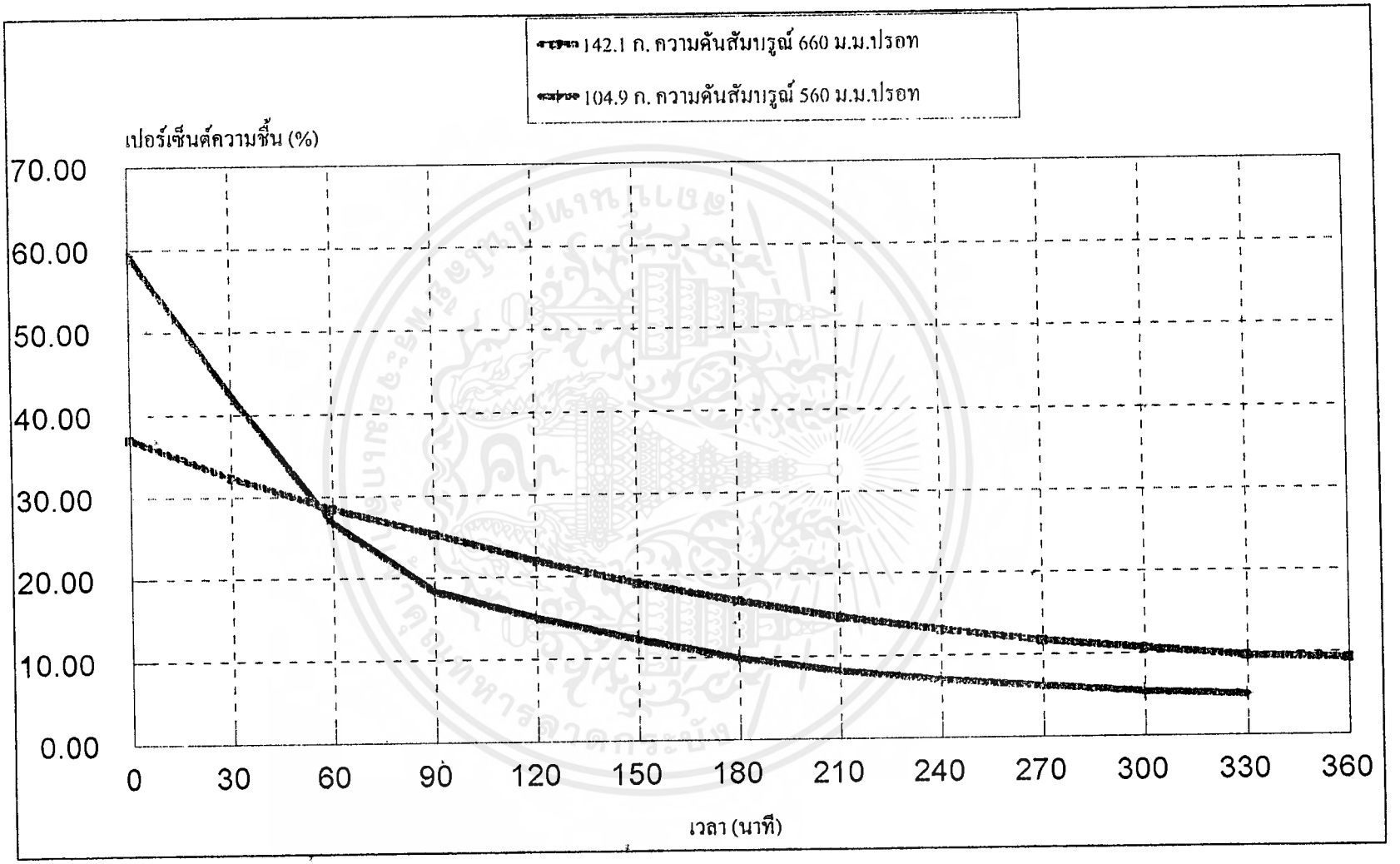
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลอง

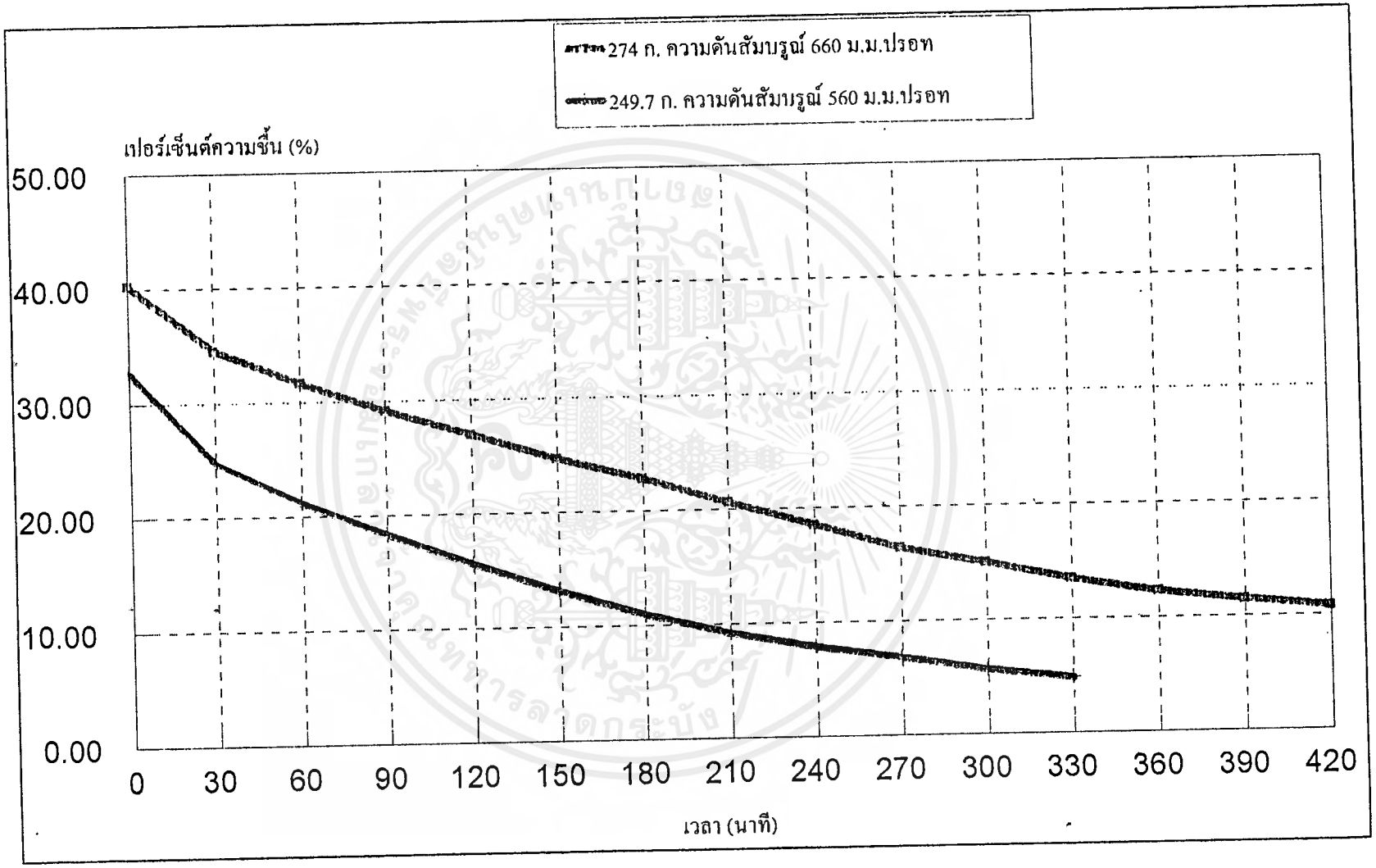
6.2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง



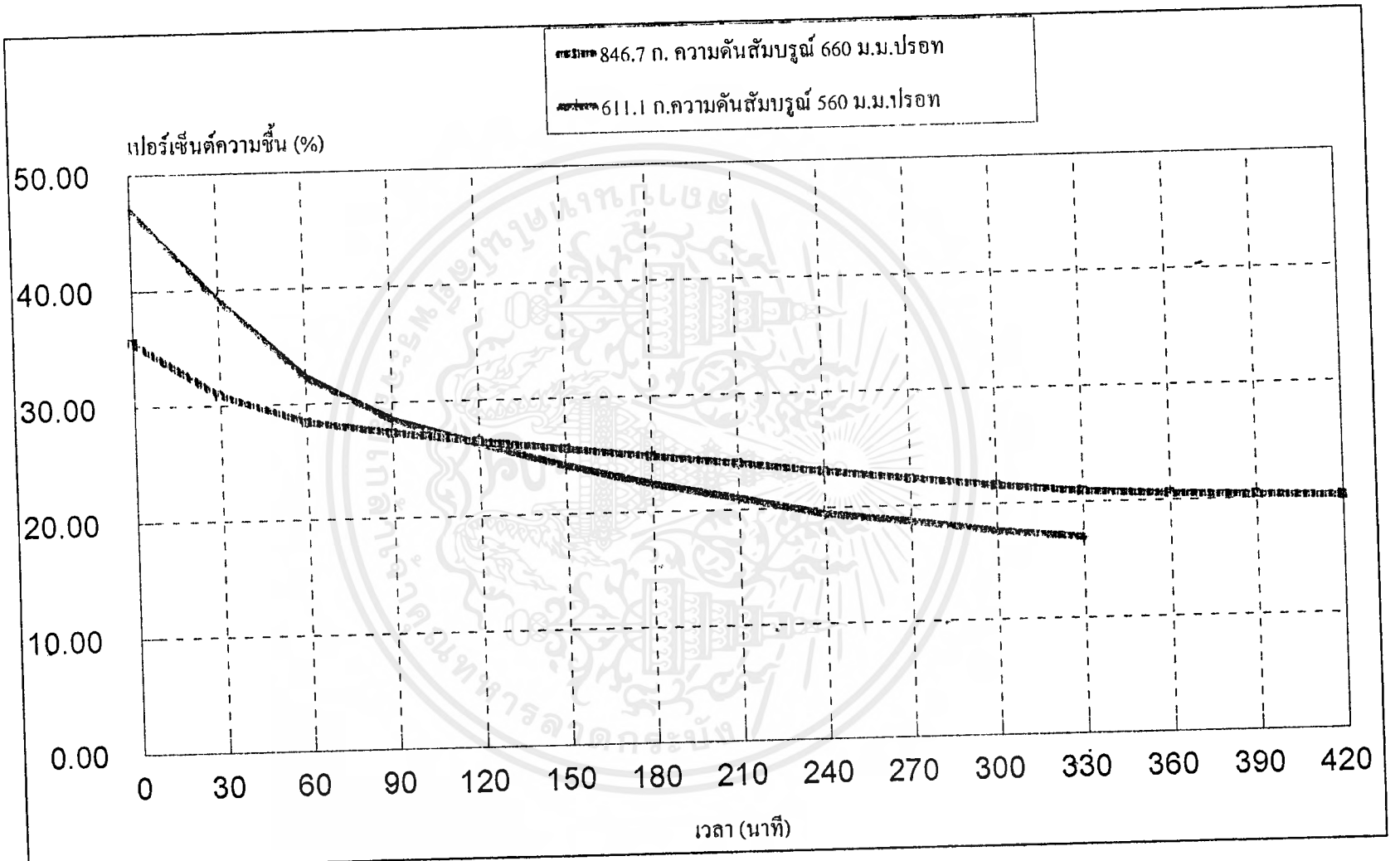
รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 55.9 และ 64.9 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.



รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 142.1 และ 104.9 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

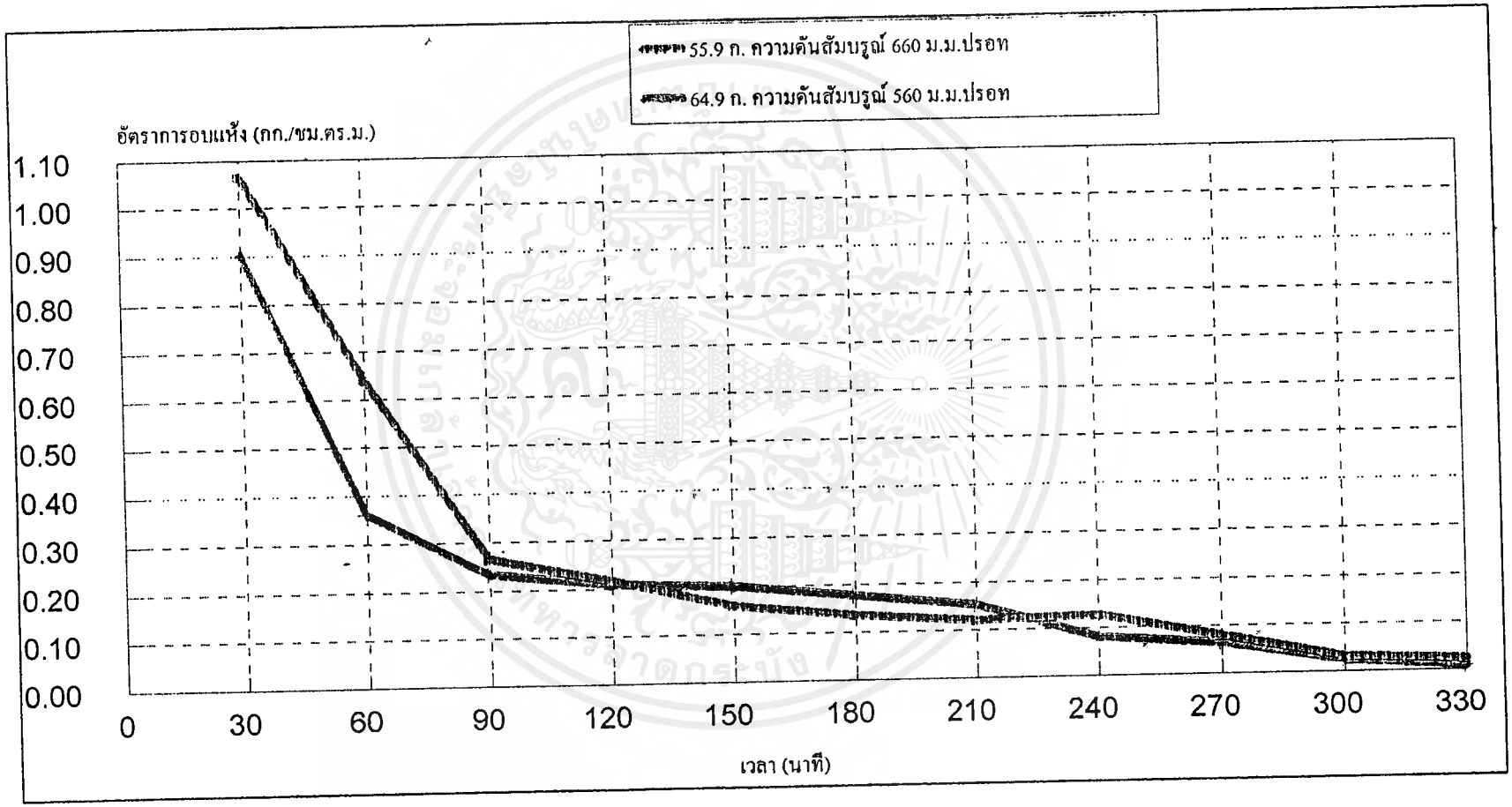


รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 274.0 และ 249.7 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

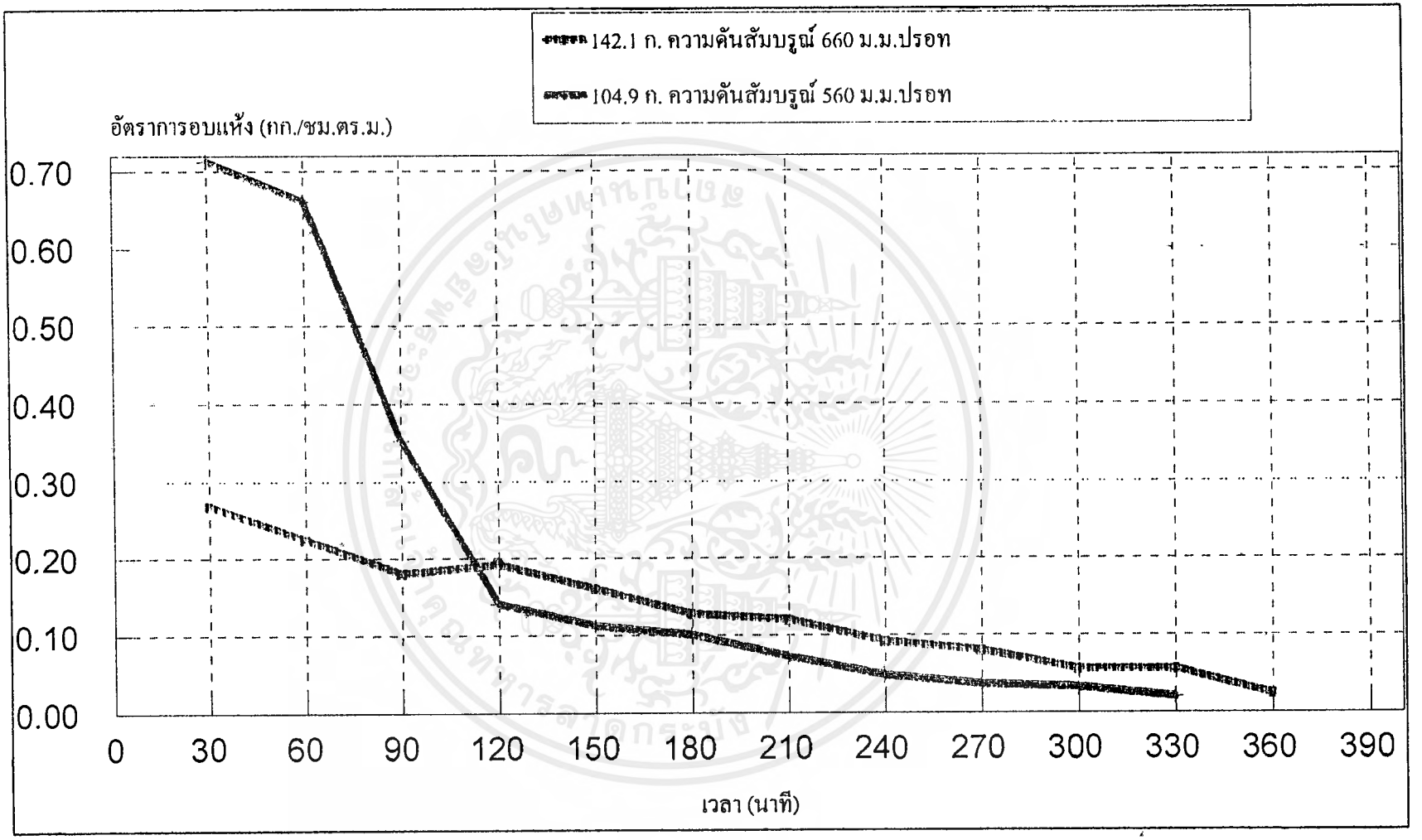


รูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 846.7 และ 611.1 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

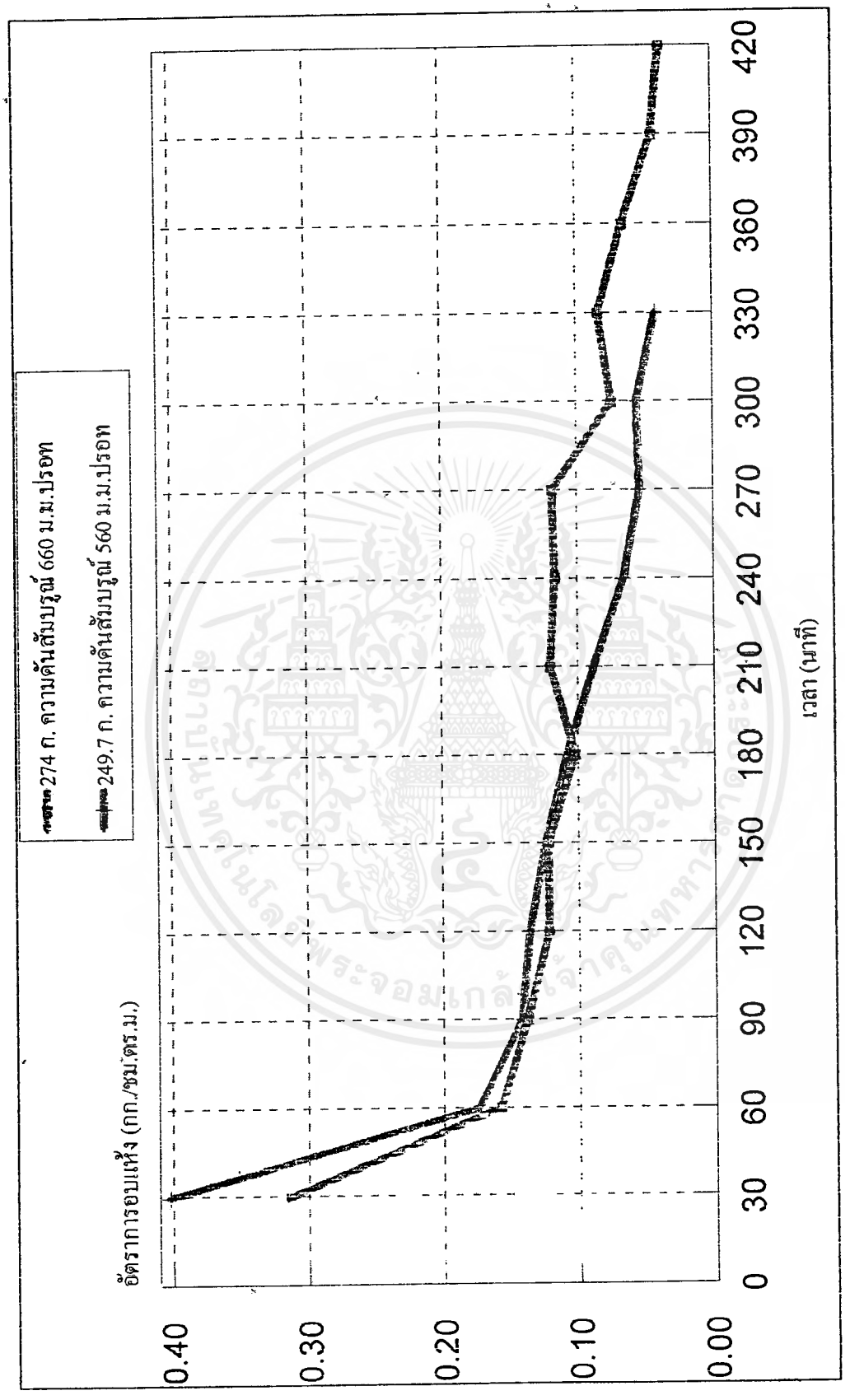
6.2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาในการอบแห้ง



รูปที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 55.9 และ 64.9 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

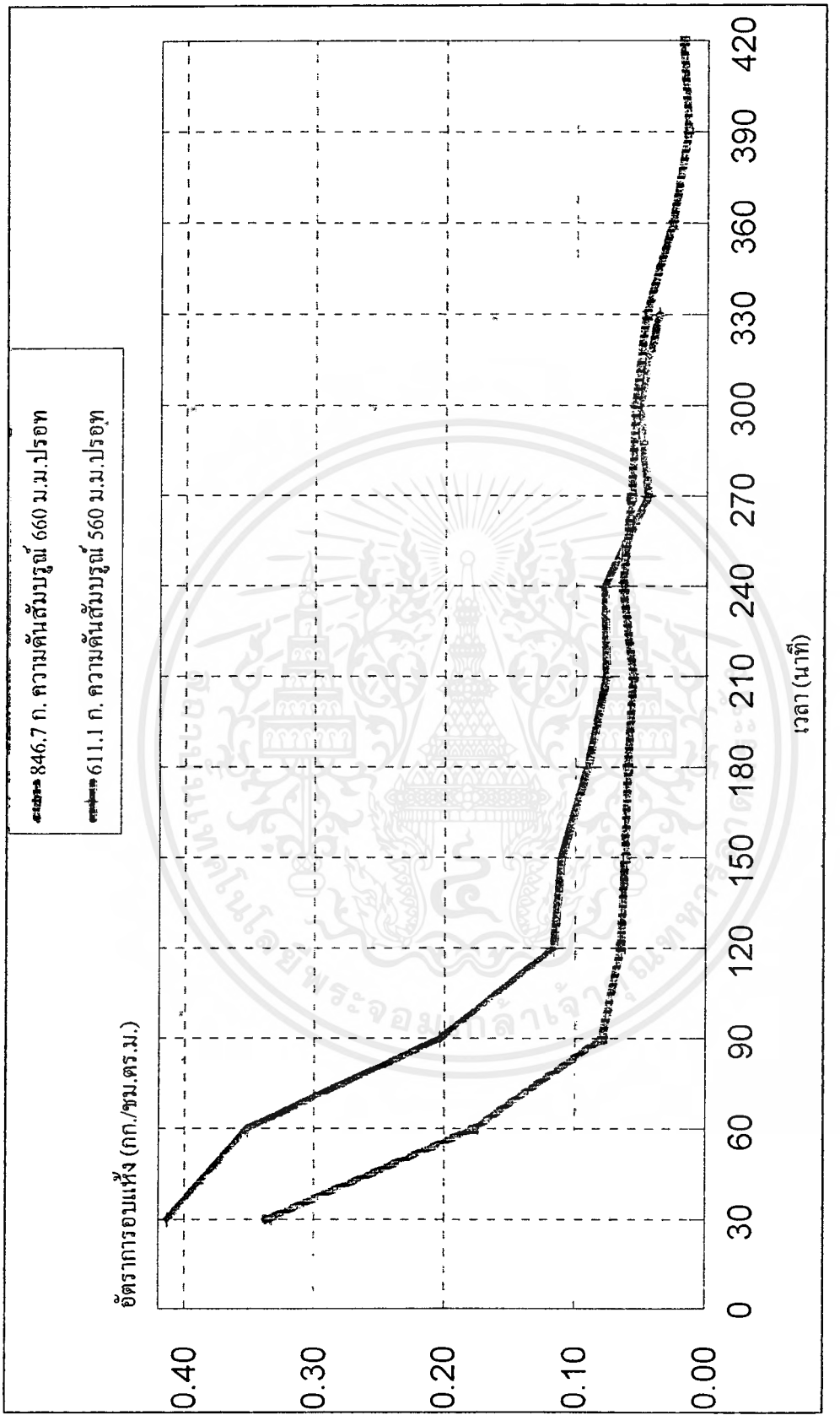


รูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 142.1 และ 104.9 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.



รูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 274.0 และ 249.7 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 °ซ และความหนาของชั้นซีเอมซี 1.5 ซ.ม.

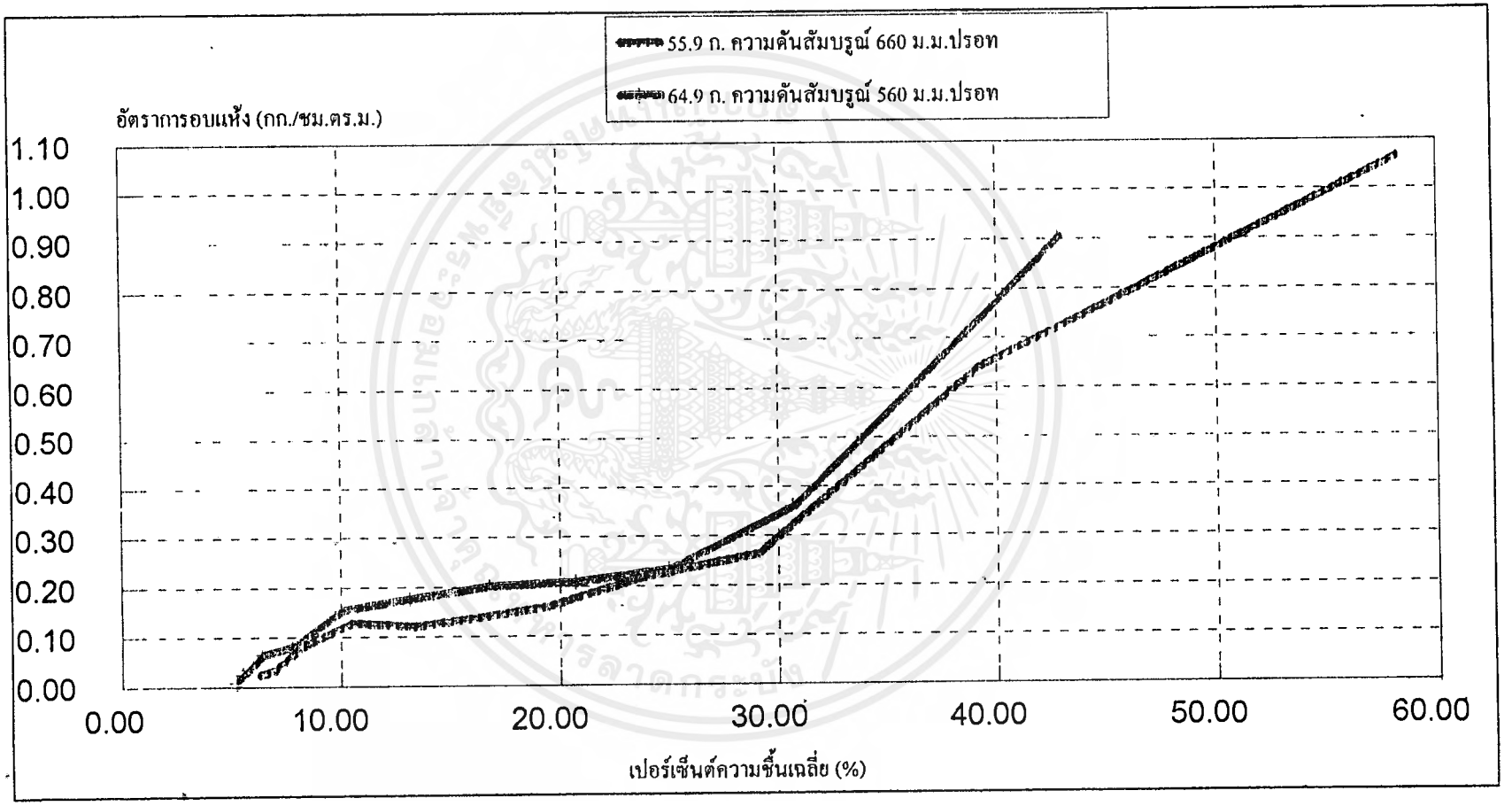
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



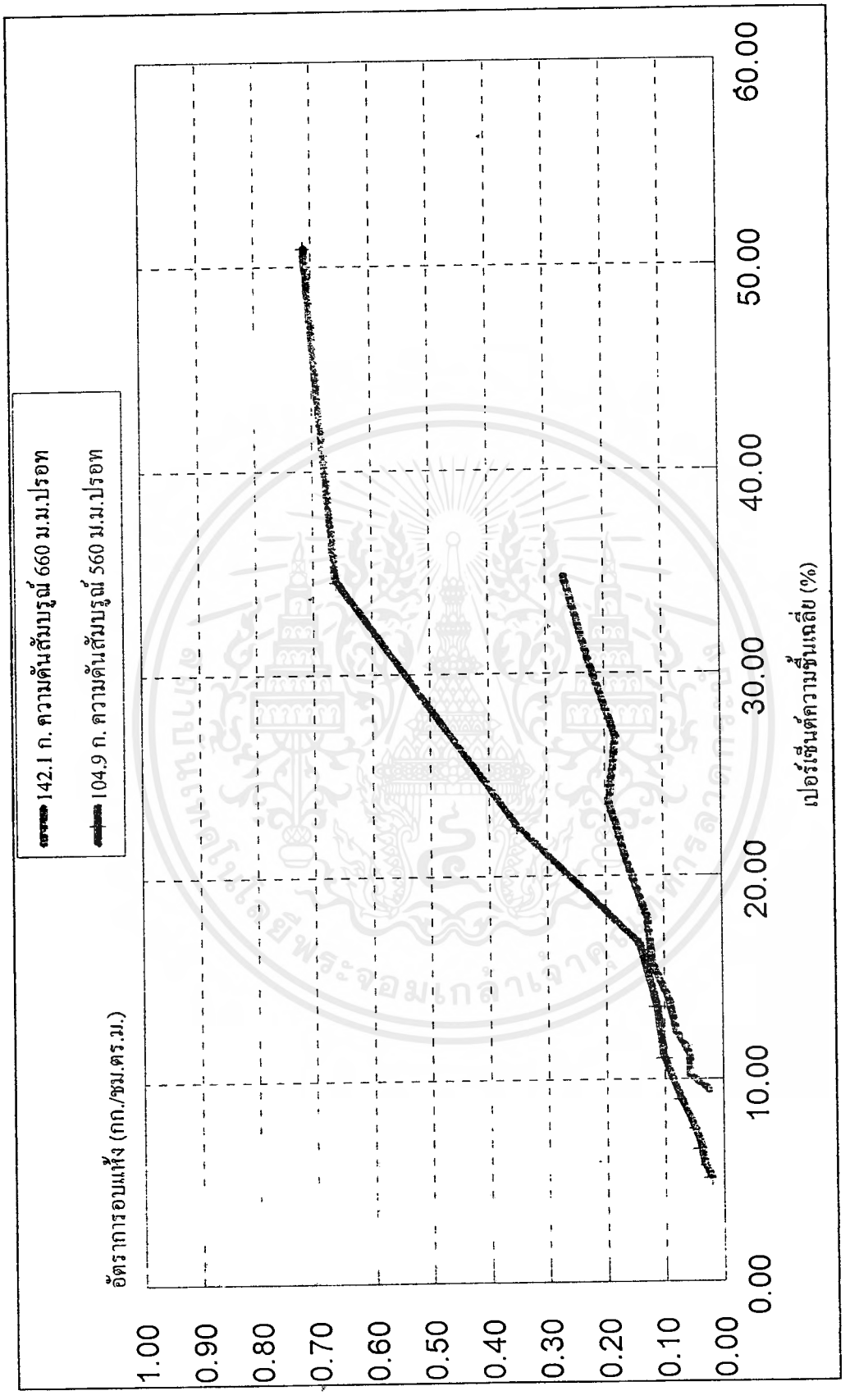
รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 846.7 และ 611.1 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเมนต์ 1.5 ซ.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย

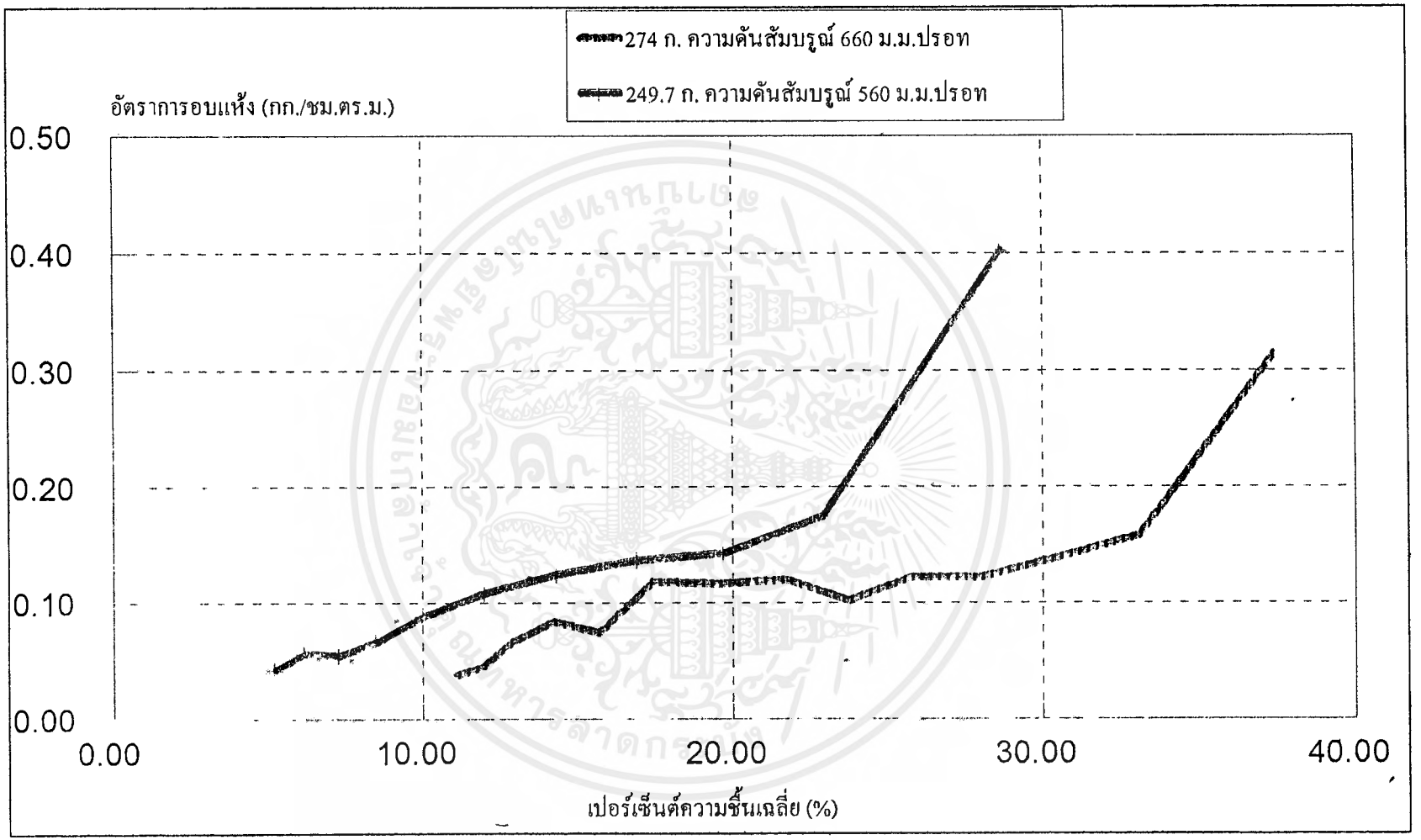


รูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 55.9 และ 64.9 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

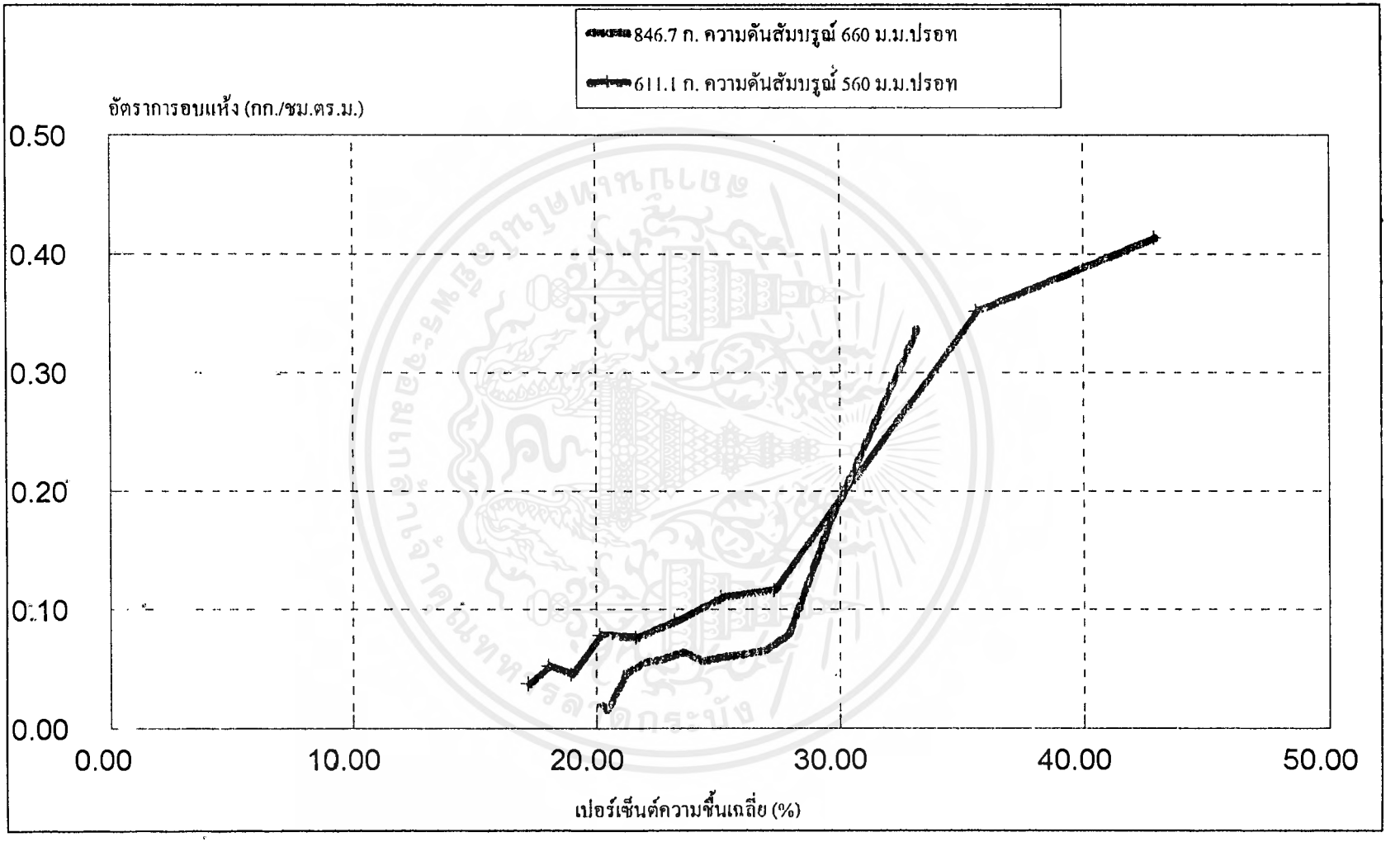


รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท
ปริมาณการอบแห้ง 142.1 และ 104.9 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเมนซี 1.5 ซ.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยที่ความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 274.0 และ 249.7 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.



รูปที่ 6.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยความดันสัมบรูณ์ 660 และ 560 ม.ม.ปรอท ปริมาณการอบแห้ง 846.7 และ 611.1 กรัม ตามลำดับ อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม.

จากรูปที่ 6.7 ถึง 6.10 จะเห็นว่าการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท สามารถลดปริมาณความชื้นของซีเอ็มซีชื้นได้ดีกว่าการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท ตัวอย่างเช่น รูปที่ 6.8 แม้ว่าความชื้นเริ่มต้นของซีเอ็มซีของการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท เท่ากับ 60 % ซึ่งมากกว่าความชื้นเริ่มต้นของซีเอ็มซีของการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท ที่เท่ากับ 38 % เมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้นจนถึงนาทีที่ 60 ความชื้นในซีเอ็มซีจะมีค่าเท่ากัน เมื่อเวลาในการอบแห้งมากกว่า 60 นาที ความชื้นของซีเอ็มซีที่ทำการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท จะมีค่าต่ำกว่าความชื้นของซีเอ็มซีที่การอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท นั่นคือ ที่ปริมาณการอบแห้งปริมาณใกล้เคียงกัน การอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท จะใช้เวลาในการอบแห้งเพื่อให้ความชื้นของซีเอ็มซีไม่เกิน 8 % น้อยกว่าการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท

จากรูปที่ 6.11 ถึง 6.14 จะเห็นว่าอัตราการอบแห้งในช่วงเริ่มการอบแห้งจะมีค่าสูงและจะมีค่าน้อยลงไปเรื่อย อัตราการอบแห้งในช่วงแรกจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาการอบแห้งมากขึ้นการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งจะมีค่าลดลง ในช่วงแรกของการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท และ 660 ม.ม.ปรอท อัตราการอบแห้งมีค่าต่างกันมาก แต่เมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้นอัตราการอบแห้งจะมีค่าใกล้เคียงกัน ตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 6.11 อัตราการอบแห้งจะมีค่าต่างกันมากในช่วงเวลา 90 นาทีแรก แต่หลังจาก 90 นาทีแรกแล้วอัตราการอบแห้งจะมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะการอบแห้งในช่วงแรกเป็นการกำจัดความชื้นที่ผิวด้านบนของซีเอ็มซี ความต้านทานในการถ่ายเทมวลของตัวทำละลายที่เป็นความชื้นยังมีค่าน้อย ทำให้อัตราการอบแห้งในช่วงแรกมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้นความชื้นที่ต้องการกำจัดจะอยู่ในเนื้อซีเอ็มซีที่ลึกลงไปจากผิวหน้าด้านบน และพบว่าขณะการอบแห้งซีเอ็มซี ผิวหน้าด้านบนของซีเอ็มซีเกิดเป็นแผ่นของแข็งปิดเนื้อซีเอ็มซีที่อยู่ด้านล่าง เกิดการหดตัวและก่อตัวเป็นก้อนเค้ก ทำให้ความต้านทานในการถ่ายเทมวลของตัวทำละลายที่เป็นความชื้นมีค่าสูง ซึ่งเป็นผลทำให้อัตราการอบแห้งที่เวลาการอบแห้งมาก ๆ มีค่าต่ำกว่าอัตราการอบแห้งในช่วงแรก

จากรูปที่ 6.15 ถึง 6.18 จะเห็นว่าที่ปริมาณการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกันและเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของซีเอ็มซีมีค่าเท่ากัน การอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท จะให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท ตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 6.15 ที่ปริมาณการอบแห้ง 64.9 ก. ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท และปริมาณการอบแห้ง 55.9 ก. ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท ที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของซีเอ็มซีเท่ากันคือ 40 % อัตราการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท มีค่าเท่ากับ 0.78 กก./ชม.ตร.ม. มากกว่าอัตราการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท ซึ่งมีค่าอัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.65 กก./ชม.ตร.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการอบแห้งซีเอ็มซีที่สังคราะห์ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 24.7 ลิตร ด้วยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศที่สร้างขึ้น โดยศึกษาผลของความดันสุญญากาศของการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 560 และ 660 ม.ม.ปรอท อุณหภูมิการอบแห้งเท่ากับ 45 ^{0}ซ และปริมาณการอบแห้งต่อ 1 ครั้งต่าง ๆ กัน สามารถสรุปได้ว่า

ก. ปริมาณการอบแห้งจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ถ้าปริมาณในการอบแห้งมากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งให้ซีเอ็มซีมีความชื้นไม่เกินค่าที่กำหนดไว้คือ 8 % (% โดยน้ำหนัก) ก็จะยิ่งมากขึ้นด้วยโดยไม่ขึ้นกับความชื้นเริ่มต้นของซีเอ็มซีที่นำมาทำการอบแห้ง

ข. อัตราการอบแห้งจะมีค่ามากที่สุดในช่วงเริ่มต้นการอบแห้งและจะลดลงเมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้น และอัตราการอบแห้งในช่วงเริ่มต้นจะมีค่ามากเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นเริ่มต้นของซีเอ็มซี ถ้าความชื้นของซีเอ็มซีมีค่ามากอัตราการอบแห้งในช่วงเริ่มต้นจะมีค่ามากด้วย

ค. อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มมีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของซีเอ็มซีมีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของซีเอ็มซีมีค่าเท่ากัน ที่ปริมาณการอบแห้งจำนวนมากจะมีอัตราการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งที่มีปริมาณการอบแห้งน้อย ๆ

ง. การอบแห้งซีเอ็มซีที่มีปริมาณการอบแห้งใกล้เคียงกัน การอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท จะใช้เวลาในการอบแห้งให้ซีเอ็มซีมีค่าความชื้นไม่เกิน 8 % น้อยกว่าการอบแห้งที่ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 ในการทดลองต้องนำซีเอ็มซีออกจากเครื่องอบแห้งทุก 30 นาที เพื่อชั่งน้ำหนักของซีเอ็มซี ดังนั้นหลังจากชั่งน้ำหนักแล้ว เมื่อทำการอบแห้งใหม่ต้องใช้เวลาประมาณ 10 นาที กว่าที่ภายในของห้องสุญญากาศจะมีความดันเท่ากับค่าที่กำหนดสำหรับการทดลอง มีผลทำให้เวลารวมทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งและผลการทดลองที่ได้จากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อน การแก้ไขให้มีความถูกต้องมากขึ้นอาจทำโดยเพิ่มช่วงเวลาในการอบแห้งจาก 30 นาที เป็น 45 นาที หรือ 60 นาที

7.2.2 การอบแห้งแบบสุญญากาศจะต้องทำการตรวจสอบ ระบบท่อ ข้อต่อ และวาล์วของระบบสุญญากาศเป็นประจำ ทั้งยังต้องสังเกตการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องสุญญากาศด้วยว่าเป็นไปตามปกติหรือไม่ ถ้ามีความผิดปกติแสดงว่าเกิดการรั่วของระบบสุญญากาศ

7.2.3 ซีล (Seal) ที่ใช้ป้องกันการรั่วของห้องสุญญากาศเป็นยางธรรมดาซึ่งเมื่อใช้ไปสักระยะหนึ่งจะเสื่อมคุณภาพลง ดังนั้นควรตรวจสอบสภาพของซีลว่าหมดอายุใช้งานหรือยัง ถ้าพบว่าเสื่อมสภาพแล้วต้องถอดเปลี่ยน

7.2.4 เก็บข้อมูลการทดลองที่ความหนาซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม. โดยแต่ละครั้งต้องมีน้ำหนักซีเอ็มซีเริ่มต้นเท่ากัน เปรียบเทียบผลกับผลการทดลองจากปริญญานิพนธ์นี้

7.2.5 ในการทดลองทุกครั้งได้กำหนดให้ความหนาของซีเอ็มซีเป็น 1.5 ซ.ม. การกดอัดและปาดซีเอ็มซีให้มีความหนาเท่ากัน มีผลทำให้ความหนาแน่นของซีเอ็มซีที่อบแห้งไม่เท่ากัน เพื่อศึกษาว่าความหนาแน่นของซีเอ็มซีที่อบแห้งเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองหรือไม่นั้น ควรศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้ซีเอ็มซีที่มีน้ำหนักต่างกันกดอัดให้มีความหนาเท่ากัน แล้วนำไปอบแห้งที่สภาวะการทดลองเดียวกัน นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

7.2.6 การทดลองต่อไป ควรศึกษาตัวแปรเพิ่มเติมดังนี้ คือ

ก. ความหนาของชั้นซีเอ็มซี เช่น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ซ.ม. (จาก [5] ได้แนะนำว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นวัสดุที่ต้องการอบแห้งไม่ควรเกิน 4 ซ.ม.)

ข. ศึกษาการอบแห้งที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องให้ความร้อนจากน้ำร้อน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง

ค. ศึกษาการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 460 ม.ม.ปรอท แต่อาจใช้เวลานานมากในการที่จะทำให้ความดันสัมบูรณ์ภายในห้องสุญญากาศเป็น 460 ม.ม.ปรอท เนื่องจากปั๊มสุญญากาศที่ใช้มีขนาดเล็ก ในกรณีที่ต้องการศึกษาการอบแห้งที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศมาก ๆ อาจต้องเปลี่ยนปั๊มสุญญากาศซึ่งจะมีราคาแพงขึ้นมาก อนึ่งปั๊มสุญญากาศที่ใช้อยู่นี้ไม่สามารถทนต่อไอของไอโซโพรพานอลได้ ปั๊มสุญญากาศที่สามารถทนต่อไอของไอโซโพรพานอลได้จะมีราคาแพงขึ้นอีกมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. เดชา วลีเกียรติกุล ประพันธ์ ศรีคุณ และพัฒนพงศ์ สิทธิสาร. การศึกษาผลของกำลังต่อปริมาตรที่มีผลต่อการขยายขนาดของปฏิกรณ์เคมีในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538.
2. จิราพร จยาวรรณ ไตรรงค์ ขันสาคร และเสาวณีย์ คงมาก. การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุนสำหรับกระบวนการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539.
3. มนตรี รัตนวิจิตร. ปรากฏการณ์ซีเอ็มซี (Sodium Carboxy Methyl Cellulose). TTIS TEXTILE DIGEST (พฤษภาคม 2537) : 24.
4. ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ และวันชนะ ยินสูตร. การศึกษาตัวแปรสำคัญในการขยายขนาดของปฏิกรณ์เคมีในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537.
5. เรียวโซ โทเอ. อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม. แปลโดย วิวัฒน์ ตัณฑะพาณิชกุล. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ กรุงเทพฯ, 2529.
6. Nonhebel, G., and Moss, A.A.H. Drying of Solids in the Chemical Industry. 1st ed. London : Butterworth & Co., Ltd., 1971.
7. Perry, R.H., and Green, D.W. Perry's Chemical Engineer's Handbook. 6th ed. New York : McGraw-Hill Book Company, 1985.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ผลการทดลองครั้งที่ 1

ความดันสัมบูรณ์ 660 ม.ม.ปรอท

น้ำหนักถาดเปล่า = 148.0 กรัม

น้ำหนักถาดเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = 203.9 กรัม

น้ำหนักซีเอ็มซีแห้ง = 55.9 กรัม

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	น้ำหนักถาด+ซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้น (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย (%)	อัตราการอบแห้ง (กก./ชม.ตร.ม.)
0	243.1	95.1	39.20	70.13	70.13	0
30	229.8	81.8	25.90	46.33	58.23	1.064
60	221.8	73.8	17.90	32.02	39.18	0.640
90	218.5	70.5	14.60	26.12	29.07	0.264
120	215.8	67.8	11.90	21.29	23.70	0.216
150	213.8	65.8	9.90	17.71	19.50	0.160
180	212.1	64.1	8.20	14.67	16.19	0.136
210	210.6	62.6	6.70	11.99	13.33	0.120
240	209.0	61.0	5.10	9.12	10.55	0.128
270	208.0	60.0	4.10	7.33	8.23	0.080
300	207.6	59.6	3.70	6.62	6.98	0.032
330	207.3	59.3	3.40	6.08	6.35	0.024
360	207.0	59.0	3.10	5.55	5.81	0.024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองครั้งที่ 2

ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท

น้ำหนักฉาดเปล่า = 148.0 กรัม

น้ำหนักฉาดเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = 290.1 กรัม

น้ำหนักซีเอ็มซีแห้ง = 142.1 กรัม

ตารางที่ ก.2 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	น้ำหนักฉาด+ซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้น (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย (%)	อัตราการอบแห้ง (กก./ชม.ตร.ม.)
0	342.8	194.8	52.70	37.09	37.09	0
30	336.1	188.1	46.00	32.37	34.73	0.268
60	330.5	182.5	40.40	28.43	30.40	0.224
90	326.0	178.0	35.90	25.26	26.85	0.180
120	321.2	173.2	31.10	21.89	23.57	0.192
150	317.2	169.2	27.10	19.07	20.48	0.160
180	314.0	166.0	23.90	16.82	17.95	0.128
210	311.0	163.0	20.90	14.71	15.76	0.120
240	308.7	160.7	18.60	13.09	13.90	0.092
270	306.7	158.7	16.60	11.68	12.39	0.080
300	305.3	157.3	15.20	10.70	11.19	0.056
330	303.9	155.9	13.80	9.71	10.20	0.056
360	303.3	155.3	13.20	9.29	9.50	0.024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองครั้งที่ 3

ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท

น้ำหนักถาดเปล่า = 298.7 กรัม

น้ำหนักถาดเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = 572.7 กรัม

น้ำหนักซีเอ็มซีแห้ง = 274.0 กรัม

ตารางที่ ก.3 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	น้ำหนักถาด+ซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้น (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย (%)	อัตราการอบแห้ง (กก./ชม.ตร.ม.)
0	683.0	384.3	110.30	40.26	40.26	0
30	667.3	368.6	94.60	34.53	37.39	0.314
60	659.4	360.7	86.70	31.64	33.08	0.158
90	652.5	353.8	79.80	29.12	30.38	0.138
120	646.4	347.7	73.70	26.90	28.01	0.122
150	640.3	341.6	67.60	24.67	25.78	0.122
180	635.2	336.5	62.50	22.81	23.74	0.102
210	629.2	330.5	56.50	20.62	21.72	0.120
240	623.4	324.7	50.70	18.50	19.56	0.116
270	617.5	318.8	44.80	16.35	17.43	0.118
300	613.8	315.1	41.10	15.00	15.68	0.074
330	609.6	310.9	36.90	13.47	14.23	0.084
360	606.3	307.6	33.60	12.26	12.86	0.066
390	604.1	305.4	31.40	11.46	11.86	0.044
420	602.2	303.5	29.50	10.77	11.11	0.038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองครั้งที่ 4

ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท

น้ำหนักถาดเปล่า = 689.3 กรัม

น้ำหนักถาดเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = 1536.0 กรัม

น้ำหนักซีเอ็มซีแห้ง = 846.7 กรัม

ตารางที่ ก.4 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 4

เวลา (นาที)	น้ำหนักถาด+ซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้น (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย (%)	อัตราการอบแห้ง (กก./ชม.ตร.ม.)
0	1836.5	1147.2	300.50	35.49	35.49	0
30	1797.4	1108.1	261.40	30.87	33.18	0.336
60	1776.8	1087.5	240.80	28.44	29.66	0.177
90	1767.6	1078.3	231.60	27.35	27.90	0.079
120	1760.0	1070.7	224.00	26.46	26.90	0.065
150	1752.8	1063.5	216.80	25.61	26.03	0.062
180	1745.8	1056.5	209.80	24.78	25.19	0.060
210	1739.3	1050.0	203.30	24.01	24.39	0.056
240	1731.8	1042.5	195.80	23.13	23.57	0.064
270	1725.1	1035.8	189.10	22.33	22.73	0.058
300	1718.7	1029.4	182.70	21.58	21.96	0.055
330	1713.2	1023.9	177.20	20.93	21.25	0.047
360	1710.1	1020.8	174.10	20.56	20.75	0.027
390	1708.3	1019.0	172.30	20.35	20.46	0.015
420	1706.1	1016.8	170.10	20.09	20.22	0.019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองครั้งที่ 5

ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท

น้ำหนักถาดเปล่า = 148.0 กรัม.

น้ำหนักถาดเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = 218.2 กรัม

น้ำหนักซีเอ็มซีแห้ง = 70.2 กรัม

ตารางที่ ก.5 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 5

เวลา (นาที)	น้ำหนักถาด+ซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้น (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย (%)	อัตราการอบแห้ง (กก./ชม.ตร.ม.)
0	239.5	91.5	21.30	30.34	30.34	0
30	236.3	88.3	18.10	25.78	28.06	0.256
60	233.2	85.2	15.00	21.37	23.58	0.248
90	230.5	82.5	12.30	17.52	19.44	0.216
120	228.2	80.2	10.00	14.25	15.88	0.184
150	226.5	78.5	8.30	11.82	13.03	0.136
180	225.0	77.0	6.80	9.69	10.75	0.120
210	223.8	75.8	5.60	7.98	8.83	0.096
240	223.2	75.2	5.00	7.12	7.55	0.048

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองครั้งที่ 6

ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท

น้ำหนักถาดเปล่า = 148.0 กรัม

น้ำหนักถาดเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = 212.9 กรัม

น้ำหนักซีเอ็มซีแห้ง = 64.9 กรัม

ตารางที่ ก.6 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 6

เวลา (นาที)	น้ำหนักถาด+ซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้น (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	เปอร์เซนต์ความชื้นเฉลี่ย (%)	อัตราการอบแห้ง (กก./ชม.ตร.ม.)
0	246.4	98.4	33.50	51.62	51.62	0
30	235.1	87.1	22.20	34.21	42.91	0.904
60	230.6	82.6	17.70	27.27	30.74	0.360
90	227.7	79.7	14.80	22.80	25.04	0.232
120	225.1	77.1	12.20	18.80	20.80	0.208
150	222.6	74.6	9.70	14.95	16.87	0.200
180	220.4	72.4	7.50	11.56	13.25	0.176
210	218.5	70.5	5.60	8.63	10.09	0.152
240	217.5	69.5	4.60	7.09	7.86	0.080
270	216.7	68.7	3.80	5.86	6.47	0.064
300	216.4	68.4	3.50	5.39	5.62	0.024
330	216.3	68.3	3.40	5.24	5.32	0.008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองครั้งที่ 7

ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท

น้ำหนักฉาดเปล่า = 148.0 กรัม

น้ำหนักฉาดเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = 252.9 กรัม

น้ำหนักซีเอ็มซีแห้ง = 104.9 กรัม

ตารางที่ ก.7 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 7

เวลา (นาที)	น้ำหนักฉาด+ซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้น (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย (%)	อัตราการอบแห้ง (กก./ชม.ตร.ม.)
0	315.2	167.2	62.30	59.39	59.39	0
30	297.4	149.4	44.50	42.42	50.91	0.712
60	280.9	132.9	28.00	26.69	34.56	0.660
90	272.1	124.1	19.20	18.30	22.50	0.352
120	268.6	120.6	15.70	14.97	16.63	0.140
150	265.8	117.8	12.90	12.30	13.63	0.112
180	263.3	115.3	10.40	9.91	11.11	0.100
210	261.5	113.5	8.60	8.20	9.06	0.072
240	260.3	112.3	7.40	7.05	7.63	0.048
270	259.4	111.4	6.50	6.20	6.63	0.036
300	258.6	110.6	5.70	5.43	5.82	0.032
330	258.1	110.1	5.20	4.96	5.20	0.020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองครั้งที่ 8

ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท

น้ำหนักฉาดเปล่า = 298.7 กรัม

น้ำหนักฉาดเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = 548.4 กรัม

น้ำหนักซีเอ็มซีแห้ง = 249.7 กรัม

ตารางที่ ก.8 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 8

เวลา (นาที)	น้ำหนักฉาด+ซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้น (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย (%)	อัตราการอบแห้ง (กก./ชม.ตร.ม.)
0	630.0	331.3	81.60	32.68	32.68	0
30	609.9	311.2	61.50	24.63	28.65	0.402
60	601.2	302.5	52.80	21.15	22.89	0.174
90	594.1	295.4	45.70	18.30	19.72	0.142
120	587.3	288.6	38.90	15.58	16.94	0.136
150	581.1	282.4	32.70	13.10	14.34	0.124
180	575.7	277.0	27.30	10.93	12.01	0.108
210	571.3	272.6	22.90	9.17	10.05	0.088
240	568.0	269.3	19.60	7.85	8.51	0.066
270	565.3	266.6	16.90	6.77	7.31	0.054
300	562.5	263.8	14.10	5.65	6.21	0.056
330	560.4	261.7	12.00	4.81	5.23	0.042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองครั้งที่ 9

ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท

น้ำหนักถาดเปล่า = 689.7 กรัม

น้ำหนักถาดเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = 1300.8 กรัม

น้ำหนักซีเอ็มซีแห้ง = 611.1 กรัม

ตารางที่ ก.9 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 9

เวลา (นาที)	น้ำหนักถาด+ซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้น (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย (%)	อัตราการอบแห้ง (กก./ชม.ตร.ม.)
0	1587.3	897.6	286.50	46.88	46.88	0
30	1539.2	849.5	238.40	39.01	42.95	0.413
60	1498.3	808.6	197.50	32.32	35.67	0.351
90	1474.6	784.9	173.80	28.44	30.38	0.203
120	1461.1	771.4	160.30	26.23	27.34	0.116
150	1448.3	758.6	147.50	24.14	25.18	0.110
180	1437.8	748.1	137.00	22.42	23.28	0.090
210	1428.9	739.2	128.10	20.96	21.69	0.076
240	1419.8	730.1	119.00	19.47	20.22	0.078
270	1414.5	724.8	113.70	18.61	19.04	0.045
300	1408.5	718.8	107.70	17.62	18.11	0.052
330	1404.2	714.5	103.40	16.92	17.27	0.037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองครั้งที่ 10

ความดันสัมบูรณ์ 560 ม.ม.ปรอท

น้ำหนักฉาดเปล่า = 1047.6 กรัม

น้ำหนักฉาดเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = 2257.2 กรัม

น้ำหนักซีเอ็มซีแห้ง = 1209.6 กรัม

ตารางที่ ก.10 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 10

เวลา (นาที)	น้ำหนักฉาด+ซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้น (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย (%)	อัตราการอบแห้ง (กก./ชม.ตร.ม.)
0	2591.6	1544.0	334.40	27.65	27.65	0
30	2570.6	1523.0	313.40	25.91	26.78	0.126
60	2553.2	1505.6	296.00	24.47	25.19	0.105
90	2538.4	1490.8	281.20	23.25	23.86	0.089
120	2523.6	1476.0	266.40	22.02	22.64	0.089
150	2513.1	1465.5	255.90	21.16	21.59	0.063
180	2502.0	1454.4	244.80	20.24	20.70	0.067
210	2492.3	1444.7	235.10	19.44	19.84	0.058
240	2481.2	1433.6	224.00	18.52	18.98	0.067
270	2471.6	1424.0	214.40	17.72	18.12	0.058
300	2461.9	1414.3	204.70	16.92	17.32	0.058
330	2454.4	1406.8	197.20	16.30	16.61	0.045
360	2445.9	1398.3	188.70	15.60	16.26	0.051
390	2437.5	1389.9	180.30	14.91	15.25	0.050
420	2429.0	1381.4	171.80	14.20	14.55	0.051
450	2422.6	1375.0	165.40	13.67	13.94	0.038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

การทดลองครั้งที่ 1

ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท

น้ำหนักฉาดเปล่า = 148.0 กรัม

น้ำหนักฉาดเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = 203.9 กรัม

น้ำหนักซีเอ็มซีแห้ง = 55.9 กรัม

พื้นที่การอบแห้ง = 0.025 ตร.ม.

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการทดลองและผลการคำนวณครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	น้ำหนัก ฉาด+ซีเอ็มซีเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซี เริ่มต้น (กรัม)	ความชื้น (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย (%)	อัตราการอบแห้ง (กก./ชม.ตร.ม.)
0	243.1	95.1	39.20	70.13	70.13	0
30	229.8	81.8	25.90	46.33	58.23	1.064
60	221.8	73.8	17.90	32.02	39.18	0.640
90	218.5	70.5	14.60	26.12	29.07	0.264

การคำนวณที่เวลาการอบแห้ง 30 นาที

ก. ความชื้น = 81.8-55.9

= 39.20 กรัม

ข. เปอร์เซ็นต์ความชื้น = (81.8-55.9)×100/55.9

= 70.13

ค. เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย = (70.13+46.33)/2

= 58.23

ง. อัตราการอบแห้ง = (243.1-229.8)/(1000×0.025 ×30/60)

= 1.064 กก./ชม.ตร.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

ตารางที่ ค.1 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

รายการ	ราคา (บาท)
ห้องสุญญากาศ (Vacuum chamber)	12,000
ชั้นวางสแตนเลส (Tray)	2,500
เครื่องควบแน่น (Condenser)	5,500
เครื่องทำน้ำร้อน (Heater)	16,200
ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)	6,500
เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)	1,500
ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)	28,500
ปั๊มน้ำร้อน (Hot water pump)	10,000
เกจวัดความดันสุญญากาศ (Vacuum gauge)	1,500
ระบบท่อ วาล์ว ข้อต่อ	6,000
โครงสร้างตัวเครื่อง	20,000
ระบบไฟฟ้า	8,000
ค่าดำเนินการ	25,000
รวมค่าใช้จ่าย	143,200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การประเมินค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ซีเอ็มซีและการเดินเครื่องอบแห้ง

ง.1 การประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิตซีเอ็มซี 1 ครั้ง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 24.7 ลิตร ในการผลิต 1 ครั้ง จะได้ซีเอ็มซีที่แห้งประมาณ 1.5 กก.

ก. ค่าสารเคมี

ตารางที่ ง.1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีเอ็มซีและการประเมินราคา

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้	ราคา	คิดเป็นเงิน (บาท)
เซลลูโลสชนิดผง	930 กรัม	860 บาท/กก.	780.0
เตตระเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์	11.1 กรัม	1760 บาท/กก.	19.4
ไอโซโพรพานอล	20.94 ลิตร	3570 บาท/18 ลิตร	4153.1
โซเดียมไฮดรอกไซด์	837 กรัม	120 บาท/กก.	100.4
โมโนคลอโรอะซีติก	950 กรัม	2160 บาท/กก.	2052.0
กรดอะซีติก	20 มล.	600 บาท/2.5 ลิตร	4.8
		รวม (บาท)	7109.7

ข. ค่ากระแสไฟฟ้า คิดที่ค่าไฟฟ้า 5 บาท/ กิโลวัตต์-ชม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีเอ็มซีและการประเมินราคา

อุปกรณ์	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	เวลาที่ใช้ (ชม.)	คิดเป็นเงิน (บาท)
มอเตอร์ใบกวน	1.5	3.0	22.5
เครื่องทำน้ำร้อน	2.0	3.0	30.0
		รวม (บาท)	52.5

ง.2 การประเมินค่าใช้จ่ายโดยประมาณในการเดินเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้นี้คิดจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งซีเอ็มซีจนได้ซีเอ็มซีที่มีความชื้นน้อยกว่า 8 % ส่วนการอบแห้งที่ใช้เวลาในการอบแห้งนานมาก ๆ และความชื้นของซีเอ็มซีเกินกว่า 8 % จะไม่นำมาคิดเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย

ตารางที่ ง.3 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้และการประเมินค่าใช้จ่ายในการอบแห้งแบบสุญญากาศ

การทดลองครั้งที่	ปริมาณการอบแห้ง (กรัม)	เวลาในการใช้ไฟฟ้า (นาที)				คิดเป็นเงิน (บาท)
		ปั๊มสุญญากาศ (0.01 กิโลวัตต์)	ปั๊มน้ำร้อน (0.6 กิโลวัตต์)	เครื่องควบแน่น (2.0 กิโลวัตต์)	เครื่องทำน้ำร้อน (3.0 กิโลวัตต์)	
1	55.9	270	75	270	50	61.48
2	142.1	-	-	-	-	-
3	274.0	-	-	-	-	-
4	846.7	-	-	-	-	-
5	70.2	240	75	240	50	56.45
6	64.9	240	75	240	50	56.45
7	104.9	240	80	240	50	56.70
8	249.7	240	90	240	50	57.20
9	611.1	-	-	-	-	-
10	1209.6	-	-	-	-	-

การทดลองทุกครั้งทำที่อุณหภูมิ 45 ^{0}ซ และความหนาของชั้นซีเอ็มซี 1.5 ซ.ม. โดย

การทดลองครั้งที่ 1 ถึง 4 ทดลองที่ความดันสัมบรูณ์ 660 ม.ม.ปรอท

การทดลองครั้งที่ 5 ถึง 10 ทดลองที่ ความดันสัมบรูณ์ 560 ม.ม.ปรอท

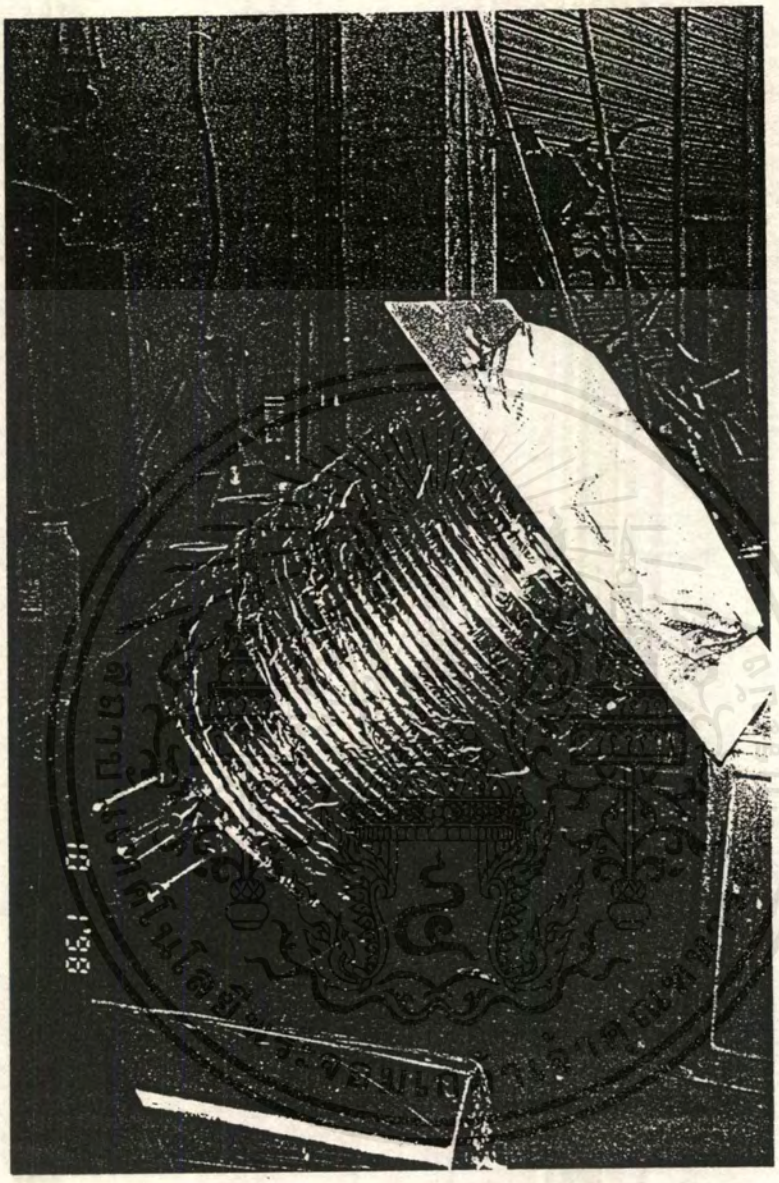
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

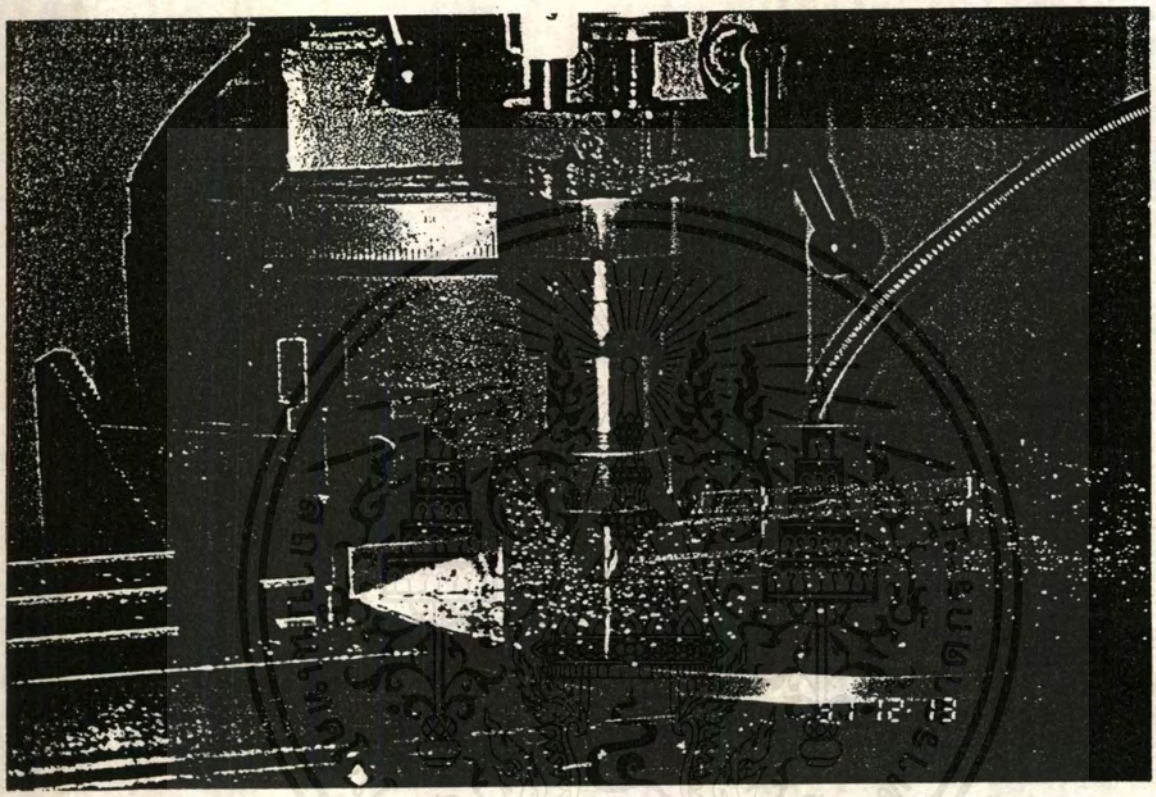
รูปที่ จ.1 แสดงภาพห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



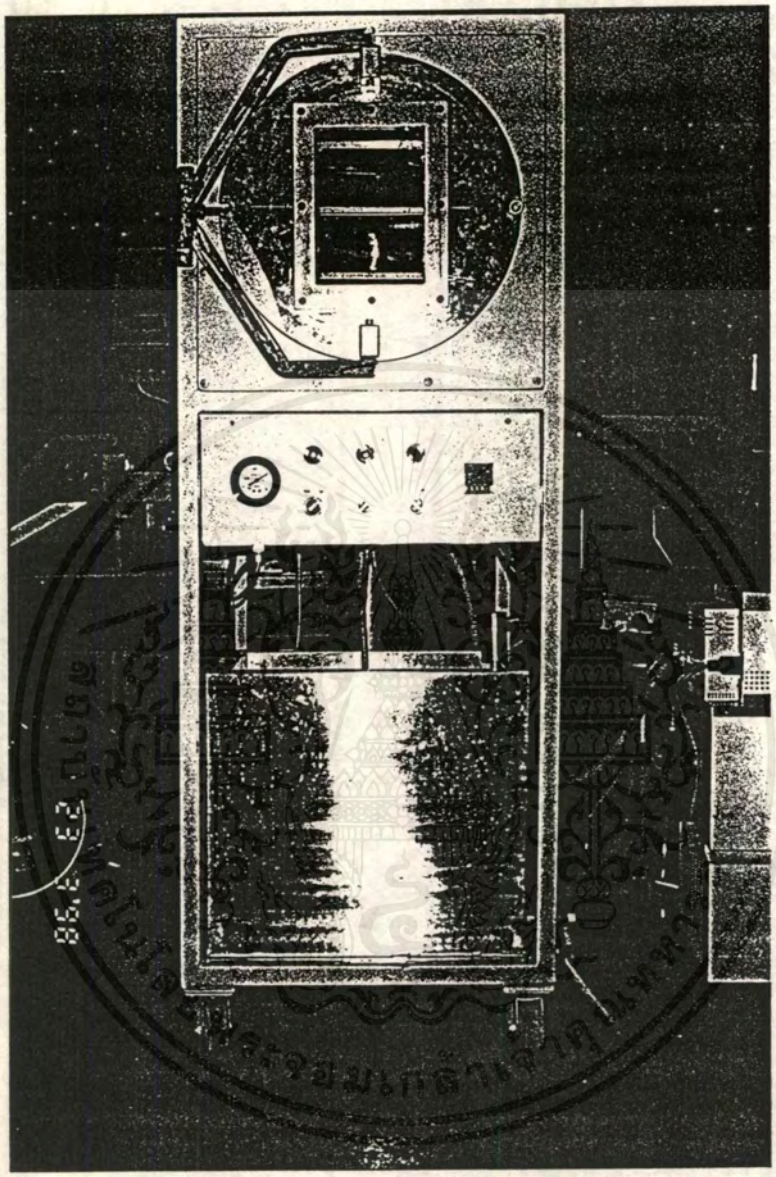
รูปที่ จ.2 แสดงภาพการพันท่อทองแดงรอบห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



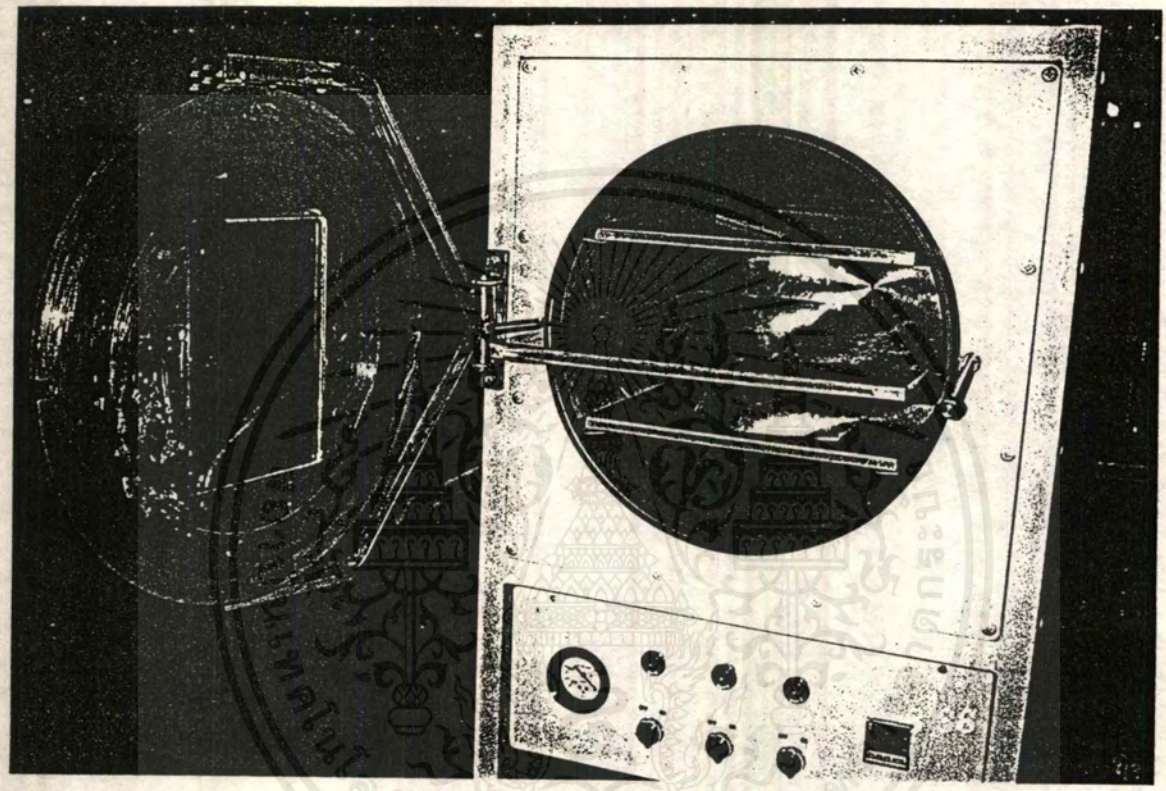
รูปที่ จ.3 แสดงภาพการตัดช่องใส่แผ่นอะคริลิกชนิดใสบนฝาปิดห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



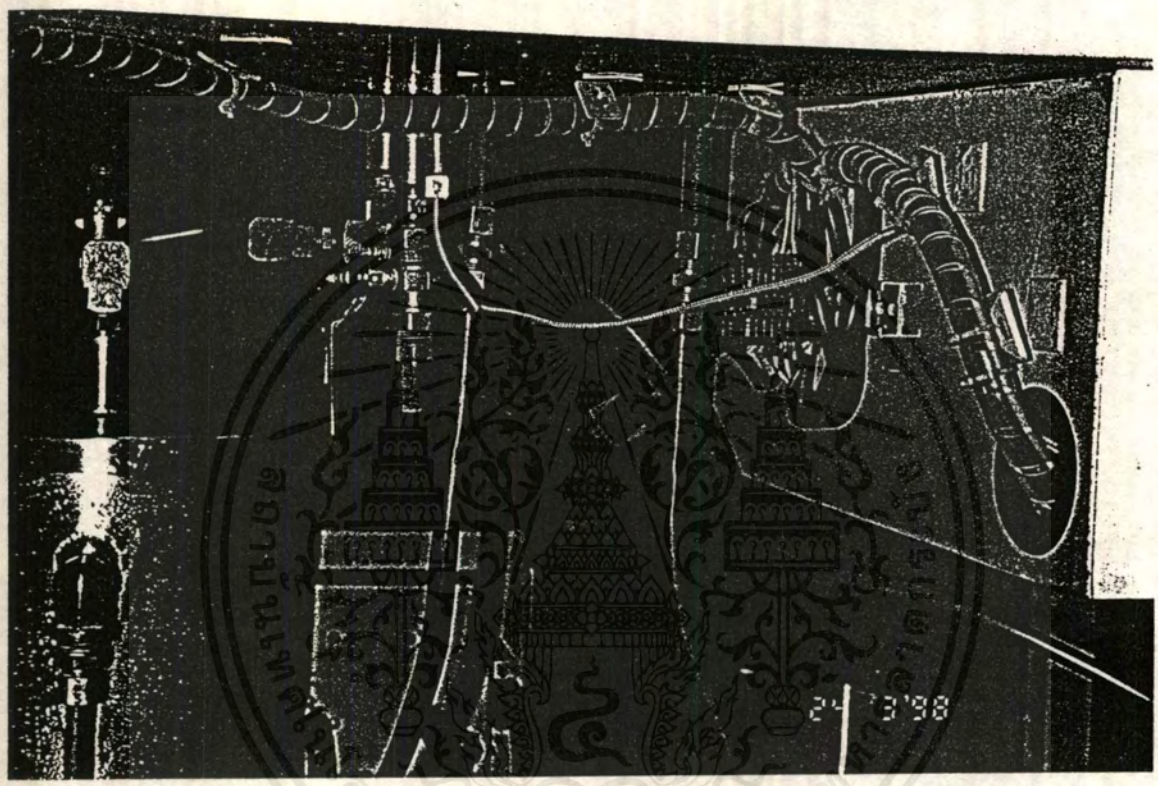
รูปที่ จ.4 แสดงภาพเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



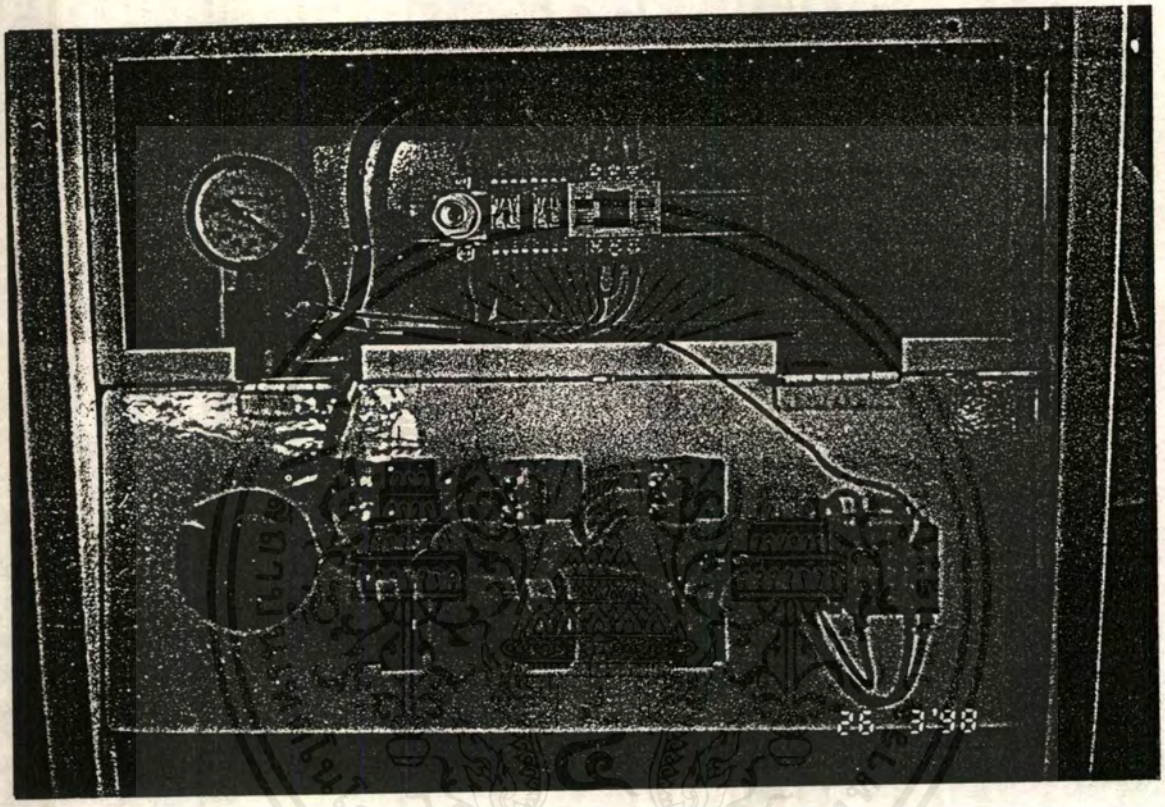
รูปที่ จ.5 แสดงภาพชั้นวางของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.6 แสดงภาพระบบท่อและวาล์วปรับความดันของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

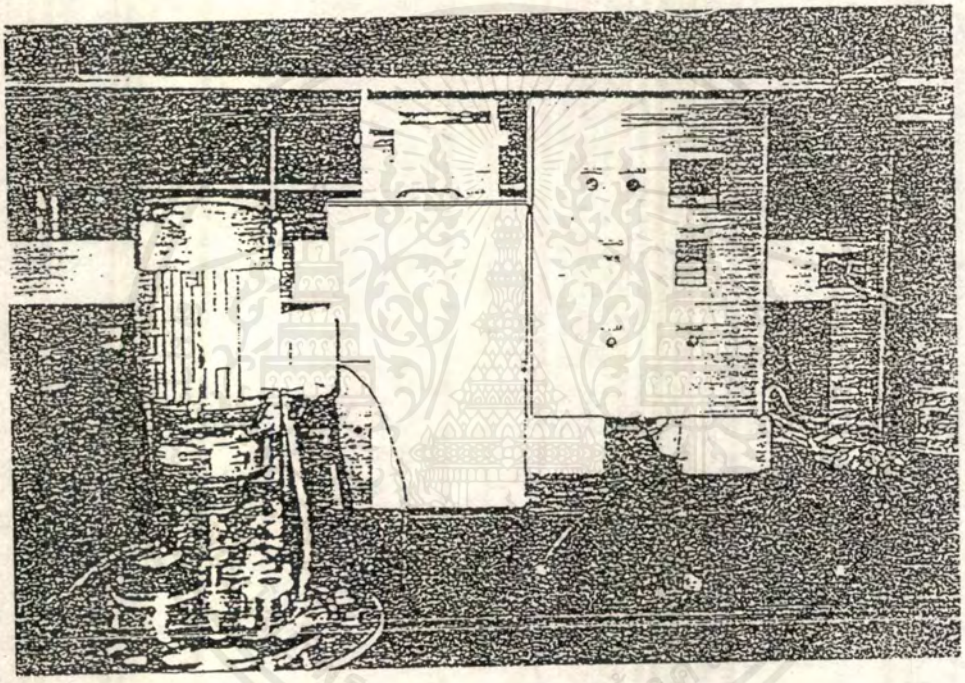


รูปที่ จ.7 แสดงภาพเกจวัดความดันสุญญากาศและวงจรไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

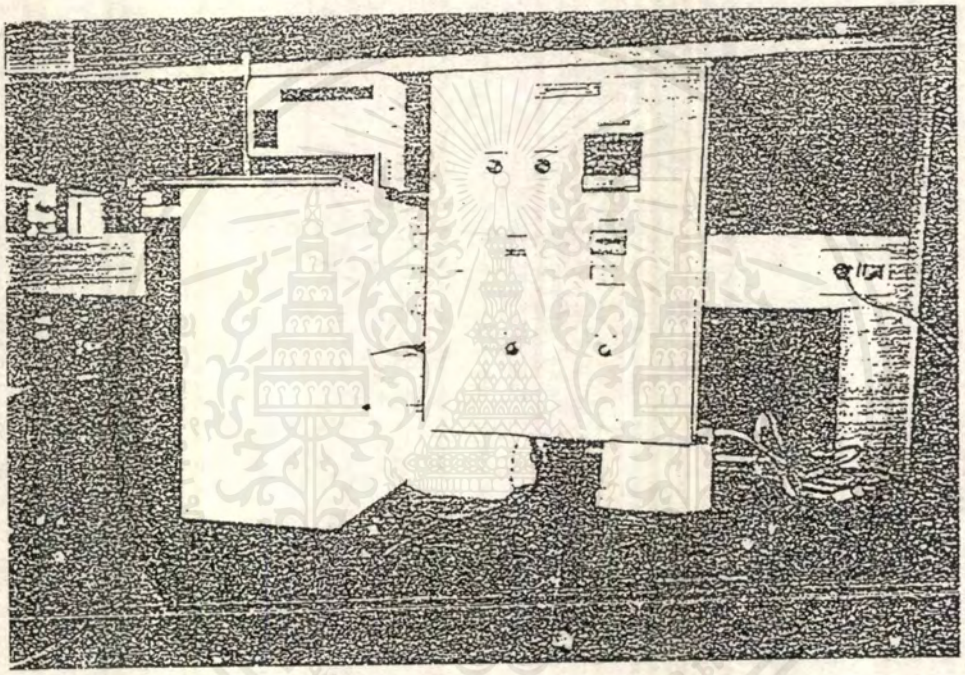
ภาคผนวก ฉ

เครื่องปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร และอุปกรณ์ประกอบ



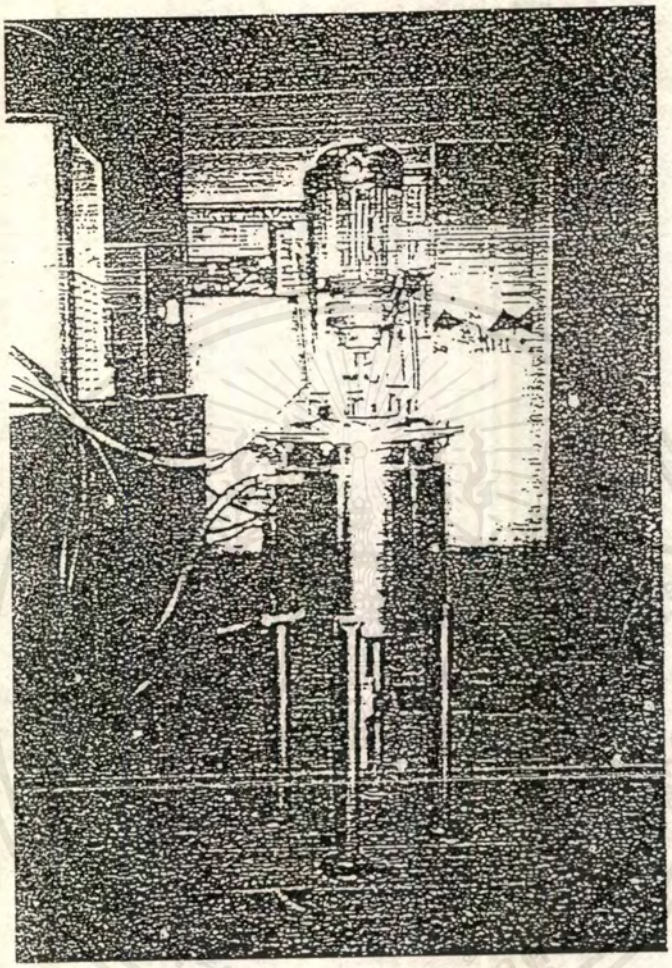
รูปที่ ฉ.1 แสดงภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีเอ็มซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



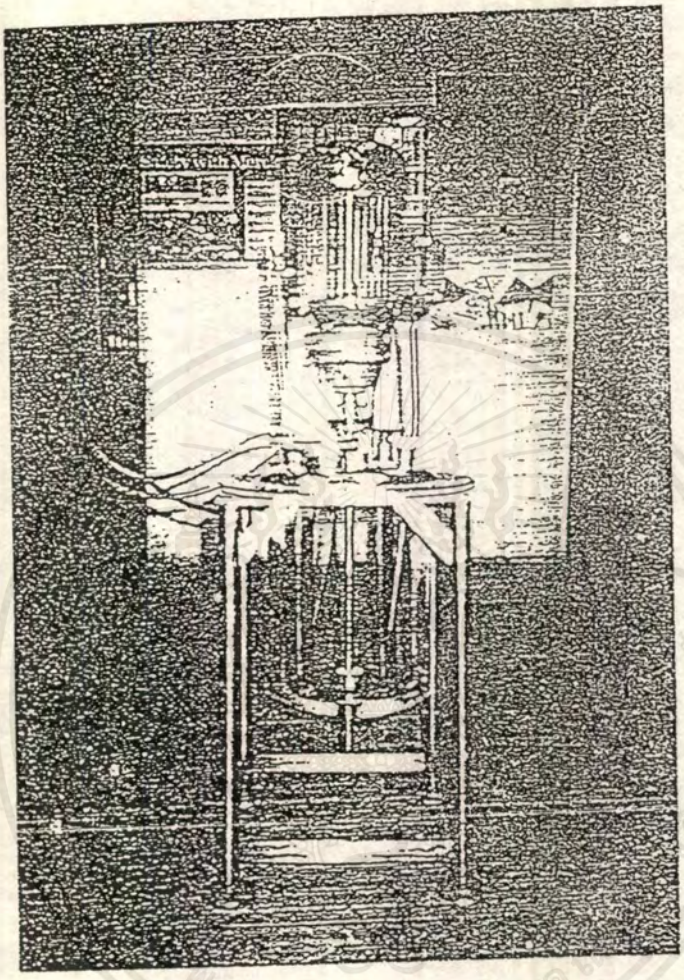
รูปที่ ฉ.2 แสดงภาพตู้ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์
และมอเตอร์ในการปั่นกวน (ขวา) และ
ภาพเครื่องทำน้ำร้อนและน้ำเย็นสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมี (ซ้าย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.3 แสดงภาพเครื่องปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร พร้อมมอเตอร์กระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

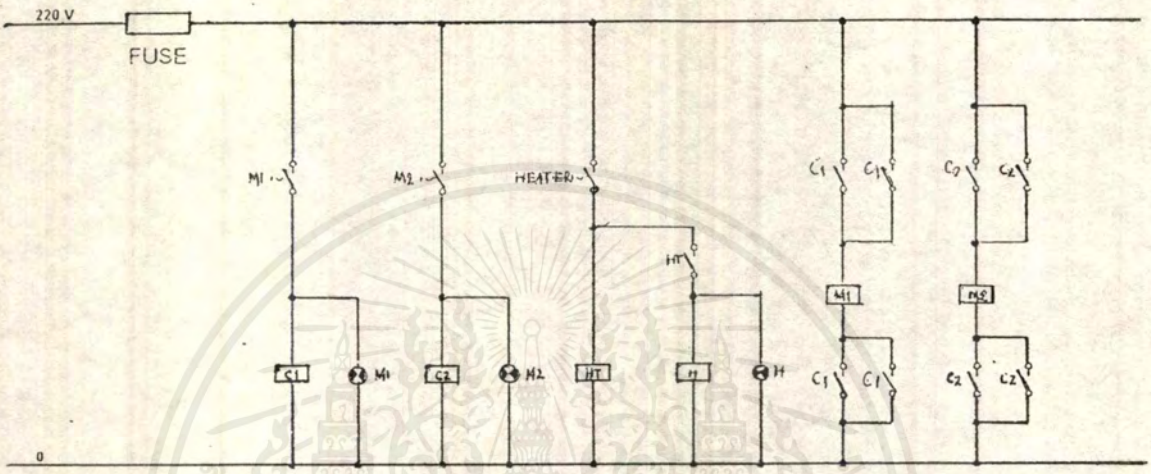


รูปที่ ฉ.4 แสดงภาพฝาถัง ครีบ ใบพัด มอเตอร์ และขาตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช

แผนผังวงจรไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ



รูปที่ ช.1 วงจรไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

M1 : สวิทช์ปิด-เปิดปั๊มสุญญากาศ

M2 : สวิทช์ปิด-เปิดปั๊มน้ำร้อน

HT : สวิทช์ปิด-เปิดเครื่องทำความร้อน

C1 : สวิทช์ปิด-เปิด

C2 : สวิทช์ปิด-เปิด

C1 C2 H HT M1 M2 : สวิทช์แม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic switch)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้