บทที่ 3
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองขั้นต้นโดยใช้เครื่องมือทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็ง (รูปที่ 2.1 แบบที่ 1) ของบริษัท Virtis model Unitrap 10-100 เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบเครื่องทำแห้งที่ต้องการต่อไป

3.1 การศึกษาการแห้งตัวของน้ำชาและน้ำมะตูม

จากการติดตามน้ำหนักของตัวอย่างที่ถูกทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งที่เวลาต่าง ๆ กัน ระหว่าง 0 ถึง 7 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างบรรจุในขวดรูปกรวย 10 ขวด ๆ ละ 10 ml หรือ 20 ml ได้ผลดังกราฟรูป 3.1 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างอัตราส่วนของน้ำหนักสารตัวอย่าง (M_t) ที่เวลา t ชั่วโมงต่อน้ำหนักตั้งต้น (M_0) เทียบกับเวลาในการทำแห้ง (t)

กราฟที่ได้มีลักษณะคล้ายกันคือ มวลลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับเวลาทำแห้งและค่อย ๆ เข้าสู่ค่าคงที่เมื่อเวลาในการทำแห้งมากขึ้นในลักษณะของ exponential curve การทดลองทั้ง 4 ชุดนี้มีความคลาดเคลื่อนหลักที่การทำให้สารตัวอย่างแข็งตัวเนื่องจากภาชนะบรรจุเป็นรูปกรวยและในระหว่างการแช่แข็งอย่างรวดเร็วด้วยไนโตรเจนเหลวซึ่งต้องทำการหมุนภาชนะบรรจุไปรอบ ๆ เพื่อให้สารตัวอย่างเกิดการแผ่กระจายเป็นฟิล์มบาง ๆ จึงอาจเป็นเหตุทำให้พื้นที่ผิวของสารตัวอย่างที่เกิดการแข็งตัวต่างกันไปในแต่ละขวดและในแต่ละชุดของการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่ากราฟมีลักษณะเกือบซ้อนทับกันโดยไม่ขึ้นกับปริมาณของสารตั้งต้น แต่เส้นกราฟของน้ำมะตูมนั้นพบว่าน้ำหนักลดลงเร็วกว่ากราฟของน้ำชา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ลักษณะของข้อมูลที่มีการกระจายอันอาจเนื่องจากวิธีการทดลองที่ใช้นั้นเองจึงนำข้อมูลระหว่าง M_t/M_o กับ t ไปทำ regression analysis ในรูปของสมการคณิตศาสตร์

$$\frac{M_t}{M_o} = Ae^{Bt} \qquad \text{.....(3.1)}$$

ซึ่งได้ผลดังแสดงในตาราง 3.1 และหาอัตราการแห้งจากสมการ

$$R = \frac{-dM_t}{dt}$$

$$= \frac{-dM_o Ae^{Bt}}{dt}$$

$$R = -M_o ABe^{Bt} \qquad \text{.....(3.2)}$$

ในที่นี้ M_o ใช้ค่าน้ำหนักตั้งต้นเฉลี่ยของการทดลองแต่ละชุดผลที่ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 3.2 ถึง 3.5 สำหรับการทดลองทั้ง 4 ชุด และผลที่ได้นำไป plot graph ระหว่างอัตราการแห้ง (R) เทียบกับปริมาณความชื้น (W) ซึ่ง

$$W = \frac{M_t - M_\infty}{M_\infty}$$

เมื่อ M_∞ = มวลสารแห้งสนิท (นั่นคือความชื้น = 0) ซึ่งหาได้โดยวิธีการในหัวข้อที่ 2.4 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

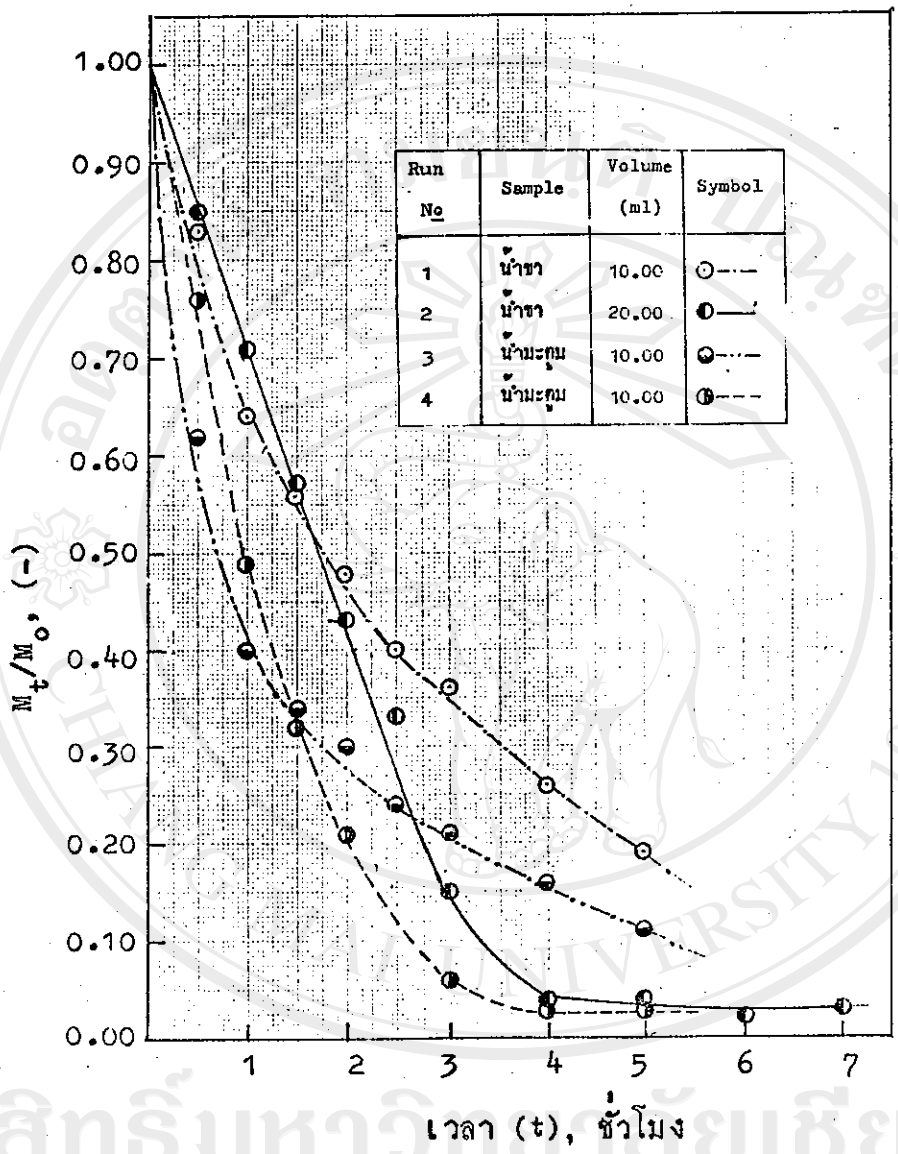
ตาราง 3.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง M_t/M_o เทียบกับ t โดย regression analysis*

สมการ $M_t/M_o = Ae^{Bt}$

การทดลองชุดที่	สารตัวอย่าง	ปริมาตรตั้งต้น (ml)	A	B	r
1	น้ำชา	10.00	1.3383	-0.5175	-0.9491
2	น้ำชา	20.00	1.1914	-0.6314	-0.9558
3	น้ำมะตูม	10.00	0.5524	-0.2973	-0.9836
4	น้ำมะตูม	10.00	1.3615	-0.8506	-0.9619

* ดูภาคผนวก ข.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.1 แสดงการลดลงของน้ำหนักสารตัวอย่างเทียบกับเวลาในระหว่างการทำน้ำชาและน้ำมะตูมให้แห้งภายใต้ภาวะแช่แข็ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.2 ผลการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งโดยใช้น้ำชาตั้งต้น 10.00 ml

การทดลองที่ 1 ปริมาตรน้ำชา 10.00 ml

มวลของชาแห้งสนิท (M_∞) = 0.31 gm

ร้อยละของของแข็งในน้ำชาตัวอย่าง (% TS) = 3.10

ภาวะเครื่องทำแห้ง - ความดัน 100 mtorr

- อุณหภูมิของเครื่องควบแน่น -40°C

เวลา (ชม.)	น.น.เริ่มต้น (M_o) (gm)	$\frac{M_t}{M_o}$	R (กรัม/ชม.)	W (กรัม/กรัม)
0.5	9.98	0.83	4.40	28.67
1.0	10.03	0.64	3.50	22.76
1.5	10.02	0.56	2.80	18.49
2.0	10.03	0.48	2.20	15.93
2.5	10.02	0.40	1.80	13.18
3.0	10.02	0.36	1.40	11.31
4.0	9.98	0.26	0.90	9.13
5.0	10.00	0.19	0.60	6.34
7.0	9.99	0.03	0.20	0.03
ค่าเฉลี่ย	10.01			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.3 ผลการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งโดยใช้น้ำชาตั้งต้น 20.00 ml

การทดลองที่ 2 ปริมาตรน้ำชา 20.00 ml

มวลของชาแห้งสนิท (M_∞) = 0.48 gm

ร้อยละของของแข็งในน้ำชาตัวอย่าง (% TS) = 2.40

ภาวะเครื่องทำแห้ง- ความดัน 100 m torr

- อุณหภูมิของเครื่องควบแน่น -40°C

เวลา (ชม.)	น.น. เริ่มต้น M_o (gm)	$\frac{M_t}{M_o}$	R (กรัม/ชม.)	W (กรัม/กรัม)
0.5	19.98	0.85	10.99	36.54
1.0	19.98	0.71	7.99	30.96
1.5	19.98	0.57	5.80	25.45
2.0	19.97	0.43	4.20	19.52
2.5	19.99	0.33	3.20	14.61
3.0	19.92	0.15	2.20	8.82
4.0	20.00	0.04	1.20	2.80
5.0	20.00	0.04	0.60	0.59
6.0	20.03	0.02	0.40	0.33
7.0	20.05	0.03	0.18	0.09
ค่าเฉลี่ย	19.99			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.4 ผลการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งโดยใช้น้ำมะตูมตั้งต้น 10.00 ml

การทดลองที่ 3 ปริมาตรน้ำมะตูม 10.00 ml

มวลของมะตูมแห้งสนิท (M_∞) = 0.49 gm

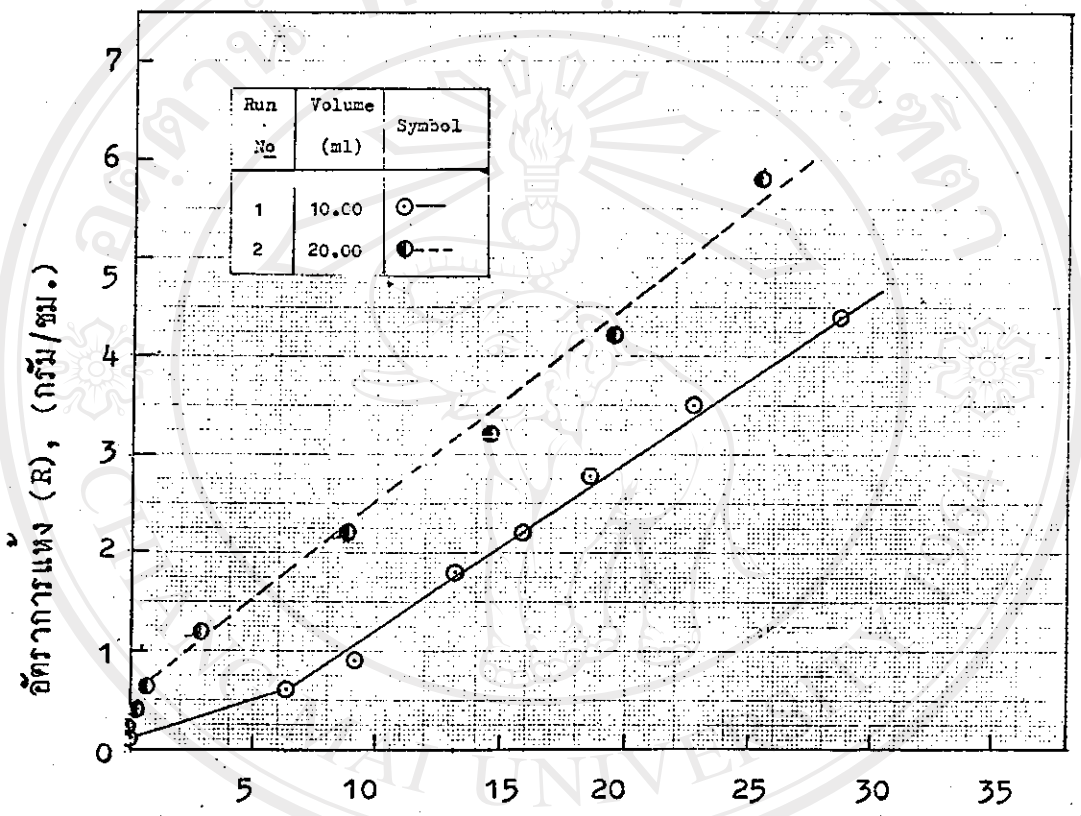
ร้อยละของของแข็งในน้ำมะตูมตัวอย่าง (% TS) = 2.45

ภาวะเครื่องทำแห้ง - ความดัน 100 m torr

- อุณหภูมิเครื่องควบแน่น -40°C

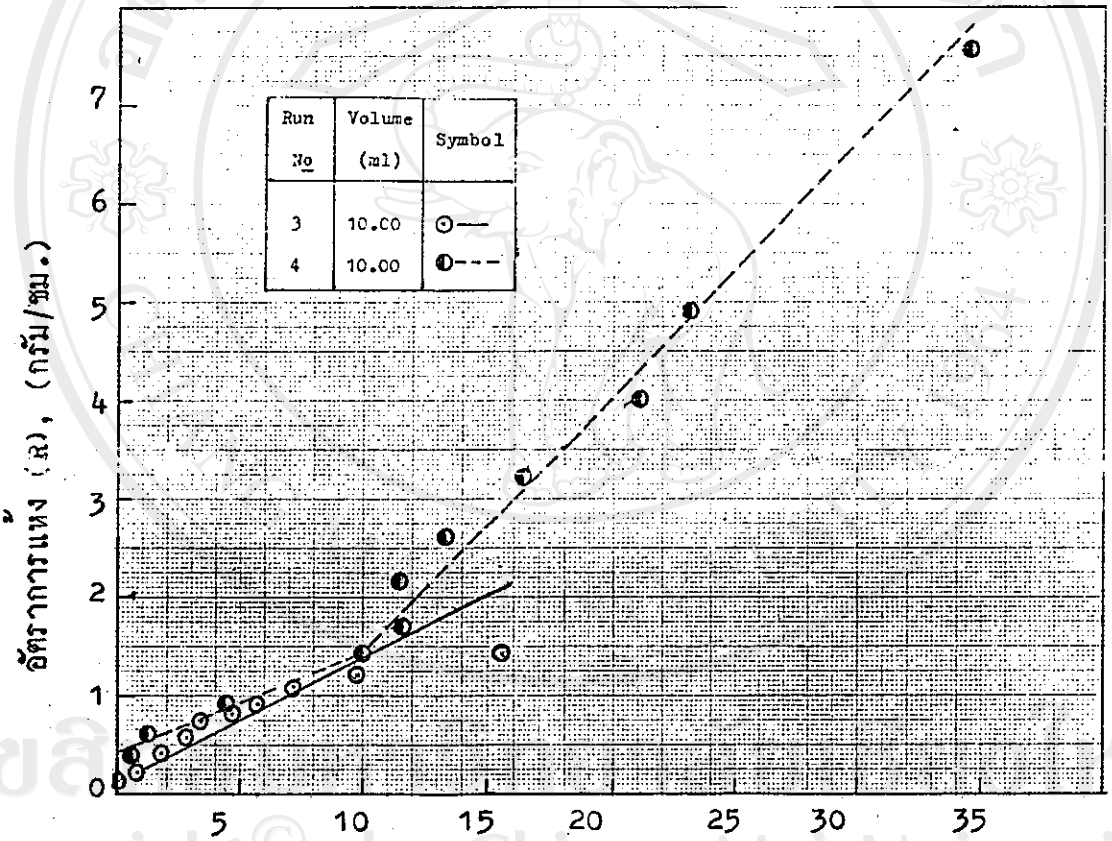
เวลา (ชม.)	น.น.เริ่มต้น M_o (gm)	$\frac{M_t}{M_o}$	R (กรัม/ชม.)	W (กรัม/กรัม)
0.5	10.09	0.62	1.43	15.44
1.0	10.09	0.40	1.21	9.84
1.5	10.08	0.34	1.11	7.13
2.0	10.08	0.30	0.91	5.72
2.5	10.12	0.24	0.81	4.77
3.0	10.14	0.21	0.71	3.49
4.0	10.12	0.16	0.51	2.67
5.0	10.09	0.11	0.40	1.84
8.0	10.13	0.06	0.20	0.79
ค่าเฉลี่ย	10.10			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งกับปริมาณความชื้นของน้ำชา ในการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งกับปริมาณความชื้นของน้ำมะตูม ในการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.5 ผลการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งโดยใช้น้ำมะตูมตั้งต้น 10.00 ml
การทดลองที่ 4 ปริมาตรน้ำมะตูม 10.00 ml
มวลของมะตูมแห้งสนิท (M_∞) = 0.25 gm
ร้อยละของของแข็งในน้ำมะตูมตัวอย่าง (% TS) = 2.52
ภาวะเครื่องทำแห้ง - ความดัน 100 m torr
- อุณหภูมิเครื่องควบแน่น -40°C

เวลา (ชม.)	น.น.เริ่มต้น M_o (gm)	$\frac{M_t}{M_o}$	R กรัม/ชม.	W กรัม/กรัม
0.50	9.98	0.78	7.56	34.50
0.75	9.98	0.61	6.09	26.37
1.00	9.98	0.56	4.90	23.12
1.25	10.03	0.53	4.00	21.15
1.50	9.99	0.39	3.20	16.32
1.75	10.00	0.35	2.60	13.35
2.00	9.99	0.28	2.10	11.45
2.25	9.98	0.35	1.70	11.58
2.50	10.01	0.21	1.40	10.05
3.00	9.98	0.06	0.90	4.35
3.50	9.98	0.05	0.60	1.23
4.00	9.95	0.03	0.40	0.54
5.00	9.98	0.03	0.20	0.08
ค่าเฉลี่ย	9.99			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

โดยทั่วไปการแห้งตัวของสารชื้นภายใต้การทำแห้งคงที่นั้นจะให้กราฟอัตราการแห้ง (drying rate curve) คือกราฟที่พลอตระหว่าง R กับ W ที่ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

- ส่วนแรกเรียกว่า ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (constant rate period) ซึ่งจะปรากฏในระยะเริ่มต้นของการแห้งตัวโดยมีลักษณะเฉพาะตัวคือ อัตราการแห้งมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับ W นั่นคือ การระเหยเป็นไอของความชื้นในสารเกิดขึ้นเสมือนกับว่าไม่มีของแข็งอยู่เลย อัตราการแห้งจึงไม่ได้รับอิทธิพลจากลักษณะของของแข็งแต่อย่างใด และ

- ส่วนหลังเรียกว่า ช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling rate period) ซึ่งอัตราการแห้งจะลดลงเป็นสัดส่วนกับความชื้น (W) ที่สารมีอยู่ในขณะนั้น ในช่วงนี้การระเหยเป็นไอของความชื้นจะได้รับอิทธิพล จากลักษณะของของแข็งโดยอัตราการแห้ง (R) อาจลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการลดลงของ W คือ

$$R = aW + b$$

และ/หรือ อาจลดลงเป็นสัดส่วนกับการลดลงของ W ในลักษณะของ power law ซึ่งอาจแทนได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์

$$R = b'W^{a'}$$

จากการพิจารณารูปที่ 3.2 และ 3.3 จะเห็นว่า อัตราการแห้งตัวของสารตัวอย่างภายใต้ภาวะแห่งนี้จะมีลักษณะลดลงตามการลดลงของความชื้น (W) ที่สารมีอยู่ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้แสดงว่าลักษณะทางกายภาพของสารตัวอย่างมีอิทธิพลต่ออัตราการแห้งตัวของสาร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ดังนั้น ขั้นตอนการแช่แข็งจึงน่าจะมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการทำแห้งแบบนี้

ข้อสรุปที่เห็นได้ชัดเจนจากการที่กราฟของการทดลองที่ 1 และ 4 ซึ่งมีจุดเปลี่ยนความชันของกราฟที่

$$7 < W < 10 \qquad \frac{\text{gm ความชื้น}}{\text{gm สารแห้งสนิท}}$$

เมื่อเทียบกับกราฟของการทดลองที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นกราฟเส้นตรงที่มีความชันเพียงค่าเดียว การที่กราฟเปลี่ยนความชันนี้แสดงว่ากลไกการแห้งตัวคือ การระเหิดของน้ำและการแยกไอน้ำออกจากสารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงไป[20] ทั้งนี้อาจเนื่องจากการแช่แข็งสารตัวอย่างซึ่งใช้วิธีผ่านไนโตรเจนเหลวลงไปในสารละลายสารตัวอย่างพร้อมกับหมุนภาชนะไปช้า ๆ เพื่อให้สารตัวอย่างแผ่กระจายเป็นชั้นของแข็งที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีพื้นที่ผิวมากนั้นอาจทำได้ต่างกันทำให้ผลการทดลองต่างกันไป อย่างไรก็ตามอาจแก้ไขได้โดยการใช้ภาชนะบรรจุสารตัวอย่างเป็นถาดและผ่านไนโตรเจนเหลวลงไปบนสารละลายตัวอย่างโดยไม่มีการแกว่งหรือเขย่าเลย ซึ่งน่าจะทำให้ได้สารตัวอย่างแข็งที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีพื้นที่ผิวคงที่ในทุก ๆ การทดลอง ถ้าใช้ปริมาณของสารละลายตัวอย่างมากพอที่จะคลุมพื้นที่หน้าตัดของถาดได้หมด

โดยทั่วไปการลดลงของอัตราการแห้ง (R) ที่เป็นสมการเชิงเส้นกับความชื้น (W) ในทุกช่วงของ W นั้นเป็นลักษณะการแห้งตัวของสารที่มีความพรุน (porous solid)[20] ดังนั้นการแห้งตัวของสารตัวอย่างภายใต้ภาวะแช่แข็งนี้จึงอาจกล่าวได้ว่าจะทำให้สารแห้งที่ได้มีความพรุนลักษณะดังกล่าวของสารแห้งนี้จะมีประโยชน์ในการละลายของสารแห้งเมื่อเติมน้ำลงไป แต่เมื่อพิจารณาสารแห้งที่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ได้เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่ามีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ นั่นคือ รูพรุนจะมีขนาดเล็ก และในระหว่างการแห้งตัวจะมีการหดตัวของสารตัวอย่าง ลักษณะดังกล่าวนี้มักจะปรากฏเสมอในการทำให้อาหารแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็ง(2)

การที่สารแห้งมีรูพรุนขนาดเล็กนี้ทำให้ต้องใช้เวลาในการเติมน้ำเพื่อให้สารแห้งคืนสภาพเดิมในภายหลัง ปกติจะสามารถแก้ไขได้โดยการใช้ความร้อนที่พอเพียงสำหรับการระเหิดของน้ำแข็งแก่สารตัวอย่างในระหว่างการทำแห้ง(2)

จากผลการทดลองขั้นต้นนี้สรุปได้ว่า

1. การทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งของน้ำชาและน้ำมะตูมภายใต้ภาวะการทำแห้งที่ความดัน 100 m.torr อุณหภูมิเครื่องควบแน่น -40°C ต้องใช้เวลาไม่น้อยกว่า 5 ชั่วโมง

2. วิธีการที่ใช้ในการแช่แข็งสารตัวอย่างมีผลต่อลักษณะของสารแข็งซึ่งจะมีอิทธิพลต่ออัตราการแห้งตัวของสารตัวอย่างด้วย

3. สารแห้งที่ได้น่าจะเป็นสารแห้งที่มีความพรุน และ

4. ต้องมีการให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างในระหว่างการทำแห้งเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความพรุนขนาดใหญ่ซึ่งนอกจากจะทำให้สะดวกต่อการทำกลับเป็นสารละลายดังเดิมแล้วยังทำให้ปริมาตรต่อหน่วยมวลของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น

3.2 <u>การทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งแบบถาด</u> (tray freeze dryer)

จากผลการทดลองในหัวข้อ 3.1 ทำให้เกิดแนวความคิดที่จะทดลองการทำแห้งโดยใช้ภาชนะบรรจุสารแบบถาดซึ่งจะทำให้พื้นที่สารตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภายใต้ภาวะแช่แข็งมีค่าค่อนข้างคงที่ในทุก ๆ การทดลองและใกล้เคียงกับภาวะที่ต้องการตามประสงค์ในการสร้างเครื่องมือทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งแบบถาดต่อไป นอกจากนี้เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะพรุนมากเพื่อจุดมุ่งหมายในการละลายกลับให้เป็นสารละลายดังเดิม ในโอกาสต่อไปหรือในการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้จัดหาเครื่องอบที่ความดันต่ำ (Vacuum oven) มาต่อเข้ากับเครื่องทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งของ VIRTIS โดยใช้สายยางต่อพ่วงกับท่อของเตาอบสำหรับต่อกับปั๊มสูญญากาศกับ manifold ของเครื่องทำแห้ง VIRTIS (รูปที่ 2.1 แบบที่ 2)

3.2.1 การศึกษาอัตราการแห้งในเครื่องทำแห้งแบบถาด

ในการทดลองนี้ได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงมวลของสารที่ถูกทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งโดยการนำถาดบรรจุสารขนาด 12 x 25 ซม. ออกจากห้องทำแห้ง (drying chamber) โดยการปิดก๊อกที่ manifold เพื่อตัดแยกห้องทำแห้งจากตัวเครื่องทำแห้ง จากนั้นเปิดก๊อก (Vacuum release valve) บนห้องทำแห้งเพื่อปรับความดันภายในห้องทำแห้งให้เป็นความดันบรรยากาศก่อนนำถาดออกจากห้องทำแห้งเมื่อชั่งน้ำหนักแล้วจึงนำกลับไปใส่ในห้องทำแห้งและดำเนินการทดลองต่อ

ผลการทดลองกับน้ำซาปริมาตร 30.00ml และ50.00ml และน้ำมะตูมปริมาตร 30.00ml ได้รวบรวมไว้ในตาราง 3.6 ถึง 3.8 ตามลำดับ และกราฟระหว่าง M_t/M_o เทียบกับเวลาแสดงด้วยรูป 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับเวลาในการทำแห้งแทนได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์ดังรวบรวมไว้ในตารางที่ 3.9

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 3.1 กราฟของอัตราการแห้ง (drying rate curve) ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง R กับ W แสดงได้ด้วยรูป 3.5

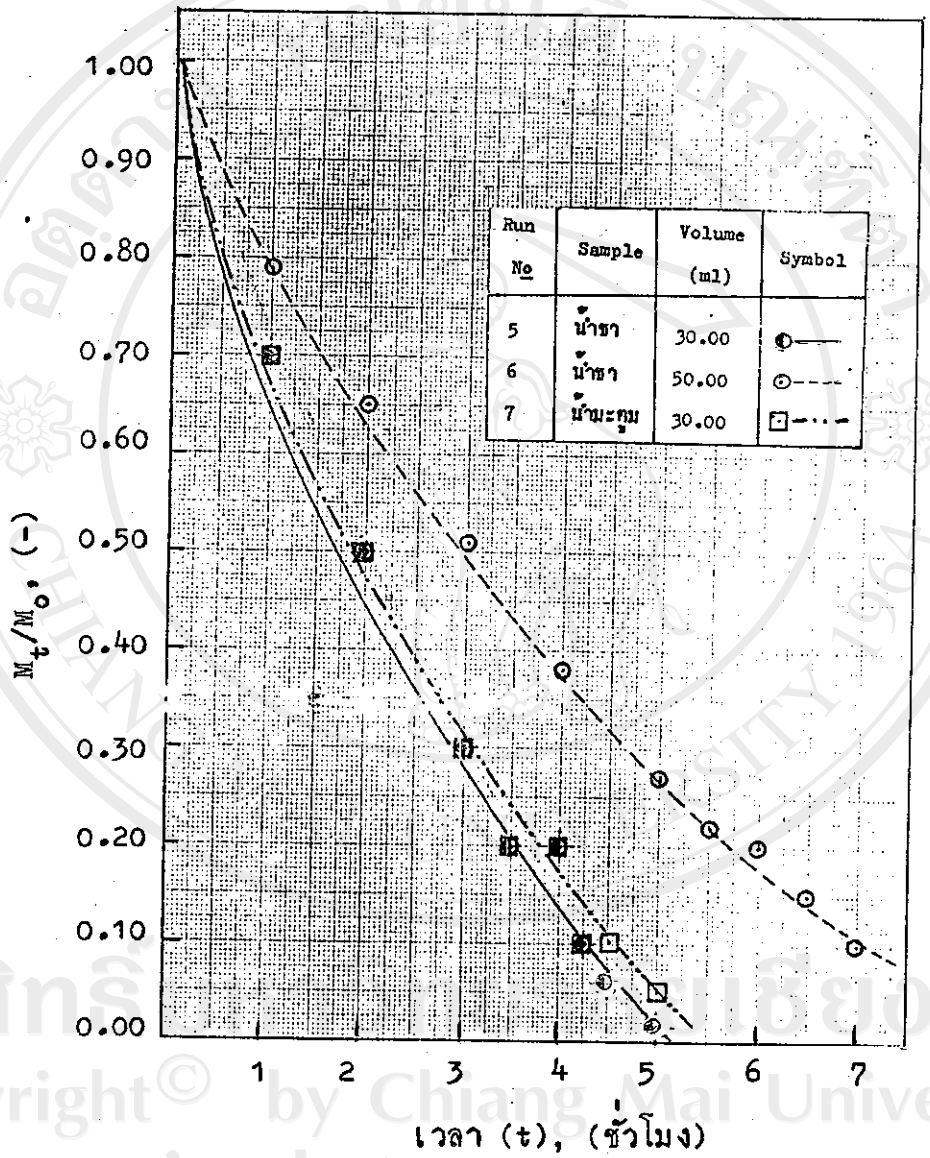
การทำแห้งโดยสารแข็งมีลักษณะแผ่นแบนนี้พบว่ามวลของสารที่เกิดการระเหิดลดลงช้ากว่ากรณีที่บรรจุสารในขวดรูปกรวย แต่ลักษณะการลดนั้นจะลดลงอย่างสม่ำเสมอซึ่งต่างไปจากการทดลองที่ผ่านมาที่มวลลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการทำแห้งและค่อย ๆ เข้าสู่ค่าคงที่เมื่อเวลาในการทำแห้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ต่างไปจากที่คาดการณ์ไว้คือ พื้นที่ผิวของของแข็งที่เกิดการระเหิดมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการแห้งจึงควรมีค่าสูงและเวลาในการทำให้แห้งควรจะสั้นกว่าเดิมแต่จากกราฟระหว่าง M_t/M_∞ เทียบกับเวลา (t) นั้น อัตราการลดของมวลหรืออัตราการระเหิดของน้ำมีค่าน้อยในช่วงเวลาทำแห้ง 1-4 ชั่วโมง จึงเป็นผลให้สารตัวอย่างมีความชื้นคงเหลือเมื่อสิ้นสุดการทดลองใกล้เคียงกับการทำแห้งในภาชนะรูปกรวย

อนึ่ง จะเห็นว่ากราฟระหว่าง R กับ W นั้นมีเฉพาะช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling rate period) เช่นเดิม แต่ลักษณะกราฟที่ได้เป็นกราฟเส้นโค้ง นั่นคือ อัตราการแห้ง (R) กับความชื้นของสารตัวอย่าง (W) แทนได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์คือ

$$R = B'W^{a'}$$

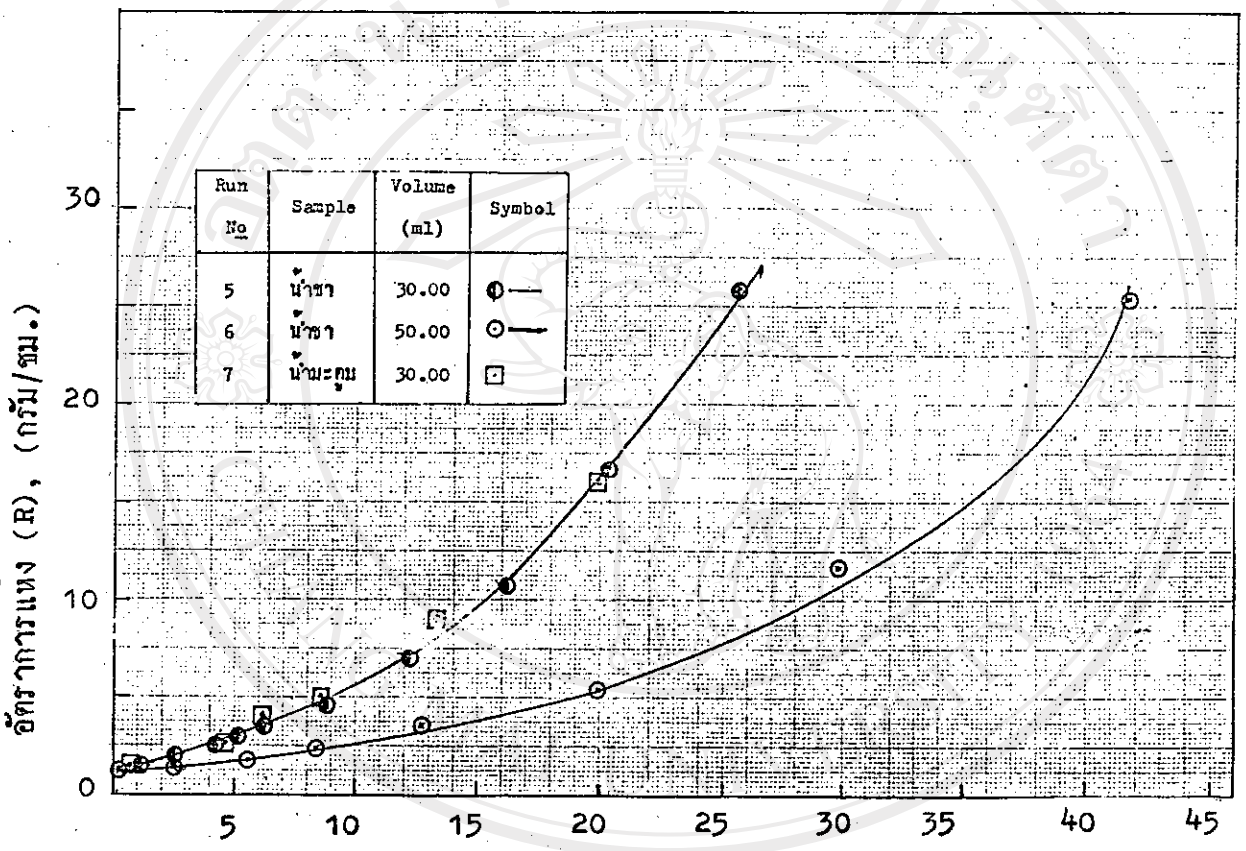
ซึ่งต่างจากกราฟอัตราการแห้งในภาชนะรูปกรวยที่ R เป็นสมการเชิงเส้นกับ W ความแตกต่างดังกล่าวนี้อาจจะอธิบายได้ 3 แบบด้วยกันคือ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.4 แสดงการลดลงของน้ำหนักสารตัวอย่างเทียบกับเวลาในระหว่างการทำน้ำชาและน้ำมะตูมให้แห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งโดยใช้ Batch Freeze dryer

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งกับปริมาณความชื้นของน้ำขาและน้ำมะพูนในการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งโดยใช้ Batch Freeze dryer

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

1. เป็นปรากฏการณ์ที่พบกันเสมอ[2] คือ อัตราการแห้งจะขึ้นกับรูปร่างของสารตัวอย่างแข็งเช่น น้ำเลือด (blood plasma) ที่ถูกทำให้แข็งในขวด ในลักษณะที่เป็นแท่งทรงกระบอกแกนกลางกลวง การแห้งตัวจะเริ่มด้วยอัตราการแห้งต่ำ และเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทำแห้งเนื่องจากพื้นที่การระเหิดเพิ่มมากขึ้นเมื่อระนาบของการระเหิดเคลื่อนจากแกนกลางลึกเข้าไปในทรงกระบอกและไปสิ้นสุดที่ผนังขวดแต่ในกรณีที่ของแข็งถูกทำให้แห้งโดยวิธีการสเปรย์ใน freeze dryer นั้น การแห้งจะเริ่มจากผิวภายนอกของอนุภาคและเคลื่อนที่ถอยลึกเข้าไปในแกนกลางของอนุภาคทำให้พื้นที่ผิวของการระเหิดลดลงอัตราการแห้งตัวจึงลดลงเมื่อเทียบกับเวลา

2. เกิดจากวิธีการทดลองที่ใช้คือการนำถาดออกมาชั่งน้ำหนักจะต้องทำการปรับความดันในห้องทำให้แห้งมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้นการทำแห้งในช่วงเวลาต่อไปจึงต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งเพื่อลดความดันในห้องทำแห้งก่อนที่จะเกิดการระเหิดต่อไป จึงทำให้อัตราการแห้งเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลามีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

3. ในช่วงต้นของการแห้ง ความชื้นในสารมีค่าสูงอัตราการแห้งสูง เมื่อเทียบกับช่วงท้ายของการทำแห้ง ในการนี้จึงต้องการความร้อนสำหรับการระเหิดมาก ดังนั้นเมื่อไม่มีการให้พลังงานความร้อนจากภายนอกเลย อัตราการแห้งจึงถูกควบคุมด้วยอัตราการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลข้างเคียงไปยังโมเลกุลของน้ำที่เกิดการระเหิดนั้น

ในที่นี้คาดว่าผลการทดลองที่ได้เกิดจากสาเหตุในข้อ 2 และ 3 มากกว่าข้อที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากการทำให้สารแข็งตัวในขวดรูปกรวยนั้นได้พยายามเอียงและหมุนภาชนะไปรอบ ๆ เพื่อทำให้เกิดฟิล์มบางของสารแข็ง ดังนั้นพื้นที่ผิว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.6 ผลการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งของน้ำชาตั้งต้น 30.00 ml
โดยใช้ Batch Freeze dryer

การทดลองที่ 5 ปริมาตรน้ำชา 30.00 ml

มวลของชาแห้งสนิท (M_∞) = 0.6 gm

ร้อยละของของแข็งในน้ำชาน้อยกว่า (% TS) = 2.01

ภาวะเครื่องทำแห้ง - ความดัน 100 m torr

- อุณหภูมิเครื่องควบแน่น -40°C

เวลา (ชม.)	น.น.เริ่มต้น M_o (gm)	$\frac{M_t}{M_o}$	R (กรัม/ชม.)	W (กรัม/กรัม)
1.0	29.8	0.70	25.33	41.73
2.0	29.8	0.50	11.62	29.80
3.0	29.8	0.30	5.36	20.00
3.5	29.8	0.20	3.58	12.70
4.0	29.8	0.20	2.38	8.40
4.25	29.8	0.10	1.79	5.60
4.5	29.8	0.06	1.49	2.50
5.0	29.8	0.02	1.19	0.25

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.7 ผลการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งของน้ำชาตั้งต้น 50.00 ml
โดยใช้ Batch Freeze dryer
การทดลองที่ 6 ปริมาตรน้ำชา 50.00 ml
มวลของชาแห้งสนิท (M_∞) = 1.7 gm
ร้อยละของของแข็งในน้ำชาตัวอย่าง (% TS) = 3.37
ภาวะเครื่องทำแห้ง - ความดัน 100 mtorr
- อุณหภูมิเครื่องควบแน่น -40 °C

เวลา (ชม.)	น.น.เริ่มต้น M_o (gm)	$\frac{M_t}{M_o}$	R (กรัม/ชม.)	W (กรัม/กรัม)
1.0	50.5	0.79	25.76	25.6
2.0	50.5	0.65	16.67	20.4
3.0	50.5	0.51	10.61	16.2
4.0	50.5	0.38	7.07	12.2
5.0	50.5	0.27	4.55	8.7
5.5	50.5	0.22	3.54	6.3
6.0	50.5	0.20	3.03	5.2
6.5	50.5	0.15	2.53	4.2
7.0	50.5	0.10	2.02	2.6
7.5	50.5	0.04	1.52	1.03
8.0	50.5	0.03	1.01	0.12

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.8 ผลการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งของน้ำมะตูมปริมาตร 30.00 ml โดยใช้ Batch Freeze dryer

การทดลองที่ 7 ปริมาตรน้ำมะตูม 30.00 ml

มวลของมะตูมแห้งสนิท (M_∞) = 1.2 gm

ร้อยละของของแข็งในน้ำมะตูมตัวอย่าง (% TS) = 4.03

ภาวะเครื่องทำแห้ง - ความดัน 100 mtorr

- อุณหภูมิเครื่องควบแน่น -40 °C

เวลา (ชม.)	น.น.เริ่มต้น M_o (gm)	$\frac{M_t}{M_o}$	R (กรัม/ชม.)	W (กรัม/กรัม)
1.0	29.8	0.70	16.69	19.9
2.0	29.8	0.50	8.94	13.3
3.0	29.8	0.30	4.77	8.9
3.5	29.8	0.20	3.58	6.2
4.0	29.8	0.20	2.38	4.3
4.25	29.8	0.10	2.09	3.0
4.5	29.8	0.10	1.79	2.1
5.0	29.8	0.05	1.19	0.7

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.9 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง M_t/M_o เทียบกับ t ของการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งแบบถาด

การทดลองชุดที่	สารตัวอย่าง	ปริมาตรตั้งต้น (ml)	A	B	r
5	น้ำชา	30.00	2.3895	-0.7878	-0.9136
6	น้ำชา	50.00	1.8184	-0.4368	-0.9387
7	น้ำมะตูม	30.00	1.6648	-0.6294	-0.9623

จึงไม่ควรต่างกันมากนักในระหว่างการทำแห้ง และในกรณีที่ใช้ถาดเป็นภาชนะบรรจุนั้นพื้นที่ที่เกิดการระเหิดก็ค่อนข้างคงที่เช่นกัน สำหรับสาเหตุข้อ 2 นั้น ไม่อาจทำการแก้ไขได้ในการทดลองนี้ เนื่องจากต้องใช้วิธีการชั่งน้ำหนักในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของระบบ ส่วนสาเหตุที่ 3 นั้นอาจแก้ไขได้โดยให้ความร้อนโดยอาศัยระบบการให้ความร้อนผ่านผนังห้องทำแห้งซึ่งดัดแปลงจากเตาอบสูญญากาศอยู่แล้ว โดยควรจะเริ่มให้ความร้อนตั้งแต่ชั่วโมงที่ 3 เป็นต้นไป ทั้งนี้เนื่องจากจุดที่มีการเปลี่ยนความชันของกราฟระหว่าง R กับ W จะอยู่ในช่วงเวลานี้

3.2.2 การศึกษาการทำแห้งแบบถาดโดยมีการให้ความร้อนเสริมจากแหล่งพลังงานภายนอก

โดยการทดลองทำน้ำชาและน้ำมะตูมปริมาตรอย่างละ 30.00 ml ให้แห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งและให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างแข็งตั้งแต่ชั่งโมงที่ 3

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

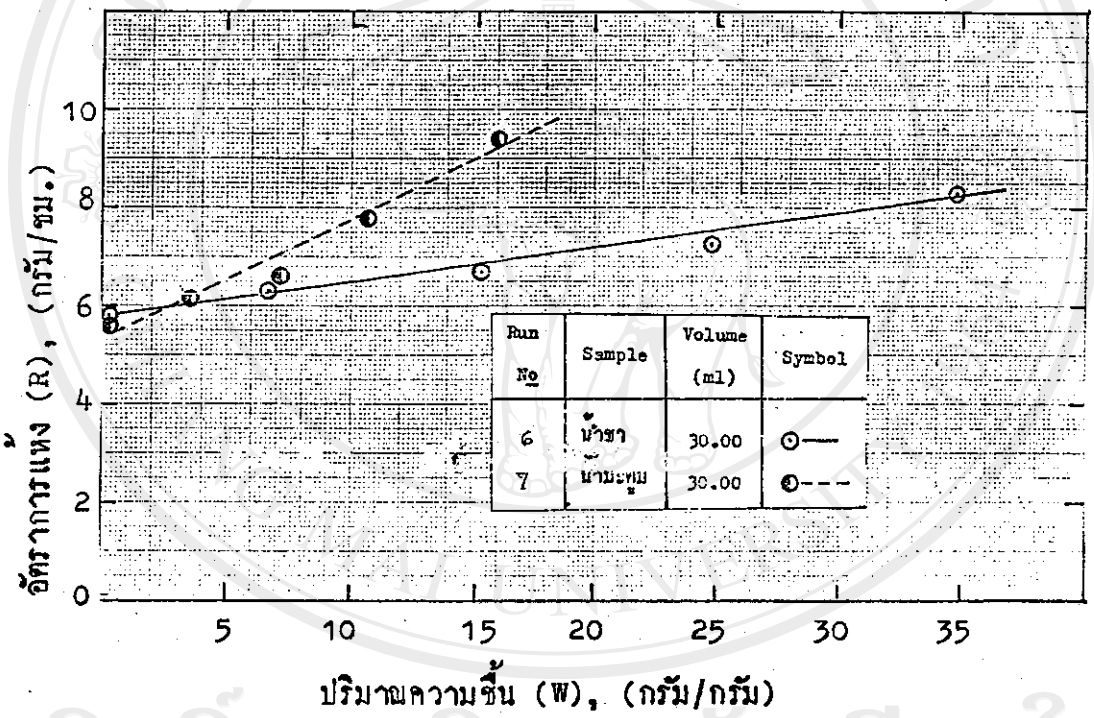
เป็นต้นไปจนสิ้นสุดการทดลอง ปรากฏว่าข้อมูลที่ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 3.10 และ 3.11 และกราฟระหว่าง R กับ W เป็นดังรูปที่ 3.6 ซึ่งจะเห็นว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงคล้ายกับการทดลองในหัวข้อ 3.1 ผลของการให้ความร้อนนี้ทำให้อัตราการแห้งมีค่าสูงที่ความชื้นของสารต่ำ หรือในช่วงท้ายของการทำแห้ง และมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการให้ความร้อน อนึ่ง การสังเกตผลิตภัณฑ์ด้วยตาเปล่าพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความพรุนสูงมากเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ให้ความร้อนช่วย

จากผลการทดลองทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งแบบถาดนี้ได้ข้อสรุป 2 ประการคือ

1. พื้นที่ผิวที่เกิดการระเหิดหากมีค่าสูงเกินไปอัตราการแห้งจะขึ้นอยู่กับการถ่ายเทความร้อน สำหรับการระเหิดจากโมเลกุลข้างเคียงไปยังโมเลกุลของน้ำที่จะเกิดการระเหิดเป็นไอ

2. การให้ความร้อนเสริมตั้งแต่ชั่วโมงที่ 3 เป็นต้นไปจะทำให้อัตราการแห้งเพิ่มสูงขึ้น และกลไกการแห้งไม่ขึ้นอยู่กับการถ่ายเทความร้อนตามข้อ 1 อีกต่อไป และนอกจากนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความพรุนสูงด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้งกับปริมาณความชื้นของน้ำชาและน้ำมะตูมในการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งโดยใช้ Batch Freeze dryer และมีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบในชั่วโมงที่ 3 ของการทำแห้ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.10 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนไป อัตราเร็วของการทำแห้งและปริมาณความชื้นต่อหน่วยมวลของสารแห้งสนิทที่เวลาต่าง ๆ ของการทำแห้งของน้ำชา

- ความดัน 50 mtorr
- อุณหภูมิของเครื่องควบแน่น -40°C
- ปริมาตรของน้ำชาตั้งต้น 30 ml
- เพิ่มความร้อนให้กับระบบอุณหภูมิ 30°C ในชั่วโมงที่ 3 ของการทำแห้ง

เวลา (ชม.)	น.น.เริ่มต้น (M_o)(gm)	น.น.ที่เวลาต่าง ๆ (M_t)	น.น.ที่แห้งสนิท M_∞	R กรัม/ชม.	W กรัม/กรัม
1.0	29.8	21.5	0.6	8.3	34.8
2.0	29.8	15.5	0.6	7.2	24.8
3.0	29.8	9.8	0.6	6.7	15.3
4.0	29.8	4.6	0.6	6.3	6.7
5.0	29.8	0.7	0.6	5.8	0.2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.11 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนไป อัตราเร็วของการทำแห้งและปริมาณความชื้นต่อหน่วยมวลของสารแห้งสนิทที่เวลาต่าง ๆ ของการทำแห้งของน้ำมะตูมภายใต้ภาวะและเงื่อนไขเดียวกันกับน้ำซา

เวลา (ชม.)	น.น.เริ่มต้น M_o (gm)	น.น.ที่เวลาต่าง ๆ	น.น.ที่แห้งสนิท M_∞	R กรัม/ชม.	W กรัม/กรัม
1.0	29.8	20.4	1.2	9.4	16.0
2.0	29.8	14.1	1.2	7.8	10.7
3.0	29.8	9.9	1.2	6.6	7.2
4.0	29.8	5.4	1.2	6.1	3.5
5.0	29.8	1.6	1.2	5.6	0.3

3.3 การทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งโดยใช้เครื่องมือที่ออกแบบ

จากข้อมูลในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ได้นำไปสร้างเครื่องทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งอย่างง่ายดังรูปที่ 2.1 แบบที่ 3 ทั้งนี้โดยการใช้ Vacuum oven ทำหน้าที่เป็นห้องทำแห้ง (drying chamber) ซึ่งมีปริมาตรมาก ดังนั้นการทดลองกับเครื่องมือที่ออกแบบนี้จึงไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาได้เหมือนกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2

ปัญหาอีกประการหนึ่งคือ ไม่สามารถลดความดันในห้องทำแห้งให้ต่ำมาก ๆ ได้ตามต้องการ จากการทดลองโดยใช้ปั๊มสูญญากาศ EDWARD

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

model ED 50 พบว่าความดันในระบบลดลงจากความดันบรรยากาศไปเป็นความดันต่ำที่สุด 0.2 torr (mmHg) และเมื่อใช้ mercury diffusion pump ควบกับปั๊มสูญญากาศพบว่าความดันต่ำสุดที่ได้มีค่าเพียง 0.1 torr (หรือ 10^2 mtorr) ซึ่งทั้ง 2 กรณีนี้ความดันในระบบมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้ในการทดลองตามหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ในทางอุตสาหกรรม ความดันที่ใช้อยู่ในช่วงระหว่าง 0.2-0.1 torr(10) เมื่อทำสารที่ผ่านการแช่แข็งโดยใช้ถาดเป็นภาชนะบรรจุสารละลายตัวอย่างไปทำให้แห้งในเครื่องทำแห้งนี้พบว่าเกิดการหลอมตัวของสารตัวอย่างบริเวณผิวหน้า ในช่วงต้นชั่วโมงแรกของการทำแห้งการลดความดันภายในระบบจากความดันบรรยากาศลงไปเป็นความดันปฏิบัติงาน (0.1-0.2 torr) นั้นพบว่าใช้เวลาน้อยกว่า 5 นาที จึงไม่ไม่ควรเป็นสาเหตุของการหลอมตัวที่ผิวหน้าของสารตัวอย่างและแม้ว่าจะทำการแก้ไขโดยการนำถาดบรรจุของผสม ethanol-dryice ใส่ไว้ในห้องทำแห้งเพื่อลดอุณหภูมิก่อนนำถาดบรรจุสารตัวอย่างไปใส่และเริ่มดูดอากาศออกจากระบบก็ตามก็ยังคงพบการหลอมตัวของสารตัวอย่างซึ่งแสดงว่าความดันภายในระบบไม่ต่ำพอทำให้การระเหิดเกิดช้าเกินไป ทำให้อุณหภูมิของสารตัวอย่างไม่สามารถรักษาให้ต่ำได้จึงเกิดการหลอมตัวดังกล่าว ด้วยเหตุนี้ในช่วงต้นของการทำแห้งจึงมีลักษณะเป็นการระเหยของน้ำมากกว่าจะเป็นการระเหิดของน้ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อความชื้นในสารลดลงสารตัวอย่างจะมีลักษณะแข็งและการแห้งตัวของสารเกิดโดยการระเหิดของน้ำเหมือนกับในเครื่องทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งทั่วไป ในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบโดยใช้แผ่นความร้อนเริ่มต้นตั้งแต่ครึ่งชั่วโมงแรกของการทำแห้ง อุณหภูมิเริ่มต้นคือ 121°C เรื่อยไปจนถึงชั่วโมงที่ 3 ของการทำแห้งจะมีการลดอุณหภูมิลงเหลือ 65.5°C เนื่องจากที่ผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้งและสารอาหารที่ผิวหน้าอาจถูกทำลายไปได้ด้วยความร้อน(10)

ดังนั้น ในการทดลองนี้จึงทำสารให้แห้งอย่างต่อเนื่องโดยใช้เวลาในการทำแห้งนาน 10 ชั่วโมง และให้ความร้อนตั้งแต่ชั่วโมงที่ 3 เป็นต้นไป เพราะว่าจากการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สังเกตในขณะทดลองเห็นว่าสารตัวอย่างเริ่มแห้งแล้ว และปริมาณความชื้นเหลือน้อย แล้วพิจารณาจากราฟรูป 3.2 และ 3.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ต่อไป อนึ่ง เพื่อให้สามารถเทียบผลการทดลองได้ดียิ่งขึ้น จึงได้ดัดแปลงเครื่อง Virtis โดยการนำปั๊มสูญญากาศ EDWARD ED 50 ไปใช้แทนปั๊มสูญญากาศที่ใช้อยู่เดิม และนอกจากนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ปั๊มสูญญากาศดังกล่าวควบกับ mercury diffusion pump ซึ่งทำให้ได้ความดันในระบบเป็น 20 และ 5 mtorr ตามลำดับเทียบกับ 0.2 และ 0.1 torr เมื่อใช้ระบบปั๊มนี้กับเครื่องทำแห้งที่ออกแบบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของท่อทางออกของแกสในห้องทำแห้งของเครื่องที่ออกแบบนั้นมีผลเป็นอย่างมากต่อความดันของระบบ ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้ในการทดลองต่าง ๆ ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 3.12 ดังต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.12 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็งโดยใช้เครื่องมือทำแห้งแบบถาดที่ออกแบบและที่ดัดแปลงจากเครื่อง Virtis ปริมาตรของน้ำชา 100.00 ml

ความดันของระบบ	การทดลองที่	เครื่องมือ *	อุณหภูมิของเครื่องควบแน่น °C	สีของผลิตภัณฑ์	ลักษณะของผลิตภัณฑ์
0.2 torr	8	1	-60	น้ำตาลเข้ม	ผงพลาสติก
0.1 torr	10	1	-60	"	"
100 mtorr	12	2	-40	น้ำตาลอ่อน	"
50 mtorr	14	2	-40	"	"
20 mtorr	16	3	-40	น้ำตาลนวล	ปุยคล้ายฟองน้ำ
5 mtorr	18	4	-40	"	"

* 1 ≡ เครื่องมือที่ออกแบบตามรูป 2.1

2 ≡ เครื่องมือที่ดัดแปลงจากเครื่อง Virtis

3 ≡ Virtis ต่อกับปั๊ม ED50

4 ≡ Virtis ต่อกับปั๊ม ED50 และ Mercury diffusion pump

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากข้อมูลในตาราง 3.12 ผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้จากเครื่องทำแห้งที่ออกแบบและที่ดัดแปลงมีลักษณะเป็นผงพลาสติกสีน้ำตาลเข้มมีความพรุนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้จากเครื่อง VIRTIS ซึ่งมีลักษณะเป็นปุยคล้ายฟองน้ำ สีน้ำตาลนวลมีความพรุนมากก็แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้จากการควบคุมความดันต่ำมาก ๆ มีคุณภาพดีกว่าเพื่อให้เครื่องมือทำแห้งที่ออกแบบใช้งานได้มีประสิทธิภาพขึ้นจึงควรปรับปรุงทางออกของห้องทำแห้งของเครื่องทำแห้งที่ออกแบบให้มีขนาดกว้างกว่าเดิมเหมือนเครื่องทำแห้ง VIRTIS เนื่องจากเมื่อทางออกของห้องทำแห้งมีขนาดเล็กทำให้โมเลกุลของแกสหรือไอ เคลื่อนที่ออกไปจากห้องทำแห้งได้ช้าลง ความดันในระบบจึงไม่อาจลดลงได้มากพอที่จะทำงานเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามต้องการ

3.4 <u>การทดสอบความสามารถในการละลายย้อนกลับ (Rehydration) ของผลิตภัณฑ์ทำได้ดังนี้คือ.-</u>

- ตวงน้ำกลั่นปริมาตร 1 ใน 10 ของปริมาตรเริ่มต้นของน้ำชาหรือน้ำมะตูมขณะก่อนทำการแช่แข็งลงใน beaker

- ชั่ง product ที่ได้ปริมาณ 1 ใน 10 กรัม เทใส่ลงในน้ำคนอย่างต่อเนื่องพร้อมจับเวลาที่ใช้เมื่อ product ละลายจนหมด

- เวลาที่ได้เป็นเวลาที่ใช้ในการละลายย้อนกลับของผลิตภัณฑ์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.13 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้และเวลาที่ใช้ในการละลายย้อนกลับ (rehydration) ของน้ำชาปริมาตร 100.00 ml จากการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็ง

การทดลองที่	เครื่องมือ*	ความดันของระบบ	อุณหภูมิของเครื่องควบแน่น °C	ลักษณะของผลิตภัณฑ์	เวลาที่ใช้ในการละลาย (วินาที)
8	1	0.2 torr	-60	ผงพลาสติก	42.24
10	1	0.1 torr	-60	"	42.39
12	2	100 mtorr	-40	"	49.12
14	2	50 mtorr	-40	"	60.00
16	3	20 mtorr	-40	ปุยคล้ายฟองน้ำ	17.28
18	4	5 mtorr	-40	ปุยคล้ายฟองน้ำ	10.86

*ดูท้ายตาราง 3.12

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.14 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้และเวลาที่ใช้ในการละลายย้อนกลับ (rehydration) ของน้ำมะตูม ปริมาตร 100.00 ml จากการทำแห้งภายใต้ภาวะแช่แข็ง

การทดลองที่	เครื่องมือ*	ความดันของระบบ	อุณหภูมิของเครื่องควบแน่น °C	ลักษณะของผลิตภัณฑ์	เวลาที่ใช้ในการละลาย (วินาที)
9	1	0.2 torr	-60	ผงพลาสติก	43.23
11	1	0.1 torr	-60	"	41.43
13	2	100 mtorr	-40	"	42.06
15	2	50 mtorr	-40	"	51.88
17	3	20 mtorr	-40	ปุยคล้ายฟองน้ำ	18.36
19	4	5 mtorr	-40	ปุยคล้ายฟองน้ำ	18.37

*ดูท้ายตาราง 3.12

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อพิจารณาข้อมูลในตาราง 3.13 และ 3.14 จะเห็นว่าลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำแห้งโดยใช้เครื่องมือทำแห้งแบบถาดมีผลต่อการละลายน้ำคือ ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผงพลาสติกจะใช้เวลาในการละลายย้อนกลับ (rehydration) มากกว่า ส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นปุยกล้ายฟองน้ำจะใช้เวลาในการ rehydration น้อยกว่าประมาณ 2.5 เท่า เนื่องมาจากโครงสร้างของผลิตภัณฑ์แบบพลาสติกนั้นมีความพรุนน้อยน้ำแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างได้ช้าเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่เป็นปุยกล้ายฟองน้ำซึ่งมีความพรุนมากกว่าจึงดูดน้ำได้ดีเมื่อนำไปละลายน้ำจึงละลายได้เร็ว

นอกจากนี้โครงสร้างที่เป็นผงพลาสติกนั้นมักจะลอยอยู่บนผิวน้ำไม่จมลงไปทำให้การละลายน้ำช้าลง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved