วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์สำหรับการหมักแบบแห้ง

Development of Relative Humidity Enhancer for Solid-state Fermentation

โดย

นายวรัญญู เสมรสุต

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-2483-2

วรัญญู เสมรสุต 2549: การพัฒนาเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์สำหรับการหมักแบบแห้ง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ประธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ, Ph.D. 86 หน้า
ISBN 974-16-2483-2

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์สำหรับการหมักแบบแห้ง 3 แบบ คือ แบบที่ 1 เป็นการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์โดยให้อากาศผ่านละอองน้ำที่พ่นจากด้านบนของเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ แบบที่ 2 เพิ่มความชื้นสัมพัทธ์โดยพ่นละอองน้ำจากด้านล่างของเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ และแบบที่ 3 แบ่งเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ออกเป็น 3 ส่วนด้วยแผ่นกั้นเพื่อควบคุมทิศทางการไหลอากาศให้ไหลสลับขึ้นและลง เพื่อเพิ่มระยะเวลาที่อากาศอยู่ในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทั้ง 3 แบบนี้ให้อากาศไหลเข้าทางด้านล่างแล้วไหลออกทางด้านบนของเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ หลังจากนั้นนำเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทั้ง 3 แบบ มาทดสอบเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 34.62 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (ความเร็วอากาศในถังหมัก 0.1 เมตรต่อวินาที) ผลการทดสอบพบว่าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเป็น 79 เปอร์เซ็นต์ เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 2 สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเป็น 85 เปอร์เซ็นต์ และเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเป็น 98.1 เปอร์เซ็นต์ และมีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ตลอดการทดลอง

เมื่อนำเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทั้ง 3 แบบมาทดลองหมักรา *Rhizopus oligosporus* บนวัสดุหมักผสมระหว่างกากมันสำปะหลังกับรำข้าวเจ้า ด้วยสัดส่วน 70 ต่อ 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณความชื้นในวัสดุหมักเริ่มต้น 55 เปอร์เซ็นต์ ในถังหมักแพคเบดแบบสองชั้น และให้อากาศระบายความร้อนในวัสดุหมักในชั่วโมงที่ 12 ด้วยความเร็วอากาศในถังหมักเท่ากับ 0.1 เมตรต่อวินาที พบว่าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ช่วยให้รา *R. oligosporus* เจริญดีที่สุดโดยมีปริมาณกลูโคซามีนสูงสุดในเบดบนและเบดล่างเท่ากับ 31.65 และ 50.64 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งในชั่วโมงการหมักที่ 98 และ 84 หลังจากนั้นทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 โดยการเพิ่มความเร็วอากาศในถังหมักจาก 0.1 เป็น 0.15 เมตรต่อวินาที ในการหมักรา *R. oligosporus* พบว่ามีปริมาณกลูโคซามีนสูงสุดในเบดบนและเบดล่างเท่ากับ 44.31 และ 49.46 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง สุดท้ายทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 โดยการนำสภาวะที่ดีที่สุดในการหมักรา *R. oligosporus* มาหมักรา *Aspergillus oryzae* ในถังหมักแพคเบดแบบชั้นเดียว พบว่ามีปริมาณกลูโคซามีนสูงสุดเท่ากับ 41.20 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในชั่วโมงการหมักที่ 108

_____ _____ ___ / ___ / ____

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่อประธานกรรมการ

Varunyou Smerasuta 2006: Development of Relative Humidity Enhancer For Solid-state Fermentation. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Penjit Srinophakun, Ph.D. 91 pages.
ISBN 974-16-2483-2

The purpose of this thesis is to develop the humidifier in order to apply in the solid-state fermentation. There are 3 types of humidifier. The water is sprayed from the top for the first type of humidifier while the water is sprayed from the bottom to the top for the second and the third type of humidifier. The third type of humidifier is designed to have three baffles inside in order to control the air direction (upward / downward) and increase the residence time of air flow in the humidifier. Note that the air is flown from the bottom to the top in all types of humidifier. After the test of the three humidifiers by flowing 34.62 cubic meter per hour-air flow rate (air velocity in pack-bad is 0.1 meter per second), the first type of humidifier can increase the relative humidity to 79% while the second type can increase to 85%. However the third type can increase the relative humidity up to 98.1% and maintain the relative humidity level above 90% at all time.

When testing all type of humidifiers in *Rhizopus oligosporus* fermentation, using the mixture of cassava waste and rice bran in the proportion of 70:30 at 55% initial moisture content, in the two layer pack-bad fermentor and ventilation after 12^{th} hour of fermentation at 0.1 meter per second-air flow rate, the result of the third type of humidifier illustrated the best growth of *R. oligosporus.* At the fermentation time of 98 and 84 hours, *R. oligosporus* gave the highest glucosamine content in the upper and lower bed of 33.05 and 50.64 mg / g dry substrate respectively. After increase air flow rate in the pack-bed from 0.1 to 0.15 meter per second, the glucosamine content increased to 44.31 mg / g dry substrate in the upper bed and 49.46 mg / g dry substrate in the lower bed. Lastly, the third humidifier war tested with *Aspergillus oryzae* fermentation in one layer packed bed fermentor using the best condition of *R. oligosporus* cultivation, the results showed that the highest glucosamine content was 41.20 mg / g dry substrate at 108 hours of fermentation.

_____ _____ ___ / ___ / ____

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจและห่วงใยอย่างเสมอ รวมทั้งให้การสนับสนุนในการศึกษาของข้าพเจ้า จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ ประธานกรรมการที่ปรึกษา และอาจารย์ ดร. จรัญ ฉัตรมานพ ผู้ประสาทวิชาความรู้ รวมทั้งให้คำแนะนำ ชี้แนะในการทำงานวิจัย นอกจากนั้นช่วยตรวจ และแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานพ เจริญไชยตระกูล กรรมการวิชาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อัจฉรา ดวงเดือน กรรมการวิชารอง และผู้ช่วยศาสตราจารย์จารนัย พณิชยกุล ผู้แทนบัณฑิต ที่สละเวลาให้คำแนะนำและตรวจแก้วิทยานิพนธ์เพื่อความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ คุณพงษ์ประวัติ พิมพการัง คุณจุฬารัตน์ ครองแถว คุณสุนทร ปิติเจริญพันธ์ และคุณเกษณีย์ เอี่ยมรักษาเกียรติ ที่สละเวลาสาธิตวิธีการวิเคราะห์ต่างๆ รวมทั้งสอนการใช้เครื่องมือ และอำนวยความสะดวกต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในด้านต่างๆ เสมอ และขอบคุณห้องปฏิบัติการชีวภาพที่ให้สถานที่ทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบอาราธนาคุณพระศรีรัตนตรัย ให้ปกป้องและคุ้มครองให้ทุกท่านจงมีสุขภาพแข็งแรง มีความสุขกาย สุขใจ ปราศจากทุกข์โศกโรคภัยทั้งปวงด้วยเทอญ

วรัญญู เสมรสุต

พฤษภาคม 2549

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตงานวิจัย	2
การตรวจเอกสาร	3
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการหมัก	3
กระบวนการหมักแบบแห้ง	6
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับรา	12
การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ	17
หลักการเบื้องต้นของการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์	30
ชนิดเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์	35
อุปกรณ์และวิธีการ	42
อุปกรณ์	42
วิธีการ	48
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	53
สรุป	74
ข้อเสนอแนะ	75
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	76
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน	84
ภาคผนวก ข ตารางข้อมูลการทดลอง	85
ภาคผนวก ค วิธีการคำนวณ	90

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สถิติความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของประเทศในช่วงฤดูกาลต่างๆ	22
2	ระดับความชื้นที่เหมาะสมในกระบวนการต่างๆ	23
3	การเปรียบเทียบกระบวนการในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แต่ละชนิด	41

ตารางผนวกที่

ก1	กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคซามีน	84
ข1	ความชื้นสัมพัทธ์ก่อนและหลังผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3	85
ข2	อุณหภูมิในเบดบนและล่าง ในการหมักรา *R. oligosporus* ที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3 ให้อากาศด้วยความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที	85
ข3	ความชื้นในวัสดุหมัก ในการหมักรา *R. oligosporus* ที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3 ให้อากาศด้วยความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที	86
ข4	ปริมาณกลูโคซามีน ในการหมักรา *R. oligosporus* ที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3 ให้อากาศด้วยความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที	86
ข5	อุณหภูมิในเบดบนและล่าง และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขาเข้าถังหมัก ในการหมักรา *R. oligosporus* ที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ให้อากาศด้วยความเร็ว 0.15 เมตรต่อวินาที	87
ข6	ความชื้นในวัสดุหมักและปริมาณกลูโคซามีน ในการหมักรา *R. oligosporus* ที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ให้อากาศด้วยความเร็ว 0.15 เมตรต่อวินาที	88
ข7	อุณหภูมิในเบด ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขาเข้าถังหมัก ความชื้นในวัสดุหมัก และปริมาณกลูโคซามีน ในการหมักรา *A. oryzae* ที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ให้อากาศด้วยความเร็ว 0.15 เมตรต่อวินาที	88

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรา *Rhizopus* spp	15
2	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรา *Aspergilus oryzae*	17
3	พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ	19
4	โมเลกุลของน้ำในภาชนะ	19
5	กราฟแสดงปริมาณไอน้ำที่ทำให้อากาศ 1 กิโลกรัมเกิดการอิ่มตัว	20
6	แผนภูมิความชื้น (psychrometric chart)	24
7	กระบวนการทำความร้อน	25
8	กระบวนการลดความชื้นโดยวิธีการเคมี	26
9	กระบวนการลดความชื้น	27
10	กระบวนการทำความเย็นและลดความชื้น	27
11	กระบวนการทำความเย็น	28
12	กระบวนการทำความเย็นและเพิ่มความชื้น	29
13	กระบวนการทำความร้อนและเพิ่มความชื้น	30
14	รูปแบบการกระจายตัวของไอน้ำ	31
15	รูปการกระจายไอน้ำในท่อส่งอากาศที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน แต่มีขนาดไม่เท่ากัน	32
16	อิทธิพลจากอุณหภูมิของอากาศที่ใช้เพิ่มความชื้นสัมพัทธ์	32
17	อิทธิผลจากความเร็วอากาศในท่อส่ง	33
18	การแบ่งหัวพ่นออกเป็นชุดในท่อส่งขนาดใหญ่	33
19	รูปแสดงการติดตั้ง high-limit humidistat	34
20	การกระจายตัวของอากาศและละอองน้ำเมื่อมีแผ่นกั้นการไหลอากาศ	35
21	การเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์เมื่ออุณหภูมิกระเปาะแห้งคงที่	36
22	เครื่องเพิ่มความชื้นชนิดให้ไอน้ำโดยตรง	37
23	เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบไอน้ำสูงไอน้ำ	38
24	เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบไอน้ำชนิดไฟฟ้าไอออนนิคเบด	39
25	หัวพ่นละอองน้ำในเครื่องเพิ่มความชื้นระบบหมอก	40
26	การเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ในระบบหมอก	40
27	ระบบการหมักแบบแห้งพร้อมเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	รูประบบการหมักพร้อมเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์	43
29	ถังหมักแพคเบดแบบชั้นเดียว	44
30	ถังหมักแพคเบดแบบสองชั้น	45
31	ขนาดเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์	46
32	เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1	54
33	ผลการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1	54
34	เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 2	55
35	ผลการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 2	56
36	เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3	57
37	ผลการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3	58
38	การเปรียบเทียบการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 2 และ3 รูปวัสดุหมักเบดบนและล่าง ชั่วโมงที่ 0	59
39	รูปวัสดุหมักด้านข้างในเบดบน และเบดล่าง ชั่วโมงที่ 96	60
40	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเบดบน ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้	60
41	อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที	
42	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเบดล่าง ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที	61
43	การเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุหมักเบดบน ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที	62
44	การเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุหมักเบดล่าง ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที	63 64
45	ปริมาณกลูโคซามีนเบดบน ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
46	ปริมาณกลูโคซามีนเบดล่าง ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที	66
47	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเบดบนและล่าง ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที	67
48	การเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุหมักในเบดบนและล่าง และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขาเข้าถังหมักแพคเบด ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที	68
49	ปริมาณกลูโคซามีนในเบดบนและล่าง ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที	69
50	รูปวัสดุหมักที่ชั่วโมงที่ 0, 24, 60 และ120	70
51	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเบด ในการเลี้ยงรา *A. oryzae* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที	71
52	การเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุหมักและความชื้นสัมพัทธ์ ในการเลี้ยงรา *A. oryzae* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที	72
53	ปริมาณกลูโคซามีน ในการเลี้ยงรา *A. oryzae* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที	73

ภาพผนวกที่

ก1	กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคซามีน	84
ค1	ถังหมักแพคเบดและพัดลมดูดอากาศ	90
ค2	ภายในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3	91

การพัฒนาเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์สำหรับการหมักแบบแห้ง

Development of Relative Humidity Enhancer for Solid-state Fermentation

คำนำ

เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญในการเพิ่มความชื้นให้กับอากาศก่อนนำอากาศไประบายความร้อนในวัสดุหมักในระบบการหมักแบบแห้ง เพื่อลดการสูญเสียความชื้นของวัสดุหมัก กระบวนการหมักแบบแห้งเป็นกระบวนการแปรสภาพทางชีวเคมี โดยการทำงานของเอนไซม์ที่ จุลินทรีย์สร้างขึ้น มีการเติมน้ำเพื่อปรับความชื้นวัสดุหมักให้มีความชื้นที่เหมาะสมต่อการเจริญของ จุลินทรีย์ (วราวุฒิ, 2529) การหมักแบบแห้งนิยมทำในถังหมักแพคเบด โดยปัจจัยที่มีผลต่อการหมัก คือ ความชื้นในวัสดุหมัก และอุณหภูมิของวัสดุหมัก โดยถ้าอุณหภูมิในวัสดุหมักสูงอาจทำให้จุลินทรีย์ตายได้

การหมักแบบแห้งในถังหมักแพคเบดมักเกิดปัญหาการสะสมความร้อนในวัสดุหมัก ซึ่งความร้อนนี้เกิดจากการเจริญของจุลินทรีย์ โดยมีการเสนอทางแก้ปัญหาความร้อนสะสมในถังหมักแบบแพคเบด ด้วยการเพิ่มความเร็วอากาศหรือลดอุณหภูมิทางเข้าของลม (Sangsurasak and Mitchell, 1995) ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังอากาศโดยการพาความร้อน หากสามารถรักษาความชื้นในวัสดุหมักและอัตราการไหลของอากาศให้มีค่าคงที่จะสามารถรักษาอุณหภูมิในวัสดุหมักให้คงที่ได้ โดยให้มีการสูญเสียน้ำของอาหารเลี้ยงเชื้อน้อยที่สุด (มณีรัตน์, 2542)

การสูญเสียความชื้นภายในวัสดุหมักเกิดจากการระเหยของน้ำและการที่อากาศไหลผ่านเบดทำให้ความชื้นในเบดลดลง ส่งผลให้การเจริญของจุลินทรีย์ลดลง (Hamidi-Esfahani, 2004) ดังนั้นจึงต้องควบคุมอุณหภูมิ และปริมาณความชื้นในวัสดุหมักให้เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ เนื่องจากอากาศที่ใช้ในการระบายความร้อนโดยทั่วไปมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำและไม่มีการเพิ่มความชื้นให้กับอากาศที่ใช้ระบายความร้อนในวัสดุหมักจึงทำให้ความชื้นในวัสดุหมักลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ในทางกลับกันถ้านำอากาศที่มีความชื้นสูงมาระบายความร้อนจะช่วยให้สูญเสียความชื้นในวัสดุหมักน้อยกว่า เพราะว่าอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูงทำให้น้ำระเหยได้น้อย ดังนั้นถ้าสามารถควบคุมอุณหภูมิในวัสดุหมักไม่ให้สูงและปริมาณความชื้นในวัสดุหมักให้มีความเหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์แล้ว ช่วยให้จุลินทรีย์เจริญได้ดีและสามารถผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ

ในปัจจุบันเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ที่มีขายตามท้องตลาดมีราคาค่อนข้างสูง และไม่ได้ออกแบบเฉพาะเจาะจงสำหรับที่จะนำมาใช้ในกระบวนการหมักแบบแห้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์สำหรับกระบวนการหมักแบบแห้งในถังหมักแพคเบดที่มีราคาไม่สูงนัก และใช้วัสดุที่มีในประเทศ

วัตถุประสงค์

1. พัฒนาและทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์สำหรับการหมักแบบแห้ง

2. ศึกษาผลการใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในการเลี้ยงรา *Rhizopus oligosporus* และรา *Aspergillus oryzae* ในถังหมักแพคเบด

ขอบเขตงานวิจัย

1. พัฒนาเครื่องเพิ่มความชื้นสำพัทธ์ที่ใช้สำหรับการหมักแบบแห้ง

2. ทำการศึกษาการหมักในถังแพคเบดแบบชั้นเดียวและสองชั้นขนาด 50 ลิตร ที่มีเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

3. ทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ โดยนำไปใช้ควบคู่กับถังหมักแพคเบดเพื่อหมักรา 2 ชนิด คือ *R. oligosporus* และ *A. oryzae*

การตรวจเอกสาร

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการหมัก

1. การหมัก (Fermentation)

การหมัก (fermentation) เป็นกระบวนการแปรสภาพทางชีวเคมี อันเป็นผลจากการทำงานของเอนไซม์ที่สร้างขึ้นโดยจุลินทรีย์ (วราวุฒิ, 2529)

การหมักสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท ถ้าแบ่งตามปริมาณของเหลวที่เติมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

1. การหมักแบบแห้ง (solid-state fermentation, SSF) เป็นการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์บนอาหารหมักที่เป็นวัสดุแข็งหรือ อาหารแห้งไม่ละลายน้ำ ใช้น้ำเพียงเล็กน้อยเพื่อปรับให้วัสดุหมักมีความชื้นเพียงพอต่อการเจริญของจุลินทรีย์

2. การหมักในสภาพกึ่งเหลว (semi-solid fermentation) เป็นการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์บนอาหารหมักที่เป็นของเหลวแต่มีบางส่วนเป็นของแข็งแขวนลอยอยู่

3. การหมักในอาหารเหลว (submerged fermentation) เป็นการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์บนอาหารหมักที่เป็นของเหลว

1.1 ขั้นตอนในกระบวนการหมัก (วราวุฒิ, 2529)

กระบวนการหมักโดยทั่วไป มีขั้นตอนที่สำคัญ 4 ขั้นตอน ดังนี้

1.1.1 การเตรียมต้นเชื้อ (inoculum preparation) เป็นการเตรียมจุลินทรีย์ให้แข็งแรงและมีปริมาณมากเพียงพอต่อการหมัก และต้องปราศจากการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการ

1.1.2 การเตรียมวัตถุดิบ (raw material preparation) ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ ถ้าเป็นวัตถุดิบที่จุลินทรีย์สามารถใช้ได้ง่าย เช่น น้ำตาล เป็นต้น ก็สามารถจัดเตรียมได้ง่าย แต่ในทาง

ตรงกันข้ามถ้าเป็นวัตถุดิบที่ใช้ได้ยาก เช่น ลิกโนเซลลูโลส จะต้องนำไปผ่านกระบวนการเพื่อทำให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมที่จะทำการหมักต่อไปเสียก่อน ได้แก่ การลดขนาด ปฏิกิริยาชีวเคมีเปลี่ยนให้เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เป็นต้น

1.1.3 การหมัก (fermentation) เมื่อเตรียมวัตถุดิบและต้นเชื้อพร้อมแล้ว นำมาถ่ายลงในถังหมัก (fermenter) โดยวัตถุดิบดังกล่าวจะต้องผ่านการฆ่าเชื้อหรือไม่ผ่านขึ้นอยู่กับชนิดของการหมัก เช่น ในกรณีหมักแอลกอฮอล์จากกากน้ำตาล กากน้ำตาลไม่ได้ผ่านการฆ่าเชื้อมาก่อน ในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องปรับและควบคุมสภาวะของการหมัก เช่น ความเร็วอากาศ อัตราการกวน พีเอช และอุณหภูมิตลอดช่วงการหมัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของการหมัก และชนิดของผลิตภัณฑ์รวมถึงชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้อีกด้วย

1.1.4 การแยกผลิตภัณฑ์และการทำให้บริสุทธิ์ (product isolation and product purification) เป็นขั้นตอนในการแยกผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาโดยอาศัยเทคนิคต่าง ๆ เช่น การกรอง การปั่น การตกตะกอน การสกัดด้วยตัวทำละลาย การตกผลึก การระเหย และการทำให้แห้ง ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ เมื่อแยกผลิตภัณฑ์ได้ออกมาแล้ว จึงนำมาทำให้บริสุทธิ์โดยอาศัยเทคนิคทางโครมาโตกราฟฟี่ เช่น โครมาโตกราฟฟี่แบบดูดซับ (adsorption chromatography) โครมาโตกราฟฟี่แบบแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange chromatography) และเจลโครมาโตกราฟฟี่ (gel chromatography)

1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการหมัก

1.2.1 อาหาร จุลินทรีย์ทุกชนิดต้องการอาหารโดยเฉพาะสารประกอบคาร์บอนเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานไนโตรเจนเพื่อใช้สังเคราะห์โปรตีน วิตามิน และแร่ธาตุใช้ในการเจริญจุลินทรีย์ บางชนิดสามารถสังเคราะห์วิตามินได้เอง บางชนิดใช้สารประกอบอนินทรีย์เป็นอาหาร ได้แก่ ยีสต์ รา แบคทีเรีย การให้อาหารแก่จุลินทรีย์มีความจำเป็นต้องให้พอเหมาะไม่มากไม่น้อยเกินไป อาหารเป็นแหล่งพลังงานสำหรับการเจริญและการทวีจำนวนของจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบลักษณะและองค์ประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อ

1.2.2 ความชื้น ปริมาณน้ำส่วนที่จุลินทรีย์ใช้ไปในการดำรงชีพเรียกว่า water activity (Aw) แบคทีเรียต้องการน้ำมากกว่ายีสต์ และรา ดังนั้นค่า Aw ของแบคทีเรียจึงเท่ากับ 1 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำบริสุทธิ์ และสามารถเจริญในสารละลายน้ำตาลไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ หรือน้ำเกลือไม่

เกิน 0.85 เปอร์เซ็นต์ (อรุณี, 2530) ส่วนราต้องการความชื้นน้อยกว่ายีสต์และแบคทีเรีย ดังนั้นในกระบวนการหมักแบบแห้ง จึงใช้ราเป็นหลัก

1.2.3 อุณหภูมิ จุลินทรีย์จะเจริญได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่พอเหมาะ (optimal temperature) และอาจจำแนกชนิดของจุลินทรีย์ตามช่วงอุณหภูมิที่เจริญได้เป็น 3 ชนิด (อรุณี, 2530) คือ

psychrophiles ได้แก่ จุลินทรีย์ที่เจริญได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ เช่น 0-10 องศาเซลเซียส

mesophiles ได้แก่ จุลินทรีย์ที่เจริญได้ดีในช่วงอุณหภูมิปานกลาง เช่น 20-45 องศาเซลเซียส

thermophiles ได้แก่ จุลินทรีย์ที่เจริญได้ดีในอุณหภูมิสูง คือสูงกว่า 45 องศาเซลเซียส

เนื่องจากการเจริญของจุลินทรีย์ในระหว่างการหมัก ทำให้เกิดพลังงานความร้อนอันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาชีวเคมีในการออกซิไดซ์สารอาหารของจุลินทรีย์ และจุลินทรีย์แต่ละชนิดมีสภาพอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการหมักให้ดี การควบคุมอุณหภูมิของถังหมักอาจทำได้โดยใช้ระบบหล่อเย็น (cooling water) เมื่ออุณหภูมิของระบบสูงขึ้น และตัวให้ความร้อน (heater) เมื่ออุณหภูมิของระบบลดต่ำลง

1.2.4 ออกซิเจน ในกระบวนการเมตาบอลิซึมต้องใช้การหายใจซึ่งต้องใช้ออกซิเจน และกระบวนการนี้จะเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะจุลินทรีย์จำพวกใช้อากาศ (aerobic) เท่านั้นที่ต้องใช้ ทำให้ได้พลังงานเพื่อการเจริญเติบโต ออกซิเจนมีความสำคัญต่อการเจริญของจุลินทรีย์มากโดยเฉพาะพวกที่ต้องการออกซิเจน เช่น ราจะเจริญในที่มีออกซิเจนเท่านั้น ส่วนยีสต์จะมีหรือไม่มีออกซิเจนก็เจริญได้แต่มีสภาพการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน สำหรับแบคทีเรียมีทั้งชนิดที่ต้องการและไม่ต้องการออกซิเจน ปริมาณออกซิเจนในอาหารจะเป็นตัวควบคุมอัตราการเจริญเติบโตและการผลิตสารเมตาบอไลท์เพื่อใช้ในการเผาผลาญอาหาร โดยความต้องการออกซิเจนจะขึ้นกับส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อ ส่วนประกอบของอาหารบางอย่าง เช่น แป้งหรือโพลีแซคคาไรค์อื่นๆ จะทำให้เกิดความหนืดในอาหารเลี้ยงเชื้อซึ่งส่งผลต่อการให้อากาศ ซึ่งทำให้อัตราการส่งผ่านออกซิเจนเข้าสู่เซลล์ลดลง จึงใช้วิธีอัดอากาศเข้าไปในอาหารเลี้ยงเชื้อ

1.2.5 ค่าพีเอช จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ชอบอาหารที่มีพีเอชกลางๆประมาณ 6.6-7.5 แบคทีเรียไม่สามารถทนต่อพีเอชต่ำได้เท่ายีสต์หรือรา ถ้าอาหารที่มีพีเอชต่ำกว่า 3.5 แบคทีเรียส่วนใหญ่จะไม่เจริญ(สมใจ, 2537) ดังนั้นการเน่าเสียของอาหารที่มีกรดสูง เช่น ผลไม้มักจะเกิดยีสต์หรือรามากกว่า (วราวุฒิ, 2529) ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ในการหมักมีคุณสมบัติเป็นบัฟเฟอร์อยู่แล้ว ซึ่งมักมีค่าอยู่ในช่วง 4.5-5.0 แต่ระหว่างการหมักหลายชนิดพีเอชอาจเปลี่ยนเร็วมาก และมีช่วงกว้างมากจนกระทั่งไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมให้พีเอชของการหมักอยู่ในช่วงที่พอเหมาะ โดยอาศัยเครื่องมือวัดและควบคุม

กระบวนการหมักแบบแห้ง

1. ความหมายของกระบวนการหมักแบบแห้ง

เป็นการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์บนอาหารแข็งที่ไม่ไม่ละลายน้ำ การเตรียมวัสดุหมักจะใช้น้ำเพื่อปรับให้วัสดุหมักให้มีความชื้นเพียงพอต่อการเจริญของจุลินทรีย์ โดยที่น้ำในระบบจะอยู่ในรูปของความชื้น (moisture) บนวัสดุหมัก และไม่มีน้ำส่วนเกินอยู่ภายนอกวัสดุหมักหรืออาจกล่าวได้ว่าไม่มีน้ำอิสระ (free water) อยู่ในระบบการหมักแบบแห้ง ส่วนใหญ่เหมาะกับราที่สร้างเส้นใย เช่น ยีสต์และแบคทีเรียบางชนิด (วราวุฒิ, 2529) โดยที่การเจริญของจุลินทรีย์จะหยุดชะงักลงถ้าปริมาณความชื้นของอาหารต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ (ดุษณี, 2537) วัสดุหมักที่ใช้หมักนี้ได้แก่ เมล็ดธัญพืช รำข้าวสาลี รวมทั้งของเสียจากกระบวนการผลิตอาหาร (Smith, 1985; Mudgett, 1986)

2. ลักษณะของการหมักแบบแห้ง (characteristic of solid-state fermentation)

ลักษณะของการหมักแบบแห้งทั่วไปพอจะแบ่งออกได้ตาม Hesseltine (1977) ดังนี้ (วราวุฒิ, 2529)

1.1 วัตถุดิบที่นิยมใช้ในการหมักเป็นผลิตภัณฑ์จากพืช เช่น พวกธัญพืช ถั่ว และผลิตภัณฑ์จากพืชและสัตว์ที่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต และโปรตีนสูง

1.2 วัตถุดิบที่นิยมใช้ต้องควบคุมขนาดให้เหมาะสม เพื่อให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุหมักเพียงพอให้อากาศถ่ายเทหมุนเวียนได้เป็นอย่างดี

1.3 ส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อที่สำคัญ ได้แก่ น้ำ นอกจากนี้จำเป็นต้องเติมสารอาหารอื่นๆ เช่น แหล่งไนโตรเจนหรือเกลือแร่ เป็นต้น

1.4 การปนเปื้อนด้วยแบคทีเรียชนิดที่ไม่ต้องการในระหว่างการหมักแบบแห้งลดน้อยลง เนื่องจากความชื้นในระบบค่อนข้างต่ำ จึงเหมาะสมกับการเจริญของรา แต่ไม่เหมาะต่อการเจริญของแบคทีเรีย

1.5 ในระหว่างการหมักแบบแห้ง มักเกิดปัญหาความร้อนสะสมอยู่มาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิในระบบไม่ให้สูงเกินจนเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ที่ใช้

3. <u>ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในกระบวนการหมักแบบแห้ง</u>

วราวุฒิ และรุ่งนภา (2532) กำเนิด (2534) และ Mudgett (1986) ได้สรุปปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการหมักแบบแห้งไว้ดังนี้

3.1 ต้นเชื้อจุลินทรีย์ (inoculum) ควรต้องเตรียมให้อยู่ในรูปสปอร์ และต้องมีอัตราการงอก (germinate) ที่รวดเร็วและมีลักษณะเดียวกัน (uniform) ที่สูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป

3.2 ระดับความชื้นของวัสดุหมักต้องปรับให้เหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ และต้องพยายามควบคุมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมตลอดเวลา ถ้าความชื้นของวัสดุหมักสูงเกินไปก็จะเกิดปัญหาการถ่ายเทอากาศภายในวัสดุหมักไม่ดีพอ ทำให้ผลผลิตจากการหมักก็จะลดต่ำลงด้วย

3.3 ถังหมักที่ใช้ต้องเลือกให้ถูกวัตถุประสงค์ของการหมัก และกำลังการผลิตที่ต้องการ ควรมีการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบความเหมาะสมของระบบการหมักพร้อมทั้งประเมินความเป็นไปได้ทางการค้า

3.4 การเตรียมวัสดุหมักต้องเตรียมให้สภาพของวัสดุหมักให้อยู่ในสภาพที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่าย และนำไปใช้ได้ง่าย เช่น วัสดุหมักต้องมีขนาดพอเหมาะต่อการถ่ายเทมวลและความร้อน ถ้าวัสดุหมักมีขนาดใหญ่ไปทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้เต็มที่ ทำให้ประสิทธิภาพการหมักลดลงเป็นต้น

3.5 รูปทรงของอนุภาค (particle shape) มีผลต่ออัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอนุภาค เช่น เดียวกับขนาดของอนุภาค นอกจากนั้นยังมีผลต่อการบรรจุอาหารลงในถังหมักและเป็นตัวบอกถึงช่องว่างสำหรับการแพร่ของออกซิเจนระหว่างอนุภาค อย่างไรก็ตามความสำคัญของรูปทรงอนุภาคไม่ค่อยได้รับความสนใจมากนัก แต่ยังมีหลักการของรูปทรงอนุภาค ดังนี้

3.5.1 รูปทรงแบบลูกบาศก์เมื่อบรรจุวัสดุหมักจะแน่นและมีช่องว่างน้อย

3.5.2 อาหารแห้งที่มีลักษณะเป็นแผ่นจะมีพื้นที่ผิวมาก

3.5.3 อนุภาคที่มีลักษณะทรงกลมตันเมื่อบรรจุแล้วจะมีช่องว่างเกิดขึ้นมาก

3.5.4 อนุภาคที่มีน้ำหนักมากเกินไป น้ำจะไปอุดรูช่องว่างของวัสดุหมักทำให้อากาศถ่ายเทได้ไม่สะดวก และน้ำจะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของวัสดุหมัก ซึ่งอาจทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคนั้นหายไป

3.5.5 อนุภาคที่ประกอบด้วยอนุภาคหลายๆขนาด อนุภาคที่ละเอียดจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างที่เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่จะเป็นการลดช่องว่างระหว่างอนุภาค

3.5.6 อนุภาคเรียวยาวจะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตรค่อนข้างมาก และอนุภาคอาจจะยาวเรียงต่อกันไป

3.6 การถ่ายต้นเชื้อจุลินทรีย์ต้องใช้ต้นเชื้อที่อยู่ในรูปที่เหมาะสม เช่น กระบวนการหมักแบบแห้งมักใช้ราในการหมัก ต้นเชื้อราควรอยู่ในรูปสปอร์ที่มีอัตราการงอกเป็นเส้นใยสูง

3.7 อุณหภูมิ และพีเอช ในกระบวนการหมักแบบแห้งนั้น อุณหภูมิ และพีเอช นับว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญ โดยที่การควบคุมอุณหภูมิและพีเอชในการหมักแบบแห้งนั้นทำได้ยาก เนื่องจากมิได้อยู่ในของเหลวจึงทำการวัดโดยตรงไม่ได้ เพราะของแข็งที่เป็นอาหารนั้นมีความชื้นในปริมาณที่ต่ำ

3.8 การเติมอากาศ มีความสำคัญต่อการหมักเนื่องจากออกซิเจนที่เพียงพอจะช่วยรักษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญ และเป็นการระบายคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีมากเกินไปใน

กระบวนการ นอกจากนั้นยังมีความสำคัญในการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างอาหารที่หมัก

3.9 การส่งถ่ายมวล และการส่งถ่ายความร้อนต้องสามารถทำได้สะดวก

3.10 การเก็บเกี่ยวผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมักแบบแห้งทำได้ยาก

4. <u>ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของกระบวนการหมักแบบแห้ง</u>

4.1 ข้อได้เปรียบของระบบหมักแบบแห้ง แบ่งออกได้ดังนี้ (วราวุฒิ, 2529)

4.1.1 อาหารเลี้ยงจุลินทรีย์เตรียมได้ง่าย

4.1.2 ใช้พื้นที่ในการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการหมักไม่มาก

4.1.3 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการขยายสู่ระดับอุตสาหกรรม ไม่ค่อยยุ่งยากและไม่แตกต่างจากที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

4.1.4 ต้นเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้อยู่ในรูปของสปอร์ จึงไม่จำเป็นต้องมีถังหมักสำหรับเตรียมต้นเชื้อ ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย

4.1.5 สภาพการเจริญของจุลินทรีย์ เช่นรา มีลักษณะคล้ายคลึงกับที่อยู่ในธรรมชาติ จึงทำให้มีระยะเวลาการปรับตัว (lag phase) ของจุลินทรีย์สั้น

4.1.6 ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถสกัดออกได้โดยตรง โดยใช้วิธีที่ง่าย และสะดวก

4.1.7 สภาวะการปนเปื้อนเกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากมีความชื้นต่ำ ทำให้ไม่เหมาะต่อการเจริญของแบคทีเรีย

4.2 ข้อเสียเปรียบของกระบวนการหมักแบบแห้ง แบ่งออกได้ดังนี้

4.2.1 มีความจำกัดต่อชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ (โดยส่วนใหญ่เป็นรา นอกจากนั้นได้แก่ แบคทีเรีย ยีสต์ และสเตรปโตมัยซิสบางสายพันธุ์) ซึ่งจุลินทรีย์นั้นจะต้องสามารถเจริญได้ในสภาพที่มีความชื้นต่ำ

4.2.2 ปัญหาความร้อนที่สะสมในปริมาณสูงเมื่อหมักในปริมาณมาก เนื่องจากวัสดุหมักมีค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ค่อนข้างต่ำ ทำให้การถ่ายเทความร้อนออกจากวัสดุหมักเกิดขึ้นได้ยาก

4.2.3 การติดตามผลการหมัก เช่น พีเอช ความชื้นในวัสดุหมัก สามารถทำได้ยาก

4.2.4 ใช้ต้นเชื้อในปริมาณสูง

4.2.5 วัสดุหมักที่ใช้หมักจำเป็นต้องผ่านการแปรสภาพ (pretreatment) ก่อน

4.2.6 การหาค่ามวลของเส้นใย (mycelial mass) สามารถทำได้ยาก

5. <u>ชนิดของถังหมักในกระบวนการหมักแบบแห้ง</u>

5.1 ถังหมักแบบถาด (tray bioreactor)

การหมักแบบถาดเป็นเทคนิคที่ง่าย ไม่มีการให้อากาศและไม่มีการกวนวัสดุหมัก วัสดุหมักจะถูกเกลี่ยเป็นชั้นบางๆบนวัสดุที่ตื้น ได้แก่ ถาดอะลูมิเนียม ไม่มีการเจาะรูให้อากาศบริเวณก้นถาด ดังนั้นปัญหาที่พบ คือ ปริมาณวัสดุหมักที่จะหมักมีปริมาณจำกัด สามารถหมักได้เป็นชั้นบาง ๆ และความหนาของวัสดุหมักควรหนาไม่เกิน 5 เซนติเมตร เพื่อหลีกเลี่ยงความร้อนที่เพิ่มสูงเกินไป และเพื่อให้ซับสเตรทได้รับอากาศอย่างทั่วถึง (Tunga *et al*., 1999) นอกจากนี้ Ghildyal *et al*. (1992) ได้ศึกษาการหมักในถังหมักแบบถาด โดยหมักส่วนผสมของรำข้าวสาลีและแป้งข้าวโพดด้วยรา *Aspergilus niger* CFTRI 1105 พบว่าประสิทธิภาพการหมักจะลดต่ำลงเมื่อเพิ่มความสูงของซับสเตรท และระบบยากต่อการควบคุม นอกจากนี้เมื่อวัสดุหมักมีความหนา จะเกิดปัญหาในเรื่องการถ่ายเทความร้อน และการควบคุมตัวแปรต่างๆ เช่น ความชื้น พีเอช และอุณหภูมิทำได้ยากขึ้น (Mitchell and Lonsane, 1992)

5.2 ถังหมักแบบหมุน (rotating drum bioreactor)

ถังหมักแบบหมุนถูกออกแบบเพื่อปรับปรุงระบบการให้อากาศให้เพียงพอ และการผสมของวัสดุหมักให้เข้ากันได้ดี แต่มีข้อจำกัด คือ การทำลายจุลินทรีย์และผลิตภัณฑ์จากแรงเฉือน (shear force) และความร้อนที่สูงขึ้น การผสมและการให้อากาศแก่ชั้นวัสดุหมักทำได้ 2 วิธีได้แก่ วิธีแรกโดยการหมุนของตัวถัง (Silman, 1980; Stuart *et al*., 1999) และวิธีที่สองโดยการติดตั้งใบกวนหรือแผ่นกั้น (baffle) ติดกับผนังด้านในของถัง (Nagel *et al*., 2001a, 2001b)

ถังหมักแบบหมุนประกอบด้วยลูกกลิ้งซึ่งทำหน้าที่ยึดและหมุนตัวถัง นอกจากนี้ยังมีถังหมักแบบหมุนที่ใช้หลักการเฟืองขับ โดยหมุนที่ความเร็วรอบต่างๆ การผสมกันภายในถังหมักแบบหมุนจะเกิดขึ้นโดยการกลิ้งหรือการหมุนของตัวถังหมักอย่างช้าๆ เป็นการผสมโดยวิธีทางกล เช่น ใบกวน อาจมีผลทำลายจุลินทรีย์ หรือทำลายโครงสร้างของอาหาร อย่างไรก็ตามปัญหาอาจเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการจับตัวเป็นก้อนของอาหาร หรืออาจเกิดการสีกันระหว่างอนุภาคทำให้จุลินทรีย์ตายได้ ถังหมักแบบหมุนประกอบด้วยช่องทางเข้าและออกของอากาศ โดยอากาศอาจเข้าสู่ถังหมักโดยผ่านทางด้านล่างถังหรือตามแนวความยาวถังโดยหัวฉีดแบบพ่นฝอย การระบายอากาศออกจากถังหมักจะใช้พัดลมดูดอากาศติดตั้งตรงฝั่งตรงข้ามของช่องทางเข้าของอากาศ (Takamine, 1914) อากาศจะผ่านการฆ่าเชื้อและเพิ่มความชื้นจากน้ำกลั่นก่อนเข้าสู่ถังหมัก นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของถังหมักโดยการติดตั้งแผ่นกั้นเพิ่มเติมที่เพลาหมุนตัวถังหรืออาจแบ่งถังหมักเป็น 3 ส่วน ใน 4 ส่วน (Lindenfelser and Ciegler, 1975) โดยทุกส่วนของถังหมักต้องสามารถถอดประกอบเพื่อล้างทำความสะอาด และฆ่าเชื้อได้

5.3 ถังแพคเบด (packed-bed reactor)

ถังแพคเบดเป็นเครื่องปฏิกรณ์ชนิดหนึ่งที่ใช้งานมากในอุตสาหกรรมเคมี เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกสูง นิยมทำจากแก้วหรือพลาสติก ขนาดของถังขึ้นอยู่กับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน โดยคำนึงถึงสัดส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง นอกจากนี้มีจุดเด่นเฉพาะตัวของถังแพคเบดก็คือ ภายในถังจะบรรจุของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวอย่างมีรูปบนพื้นผิวที่มี รูพรุน ซึ่งเป็นช่องทางการอัดอากาศผ่านไปยังชั้นวัสดุหมัก (Mitchell and Lonsane, 1992; Walas, 1988) ถังหมักแบบแพคเบดมักวางอยู่ในห้องที่มีอุณหภูมิคงที่หรือมีระบบน้ำหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิ การให้อากาศมีความสำคัญมากในระบบนี้ โดยปกติอากาศจะถูกส่งเข้าไปในคอลัมน์ทางด้านล่างด้วยอากาศชื้นเพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุหมักแห้งเกินไป

อากาศนอกจากเป็นแหล่งออกซิเจนของจุลินทรีย์พวกที่ใช้ออกซิเจนแล้วยังช่วยระบายความร้อนในแพคเบดด้วย โดยความร้อนสามารถถ่ายเทไปยังอากาศได้โดยการพาความร้อน จากเหตุผลดังกล่าว ความชื้น อัตราการไหลของอากาศ มักถูกควบคุมให้คงที่เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ โดยให้มีการสูญเสียน้ำในอาหารเลี้ยงเชื้อน้อยที่สุด (มณีรัตน์, 2542) การหมักในถังแพคเบดเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นระบบปิดจึงลดการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์อื่นๆได้มากกว่าแบบถาด และไม่ทำให้เกิดปัญหาการทำลายเส้นใยจากการหมุนเมื่อเปรียบเทียบกับถังหมักแบบหมุน (Ghildyal *et al*., 1994)

สามารถนำถังแพคเบดไปใช้งานสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย โดยมีจุดประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นที่ไหลผ่านเบด ใช้เป็นที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ใช้ตรึงเอนไซม์ในกระบวนการเชิงวิศวกรรมชีวเคมี เป็นต้น

5.3.1 ข้อดีและข้อเสียของถังหมักแบบแพคเบด แบ่งได้ดังนี้ (มณีรัตณ์, 2542)

ถังหมักแบบแพคเบดมีข้อดี คือ สามารถควบคุมตัวแปรของระบบได้ดีกว่าถังแบบถาด และถังหมักแบบนี้ไม่ทำลายจุลินทรีย์ เช่น ทำลายเส้นใยของรา เนื่องจากไม่มีการเคลื่อนที่ นอกจากนั้นยังประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับถังหมักแบบหมุน (rotary drum reactor) เนื่องจากไม่มีการหมุนและไม่มีการกวน สุดท้ายถังหมักแบบแพคเบดยังประหยัดเนื้อที่มากกว่าการหมักแบบถาด

ถังหมักแบบแพคเบดมีข้อเสียคือ จะมีปัญหาการถ่ายเทความร้อน ทำให้เกิดความร้อนสะสมในระบบ และทำการแยกหรือนำผลิตภัณฑ์ออกจากถังหมักได้ยากกว่าการหมักแบบถาด

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับรา

1. ความหมายของรา

ราเป็นฟังไจ (fungi) ชั้นสูงที่มีการเติบโตแบบเส้นใย ที่เรียกว่า ไมซีเลียม (mycelium) เป็นจุลินทรีย์ที่สังเกตุได้ง่ายมีสีสันต่างๆกัน ราบางชนิดทำให้อาหารเสีย และบางชนิดมีประโยชน์ในการแปรรูปอาหาร เช่น ใช้การผลิตเนยแข็ง กรดอะซิตริก และ เอนไซม์อะไมเลส จากลักษณะไฮฟา

ทำให้แบ่งราออกเป็น 2 จำพวกคือ เซพเทต (septate) หมายถึง ราชนิดที่มีผนังกั้นเซลชัด มีลักษณะเป็นเซลต่อกันในสายไฮฟา และ อะเซพเทต (aseptate) หมายถึง ราชนิดที่ไม่มีผนังกั้นเซลล์สายไฮฟามีลักษณะกระจัดกระจาย ซึ่งทั้งคู่มีการขยายพันธ์แบบใช้สปอร์ แบ่งเป็น

1.1 สปอร์รา (asexual) มีลักษณะต่างๆกัน เช่น คอนนิเดีย (conidia) เป็นกลุ่มของสปอร์ที่อยู่ปลายไฮฟา ไม่มีสิ่งห่อหุ้ม และแองจิสปอร์ (angispore) เป็นสปอร์ที่อยู่ภายในกระเปาะ (sporangium)

1.2 สปอร์เพศ (sexual spores) โดยทั่วไปราต้องการความชื้นน้อยกว่าแบคทีเรียและยีสต์ ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญอยู่ในช่วง 25 ถึง 30 องศาเซลเซียส ราส่วนใหญ่ทนอุณหภูมิสูงไม่ได้ นอกจากนั้นยังต้องการออกซิเจน และต้องการพีเอชต่ำ ใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นแหล่งพลังงาน

เนื่องจากรามีการเกาะรวมกันจึงเป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของอากาศ ซึ่งออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำรงชีวิตของเชื้อราทุกชนิด ราที่สำคัญในอุตสาหกรรมได้แก่ *Aspergilus* ใช้สำหรับการผลิตกรดจุลินทรีย์ ยาปฏิชีวนะ และเอนไซม์

2. <u>การดำรงชีวิตของรา</u>

การดำรงชีพของราจะอาศัยอาหารจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆ หรือซากพืช สัตว์ ราต่างชนิดกันมีความต้องการสารอาหารที่ไม่เหมือนกัน (พิไลพรรณ, 2525) ราบางชนิดสามารถใช้สารอาหารได้หลายประเภท แต่ราบางชนิดมีความจำเพาะต่อสารอาหาร คือ สามารถเจริญในสารอาหารไม่กี่ชนิด ถ้าเปลี่ยนสารอาหารอาจทำให้ไม่เจริญได้

สารอาหารที่ราต้องการในการเจริญมีหลายประเภท ส่วนมากราเจริญได้ดีในแหล่งอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตสูง หรือมีแหล่งคาร์บอนมาก (พิบูลย์, 2541) ส่วนแหล่งอาหารอื่นๆ เช่น แหล่งไนโตรเจน ซึ่งราสามารถนำแหล่งไนโตรเจนมาใช้ในการสร้างโปรตีน นอกจากนี้รายังต้องการแหล่งวิตามินมาใช้ในการเจริญ และสืบพันธุ์ การใช้สารอาหารของราทำได้โดยราจะปล่อยน้ำย่อยหรือพวกเอนไซม์ออกมาย่อยสารอาหารแล้วทำการดูดซึมมาใช้ ซึ่งสารอาหารจะสะสมอยู่ในรูปไกลโคเจน หรือไขมัน

สภาวะแวดล้อมในการเจริญของราต้องมีความเหมาะสม (พิไลพรรณ, 2525) ราจะเจริญในที่มีความชื้นพอสมควร น้ำที่อยู่ในรูปความชื้นมีหน้าที่ในการรักษาความดันภายในเซลล์ให้คงที่ ช่วยรักษาอัตราการแตกกิ่งและการเพิ่มเส้นใยให้คงที่ (Gervais and Molin, 2003) ราสามารถเจริญได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่ราเจริญที่อุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 30 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การเจริญของราลดลง และที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ราเกือบทุกชนิดตายหมด แต่สปอร์ของรายังอยู่ ถ้าต้องการกำจัดสปอร์ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 องศาเซลเซียส นอกจากนี้อาหารเลี้ยงเชื้อควรมีพีเอชประมาณ 5-6 ราส่วนมาใช้ออกซิเจนในการเจริญของรา

3. <u>วงจรการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์</u>

การเจริญของจุลินทรีย์ หมายถึง ปฏิกิริยาระหว่างจุลินทรีย์กับสิ่งแวดล้อมอันได้แก่ อุณหภูมิ พีเอช และความเข้มข้นของสารอาหาร เป็นต้น ในอีกแง่หนึ่งการเจริญของจุลินทรีย์อาจหมายถึง การเติบโตหรือการให้สารอาหารแก่จุลินทรีย์แต่ละเซลล์ อันเป็นกระบวนการที่สลับซับซ้อน และได้มาจากผลรวมของเมตาบอลิซึมของเซลล์ โดยทั่วไปเมื่อจุลินทรีย์มีการเจริญ จะมีการเปลี่ยนแปลงของแต่ละเซลล์โดยเซลล์จะเพิ่มขนาดขึ้นก่อน จากนั้นก็จะแบ่งตัวออกเป็นสองเซลล์ (binary division) อัตราการเจริญของจุลินทรีย์โดยปกติจะเป็นรูป sigmoid curve (s-shape) เช่นเดียวกับจุลินทรีย์อื่นๆ อัตราการเจริญสูงสุดของจุลินทรีย์จะอยู่ที่จุดเมื่อเซลล์มีขนาดประมาณสามในสี่ของเซลล์ที่โตเต็มที่ (ในช่วงที่มีการแบ่งเซลล์) และอัตราการเจริญต่ำสุดจะอยู่ที่จุดก่อนและหลังการแบ่งเซลล์เล็กน้อย การศึกษาการเจริญของจุลินทรีย์มักแบ่งวงจรการเจริญออกเป็นระยะต่าง ๆ โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการเจริญ (growth rate) โดยปกติแล้วแบ่งออกเป็น 4 ระยะ คือ lag phase, log phase หรือ exponential phase, stationary phase และ death phase (วราวุฒิ, 2529)

4. <u>รา *Rhizopus oligosporus*</u>

รา *Rhizopus oligosporus* เป็นราจำพวกไซโกไมโคตินา (zygomycotina) ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นใย โดยเส้นใยจะมีการเพิ่มจำนวนและรวมกลุ่มกันจนมีขนาดใหญ่ ดังภาพที่ 1 สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเรียกว่า ไมซีเลียม (mycelium) ซึ่งมีลักษณะคล้ายปุยฝ้ายแผ่กระจายเต็มภาชนะ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Fluffy (Frazier 1967) เส้นใยของ *R. oligosporus* สามารถเจริญได้สองทิศทาง ในตามขวางจะเจริญไปอย่างเต็มที่แล้วจึงหยุดเจริญ ส่วนการเจริญตามยาวของเส้นใยจะขยายออกไปและแตกแขนงอย่างไม่จำกัดตราบเท่าที่สภาวะแวดล้อมยังเหมาะสม เส้นใยที่มารวมเป็นไมซีเลียมจะประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกเป็นไมซีเลียมที่ยึดเกาะกับอาหารเรียกว่า vegetative

mycelium ทำหน้าที่ดูดสารอาหารไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ และส่วนที่สองเป็นไมซีเลียมที่ยื่นไปในอากาศ เรียกว่า aerial mycelium หรือ reproductive mycelium ทำหน้าที่สร้างสปอร์เพื่อการสืบพันธุ์ (Bilgrami and Verma, 1978)

ภาพที่ 1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรา *Rhizopus* spp.
ที่มา: BioImages (1976)

รา *R. oligosporus* สืบพันธุ์ได้ทั้งแบบอาศัยเพศ และไม่อาศัยเพศสปอร์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ อยู่ภายในอับสปอร์ (sporangium) ซึ่งอยู่บนก้านชูสปอร์ (sporangiophore) สำหรับสปอร์ที่เกิดจากการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศจะเรียกว่า ไซโกสปอร์ (zygospore) (Deacon, 1997) ผนังเซลล์ประกอบด้วยสารไคโตซานและไคติน ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับเซลล์

4.1 สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญของรา *Rhizopus oligosporus*

ได้มีการคัดเลือกรา *R. oligosporus* ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้เป็นเชื้อบริสุทธิ์ทั้งในการหมักเทมเป้ การผลิตเอนไซม์และการผลิตกรดอินทรีย์ ถึงระดับสายพันธุ์ไว้หลายสายพันธุ์ด้วยกัน เช่น *R. oligosporus* NRRL 1521, NRRL 2710, NRRL 5905 และ CBS 338.62 (Ko, 1985) สายพันธุ์เหล่านี้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมหลายประการด้วยกัน ได้แก่

4.1.1 เจริญได้ดีที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 42 เซลเซียส และที่พีเอชประมาณ 4.0 (Wang *et al*., 1975; Hesseltine, 1979; Nout and Rombouts, 1990) ราจะสร้างเส้นใยปกคลุมทั่วเมล็ดถั่วภายใน

18 ถึง 20 ชั่วโมง โดยระดับความชื้นที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง 40 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยขึ้นกับวัสดุหมัก (Wang *et al*., 1975)

4.1.2 เป็นสายพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพในการผลิตเอนไซม์โปรติเอส ซึ่งได้พบว่า โปรติเอสที่ผลิตโดย *R. oligosporus* นั้น มีทั้งเอนไซม์ที่มีกิจกรรมการย่อยดีที่สุดที่ พีเอช ประมาณ 3 และเอนไซม์ที่มีกิจกรรมการย่อยสูงสุดที่ พีเอช 5 เอนไซม์ทั้งสองจัดว่าเป็น Acid protease (Wang *et al*., 1975)

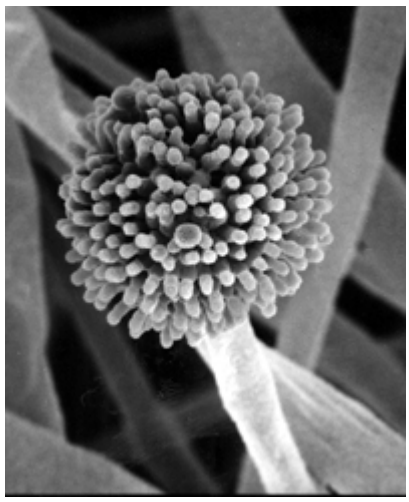
4.1.3 สามารถผลิตเอนไซม์ไลเปสย่อยไขมันในเมล็ดถั่ว (Winarno and Reddy, 1986) นอกจากนี้ยังสามารถผลิตเอนไซม์ย่อยเซลล์พืช เช่น เซลลูเลส ไซลาเนส อะราบิเนส เป็นต้น (Shurtleff and Aoyagi, 1980)

4.1.4 เป็นสายพันธุ์ที่ผลิตสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารต่อต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ได้แก่ 6, 7, 4 trihydroxy isoflavone (Murata, 1977) จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีกลิ่นหืน

5. <u>รา *Aspergillus oryzae*</u>

ราสายพันธุ์พวก *Aspergillus* พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ มักพบอยู่บนพวกผัก ผลไม้ และแหล่งอาหารอื่นๆ ซึ่งราพวกนี้เป็นตัวการที่ทำให้อาหารหลายชนิดเสีย (พวงพร, 2546) แต่บางสายพันธุ์ก็มีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมและมีความสำคัญทางเศรษฐกิจ เนื่องจากรา *A. oryzae* ใช้ในอุตสาหกรรมหมักต่างๆ เช่น การผลิตซีอิ้ว เต้าเจี้ยว กรดซิตริก (citric acid) และกรดกลูโคนิค (gluconic acid) เป็นต้น รูปร่างสัณฐานวิทยาของรา *A. oryzae* มีไมซีเลียมสามารถแตกแขนงได้และมีผนังกั้น เซลล์จะจมอยู่ในอาหาร มีโคนิดิโอเฟอร์ (conidiophore) หรือไฮฟาเกี่ยวข้องกับการสืบพันธุ์ (fertile hypha) จะเกิดขึ้นจากเซลล์เท้า (foot cell) โคนิดิโอฟอร์อาจมีหรือไม่มีผนังกั้นแบ่งที่ยอดของโคนิดิโอเฟอร์จะพองกลมขึ้นเป็นวิสิเคิล (visicle) ซึ่งมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันออกไป และมีก้านเล็กๆ โผล่ขึ้นมาเป็นจำนวนมาก เรียกว่า สตีริกมาต้า (sterigmata) ซึ่งอาจมีชั้นเดียวหรือมีสองชั้น โคดิเนียจะเกิดขึ้นจากสตีริกมาต้าและอยู่ติดต่อกันเป็นลูกโซ่ โคดิเนียอาจมีสีแตกต่างกันซึ่งเป็นลักษณะประจำของสายพันธุ์ย่อย โดยทั่วไปมักมีสีดำ น้ำตาล หรือเขียว เมื่อเติบโตโคโลนีไม่แผ่ขยายมาก สายพันธุ์ *Aspergillus* สามารถเจริญได้ดีในสภาวะที่มีความเข้มข้นของเกลือและน้ำตาลสูง แสดงว่าราสายพันธุ์นี้สามารถสกัดน้ำที่ต้องการเพื่อการเจริญจากสารที่ค่อนข้างแห้งได้ (สุพจน์, 2545)

รา *A. oryzae* ถูกแยกออกจากโคจิได้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1878 โดย Ahlburg มีผู้ทำการศึกษารา *A. oryzae* อย่างกว้างขวางเพราะเป็นราที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการทำโคจิ ซีอิ๊ว เต้าเจี้ยว เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการสร้างเอนไซม์โปรติเอส และอะไมเลสได้สูง นอกจากนี้ยังสามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลส ไลเปส เปปติเดส และอินเวอร์เทส (มณีรัตน์, 2542) อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญของรา *A. oryzae* คือที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (Francis, 2003)



ภาพที่ 2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรา *Aspergilus oryzae*
ที่มา: University of Tokyo (2005)

การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

1. คำจำกัดความเกี่ยวกับการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

1.1 ไอน้ำ (vapor)

ไอน้ำ เป็นน้ำที่อยู่ในสถานะก๊าซ ไอน้ำไม่มีสี ไม่มีกลิ่น น้ำในอากาศสามารถเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปสู่อีกสถานะหนึ่ง หรือแปรเปลี่ยนกลับไปมาได้ ดังในภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันอากาศ การเปลี่ยนสถานะจะมีการดูดหรือการคายความร้อน โดยที่ไม่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เรียกว่า “ความร้อนแฝง” (latent heat) ความร้อนแฝงมีหน่วยวัดเป็นแคลอรีโดยที่ 1 แคลอรี เท่ากับปริมาณความร้อนซึ่งทำให้น้ำ 1 กรัม มีอุณหภูมิสูงขึ้น

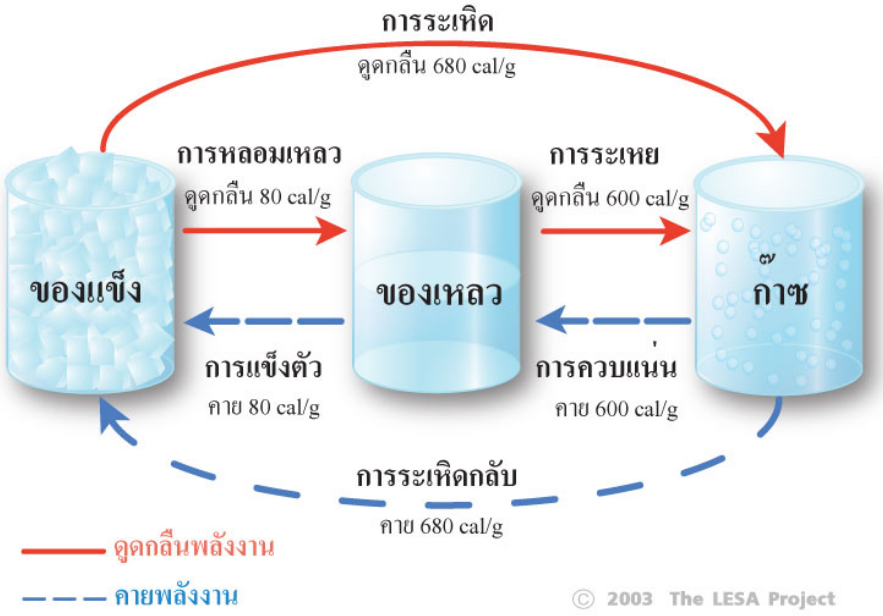
1 องศาเซลเซียส ดังนั้นหากเราเพิ่มความร้อน 10 แคลอรี ให้กับน้ำ 1 กรัม น้ำจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น 10 องศาเซลเซียส (The LESA project kirdkao observatory, 2003)

1.2 การระเหย และการควบแน่น

เมื่อน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ เราเรียกว่า “การระเหย” (evaporation) ซึ่งต้องการดูดกลืนความร้อนแฝง 600 แคลอรี เพื่อที่จะเปลี่ยนน้ำ 1 กรัมให้กลายเป็นไอน้ำ ในทางกลับกันเมื่อไอน้ำกลั่นตัวกลายเป็นหยดน้ำ “การควบแน่น” (condensation) น้ำจะคายความร้อนแฝงออกมา 600 แคลอรี/กรัม เช่นกัน (The LESA project kirdkao observatory, 2003)

1.3 ไอน้ำในอากาศ

หากมีกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถมองถังน้ำในภาพที่ 4 ด้วยกำลังขยายหนึ่งพันล้านเท่า จะสามารถมองเห็นโมเลกุลของน้ำอยู่เบียดเสียดและวิ่งไปวิ่งมา โดยที่โมเลกุลแต่ละโมเลกุลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแตกต่างกัน ช้าบ้าง เร็วบ้าง ซึ่งค่าเฉลี่ยของความเร็วในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก็คือ “อุณหภูมิ” ของน้ำ (พลังงานจลน์) ถ้าโมเลกุลที่อยู่บริเวณผิวน้ำมีความเร็วมากพอ ที่จะทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่หลุดออกไปสู่อากาศ โมเลกุลเหล่านี้จะเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นไอน้ำ ซึ่งก็คือ “การระเหย” นั่นเอง เมื่อเราปิดฝาถังและดันเข้าไปดัง เช่น ในภาพขวามือน้ำที่เคยระเหยเป็นไอน้ำ จะถูกควบแน่นกลับเป็นของเหลวอีกครั้งหนึ่งหาก “จำนวนโมเลกุลของน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอน้ำ จะเท่ากับจำนวนโมเลกุลของไอน้ำที่ควบแน่นกลับเป็นน้ำพอดี” เรียกว่า “อากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำ” ในทางกลับกันหากดึงฝาเปิดออก ไอน้ำในอากาศซึ่งเคยอยู่ในถังจะหนีออกมาก ทำให้จำนวนโมเลกุลของไอน้ำที่มีอยู่ในน้อยกว่าจำนวนโมเลกุลของไอน้ำที่ทำให้อากาศอิ่มตัว อากาศจึงไม่เกิดการอิ่มตัว ปัจจัยในธรรมชาติที่ช่วยให้อากาศไม่เกิดการอิ่มตัวคือ กระแสลม (The LESA project kirdkao observatory, 2003)



ภาพที่ 3 พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ

ที่มา: The LESA project kirdkao observatory (2003)

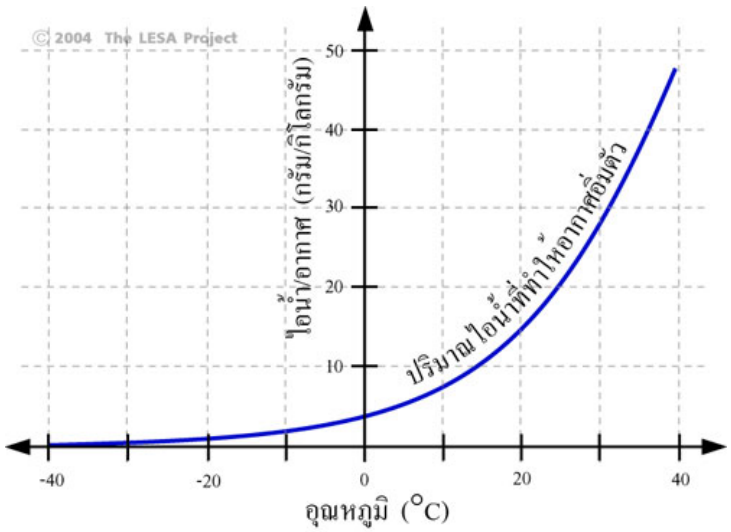
ภาพที่ 4 โมเลกุลของน้ำในภาชนะ

ที่มา: The LESA project kirdkao observatory (2003)

นอกจากความดันแล้วปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการระเหยของน้ำคือ อุณหภูมิของน้ำ น้ำร้อนสามารถระเหยได้ง่ายกว่าน้ำเย็น เนื่องจากความร้อนทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่เร็วขึ้น และหลุดหนีจากสถานะของเหลวไปเป็นก๊าซ ในทำนองกลับกันอากาศเย็นทำให้เกิดการควบแน่นได้

ดีกว่าอากาศร้อน เนื่องจากโมเลกุลของไอน้ำเย็นมีพลังงานน้อยกว่า จึงสูญเสียความเร็วและเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวได้ง่าย

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส อากาศจะต้องการปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้น 2 เท่า เพื่อทำให้เกิดการอิ่มตัว ดังแสดงในภาพที่ 5 ปริมาณของไอน้ำในอากาศขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ อากาศร้อนสามารถเก็บไอน้ำได้มากกว่าอากาศเย็น ดังนั้นหากเราลดอุณหภูมิของอากาศจนถึงจุดๆหนึ่ง จะเกิด “อากาศอิ่มตัว” (saturated air) อากาศไม่สามารถเก็บกักไอน้ำไว้ได้มากกว่านี้ หรือกล่าวได้ว่า อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 5 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำที่ทำให้อากาศ 1 กิโลกรัมเกิดการอิ่มตัว
ที่มา: The LESA project kirdkao observatory (2003)

1.4 ความชื้น (humidity)

จำนวนไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ ความชื้นของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความดัน และอุณหภูมิของอากาศ (The LESA project kirdkao observatory, 2003)

1.5 อากาศแห้ง (dry air)

อากาศที่ไม่มีความชื้นหรือมีในปริมาณน้อยมาก อากาศแห้งจะทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต ซึ่งถ้าอากาศยิ่งแห้งจะทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตแรงขึ้น (The LESA project kirdkao observatory, 2003)

1.6 จุดน้ำค้าง (dew point)

เป็นอุณหภูมิที่ของผสมไอน้ำกับอากาศ อากาศจะถูกลดอุณหภูมิลงมาจนถึงจุดอิ่มตัว โดยที่ค่าความชื้นคงที่ ในกรณีอากาศอิ่มตัวอุณหภูมิจุดน้ำค้างจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิอากาศอิ่มตัว

1.7 ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity หรือ RH)

อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นที่มีอยู่จริงในอากาศกับปริมาณความชื้นที่อากาศขณะนั้นจะมีได้ ณ อุณหภูมิเดียวกัน (ประนอม, 2546) ค่าความชื้นสัมพัทธ์แสดงในรูปของร้อยละ (เปอร์เซ็นต์) หรือ เป็นอัตราส่วนของจำนวนไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อจำนวนไอน้ำที่อาจมีได้จนอิ่มตัวเต็มที่ในอากาศเดียวกันนั้น ความชื้นสัมพัทธ์จึงกำหนดเป็นเรือนร้อย โดยให้จำนวนความชื้นที่อิ่มตัวเต็มที่เป็น 100 ส่วน (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2545)

ดังนั้น 100% RH หมายถึง ไอน้ำอิ่มตัว (saturation gas)
0% RH หมายถึง อากาศแห้ง (vapor-free gas)

$$\text{ความชื้นสัมพัทธ์(\%)} = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศ}}{\text{ปริมาณน้ำที่อากาศนั้นจะมีได้ ณ อุณหภูมิเดียวกัน}} \times 100$$

เครื่องมือที่ใช้วัดความชื้นสัมพัทธ์ เรียกว่า “ไฮโกรมิเตอร์” (hygrometer) ซึ่งมีอยู่หลายหลากชนิด มีทั้งทำด้วยกระเปาะเทอร์มอมิเตอร์ และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ไฮโกรมิเตอร์ซึ่งสามารถทำได้เองและมีความน่าเชื่อถือเรียกว่า “สลิงไซโครมิเตอร์” (sling psychrometer) ประกอบด้วยเทอร์มอมิเตอร์จำนวน 2 อันอยู่คู่กัน โดยมีเทอร์มอมิเตอร์อันหนึ่งมีผ้าชุบน้ำหุ้มกระเปาะไว้ เรียกว่า “กระเปาะเปียก” (wet bulb) ส่วนกระเปาะเทอร์มอมิเตอร์อีกอันหนึ่งไม่ได้หุ้มอะไรไว้ เรียกว่า “กระเปาะแห้ง” (dry bulb) เมื่อหมุนสลิงไซโครมิเตอร์จับเวลา 3 นาที แล้วอ่านค่าแตกต่างของอุณหภูมิกระเปาะทั้งสองบนตารางเปรียบเทียบ ก็จะได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

จากการศึกษาพบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ที่ทำให้รู้สึกสบายอยู่ระหว่าง 35-55 เปอร์เซ็นต์ ถ้าอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำหรือเรียกว่าอากาศแห้ง ความชื้นจะระเหยจากผิวหนังอย่างรวดเร็ว ทำให้รู้สึกชา โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์มีผลที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมและตัวแปรทางกายภาพ ถ้าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ไม่เหมาะสม สูงเกินไปหรือต่ำเกินไป ทำให้รู้สึกไม่สบาย และทำลายอุปกรณ์หรือวัสดุต่างๆ ระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพ

ประเทศไทยมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดปี 72-74 เปอร์เซ็นต์ และลดลงเหลือ 62 ถึง 69 เปอร์เซ็นต์ในช่วงฤดูร้อน ความชื้นที่ภาคต่างๆของประเทศไทย ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สถิติความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของประเทศในช่วงฤดูกาลต่างๆ

ภาค	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)			
	ฤดูหนาว (%)	ฤดูร้อน (%)	ฤดูฝน (%)	เฉลี่ยตลอดปี (%)
เหนือ	73	62	81	74
ตะวันออกเฉียงเหนือ	69	65	80	72
กลาง	71	69	79	73
ตะวันออก	71	74	81	76
ใต้ฝั่งตะวันออก	81	77	78	79
ใต้ฝั่งตะวันตก	77	76	84	80

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2545)

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์มีความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมไม่เท่ากันขึ้นกับแต่ละกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 2 เช่น ในกระบวนการเกี่ยวกับกระดาษถ้ามีความชื้นสัมพัทธ์น้อยเกินไป จะเกิดปัญหาคือ เมื่อพับกระดาษกระดาษจะฉีกขาดได้ง่าย ในกระบวนการผลิตกล่องกล่องจะมีความแข็งแรงน้อยลงเพราะความแข็งแรงที่บริเวณรอยพับน้อยลง ในกระเพาะเลี้ยงเห็ดต้องการอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงมาก มิฉะนั้นเห็ดจะไม่เจริญหรือเจริญแต่ไม่สมบรูณ์ทำให้ได้เห็ดที่ไม่มีคุณภาพ

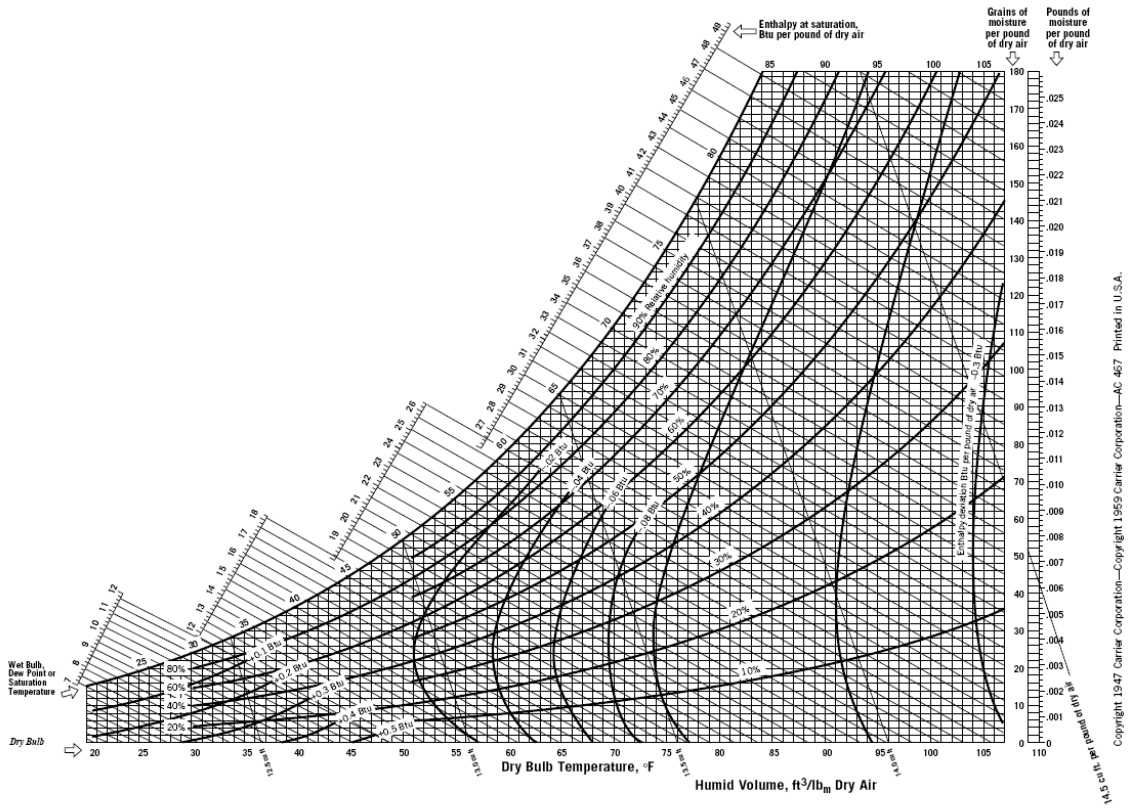
ตารางที่ 2 ระดับความชื้นที่เหมาะสมในกระบวนการต่างๆ

ระบบ หรือ ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
ที่พักอาศัย	70-72	30
เครื่องใช้ไฟฟ้า	70-75	40-55
การเพาะเลี้ยงเห็ด	50-72	80-100
การพิมพ์,ทาสี	60-90	80
ผลิตกระดาษ	70-75	40-50

ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005b)

2. แผนภูมิความชื้น (humidity chart)

แผนภูมิความชื้นแสดงสมบัติของของผสมน้ำที่ความดัน 1 บรรยากาศ ดังภาพที่ 6 สร้างโดยอ้างอิงมาจากแผนภูมิ Grosvenor มีแกนนอนเป็นอุณหภูมิ แกนตั้งเป็นค่าความชื้น แต่ละจุดบนกราฟจะแสดงส่วนผสมที่แน่นอนของอากาศและน้ำ บริเวณเหนือเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์กับอุณหภูมิไปทางด้านซ้ายมือ จะเป็นบริเวณที่ของผสมของอากาศอิ่มตัวกับน้ำ (ของเหลว) เกิดอยู่รวมกันในสภาพการเกิดหมอก (fog formation) บริเวณต่ำกว่าเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์กับอุณหภูมิจะเป็นบริเวณอากาศไม่อิ่มตัว (unsaturated air) นอกจากนี้บนเส้นอุณหภูมิ (แกน X) จัดเป็นบริเวณที่แสดงสภาวะอากาศแห้ง เส้นเอียงที่ลากจากเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์มายังแกนความชื้น คือ เส้นการลดอุณหภูมิแบบอะเดียบาติก (adiabatic saturation temperature) และจุดที่อยู่บนเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงถึงอุณหภูมิแบบอะเดียบาติก (adiabatic saturation temperature) (McCabe *et al*., 2001)

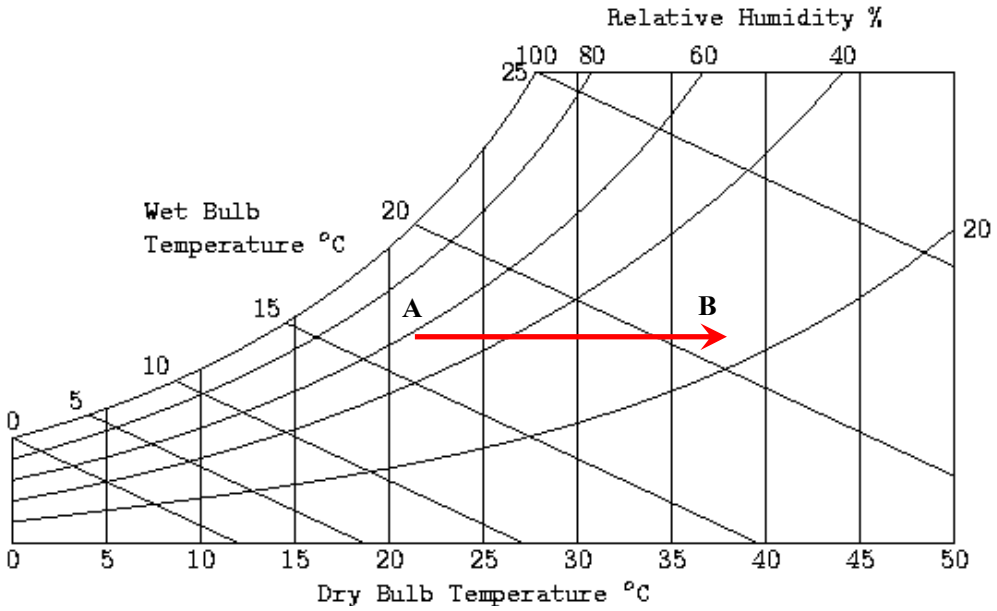


<u>ภาพที่ 6</u> แผนภูมิความชื้น (psychrometric chart)
ที่มา: Felder (1999)

3. <u>กระบวนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ</u>

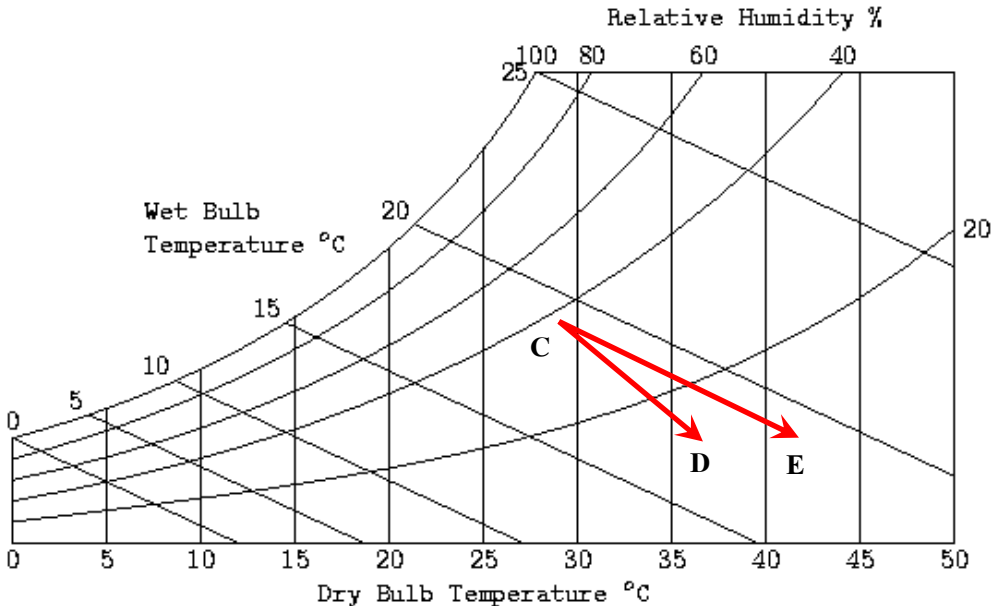
กระบวนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ สามารถสรุปได้มี 6 กระบวนการดังนี้ (ชัยสวัสดิ์, 2523)

3.1 กระบวนการทำความร้อน มีการเพิ่มความร้อนให้กับอากาศโดยที่ไม่เพิ่มหรือลดปริมาณความชื้นในอากาศ (อัตราความชื้นคงที่) จะปรากฏว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาบนแผนภูมิความชื้น ภาพที่ 7 จะปรากฏว่ากระบวนการนี้จะเป็นเส้นตรงแนวราบ AB เริ่มจากด้านซ้ายมือไปขวามือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry bulb) และอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bult) จะเพิ่มขึ้น ค่าเอนทาลปีและปริมาตรจำเพาะจะเพิ่มขึ้นแต่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะลดลง



ภาพที่ 7 กระบวนการทำความร้อน
ที่มา: ชัยสวัสดิ์ (2523)

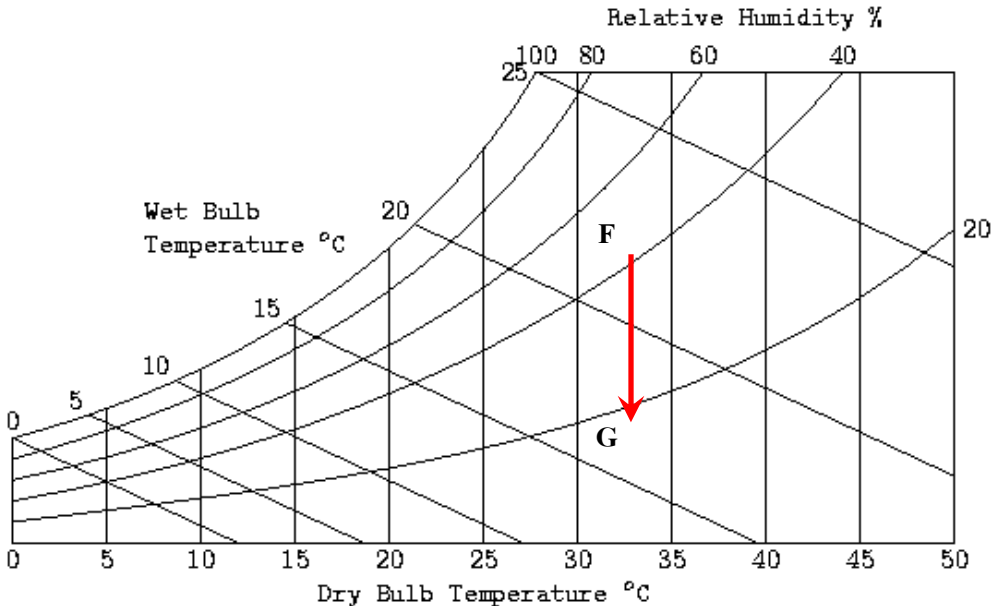
3.2 กระบวนการลดความชื้นโดยวิธีเคมี เป็นกระบวนการที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่ำหลักการของกระบวนการลดความชื้น โดยวิธีการเคมี คือ ใช้สารดูดซึมความชื้นจากอากาศ สารดูดความชื้นดังกล่าว เช่น ซิลิกาเจล เป็นต้น เมื่อความชื้นในอากาศผ่านเข้าไปยังสารดูดความชื้น ความชื้นจากอากาศจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำและถูกดูดซับด้วยสารดูดซับ ขณะที่ความชื้นจากอากาศกลั่นตัวนี้จะคายความร้อนออกมาจำนวนหนึ่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาณความร้อนแฝงของความชื้นที่กลั่นตัวบวกกับความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้อากาศที่ผ่านสารดูดความชื้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาตามทฤษฎีแล้วอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ ก่อนและหลังผ่านการดูดซึมความชื้นควรจะมีอุณหภูมิเท่ากัน เมื่อพิจารณาแผนภูมิความชื้น ดังภาพที่ 8 จะได้ว่ากระบวนการลดความชื้นโดยวิธีเคมีนี้ ดัง เส้นตรง CD ซึ่งทับกับเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศก่อนจะถูกดูดซึมความชื้น แต่ความเป็นจริงอากาศที่ผ่านสารดูดซึมความชื้นจะมีอุณหภูมิสูงกว่าตามทฤษฎี มีสภาพตามจุด E



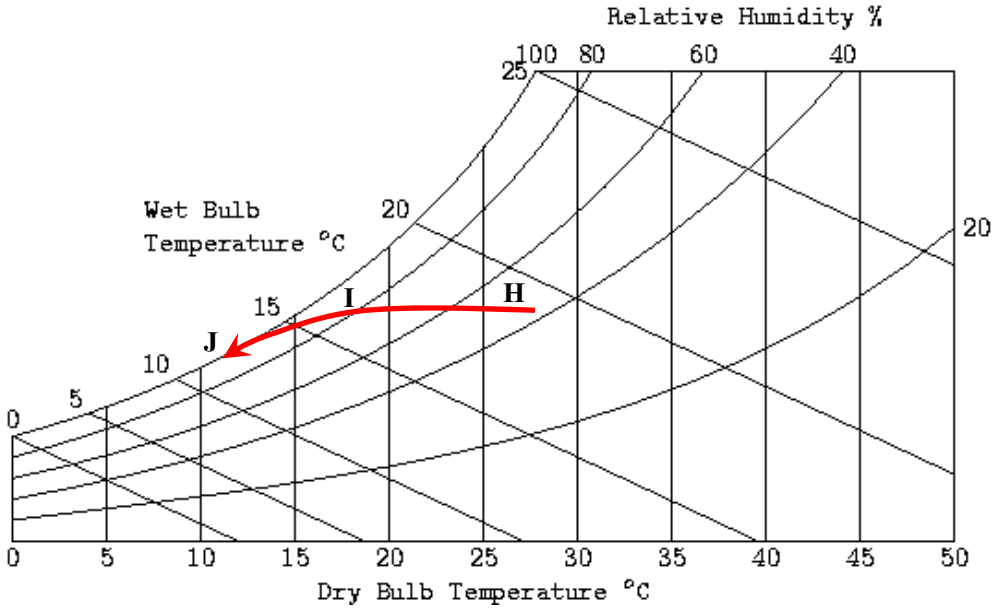
ภาพที่ 8 กระบวนการลดความชื้นโดยวิธีการเคมี
ที่มา: ชัยสวัสดิ์ (2523)

3.3 กระบวนการลดความชื้น เป็นกระบวนการที่ทำให้ความร้อนแฝงของอากาศเปลี่ยนแปลง เอนทาลปีของอากาศจะลดลงเนื่องจากถูกดึงออกไปกับไอน้ำ ทิศทางการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการดังแสดงในภาพที่ 9 คือ เส้นตรง FG ดังนั้นเมื่ออากาศถูกดึงความชื้นออก แต่อุณหภูมิกระเปาะแห้งจะคงที่ เนื่องจากความร้อนถูกดึงออกมาใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำในอากาศ

3.4 กระบวนการทำความเย็นและลดความชื้น เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในทางตรงกันข้ามกับกระบวนการทำความร้อนและเพิ่มความชื้น ทิศทางการเกิดการเปลี่ยนแปลงที่แสดงไว้ในภาพที่ 10 กระบวนการดังกล่าวสามารถทำได้ โดยการให้อากาศผ่านผิวอีเวปปอเรเตอร์ที่อุณหภูมิต่ำหรือละอองน้ำเย็น ดังนั้นเมื่ออากาศผ่านบริเวณดังกล่าวอุณหภูมิจะลดลง ขณะเดียวกันความชื้นที่มีอยู่ในอากาศจะกลั่นตัว เป็นหยดน้ำเกาะอยู่ตามผิวอีเวปปอเรเตอร์ หรือปนไปกับละลองน้ำที่เกิดจากการพ่น ในกระบวนการทำความร้อน และเพิ่มความชื้น ขณะที่อากาศผ่านจะต้องมีการเพิ่มความร้อนแก่น้ำตลอดเวลา แต่ในกระบวนการทำความเย็นและลดความชื้น วิธีการจะเป็นไปในทางตรงกันข้าม คือ ขณะที่อากาศผ่านต้องมีการเพิ่มความเย็นให้แก่น้ำเย็นตลอดเวลาเช่นกัน ขบวนการของการทำความเย็นและลดความชื้นเกิดขึ้นบนเส้น HJ ของภาพที่ 10



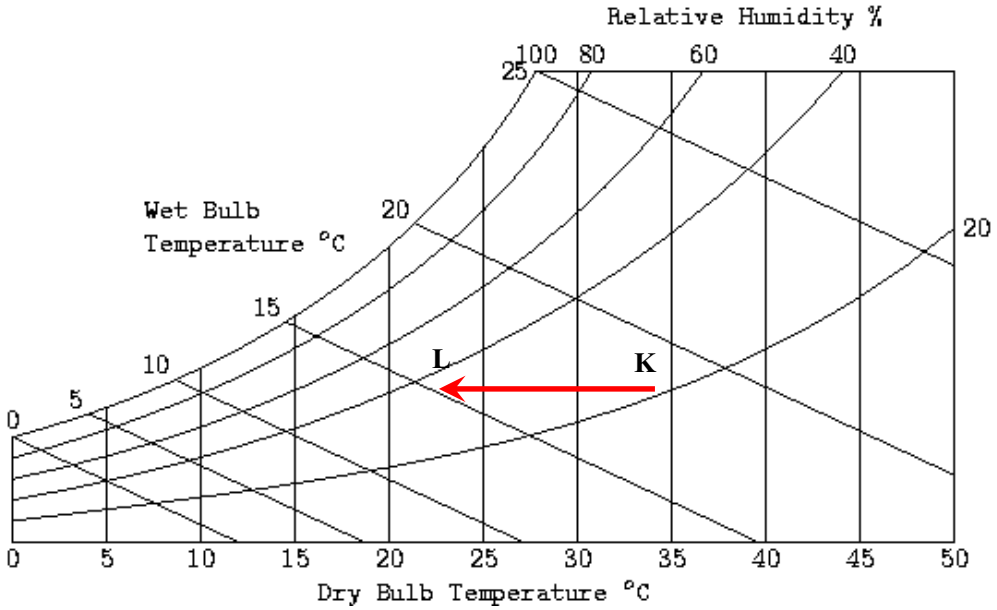
ภาพที่ 9 กระบวนการลดความชื้น
ที่มา: ชัยสวัสดิ์ (2523)



ภาพที่ 10 กระบวนการทำความเย็นและลดความชื้น
ที่มา: ชัยสวัสดิ์ (2523)

3.5 กระบวนการทำความเย็น เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในทางตรงกันข้ามกับกระบวนการทำความร้อน กล่าวคือ เป็นการนำความร้อนออกจากอากาศ โดยที่ไม่เพิ่มหรือลดปริมาณความชื้นใน

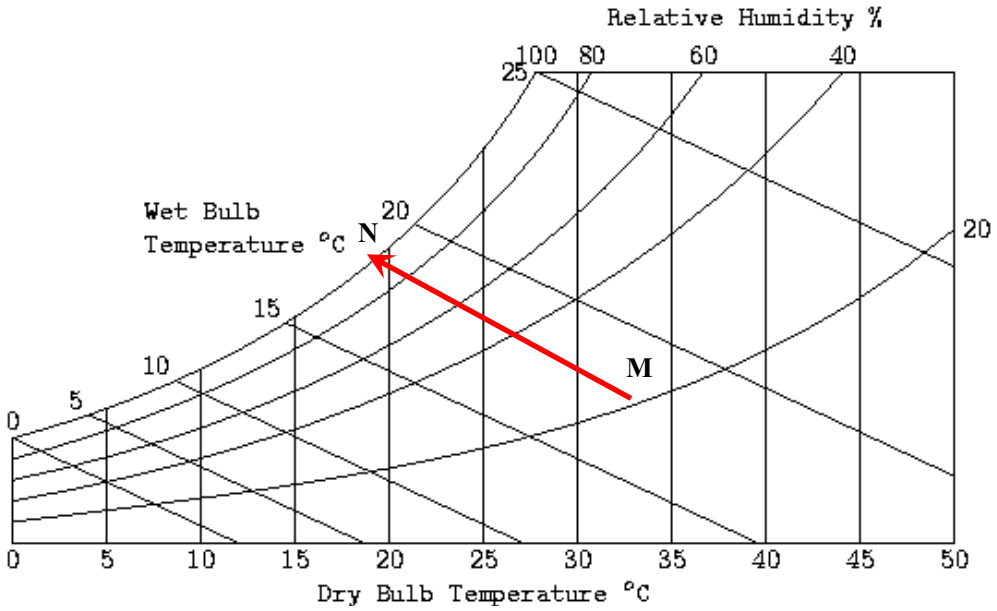
อากาศคงที่ (อัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์) คือ จะรักษาอุณหภูมิจุดน้ำค้างคงที่ด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาบนแผนภูมิความชื้น ในภาพที่ 11 กระบวนการนี้จะแทนด้วยเส้นตรงในแนวราบ KL เริ่มจากด้านขวามือไปด้านซ้ายมือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกลดลง เอนทาลปีและปริมาณจำเพาะลดลงแต่ความชื้นอากาศจะเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 11 กระบวนการทำความเย็น
ที่มา: ชัยสวัสดิ์ (2523)

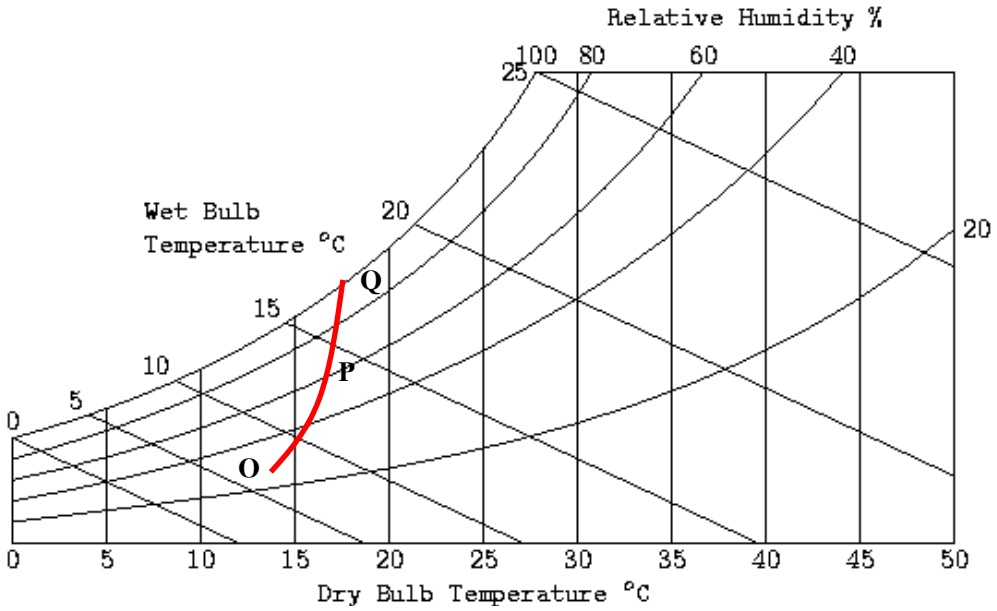
3.6 กระบวนการทำความเย็นและเพิ่มความชื้น เป็นกระบวนการที่เกิดเมื่อมีการทำความสะอาดด้วยละอองน้ำ ทำให้ความชื้นในอากาศเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันอุณหภูมิของอากาศจะลดลง ด้วยเมื่อพิจารณาแผนภูมิความชื้น ตามภาพที่ 12 จะพบว่าสภาพของอากาศขณะที่ผ่านอุปกรณ์ทำความสะอาด แสดงการเปลี่ยนแปลงกระบวนการดังเส้นตรง MN ที่ทับกับแนวของเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

3.7 กระบวนการเพิ่มความชื้น เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงความร้อนแฝงของอากาศ อัตราส่วนความชื้นและเอนทาลปีอากาศเพิ่ม เนื่องจากเอนทาลปีของไอน้ำเพิ่มเข้าไป ทิศทางการเปลี่ยนแปลงดังภาพที่ 7 แต่ทิศทางตรงกันข้ามคือจากจุด B ไปยังจุด A ดังนั้นเมื่ออากาศถูกเพิ่มความชื้นแต่อุณหภูมิกระเปาะแห้งจะคงที่ เนื่องจากจะนำความร้อนที่เพิ่มเข้ามา ไปในการเปลี่ยนสถานะของน้ำในอากาศ ซึ่งทั้งกระบวนการเพิ่มและลดความชื้นนี้ เกิดขึ้นได้ยากในทางปฏิบัติ



ภาพที่ 12 กระบวนการทำความเย็นและเพิ่มความชื้น
ที่มา: ชัยสวัสดิ์ (2523)

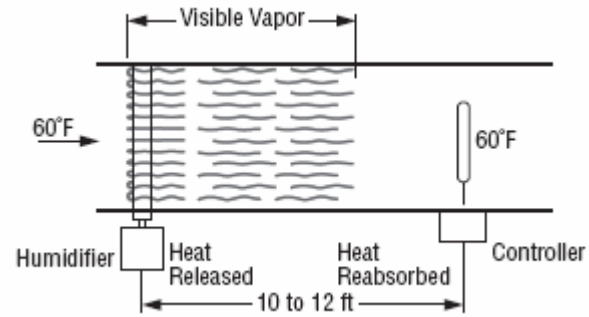
3.8 กระบวนการทำความร้อนและเพิ่มความชื้น สามารถทำให้อากาศร้อนขึ้นขณะเดียวกันทำให้ความชื้นในอากาศเพิ่มขึ้นด้วย โดยให้อากาศผ่านไปยังละอองน้ำร้อนหรือหม้อต้มน้ำ ขณะที่อากาศผ่านจะดูดซึมเอาความร้อนและความชื้นจากน้ำร้อนไปด้วย ฉะนั้นจึงต้องมีการเติมความร้อนให้แก่น้ำร้อนพอเพียงที่จะทำให้เกิดการกลายเป็นไอได้ในจำนวนพอดี วิธีการเติมความร้อนที่นิยมใช้ คือ ใช้น้ำไปเป็นสื่อกลาง ในระบบใช้ฉีดน้ำร้อนให้เป็นละออง ซึ่งจะเป็นการทำความสะอาดอากาศไปด้วย ขณะที่อากาศผ่านละอองน้ำ นอกจากนั้นอากาศจะรับความร้อนและความชื้นจากละอองน้ำร้อนแล้วฝุ่นละอองที่ปนอยู่ในอากาศจะถูกดูดซับด้วยละอองน้ำไปด้วยในตัวกระบวนการนี้ปรากฏบนแผนภูมิความชื้น ภาพที่ 13 คือ เส้น OQ จุด O คือสภาพของอากาศเริ่มเข้าสู่ละอองน้ำร้อน จุด P คือ สภาพของอากาศที่ออกจากละอองน้ำ และจุด Q คือ อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ออกจากอ่าง จุด P อาจจะอยู่ที่ตำแหน่งหนึ่งบนเส้น OQ ขึ้นอยู่กับลักษณะและโครงสร้างของกระบวนการเพิ่มความชื้น โดยทั่วไปถ้าเวลาที่อากาศสัมผัสกับน้ำร้อนมีมาก จุด P จะเข้าใกล้จุด Q มากขึ้น



ภาพที่ 13 กระบวนการทำความร้อนและเพิ่มความชื้น
ที่มา: ชัยสวัสดิ์ (2523)

หลักการเบื้องต้นของการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบไอน้ำ ต้องคำนึงถึงการกระจายตัวของไอน้ำในอากาศ การเพิ่มความชื้นในอากาศโดยใช้ไอน้ำ ทำได้โดยการพ่นไอน้ำไปในอากาศหลังจากนั้นไอน้ำจะผสมกับอากาศดังภาพที่ 14 สามารถอธิบายด้วยการถ่ายเทความร้อน เมื่อไอน้ำถูกปล่อยจากหัวพ่นไอน้ำสู่อากาศ จะเกิดการระเหยของไอน้ำทำให้ไอน้ำในอากาศเพิ่มขึ้นส่งผลให้อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น บริเวณใกล้หัวพ่นละอองน้ำสามารถมองเห็นไอน้ำและจะหายไปเมื่อการระเหยของน้ำเกิดขึ้นหรือเกิดการถ่ายเทมวลไอน้ำไปสู่อากาศอย่างสมบูรณ์ บริเวณที่สามารถเห็นไอน้ำได้แสดงว่าบริเวณนั้นเป็นบริเวณอิ่มตัวด้วยไอน้ำยิ่งยวด ระยะที่สามารถมองเห็นละอองน้ำเป็นสิ่งที่บอกว่าตำแหน่งที่ติดตั้งหัวพ่นละอองไอน้ำเหมาะสมคือ ถ้าระยะการมองเห็นละอองน้ำสั้นแสดงว่าการกระจายตัวของไอน้ำได้ทั่วถึงท่อส่งอากาศทำให้เกิดการระเหยที่รวดเร็ว ทำให้การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เกิดได้ดี ซึ่งระยะที่สามารถเห็นไอน้ำนี้ควรน้อยกว่า 10-12 ฟุต (Armstrong Humidification Group, 2005a)



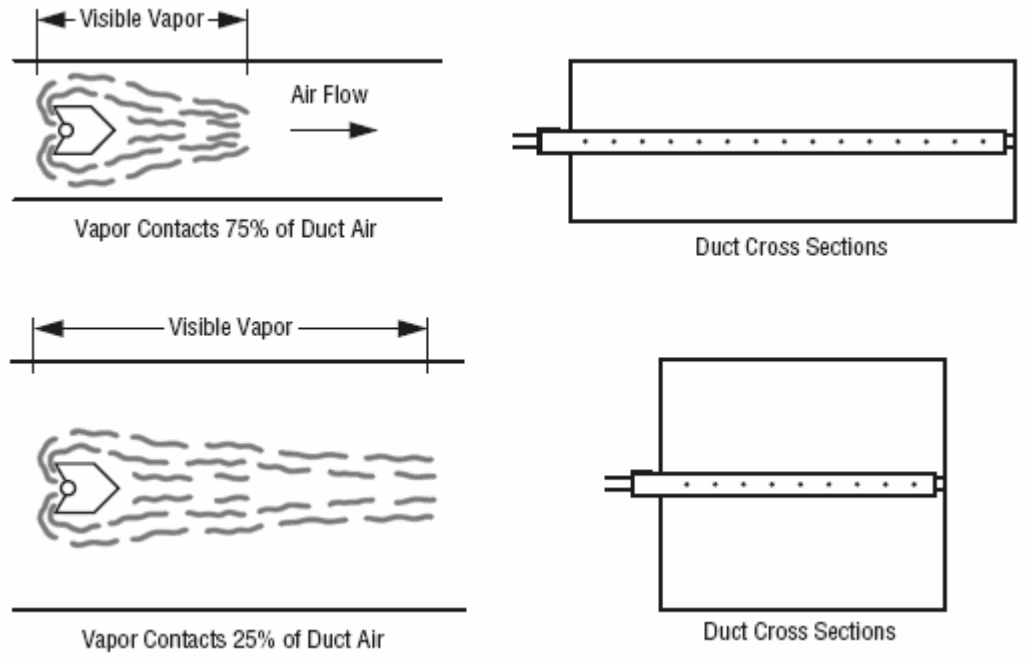
ภาพที่ 14 รูปแบบการกระจายตัวของไอน้ำ

ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005a)

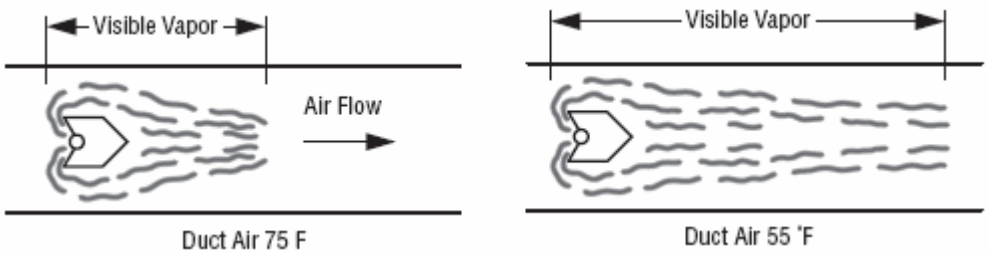
1. ปัจจัยที่สำคัญต่อการเพิ่มความชื้น

1.1 พื้นที่หน้าตัดของท่อส่งอากาศเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์โดยการพ่นละอองไอน้ำ การกระจายตัวของไอน้ำต้องสามารถกระจายได้ทั่วหน้าตัดท่อส่งอากาศ ดังภาพที่ 15 แสดงท่อส่งอากาศที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน แต่มีขนาดท่อส่งอากาศไม่เท่ากัน ทำการเพิ่มความชื้นโดยใช้การพ่นไอน้ำ และให้สภาวะต่างๆเหมือนกัน เช่น อัตราการไหลอากาศ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และปริมาณไอน้ำที่ให้กับอากาศเท่ากัน ถ้าท่อส่งอากาศที่มีการกระจายตัวของไอน้ำได้ทั่วถึง ทำให้การระเหยของไอน้ำเกิดได้รวดเร็ว มากกว่าในท่อส่งที่มีการกระจายตัวของไอน้ำไม่ทั่วถึง ทำให้น้ำระเหยได้น้อย เป็นสาเหตุให้เห็นรูปแบบไอน้ำได้ยาวเนื่องจากการระเหยเกิดได้ช้า (Armstrong Humidification Group, 2005a)

1.2 อุณหภูมิอากาศที่นำไปเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อระยะทางที่สามารถเห็นไอน้ำ อากาศอุ่นจะทำให้เห็นระยะทางไอน้ำกระจายตัวได้สั้น เนื่องจากอากาศอุ่นสามารถเกิดการระเหยได้รวดเร็วกว่าอากาศเย็น ดังภาพที่ 16 โดยที่สภาวะอื่นๆในท่อส่งอากาศเหมือนกันเช่น อัตราการไหลอากาศ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และปริมาณไอน้ำที่ให้กับอากาศเท่ากัน (Armstrong Humidification Group, 2005a)

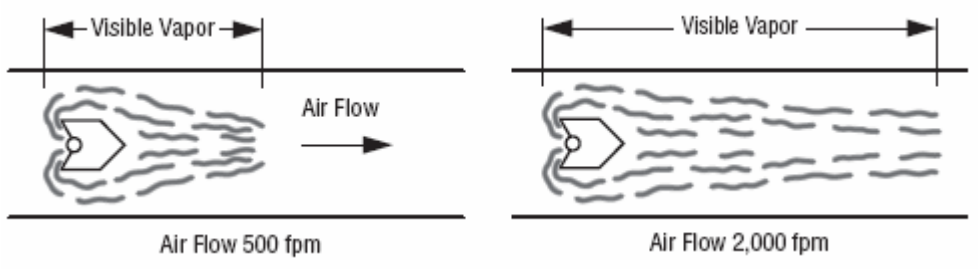


ภาพที่ 15 รูปการกระจายไอน้ำในท่อส่งอากาศที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน แต่มีขนาดไม่เท่ากัน
ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005a)



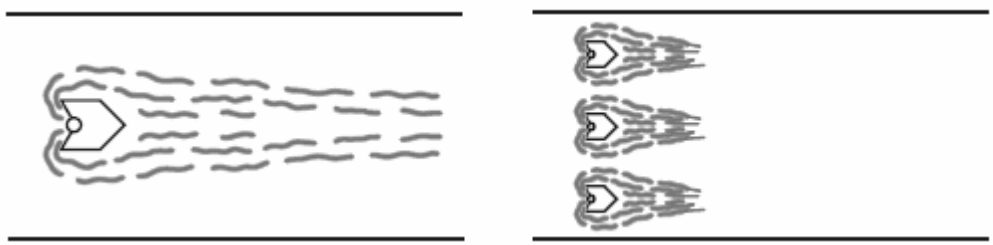
ภาพที่ 16 อิทธิพลจากอุณหภูมิในอากาศที่ใช้เพิ่มความชื้นสัมพัทธ์
ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005a)

1.3 ความเร็วอากาศในท่อส่ง เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นทำให้เห็นรูปแบบการกระจายตัวไอน้ำได้ยาวกว่าที่ความเร็วอากาศในท่อส่งต่ำ จากภาพที่ 17 แสดง ท่อส่งอากาศที่มีความเร็ว 500 ฟุตต่อนาที และ 2,000 ฟุตต่อนาที โดยที่สภาวะอื่นๆเหมือนกัน (Armstrong Humidification Group, 2005a)



ภาพที่ 17 อิทธิผลจากความเร็วอากาศในท่อส่ง
ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005a)

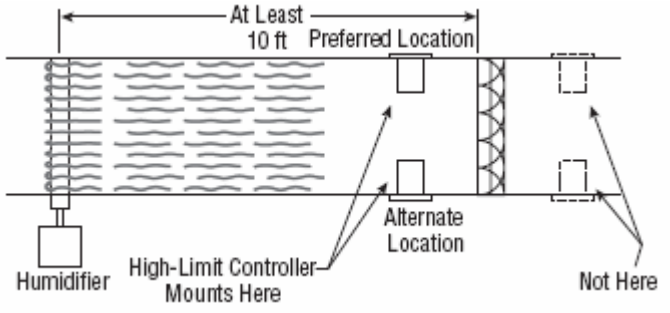
1.4 จำนวนชุดของหัวพ่นไอน้ำในท่อส่ง โดยปกติท่อส่งขนาดใหญ่การกระจายตัวของละอองไอน้ำให้ทั่วถึงด้วยหัวพ่นละอองไอน้ำได้ทั่วถึงทำได้ยาก จึงต้องการชุดหัวพ่นละอองน้ำมากกว่า 1 ชุด ช่วยให้การกระจายตัวของไอน้ำในท่อส่งอากาศได้ทั่วถึง ดังภาพที่ 18 แสดงท่อส่งอากาศที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน 2 ท่อ ซึ่งภาพทางซ้ายมีหัวพ่นละอองน้ำชุดเดียวแต่ในภาพทางด้านขวาจะแบ่งหัวพ่นละอองน้ำออกเป็น 3 ชุด โดยปริมาณไอน้ำที่ให้แก่ชุดหัวพ่นละอองน้ำทั้งสองนี้เท่ากัน ดังนั้นปริมาณน้ำในแต่ละชุดพ่นละอองน้ำในชุดทางด้านขวาจะได้ปริมาณน้ำน้อยกว่าชุดหัวพ่นในภาพทางด้านซ้าย แต่การกระจายตัวของละอองน้ำในท่อส่งดีกว่า ทำให้การสัมผัสระหว่างไอน้ำกับอากาศได้ดีกว่าจึงสามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้สูง (Armstrong Humidification Group, 2005a)



ภาพที่ 18 การแบ่งหัวพ่นออกเป็นชุดในท่อส่งขนาดใหญ่
ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005a)

1.5 ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ใช้เพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ มีผลต่อรูปแบบการเห็นไอน้ำคืออากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงสามารถเห็นละอองน้ำได้ยาวกว่า เนื่องในอากาศชื้นจะเกิดการระเหยของละอองน้ำได้น้อยจึงทำให้ละอองน้ำระเหยไม่หมด ละอองน้ำที่เหลือจากการระเหยจะลอยไปกับ

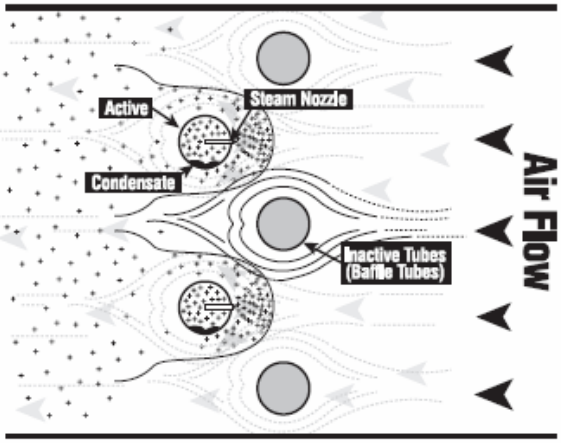
อากาศ และมีการป้องกันละอองน้ำที่ลอยไปกับอากาศโดยมีตัวควบคุมความชื้นด้วย high-limit humidistat ดังภาพที่ 19 (Armstrong Humidification Group, 2005a)



ภาพที่ 19 รูปแสดงการติดตั้ง high-limit controller mounts
ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005a)

เมื่อขนาดของไอน้ำอยู่ระหว่าง 2-40 ไมครอน อนุภาคน้ำจะถูกจับได้โดยตัวกรองประสิทธิภาพสูง (high efficiency filters) ตัวกรองบางชนิดเมื่อดูดซับน้ำแล้วจะขยายตัว ทำให้ความเร็วอากาศไหลผ่านตัวกรองช้าลงและทำให้ความดันในท่อส่งเพิ่มสูงขึ้น แต่จะไม่เกิดขึ้นในตัวกรองประสิทธิภาพสูง

การกระจายตัวของละอองน้ำในแต่ละหัวพ่นละอองไอน้ำ ละอองไอน้ำจะกระจายตัวจากแกนกลางในแต่ละหัวพ่นละอองไอน้ำและกระจายตัวทั่วท่อส่งอากาศ ซึ่งสามารถช่วยการกระจายตัวของไอน้ำในท่อส่งด้วยการใส่แผ่นกั้นการไหลในท่อส่ง เมื่ออากาศเจอกับแผ่นกั้นการไหลอากาศ ดังภาพที่ 20 ทำให้เกิดการไหลวนของอากาศหลังแผ่นกั้น เกิดการกระจายตัวของไอน้ำได้ทั่วถึงมากยิ่งขึ้นและช่วยให้อากาศดูดซับความชื้นเร็วยิ่งขึ้น (Armstrong Humidification Group, 2005a)



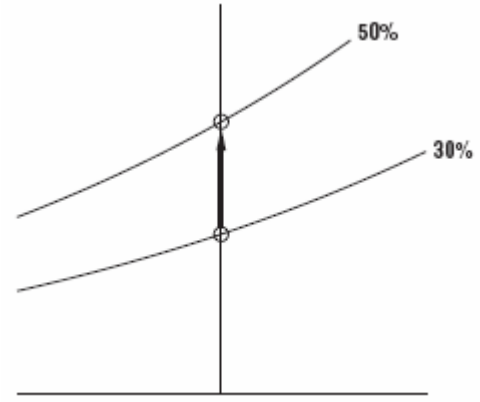
ภาพที่ 20 การกระจายตัวของอากาศและละอองน้ำเมื่อมีแผ่นกั้นการไหลอากาศ
ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005a)

ชนิดของเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

1. เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์โดยใช้ไอน้ำในการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

เป็นการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกระเปาะแห้งน้อยมาก อากาศที่ออกจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จะมีอุณหภูมิอากาศเท่ากับอากาศขาเข้า (isothermal) แต่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจะเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 21 เมื่อไอน้ำจะผสมกับอากาศจะเกิดการระเหยของน้ำทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเพิ่มขึ้น การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบนี้จะใช้ไอน้ำ 100 องศาเซลเซียส ไปในอากาศ ดังนั้นเมื่ออากาศผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แล้วอุณหภูมิอากาศน่าจะเพิ่มขึ้น แต่ความในเป็นจริงอากาศที่ผสมกับไอน้ำจะมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการระเหยของน้ำจะดูดความร้อนจากบริเวณรอบข้างทำให้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิลดลงเล็กน้อย (Armstrong Humidification Group, 2005c)

จากแผนภาพความชื้นแสดงให้เห็นว่าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ชนิดไอน้ำ สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้ในขณะที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งคงที่ จากภาพที่ 21 ความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มจาก 30 เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ในขณะที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งคงที่เท่ากับ 70 องศาฟาเรนไฮต์ เนื่องจากไอน้ำมีความร้อนเพียงพอที่ใช้ในการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์โดยไม่ต้องมีการให้ความร้อน โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่อุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นประมาณ 1-2 องศาฟาเรนไฮต์



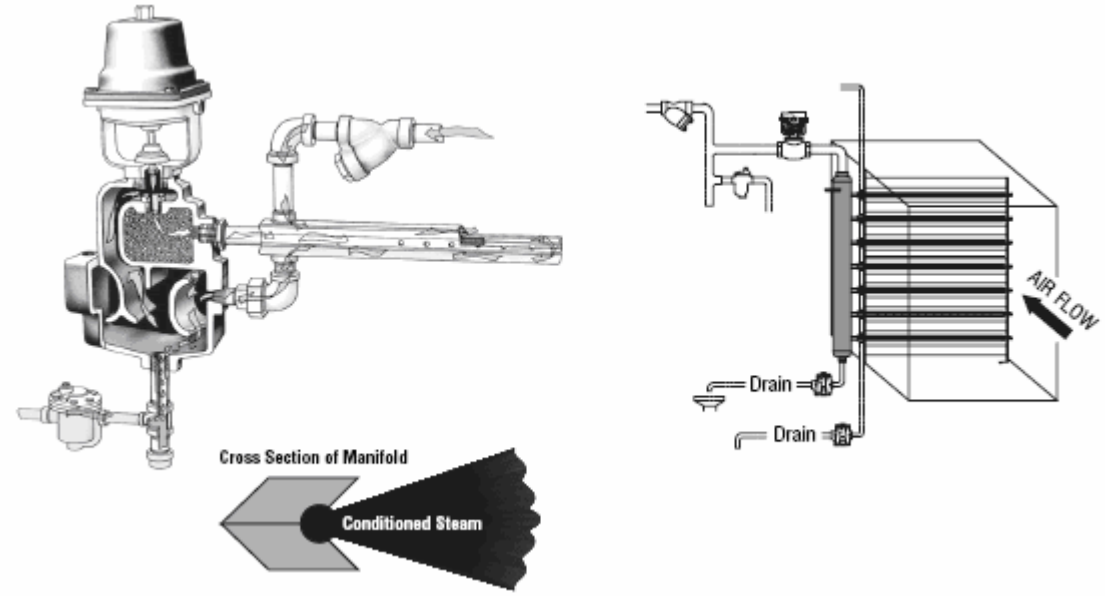
ภาพที่ 21 การเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์เมื่ออุณหภูมิกระเปาะแห้งคงที่
ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005c)

1.1 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบฉีดไอน้ำโดยตรง (direct steam injection humidifiers)

เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ชนิดนี้ใช้พื้นฐานเหมือนกับเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบไอน้ำ คือ มีการฉีดไอน้ำให้กับอากาศโดยตรง โดยเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบนี้มีจุดเด่นที่การดูแลรักษาง่าย ไอน้ำในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทำหน้าที่เป็นสารทำความสะอาด ไอน้ำจะป้องกันการเกาะของตะกรัน ซึ่งตะกรันจะไปอุดตันหัวพ่นไอน้ำในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทำให้การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ลดต่ำลงได้ (Armstrong Humidification Group, 2005c)

1.2 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบฉีดไอน้ำ (steam humidifier)

เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบชนิดนี้มีจุดเด่นที่การตอบสนองต่อการควบคุมได้รวดเร็วและมีความแม่นยำ เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์สามารถควบคุมปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ โดยทำการวัดปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขาเข้า และนำมาปรับปริมาณไอน้ำที่ผสมกับอากาศโดยมีลิ้นปิดเปิดควบคุมหัวพ่นละอองน้ำ (control valve) ลิ้นนี้สามารถปิดและเปิดได้สามารถติดตั้งหัวพ่นละอองน้ำได้ทุกที่ ดังภาพที่ 22 (Armstrong Humidification Group, 2005c)



ภาพที่ 22 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ชนิดให้ไอน้ำโดยตรง
ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005c)

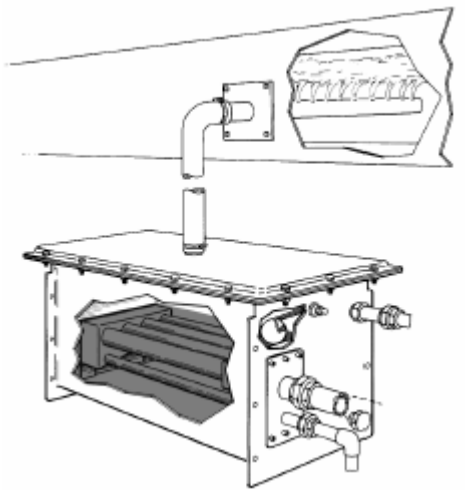
1.3 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ชนิดใช้ไอน้ำที่ผลิตจากเครื่องต้มไอน้ำ (boiler)

เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ชนิดนี้จะผลิตไอน้ำจากหม้อต้มไอน้ำ และนำไอน้ำไปผลิตไอน้ำที่พ่นสู่อากาศเพื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ ภายในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ชนิดนี้มีอุณหภูมิสูงและไม่มีการควบแน่นของน้ำ ทำให้ช่วยกำจัดแบคทีเรียในอากาศ (Armstrong Humidification Group, 2005c)

1.4 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบไอน้ำสู่ไอน้ำ (steam-to-steam humidifier)

เครื่องเพิ่มความชื้นชนิดนี้ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อผลิตไอน้ำและนำไอน้ำไปผลิตไอน้ำเพื่อนำไปใช้ในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ โดยที่ไอน้ำขั้นที่ได้มีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ การดูแลรักษาเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ชนิดนี้ขึ้นกับคุณภาพน้ำที่ใช้ว่ามีสิ่งเจือปน เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และโลหะ สิ่งเจือปนจะสะสมในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จึงต้องมีการทำความสะอาดบ่อยครั้ง การตอบสนองต่อการควบคุมของเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบนี้จะช้ากว่าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบให้ไอน้ำโดยตรง เนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาในการผลิตไอน้ำในขั้นแรกและนำไปผลิตไอน้ำในขั้นที่สอง จึงทำให้มีการตอบสนองต่อระบบควบคุมช้า ภาพเครื่อง

เพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบไอน้ำสู่ไอน้ำแสดงในภาพที่ 23 (Armstrong Humidification Group, 2005c)



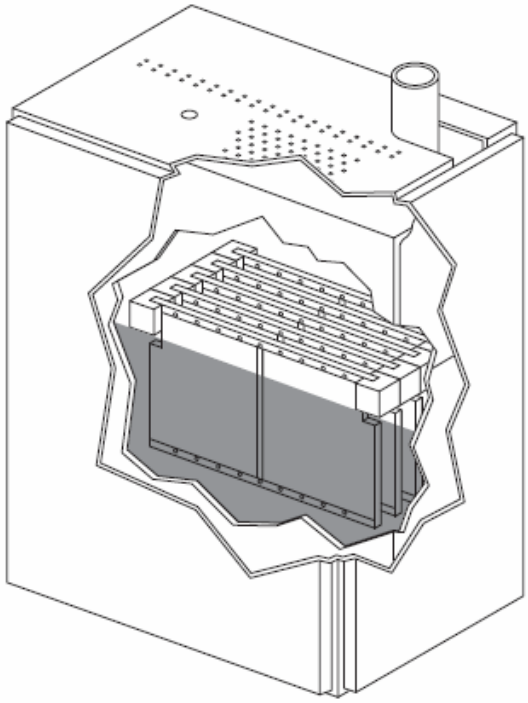
ภาพที่ 23 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบไอน้ำสู่ไอน้ำ
ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005c)

1.6 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบไอน้ำชนิดไฟฟ้าอิเล็คโทรด (electric steam humidifiers (electrode))

เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ชนิดนี้ใช้แหล่งให้พลังงานไฟฟ้าเพื่อผลิตไอน้ำที่สภาวะความดันบรรยากาศ โดยขั้วไฟฟ้าส่งไฟฟ้าผ่านน้ำกลั่นเพื่อผลิตไอน้ำ ดังนั้นสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำมีผลต่อการผลิตไอน้ำ จึงต้องใช้น้ำที่มีคุณภาพดี (Armstrong Humidification Group, 2005c)

1.7 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบไอน้ำชนิดไฟฟ้าไอออนนิคเบด (electric steam humidifiers (ionic bed))

เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบไอน้ำชนิดไฟฟ้าไอออนนิคเบดใช้ตัวต้านทานจุ่มลงไปในน้ำเพื่อให้ความร้อนแก่น้ำเพื่อผลิตไอน้ำ แสดงดังภาพที่ 24 ดังนั้นจึงไม่ต้องคำนึงถึงคุณภาพน้ำ เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ชนิดนี้สามารถใช้กับน้ำได้หลายชนิด การดูแลรักษาสามารถทำได้ง่ายเมื่อไอออนิคเบดสกปรกสามารถถอดเปลี่ยนได้ไอออนิคเบดได้ (Armstrong Humidification Group, 2005c)

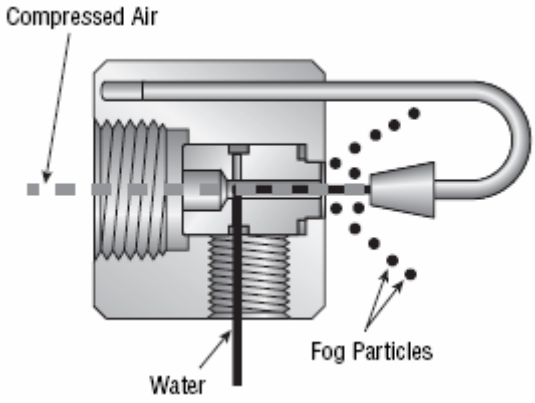


ภาพที่ 24 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบไอน้ำชนิดไฟฟ้าไอออนนิคเบด
ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005c)

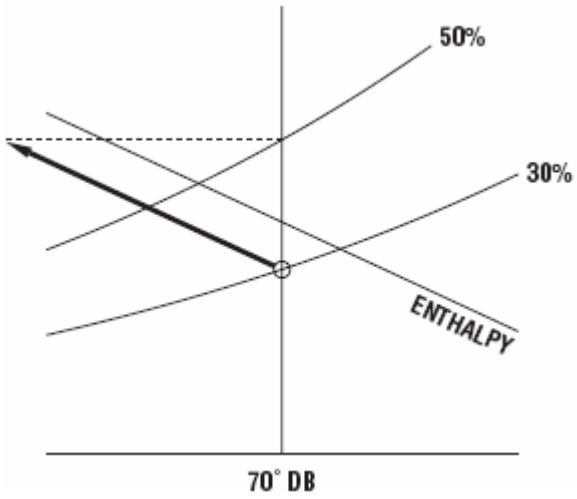
2. เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ชนิดใช้ละอองน้ำในการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ (fogging system)

เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ระบบหมอกใช้การอัดอากาศผ่านน้ำเพื่อทำให้เกิดละอองน้ำขนาดเล็กที่ดูคล้ายกับหมอก หัวพ่นละอองน้ำแสดงในภาพที่ 25 น้ำจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากของเหลวกลายเป็นก๊าซ โดยที่ละอองน้ำดูดความร้อนจากระบบหรือสิ่งแวดล้อมเพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นก๊าซ อากาศที่ออกจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ชนิดนี้มีอุณหภูมิลดลง และมีความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มจาก 30 เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เอนทาลปีมีค่าคงที่ ดังภาพที่ 26

เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ระบบหมอกถูกออกแบบให้สามารถปรับได้ทั้งแรงดันอากาศและแรงดันน้ำเพื่อให้ได้ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ต้องอาศัยการสัมผัสของอากาศกับละอองน้ำเพื่อให้เกิดการระเหยของน้ำได้มากเพื่อที่จะสามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศได้สูง ดังนั้นการติดตั้งหัวพ่นละอองน้ำจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ระบบหมอก นอกจากนั้นน้ำที่ใช้ในการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ ควรเป็นน้ำที่มีความสะอาดพอสมควรเพื่อป้องกันการอุดตันของหัวพ่นละอองน้ำ



ภาพที่ 25 หัวพ่นละอองน้ำในเครื่องเพิ่มความชื้นระบบหมอก
ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005c)



ภาพที่ 26 การเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ในระบบหมอก
ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005c)

เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 3 เช่น เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบให้ไอน้ำโดยตรงมีข้อดีคือ สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้ดีและมีการตอบสนองต่อการควบคุมได้ดี แต่อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์มีอุณหภูมิสูง ซึ่งอาจจะไม่เหมาะการนำมาใช้ในการลดอุณหภูมิในระบบการหมักแบบแห้ง

การเลือกเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงการใช้งาน ต้องคำนวณปริมาณอากาศชื้นที่ต้องการ และคำนึงถึงแหล่งผลิตละอองน้ำที่ในการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบกระบวนการในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แต่ละชนิด

	ชนิดเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์				
	ไอน้ำโดยตรง	ไอน้ำสู่ไอน้ำ	ไฟฟ้าอิเล็คโทรด	ไอออนนิคเบด	ระบบหมอก
อุณหภูมิ	ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ				อุณหภูมิลดลง
ปริมาณอากาศที่สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์	น้อยถึงมาก	น้อย	น้อยถึงปานกลาง	น้อยถึงปานกลาง	น้อยถึงมาก
การตอบสนองต่อระบบควบคุม	ทันที	ช้า	ปานกลาง	ปานกลาง	ทันที
ความถี่ในการดูแลรักษา	ปี	เดือน	เดือนถึง 3 เดือน	6 เดือนถึง 9 เดือน	ปี
ระดับการดูแลรักษา	ต่ำ	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ
ราคาเครื่อง	ถูก	แพง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
ราคาปฏิบัติการ	ถูก	ถูก	ปานกลาง	ปานกลาง	ถูก
ราคาในการดูแลรักษา	ต่ำ	สูง	สูง	ปานกลาง	ถูก

ที่มา: Armstrong Humidification Group (2005b)

ข้อมูลที่สำคัญในการเลือกเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์มีดังนี้

1. อุณหภูมิอากาศหลังผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

2. ระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ต้องการ

3. ปริมาณอากาศที่ต้องการ

4. แหล่งผลิตไอน้ำที่ใช้ในการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

อุปกรณ์และวิธี

อุปกรณ์

1. จุลินทรีย์ที่ใช้ทดลอง

จุลินทรีย์ที่ใช้ทดลองมี 2 ชนิด คือ

1.1 รา *Rhizopus oligosporus* (*A. oryzae*) TISTR 3001 (ATCC22959) จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และมีความเข้มของสปอร์ต้นเชื้อเท่ากับ 9×10^{9} สปอร์ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

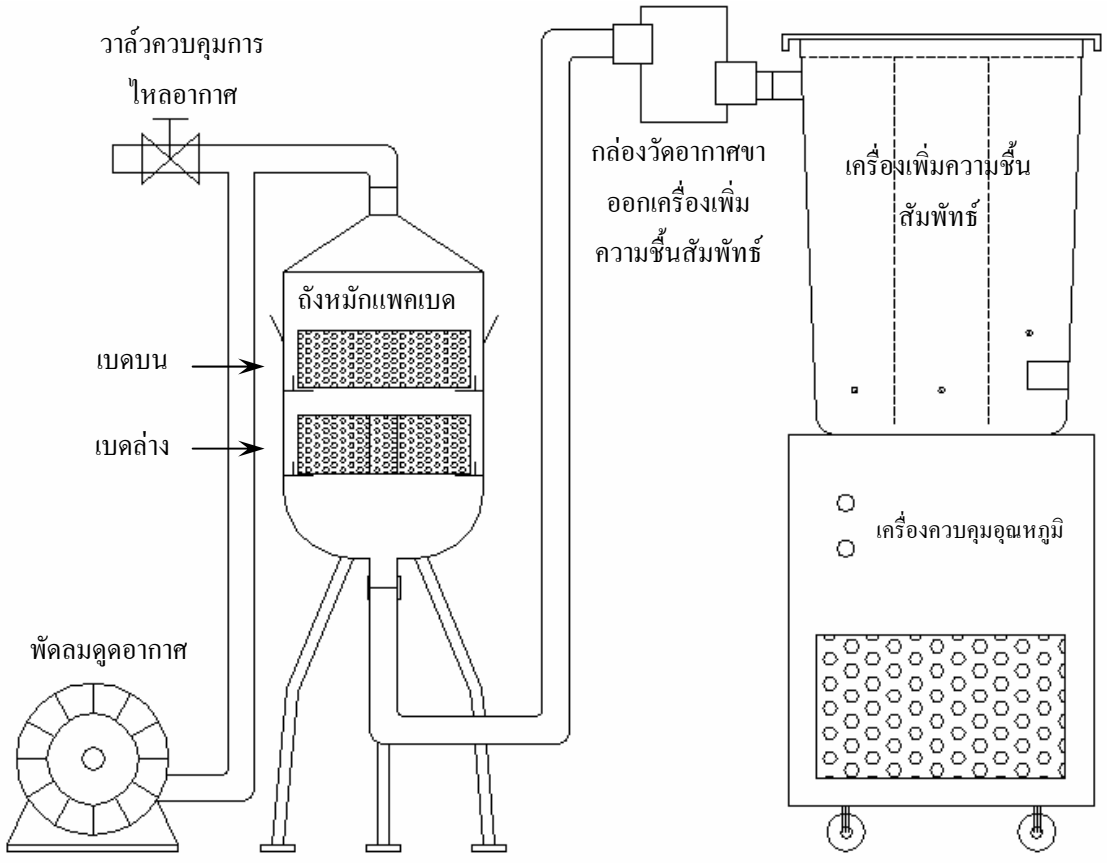
1.2 รา *Aspergillus oryzae* (*R. oligosporus*) มีชื่อทางการค้าว่า Ozykat-1 มีความเข้มข้นของสปอร์ต้นเชื้อเท่ากับ 10^{9} สปอร์ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง สั่งซื้อจากคุณราตรี มงคลวัย บ้านเลขที่ 47 หมู่ 7 ต.โพสะ อ.เมือง จ. อ่างทอง 14000 โทรศัพท์ 0-3562-0321

2. วัสดุหมัก

วัสดุหมักที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากการเกษตร ได้แก่ กากมันสำปะหลัง รำข้าวเจ้า และรำข้าวสาลี

3. ชุดระบบการหมัก (fermentation system)

ระบบหมักแบบแห้งประกอบด้วยเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทำหน้าที่เพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศก่อนนำอากาศชื้นไประบายความร้อนในวัสดุหมัก โดยปั๊มน้ำสูบน้ำให้กับหัวพ่นละอองน้ำเพื่อใช้ในการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งอยู่ทางด้านล่างของเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ อากาศจะถูกดูดผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์โดยอากาศเข้าทางด้านล่างและออกทางด้านบนของเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ ทางออกเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์มีกล่องพักอากาศ เพื่อช่วยให้การวัดความชื้นสัมพัทธ์ที่ออกจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ให้มีความม่นยำ หลังจากนั้นอากาศจะผ่านไปยังถังหมักแพคเบดโดยใช้ท่อพลาสติก อากาศจะเข้าถังหมักแพคเบดทางด้านล่างและออกทางด้านบนของถังหมัก โดยมีพัดลมดูดอากาศทำหน้าที่ดูดอากาศให้ไหลผ่านชุดระบบหมัก ซึ่งพัดลมดูดอากาศอยู่ถัดจากถังหมักแพคเบดดังภาพที่ 27

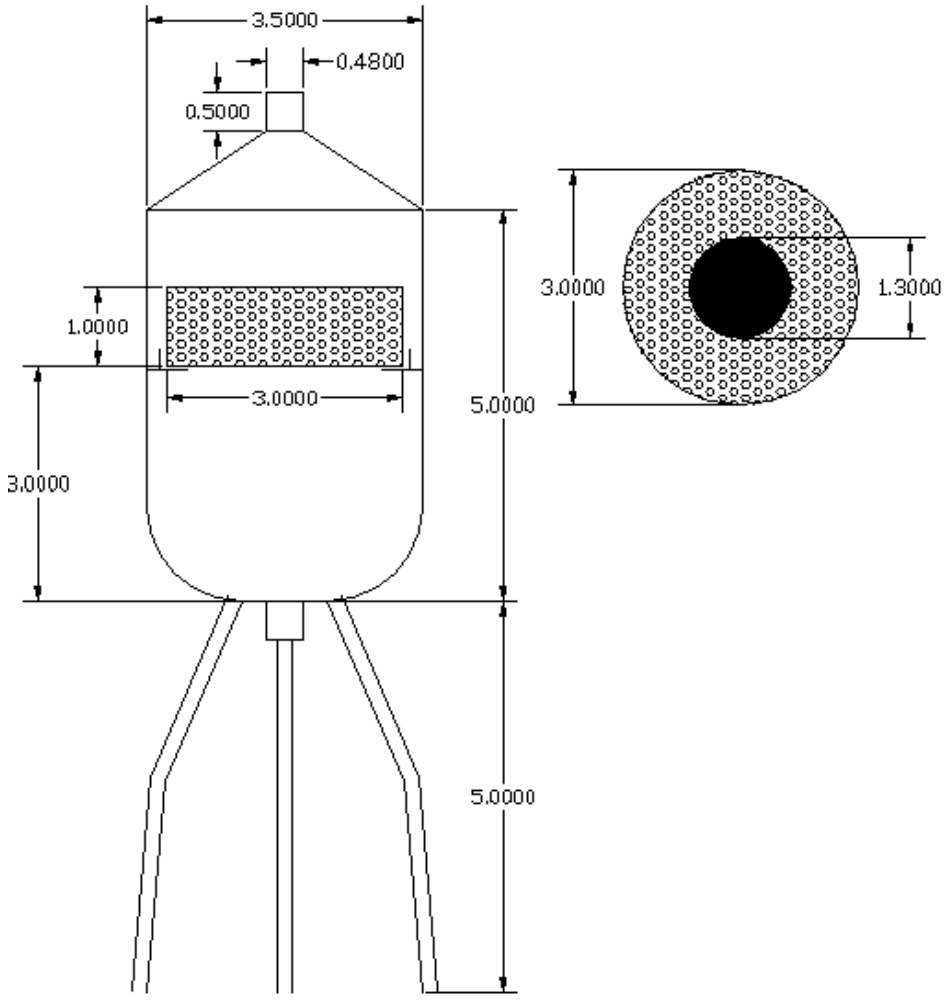


ภาพที่ 27 ระบบการหมักแบบแห้งพร้อมเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

ภาพที่ 28 รูประบบการหมักพร้อมเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

3.1 ถังหมักแบบแพคเบด (packed-bed fermentor)

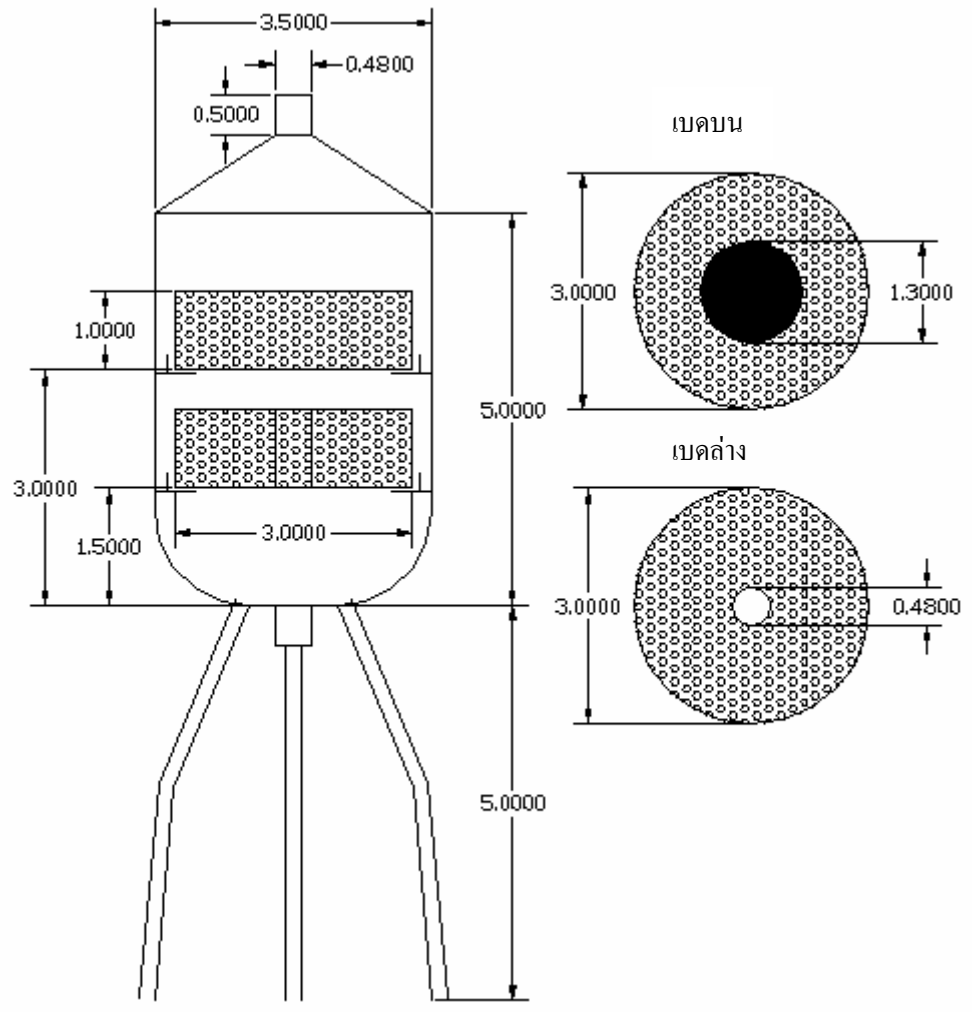
3.1.1 ถังหมักแพคเบดแบบชั้นเดียว ที่ใช้ในการหมักในงานวิจัยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร (ไม่รวมฝาปิดถังหมัก) มีปริมาตรโดยรวมประมาณ 50 ลิตร ดังภาพที่ 29 มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงเท่ากับ 4:5 วัสดุที่ใช้ทำถังหมักเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตัวถังประกอบด้วยฝาปิด ทางด้านล่างจะมีช่องให้อากาศไหลเข้าและทางด้านบนมีช่องให้อากาศไหลออก ช่องให้อากาศระบายเข้าและออกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 เซนติเมตร และมีช่องสำหรับเสียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิจำนวน 2 ช่อง ภายในถังหมักมีตะแกรง (เบด) 1 ชั้น ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร มีรูพรุนรอบตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ที่ก้นตะแกรงมีแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมทึบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร เพื่อช่วยกระจายอากาศให้ทั่วถึงตะแกรงชั้นบน ดังภาพที่ 29



อัตราส่วน 1 หน่วย :10 เซนติเมตร

ภาพที่ 29 ถังหมักแพคเบดแบบชั้นเดียว

3.1.2 ถังหมักแพคเบดแบบ 2 ชั้น ที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดเท่ากับถังหมักแพคเบดแบบชั้นเดียว แต่จะมีตะแกรงในถังหมัก 2 ชั้น ดังภาพที่ 30 ตะแกรงทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร มีรูพรุนรอบตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ภายในถังหมักสามารถวางตะแกรงได้ 2 ระดับ ที่ความสูง 15 และ30 เซนติเมตร ที่ก้นตะแกรงชั้นบน (เบดบน) มีแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมทึบปิดที่ตรงกลางเพื่อช่วยในการกระจายอากาศให้กับตะแกรงชั้นบน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร และตะแกรงล่างมีการเจาะรูตรงกลาง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 เซนติเมตร เพื่อช่วยให้อากาศไหลผ่านสู่เบดชั้นบนได้สะดวก

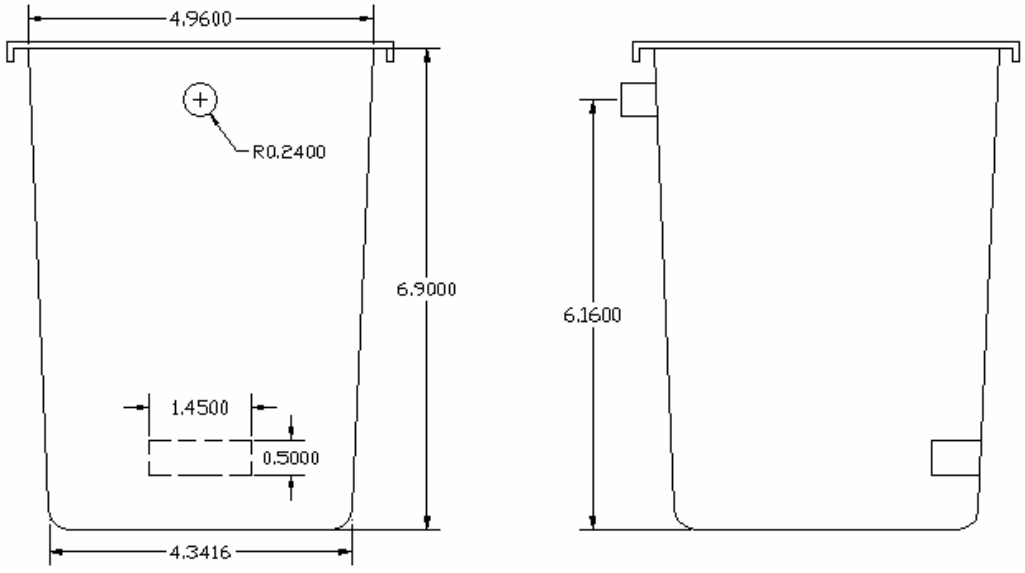


อัตราส่วน 1 หน่วย :10 เซนติเมตร

ภาพที่ 30 ถังหมักแพคเบดแบบสองชั้น

3.2 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ (humidifier)

เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ มีลักษณะเป็นถังทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 49.6 เซนติเมตร และเส้นผ่านผ่านศูนย์กลางด้านล่าง 43.5 เซนติเมตร สูง 69 เซนติเมตร มีปริมาตรโดยรวม 98 ลิตร ดังแสดงในภาพที่ 31 ถังเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ผลิตจากพลาสติก มีช่องให้อากาศไหลเข้าทางด้านล่างกว้าง 14.5 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร ปิดด้วยแผ่นกรองอากาศ และมีช่องให้อากาศไหลออกทางด้านบนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.8 เซนติเมตร



อัตราส่วน 1 หน่วย :10 เซนติเมตร

ภาพที่ 31 ขนาดเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

3.3 พัดลมดูดอากาศ (air suction blower)

พัดลมดูดอากาศของบริษัท Greenco รุ่น XBD-750 มีกำลัง 1 แรงม้า ใช้พัดลมดูดอากาศควบคุมอัตราการไหลอากาศภายในถังหมักแพคเบด อากาศไหลเข้าทางด้านล่างแล้วออกทางด้านบนของถังหมักแพคเบด ทางด้านบนของถังหมักแพคเบดมีวาล์ว by pass เพื่อควบคุมอัตราการไหลอากาศภายในถังหมักแพคเบด

3.4 ปั้มน้ำ (water pump)

ปั้มน้ำ รุ่น CBAI ของบริษัท Scientific Promotion ใช้สูบน้ำให้กับหัวพ่นละอองน้ำ

3.5 หัวพ่นละอองน้ำ (water spray)

หัวพ่นละอองน้ำรุ่น mist jet ของบริษัท เรนเบิรด์ (rain bird) ประเทศอเมริกา

3.5 อุปกรณ์ควบคุมตัวแปรภายในถังหมัก

3.5.1 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการทดลองมี 2 แบบ ดังนี้

แบบที่ 1 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Barigo hydrometer รุ่น 420 ประเทศเยอรมัน)

แบบที่ 2 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศของบริษัท ETT สามารถวัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (เปอร์เซ็นต์) ได้ตั้งแต่ช่วง 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และช่วงอุณหภูมิอากาศ 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส

3.5.2 เครื่องวัดความเร็วอากาศ (air flow mater) รุ่น hot wire sensor (407112) ของบริษัท Extech Instruments ใช้สำหรับวัดความเร็วอากาศในถังหมัก

3.5.3 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเก็บข้อมูล (multilog datalogger ของ Fourier system รุ่น DB-526, Isarael) พร้อมหัวเซนเซอร์ (thermocouple) สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -25 ถึง 110 องศาเซลเซียส ใช้สำหรับเก็บอุณหภูมิในวัสดุหมัก

4. **<u>อุปกรณ์วิเคราะห์ต่างๆ</u>**

4.1 ตู้ปลอดเชื้อ

4.2 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น LM6100 ของบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

4.3 เครื่องอบฆ่าเชื้อ (autoclave) รุ่น HL-340 ของบริษัท Huxley

4.4 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น 420A ของบริษัท Orion ประเทศสหรัฐอเมริกา

4.5 เครื่องวิเคราะห์ความชื้นในวัสดุหมัก (moisture analyzer) รุ่น AMB 50 ของบริษัท Adam Equipment ประเทศอังกฤษ

4.6 เครื่องสเปคโตโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) รุ่น Anthekie Advanced ของบริษัท Secomam ประเทศฝรั่งเศส

วิธีการทดลอง

1. การพัฒนาและการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้พัฒนาใช้ในงานวิจัยนี้ช่วยเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ให้กับอากาศที่ใช้ระบายความร้อนในวัสดุหมักภายในถังหมักแพคเบด เพื่อลดการสูญเสียความชื้นของวัสดุหมักที่เกิดจากอากาศที่ใช้ระบายความร้อนออกจากวัสดุหมัก อากาศพาความชื้นออกจากวัสดุหมัก ดังนั้นจึงได้มีการสร้างเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เพื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เพื่อช่วยลดการระเหยของน้ำในวัสดุหมัก นอกจากนั้นเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ยังสามารถลดอุณหภูมิอากาศไปพร้อมกับการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ และเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยการพ่นละอองน้ำ โดยพ่นละอองน้ำด้วยอัตราการไหล 72 ลิตรต่อชั่วโมง และใช้อัตราการไหลอากาศ 34.62 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงหรือความเร็วอากาศในถังหมัก 0.1 เมตรต่อวินาที วัดความชื้นสัมพัทธ์ก่อนและหลังผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทุก 30 นาที

2. การหมักรา *R. oligosporus* ในถังหมักแพคเบดแบบสองชั้น ที่ความเร็วอากาศในถังหมัก 0.1 เมตรต่อวินาที

เตรียมวัสดุหมักผสมระหว่างกากมันสำปะหลังกับรำข้าวเจ้าด้วยสัดส่วน 70 ต่อ 30 โดยน้ำหนัก นำวัสดุหมัก 3500 กรัม มาปรับความชื้นวัสดุหมักให้ได้ 55 เปอร์เซ็นต์ (จุฬารัตน์, 2547) หลังจากนั้นนำวัสดุหมักไปฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งความดันที่ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 25 นาที นำวัสดุหมักที่ผ่านการฆ่าเชื้อมาทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ปลอดเชื้อจนวัสดุหมักมีอุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส จากนั้นถ่ายต้นเชื้อรา *R. oligosporus* ผงที่เตรียมไว้จำนวน 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุหมักหลังจากปรับความชื้น นำต้นเชื้อรา *R. oligosporus* คลุกเคล้ากับวัสดุหมักให้เข้ากัน บรรจุวัสดุหมักที่เตรียมเสร็จลงในตะแกรงกลม (เบด) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ซึ่งตะแกรงถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆด้วยแผ่นกั้นพลาสติกออกเป็น 8 ส่วนตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเพื่อให้อากาศไหลผ่านเบดได้ดี ซึ่งจะช่วยให้การระบายความร้อนในวัสดุหมักเกิดได้ดีขึ้น (จรัญ, 2548) ปรับวัสดุหมักในเบดให้มีความหนา 10 เซนติเมตร นำเบดไปใส่ในถังหมักเพื่อทำการหมักเป็นเวลา 96 ชั่วโมง เนื่องจากรา *R. oligosporus* มีช่วงการเจริญประมาณ 96 ชั่วโมง (จุฬา

รัตน์, 2547) หลังจากนั้นนำอากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้ออกแบบมาระบายความร้อนภายในวัสดุหมักในชั่วโมงที่ 12 ด้วยความเร็วอากาศในถังหมัก 0.1 เมตรต่อวินาที ให้อัตราการไหลของน้ำภายในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 72 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการหมัก 96 ชั่วโมง วัดอุณหภูมิภายในวัสดุหมักทุก 30 นาที ด้วยเซนเซอร์และเครื่องเก็บข้อมูล วัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทุก 30 นาที และเก็บตัวอย่างทุก 12 ชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในวัสดุหมัก และปริมาณกลูโคซามีน

3. <u>การหมักรา *R. oligosporus* ในถังหมักแพคเบดแบบสองชั้น ที่ความเร็วอากาศในถังหมัก 0.15 เมตรต่อวินาที</u>

เตรียมวัสดุหมักที่ใช้ในการหมักรา *R. oligosporus* เหมือนกับการทดลองที่ 2 หลังจากนั้นนำวัสดุหมักไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที แล้วทิ้งวัสดุหมักให้เย็นในตู้ปลอดเชื้อ จากนั้นถ่ายต้นเชื้อรา *R. oligosporus* ด้วยปริมาณเท่ากับการทดลองที่ 2 นำวัสดุหมักที่คลุกเคล้าต้นเชื้อแล้วบรรจุลงในเบดที่ถูกแบ่งออกเป็น 8 ส่วน และปรับวัสดุหมักให้มีความหนา 10 เซนติเมตร นำเบดที่บรรจุวัสดุหมักเรียบร้อยแล้วใส่ลงในถังหมักแพคเบด และทำการหมักนาน 96 ชั่วโมง ในชั่วโมงที่ 12 เปิดอากาศเพื่อระบายความร้อนในวัสดุหมัก นำอากาศมาจากเครื่องเพิ่มความชื้นที่เหมาะสมได้จากการทดลองที่ 2 แต่เพิ่มอัตราการไหลอากาศภายในถังหมักแพคเบดเป็น 51.92 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือความเร็วอากาศในถังหมักเท่ากับ 0.15 เมตรต่อวินาที เพื่อทดสอบความสามารถในการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ที่ความเร็วอากาศสูงขึ้น นอกจากนั้นยังช่วยในการระบายความร้อนในวัสดุหมักให้ดียิ่งขึ้น วัดอุณหภูมิภายในวัสดุหมักทุก 30 นาที ด้วยเซนเซอร์และเครื่องเก็บข้อมูล วัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทุก 30 นาที และเก็บตัวอย่างทุก 12 ชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในวัสดุหมัก และปริมาณกลูโคซามีน

4. <u>การหมักรา *A. oryzae* ในถังหมักแพคเบดแบบชั้นเดียว ที่ความเร็วอากาศในถังหมัก 0.15 เมตรต่อวินาที</u>

เลี้ยงรา *A. oryzae* บนวัสดุหมักผสมระหว่างรำข้าวสาลีกับรำข้าวเจ้า ด้วยสัดส่วน 75 ต่อ 25 โดยน้ำหนัก มาปรับความชื้นวัสดุหมักให้ได้ 50 เปอร์เซ็นต์ นำวัสดุหมักไปฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งความดันที่ 121 องศาเซลเซียส นาน 25 นาที นำวัสดุหมักมาทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ปลอดเชื้อ จากนั้นถ่ายต้นเชื้อรา *A. oryzae* จำนวน 0.3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุหมักแห้งผสมกับแป้งจำนวน 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุหมักแห้ง คลุกรากับวัสดุหมักให้เข้ากันบรรจุลงในตะแกรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร เบดถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆด้วยแผ่นกั้นพลาสติกออกเป็น 6 ส่วนตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง เพื่อให้อากาศผ่าน

เบดได้ดีทำให้การระบายความร้อนในเบดเกิดได้ดี (จุฬารัตน์, 2547) ปรับวัสดุหมักให้หนา 10 เซนติเมตร นำเบดไปลงในถังหมักแพคเบด ปิดฝาถังหมักให้เรียบร้อย เมื่อระยะเวลาหมักครบ 12 ชั่วโมง ให้อากาศที่ผ่านถังเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม มาระบายความร้อนภายในวัสดุหมักที่เกิดจากการเจริญของรา *A. oryzae* ด้วยความเร็วลมภายในถังหมัก 0.15 เมตรต่อวินาที ทำการหมัก 120 ชั่วโมง เนื่องจากรา *A. oryzae* มีช่วงการเจริญประมาณ 120 ชั่วโมง วัดอุณหภูมิภายในวัสดุหมักทุก 30 นาที ด้วยเซนเซอร์และเครื่องเก็บข้อมูล (data logger) และวัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศทุก 30 นาที และเก็บตัวอย่างทุก 12 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในวัสดุหมัก และปริมาณกลูโคซามีน

5. <u>การวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ</u>

5.1 วิเคราะห์ความชื้นในวัสดุหมัก

นำตัวอย่างวัสดุหมักที่ผ่านการหมักมาทำการวิเคราะห์ความชื้นทันทีด้วยเครื่องวิเคราะห์ความชื้น (moisture analyzer) คลุกเคล้าตัวอย่างให้เข้ากัน ใส่ตัวอย่างลงในเครื่องวิเคราะห์ความชื้นประมาณ 2 กรัม กดปุ่มให้เครื่องวิเคราะห์ความชื้นวิเคราะห์ปริมาณความชื้นภายในวัสดุหมักจนเครื่องวิเคราะห์ความชื้นวิเคราะห์แล้วเสร็จ อ่านค่าแล้วบันทึกผล

5.2 วิเคราะห์หาปริมาณกลูโคซามีน (Cochran and Vercellotti, 1978)

5.2.1 วิธีเตรียมสารเคมีในการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคซามีน

ในการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคซามีนต้องเตรียมสารละลายที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณกลูโคซามีนดังนี้

ก. สารละลาย acetyl acetone reagent 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในสารละลาย Na_2Co_3 1.25 M เตรียมโดยละลาย Na_2Co_3 จำนวน 6.6244 กรัม ด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ดูดสารละลาย Na_2Co_3 48 มิลลิลิตร แล้วเติม acetyl acetone 2 มิลลิลิตร (เตรียมใหม่ทุกครั้ง)

ข. สารละลาย Ehrlich reagent เตรียมโดยชั่ง para-dimethylaminobenzaldehyde 1.6 กรัม เติมไฮโดรคลอริกเข้มข้น และethyl alcohol เข็มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ อย่างละ 30 มิลลิลิตร (เก็บได้ 2-3 วัน)

ค. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 30 กรัม เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

ง. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 M เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 กรัม เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

จ. สารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M เตรียมโดยนำไฮโดรคลอริก 3.093 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร

ฉ. สารละลายมาตรฐาน glucosamine hydrochloride

- stock solution เข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เตรียมโดยละลาย glucosamine hydrochloride จำนวน 5 กรัม ด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น

- working solution เตรียมโดยนำสารละลาย stock solution ที่เตรียมไว้ มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 25, 50, 100, 150, 200, 250 และ300 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน

5.2.2 วิธีเตรียมวัสดุหมักเพื่อวิเคราะห์ปริมาณกลูโคซามีน

นำวัสดุหมักที่ผ่านการหมักที่ชั่วโมงการหมักต่างๆไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วัน นำวัสดุหมักแห้งมาบดละเอียดมา 0.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ 50 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตรลงในวัสดุหมักแห้ง แช่ไว้ 20 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองสารละลายที่แช่ไว้ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 ดูดส่วนใสที่ผ่านการกรองมา 2 มิลลิลิตร นำมาใส่หลอดทดลองและเติมน้ำกลั่นปริมาตร 1 มิลลิลิตร ปิดฝาหลอดทดลอง นำหลอดทดลองไปต้มในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วปรับพีเอชสารละลายให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1M และสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1M และปรับปริมาตรสารละลายที่ผ่านการปรับพีเอชให้มีปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 นำสารละลายตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณกลูโคซามีน

5.2.3 วิธีวิเคราะห์กลูโคซามีน

นำสารละลายตัวอย่างมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองเติม acetyl acetone reagent จำนวน 1 มิลลิลิตร ปิดฝาหลอดทดลอง พร้อมด้วย blank เตรียมโดยดูดน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง เติม acetyl acetone reagent จำนวน 1 มิลลิลิตร ปิดฝาหลอดทดลอง นำสารละลายตัวอย่างรวมทั้ง blank ไปต้มในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที เติมสารละลาย ethyl alcohol เข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 10 มิลลิลิตร และสารละลาย Ehrlich reagent จำนวน 1 มิลลิลิตร ลงในสารละลายตัวอย่าง เขย่าให้เข้ากัน ให้ตัวอย่างแต่ละตัวอย่างผสมห่างกันตัวอย่างละ 1 นาที ตั้งสารละลายตัวอย่างทิ้ง

ไว้นาน 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร อ่านและบันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง spectrophotometer

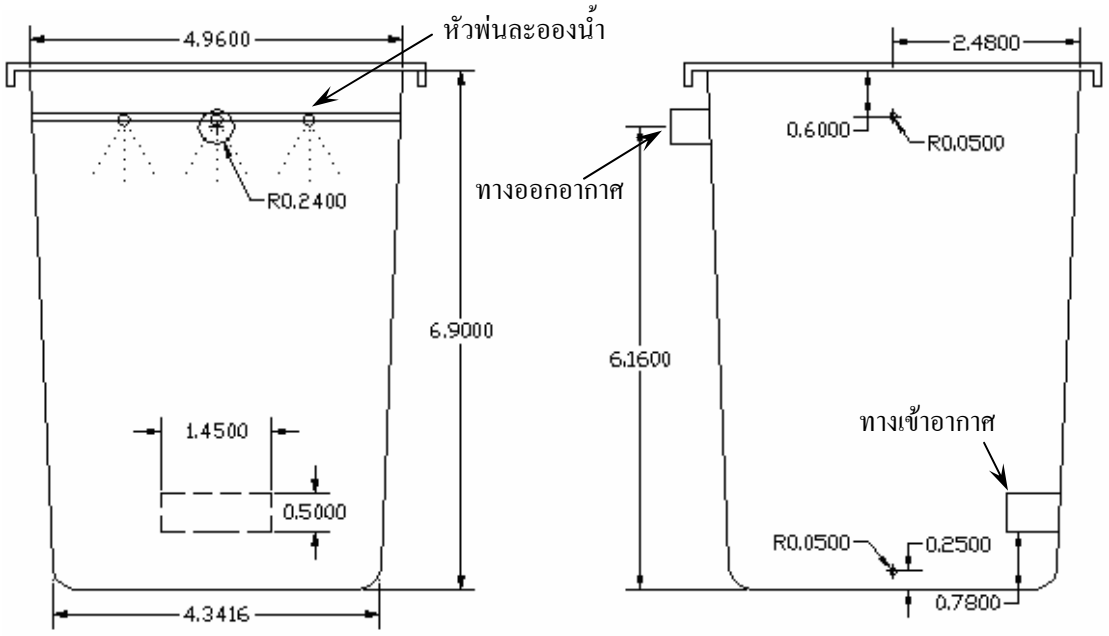
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การพัฒนาและการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

ในงานวิจัยนี้พัฒนาเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเพื่อใช้ในการหมักแบบแห้งในถังหมักแบบแพคเบด เพื่อลดการสูญเสียความชื้นของวัสดุหมักเนื่องจากระบบการให้อากาศ เพราะอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะพาความชื้นออกจากวัสดุหมักไปพร้อมกับการระบายความร้อน และทำให้วัสดุหมักแห้งซึ่งไม่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ จากการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้พัฒนาขึ้นโดยใช้อากาศที่ไม่มีการควบคุมปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ ที่อัตราการไหลอากาศ 34.62 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงหรือความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที โดยมีหัวพ่นละอองน้ำด้วยอัตราการไหล 72 ลิตรต่อชั่วโมง วัดความชื้นสัมพัทธ์ทั้งก่อนและหลังผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ และเก็บข้อมูลทุก 30 นาที ทำการทดสอบนาน 84 ชั่วโมง ซึ่งในแต่ละการทดลองให้ผลดังนี้

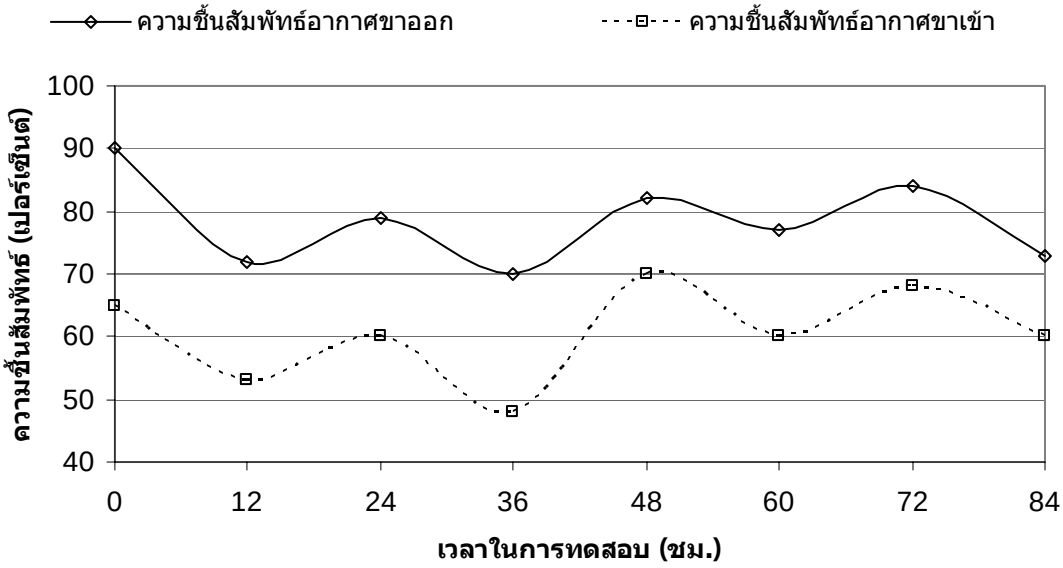
1.1 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแบบที่ 1 ติดตั้งหัวพ่นละอองน้ำไว้ด้านบนของเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จำนวน 5 หัว โดยหัวพ่นละอองน้ำพ่นละอองน้ำจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง ทางด้านล่างของเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์มีท่อระบายน้ำทำหน้าที่ระบายน้ำที่เหลือจากการเพิ่มความชื้นในอากาศให้ไหลกลับลงสู่เครื่องสูบน้ำที่อยู่ทางด้านล่างเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ อากาศจะไหลเข้าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทางด้านล่างและไหลออกทางด้านบนของเครื่อง ดังภาพที่ 32

ผลการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 พบว่าสามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจาก 60 เปอร์เซ็นต์ ให้เป็น 76 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 33 อากาศจะอยู่ในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 ประมาณ 9 วินาที ทิศทางการไหลอากาศกับทิศทางการพ่นละอองน้ำภายในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เป็นการไหลแบบทิศทางตรงกันข้ามกับ (counter-current) ทำให้การถ่ายเทมวลน้ำจากละอองน้ำไปสู่อากาศได้ดี (Yanniotis and Xerodemans, 2003) ความชื้นสัมพัทธ์ที่ออกจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่คงที่ตลอดการทดลอง เนื่องจากอากาศที่เข้าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์มีความชื้นสัมพัทธ์ไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ คือ ในเวลากลางวันมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้นปริมาณน้ำที่มีได้ ณ. อุณหภูมินั้นจะมีมากขึ้นแต่ปริมาณน้ำในอากาศนั้นมีปริมาณเท่าเดิม จึงทำให้ให้ความชื้นสัมพัทธ์ลดต่ำลง (Mahmoud *et al*., 2004)



อัตราส่วน 1 หน่วย :10 เซนติเมตร

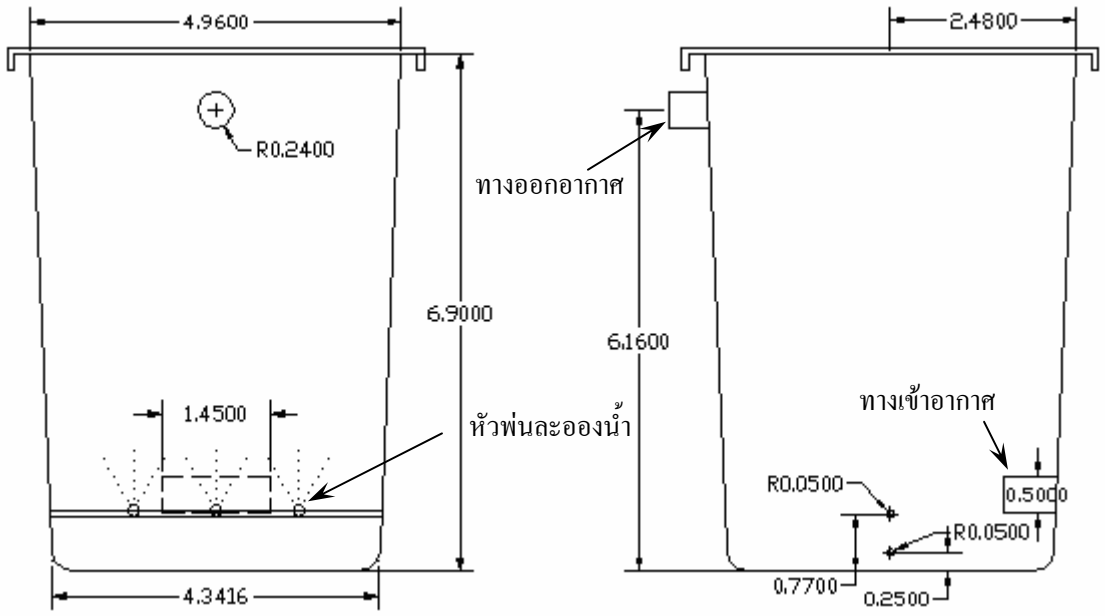
ภาพที่ 32 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1



ภาพที่ 33 ผลการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1

จากผลการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 พบว่าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 ไม่สามารถทำให้อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าคงที่ตลอดการทดลอง จึงได้มีการปรับปรุงเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เป็นแบบที่ 2

1.2 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแบบที่ 2 มีการปรับปรุงการติดตั้งหัวพ่นละอองน้ำจากด้านบนมาเป็นด้านล่างของเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ ยังคงมีจำนวนหัวพ่นละอองน้ำจำนวน 5 หัว หัวพ่นละอองน้ำจะพ่นละอองน้ำจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน ทางด้านล่างเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์มีท่อระบายน้ำเพื่อระบายน้ำที่เหลือจากการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ ให้ไหลกลับลงสู่เครื่องสูบน้ำ อากาศไหลเข้าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทางด้านล่างและไหลออกทางด้านบนของเครื่องเพิ่มเช่นเดียวกับเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 ดังภาพที่ 34

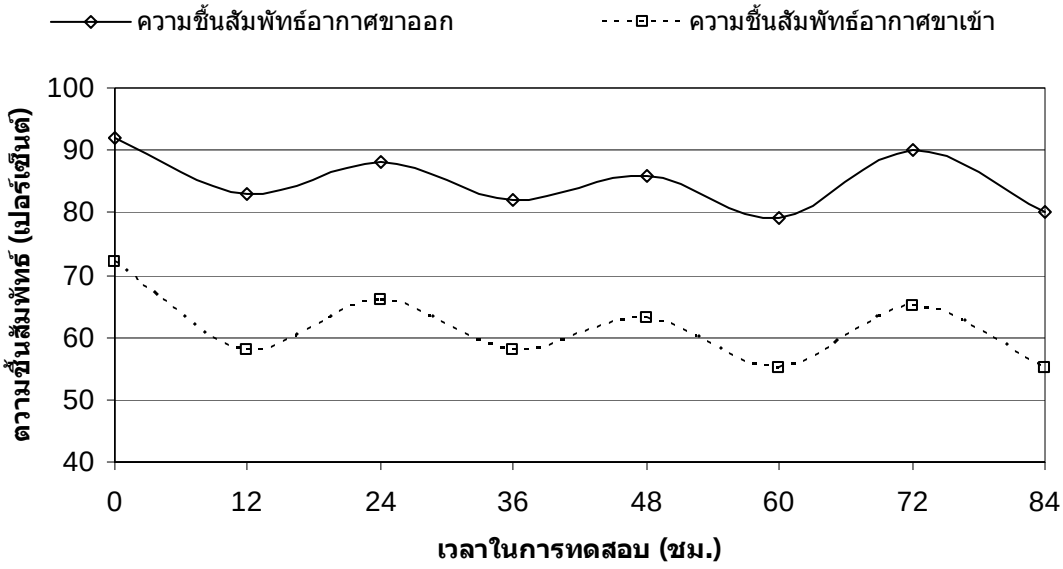


อัตราส่วน 1 หน่วย :10 เซนติเมตร

ภาพที่ 34 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 2

ผลการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 2 พบว่าเครื่องนี้สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์อากาศจาก 62 เปอร์เซ็นต์ เป็น 85 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 35 อากาศอยู่ในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 2 ประมาณ 9 วินาที การไหลอากาศกับทิศทางการพ่นละอองน้ำภายในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์มีทั้งการไหลแบบทิศทางเดียวกัน (cocurrent flow) ขณะละอองน้ำถูกพ่นขึ้นสูงด้านบนของเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ และการไหลทิศทางตรงกันข้าม (countercurrent flow) ขณะ

ละอองน้ำตกกลับลงสูงด้านล่างเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ ผลจากการติดตั้งให้หัวพ่นละอองน้ำอยู่ด้านล่างและพ่นละอองน้ำขึ้นสู่ด้านบน ช่วยเพิ่มระยะเวลาที่ละอองน้ำอยู่ในอากาศให้นานขึ้นเพราะละอองน้ำจะถูกพ่นขึ้นด้านบนและตกกลับสู่ด้านล่าง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้อากาศที่ออกจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 2 มีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าเครื่องเพิ่มความชื้นแบบที่ 1 แต่ยังคงมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ และมีความชื้นสัมพัทธ์ไม่คงที่ตลอดการทดลองเหมือนกับเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1

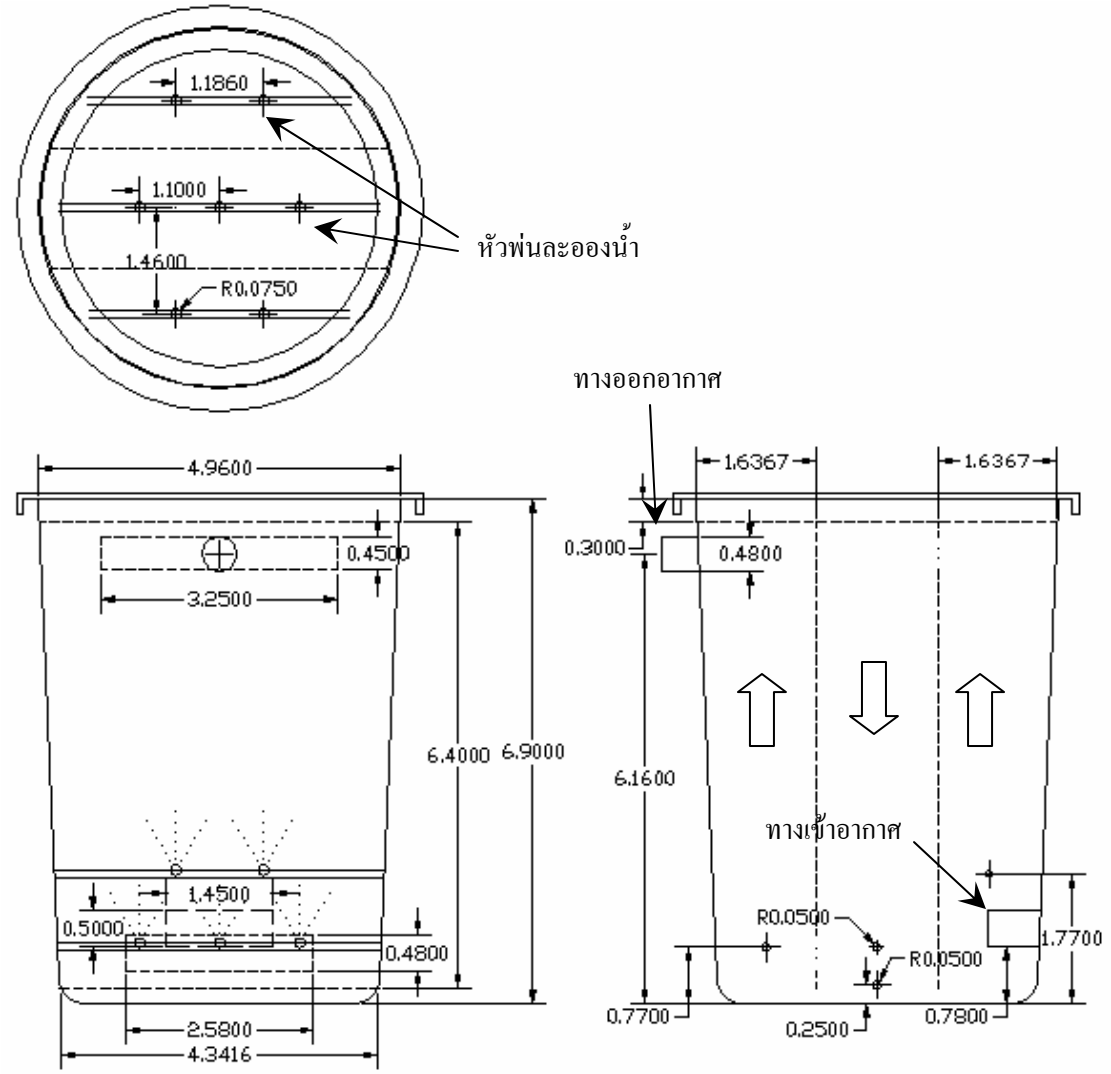


ภาพที่ 35 ผลการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 2

จากผลการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 2 พบว่าสามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้มากกว่าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 แต่มีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ และยังมีความไม่คงที่ของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ จึงได้มีการปรับปรุงเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เป็นแบบที่ 3

1.3 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแบบที่ 3 เพิ่มหัวพ่นละอองน้ำเป็น 7 หัว แบ่งออกเป็น 3 ชุด หัวพ่นละอองน้ำแต่ละชุดมีจำนวนหัวพ่นละอองน้ำ 2, 3 และ 2 หัว ตามลำดับ โดยที่ทุกหัวพ่นละอองน้ำมีทิศทางการพ่นละอองน้ำจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนทั้งหมด เหมือนเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 2 แต่ภายในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยแผ่นกั้นควบคุมทิศทางการไหลของอากาศ เพื่อเพิ่มระยะเวลาที่อากาศอยู่ภายในเครื่องเพิ่ม

ความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ให้นานขึ้น การไหลของอากาศภายในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์มีการไหลสลับขึ้นและลง ดังภาพที่ 36 ทางด้านล่างเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์มีท่อระบายน้ำ ระบายน้ำที่เหลือจากการเพิ่มความชื้นในอากาศให้ไหลกลับลงสู่เครื่องสูบน้ำ อากาศไหลเข้าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทางด้านล่างและไหลออกทางด้านบนของเครื่อง

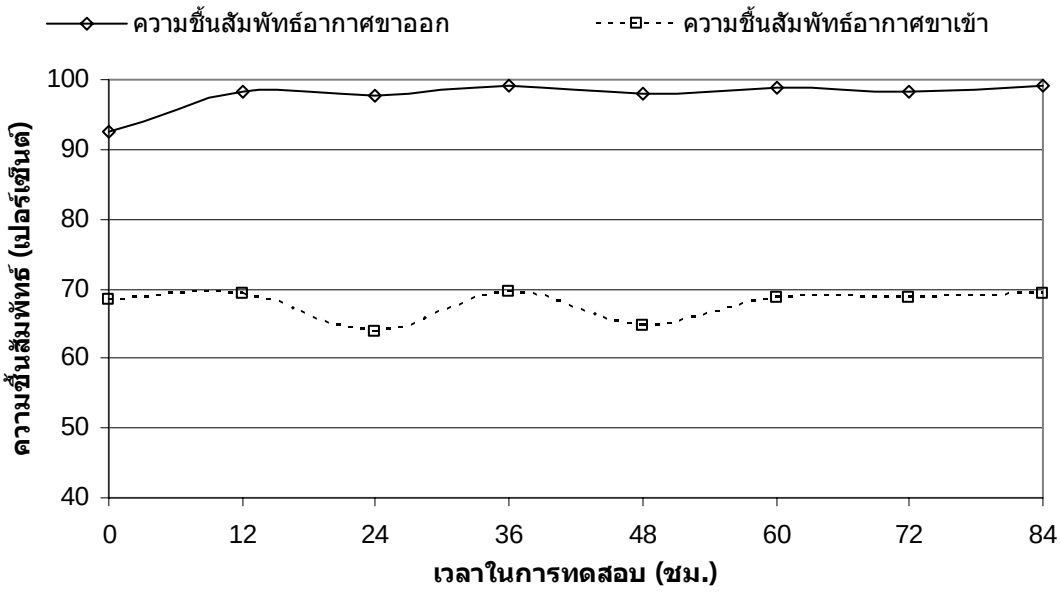


อัตราส่วน 1 หน่วย :10 เซนติเมตร

ภาพที่ 36 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3

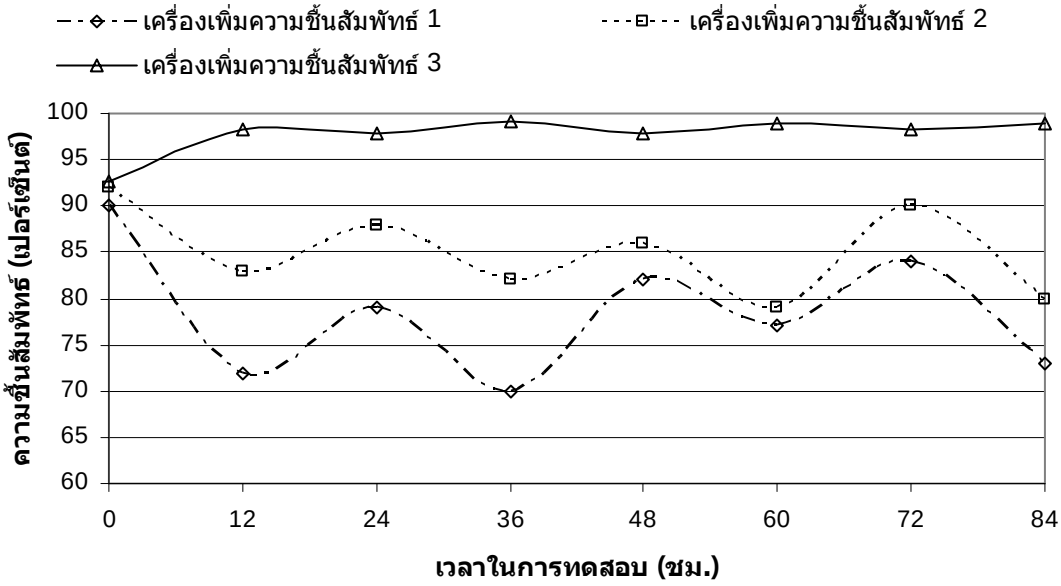
ผลจากการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ในภาพที่ 37 พบว่าสามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจาก 69.6 เปอร์เซ็นต์ เป็น 98.1 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเกือบคงที่ตลอดการทดลองโดยความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงเล็กน้อยช่วงเวลา 12-15 นาฬิกา หรือในการทดลองทดสอบ

การหมักในชั่วโมงที่ 24, 48 และ 72 โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ตลอดการทดลองมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าอากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำ ดังแสดงภาพที่ 37 ระยะเวลาที่อากาศอยู่ภายในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ 9.25 วินาที ซึ่งนานกว่าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 และ 2 ทำให้สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้มากกว่า



ภาพที่ 37 ผลการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3

เมื่อนำผลการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศโดยเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทั้งแบบที่ 1, 2 และ3 มาเปรียบเทียบกันดังภาพที่ 38 พบว่าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์อีก 2 แบบ คือ เท่ากับ 98.1 เปอร์เซ็นต์ และมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ตลอดการทดลอง 84 ชั่วโมง โดยที่เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้เท่ากับ 79 เปอร์เซ็นต์ และเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 2 สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้เท่ากับ 85 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 มีการใส่แผ่นกั้นอากาศเพื่อเพิ่มระยะเวลาที่อากาศอยู่ภายในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ให้นานขึ้นและแบ่งหัวพ่นละอองน้ำออกเป็นชุดๆ เพื่อช่วยให้การกระจายละอองน้ำดีขึ้น จึงนำเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ไปทำการทดลองในการหมักแบบแห้งด้วยการหมักรา *R. oligosporus* และรา *A. oryzae* ในการทดลองส่วนที่ 2 และ 3 ต่อไป



ภาพที่ 38 การเปรียบเทียบการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 2 และ 3

2. การหมักรา *R. oligosporus* ในถังหมักแพคเบดแบบสองชั้น ที่ความเร็วอากาศในถังหมัก 0.1 เมตรต่อวินาที

การทดลองนี้เป็นการเลี้ยงรา *R. oligosporus* ในถังแพคเบดสองชั้น เพื่อศึกษาผลการใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ที่พัฒนา โดยการหมักรา *R. oligosporus* บนวัสดุหมักผสมระหว่างกากมันสำปะหลังกับรำข้าวเจ้า ด้วยสัดส่วน 70 ต่อ 30 โดยน้ำหนัก ปรับความชื้นวัสดุหมักให้ได้ 55 เปอร์เซ็นต์ ใส่ต้นเชื้อรา *A. oryzae* 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุหมักหลังจากปรับความชื้น บรรจุลงในตะแกรงกลมที่ถูกแบ่งออกเป็น 8 ส่วนด้วยแผ่นกั้นพลาสติก ดังภาพที่ 39 ใส่วัสดุหมักในตะแกรงสูง 10 เซนติเมตร นำอากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ 3 มาระบายความร้อนในวัสดุหมักด้วยความเร็วอากาศในถังหมักแพคเบด 0.1 เมตรต่อวินาที ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 12 หลังจากการหมักจนสิ้นสุดระยะเวลาหมัก

การเจริญของรา *R. oligosporus* บนวัสดุหมักผสมระหว่างกากมันสำปะหลังกับรำข้าวเจ้า พบว่าเมื่อทำการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 1 วัน ราจะสร้างเส้นใยสีขาวและมีกลิ่นหอมอ่อนๆคล้ายกล้วยสุข เส้นใยแผ่ไปบนวัสดุหมัก และเห็นเส้นใยสีขาวฟูประมาณ 4-5 มิลลิเมตร ชัดเจนในวันที่ 2 และในวันที่ 3 ราจะเริ่มสร้างสปอร์ สปอร์ของรา *R. oligosporus* มีสีเทา และจะเข้มขึ้นเรื่อยๆตามปริมาณสปอร์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเสร็จสิ้นการหมักในชั่วโมงที่ 96 วัสดุหมักจะมีลักษณะดังภาพที่ 40

เบดบน

เบดล่าง

ภาพที่ 39 รูปวัสดุหมักเบดบนและล่าง ชั่วโมงที่ 0

เบดบน

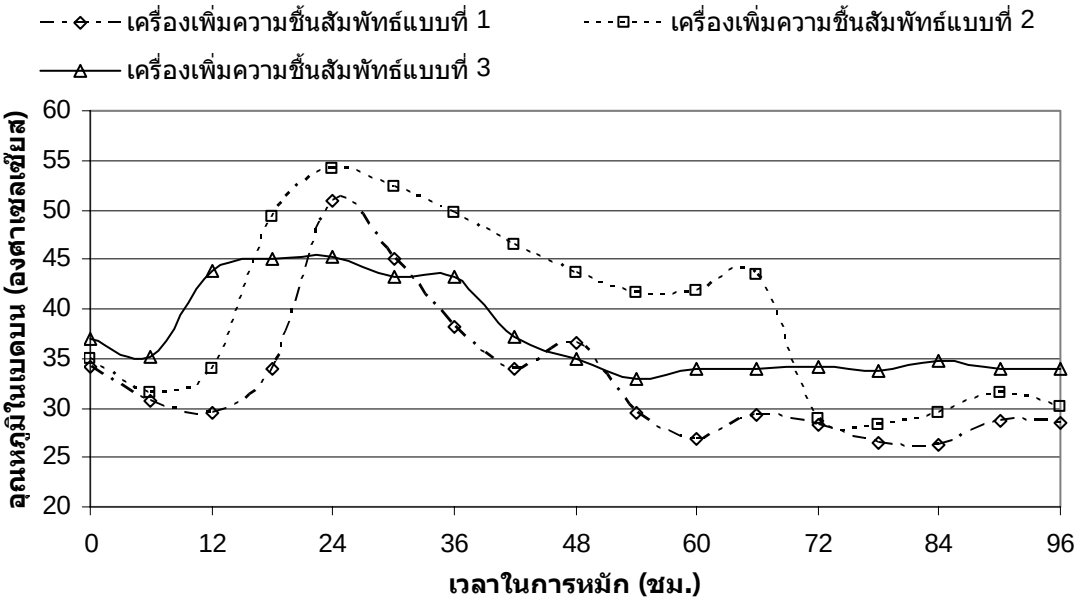
เบดล่าง

ภาพที่ 40 รูปวัสดุหมักด้านข้างในเบดบน และเบดล่าง ชั่วโมงที่ 96

จากภาพที่ 41 และ42 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบดบนและเบดล่างตลอดระยะเวลาการหมัก 96 ชั่วโมง อุณหภูมิในวัสดุหมักแสดงถึงการเจริญของรา *R. oligosporus* เนื่องจากเมื่อรา *R. oligosporus* เจริญจะเกิดความร้อนจากกระบวนการหายใจ ฉะนั้นเมื่อราเจริญได้ดีอุณหภูมิในเบดจึงสูงขึ้น แต่หากอุณหภูมิของเบดสูงเกิน 50 องศาเซลเซียส จะมีผลทำให้รา *R. oligosporus* หยุดชะงักการเจริญหรือตายได้ ในภาพที่ 41 อุณหภูมิในวัสดุหมักในช่วงแรกของเบดจะลดลงเนื่องจากวัสดุหมักที่ผ่านการฆ่าเชื้อยังอุ่นอยู่ จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนจากวัสดุหมักออกสู่สิ่งแวดล้อมจนอุณหภูมิวัสดุหมักมีค่าใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อม หลังจากนั้นอุณหภูมิในเบดเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆเนื่องจากรา *R. oligosporus* เริ่มเจริญจนถึงชั่วโมงที่ 12 ซึ่งเป็นเวลาให้อากาศแก่ระบบด้วยความเร็วอากาศในถังหมัก 0.1 เมตรต่อวินาที อากาศช่วยถ่ายเทความร้อนออกจากเบดและควบคุมให้อุณหภูมิในเบดอยู่ในช่วง 30-42 องศาเซลเซียส (Wang et al., 1975; Hesseltine, 1979; Nout and Rombouts, 1990) ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเจริญของรา *R.. oligosporus*

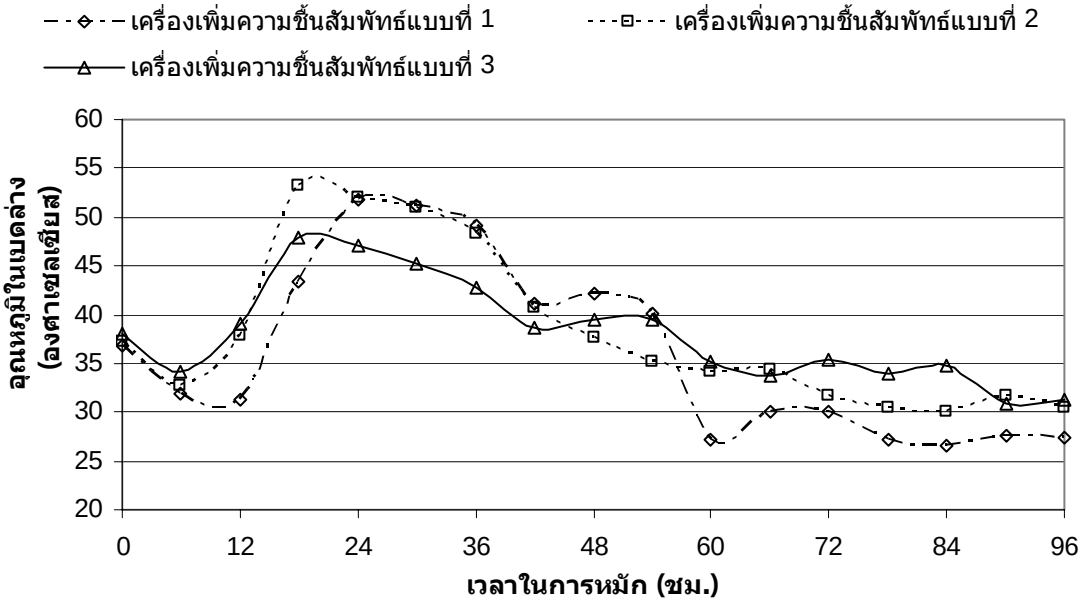
เพราะถ้าอุณหภูมิในเบดสูงมากกว่า 42 องศาเซลเซียส อาจทำให้ราชะงักการเจริญ การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการหมักแบบแห้งจะถูกจำกัดด้วยความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุหมัก (Raimbault, 1998) นอกจากนั้นอากาศช่วยระบายความร้อนออกจากเบดแล้วอากาศยังช่วยพาออกซิเจนเข้าสู่ชั้นเบดและระบายปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากชั้นเบด หลังจากการให้อากาศอุณหภูมิวัสดุหมักจะลดลงเล็กน้อยและเพิ่มขึ้นในเวลาต่อมา ในช่วงหลังของการหมักอุณหภูมิในวัสดุหมักลดต่ำลงเนื่องจากราเจริญได้น้อยลงคาดว่ามาจากสภาวะไม่เหมาะสม เช่น มีความชื้นในวัสดุหมักน้อยหรืออาหารที่ใช้ในการเจริญเริ่มขาดแคลน

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเบดบนแสดงในภาพที่ 41 พบว่าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 สามารถช่วยให้อุณหภูมิในเบดบนไม่สูงเกิน 45 องศาเซลเซียส ซึ่งจะช่วยให้รา *R. oligosporus* เจริญได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้อากาศจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 และ 2 ที่มีอุณหภูมิในวัสดุหมักสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส ทำให้รา *R. oligosporus* บางส่วนตายไปเนื่องจากอุณหภูมิในวัสดุหมักสูง สังเกตได้จากในช่วงหลังการทดลองที่ใช้อากาศจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 และ 2 มีอุณหภูมิในวัสดุหมักต่ำกว่าการทดลองที่ใช้อากาศจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3



ภาพที่ 41 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเบดบน ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที

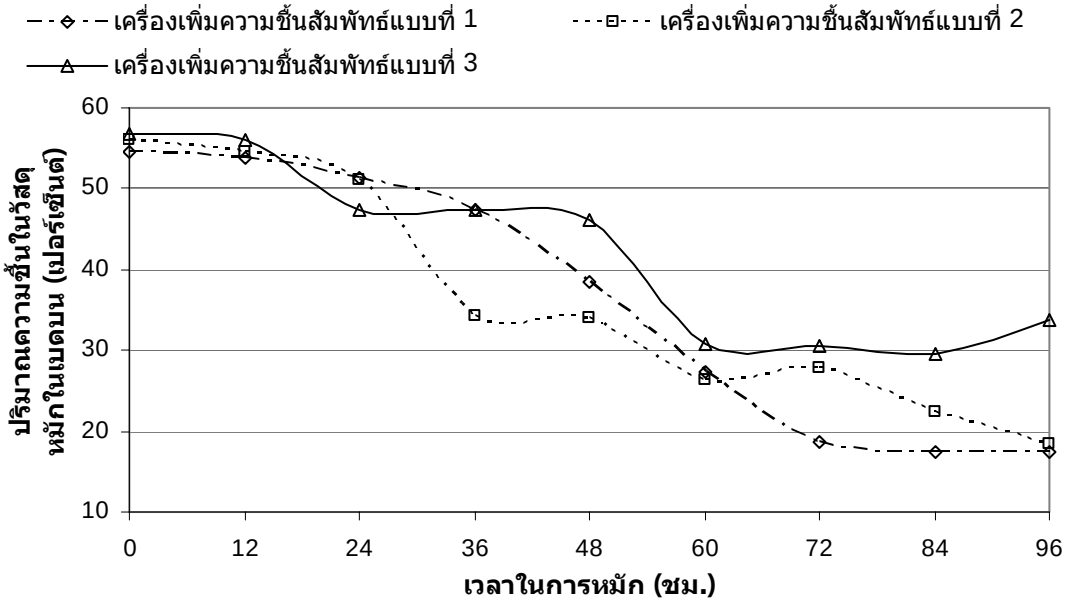
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเบดล่างแสดงในภาพที่ 42 มีแนวโน้มเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเบดบน พบว่าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 สามารถช่วยให้อุณหภูมิในเบดล่างไม่สูงเกิน 50 องศาเซลเซียส และในช่วงหลังการทดลองมีอุณหภูมิในวัสดุหมักสูงกว่าอีก 2 การทดลอง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 มีค่ามากกว่าแบบที่ 1 และ 2 จึงช่วยลดอุณหภูมิภายในเบดให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญของรา *R. oligosporus*



ภาพที่ 42 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเบดล่าง ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที

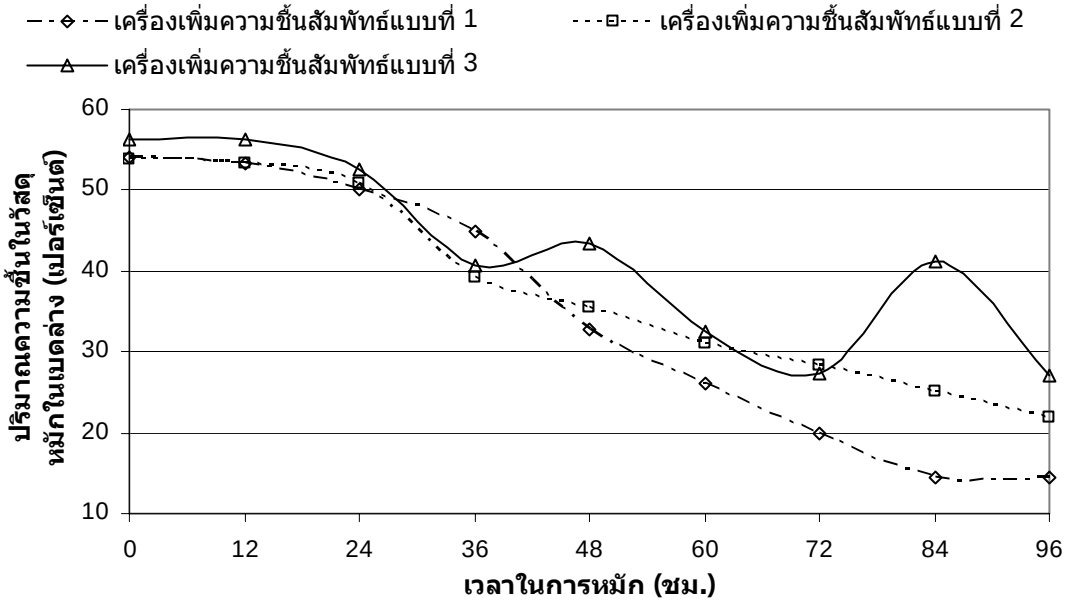
การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในวัสดุหมักในการหมักรา *R. oligosporus* ที่ความชื้นวัสดุหมักเริ่มต้นเท่ากับ 55 เปอร์เซ็นต์ และมีการให้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที ดังภาพที่ 43 แสดงความชื้นในวัสดุหมักในเบดบน และภาพที่ 44 แสดงความชื้นในวัสดุหมักในเบดล่าง ปริมาณความชื้นในวัสดุหมักจะลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดการทดลอง การลดลงของความชื้นในวัสดุหมักเกิดจากการเจริญของรา *R. oligosporus* ทำให้มีอุณหภูมิในเบดสูง จึงทำให้เกิดการการระเหยของน้ำออกจากวัสดุหมัก นอกจากนั้นการสูญเสียความชื้นของวัสดุหมักยังเกิดจากอากาศพาความชื้นออกไป ทั้งที่อากาศที่ใช้ระบายความร้อนมีความชื้นสัมพัทธ์สูง แต่เนื่องจากเบดมีอุณหภูมิสูงทำให้อากาศบริเวณรอบๆเบดมีอุณหภูมิสูง ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์รอบเบดลดต่ำลงการระเหยของน้ำจึงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

ทำให้ความชื้นในเบดลดลง ดังแสดงในภาพที่ 43 และ 44 ในชั่วโมงที่ 12-60 หลังจากชั่วโมงที่ 60 อุณหภูมิเบดมีค่าใกล้เคียงกับอากาศที่ใช้ระบายความร้อนในวัสดุหมัก ในการทดลองที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 และ 2 มีอัตราการลดลงของความชื้นในวัสดุหมักมากกว่าในการทดลองที่ใช้อากาศจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ดังภาพที่ 43-44 เนื่องจากอากาศที่ออกจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 มีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดการทดลองมากกว่าอากาศที่ออกจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 และ 2 คือ 98.1, 79 และ 85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 43 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุหมักเบดบน ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที

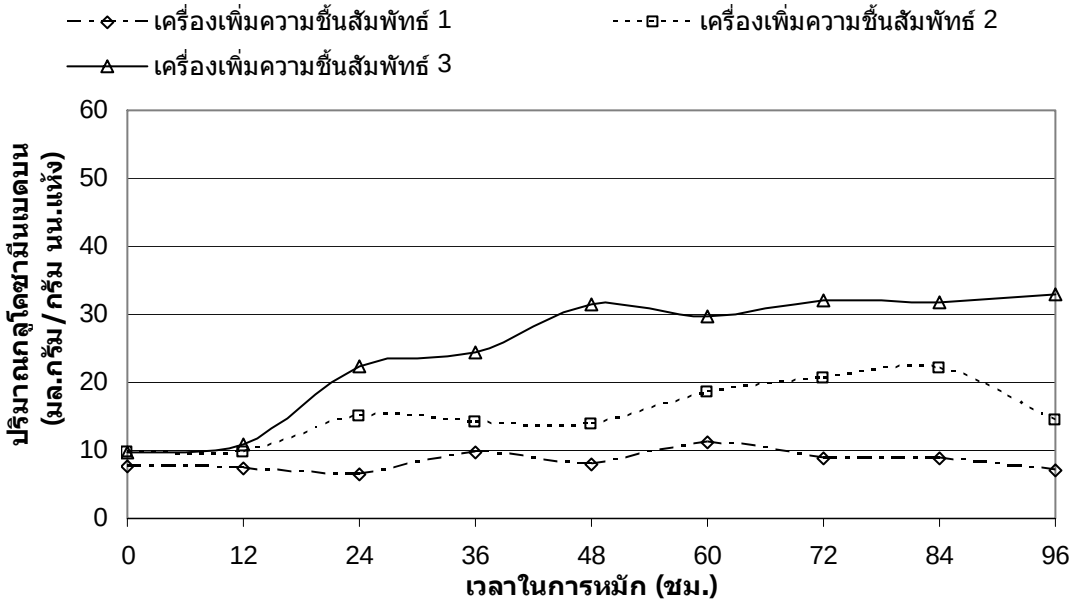
การทดลองที่ใช้อากาศจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 มีความชื้นในวัสดุหมักในชั่วโมงที่ 96 สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้อากาศจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 และ 2 คือ มีความชื้นในวัสดุหมักในเบดบน 33.82 เปอร์เซ็นต์ และในเบดล่างมีปริมาณความชื้น 27.18 เปอร์เซ็นต์ และมีความชื้นในวัสดุหมักสุดท้ายในการทดลองที่ใช้อากาศจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 และ2 เท่ากับ 17.36 และ 18.44 เปอร์เซ็นต์ ในเบดบน และ 14.44 และ 21.97 เปอร์เซ็นต์ ในเบดล่าง



ภาพที่ 44 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุหมักเบดล่าง ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที

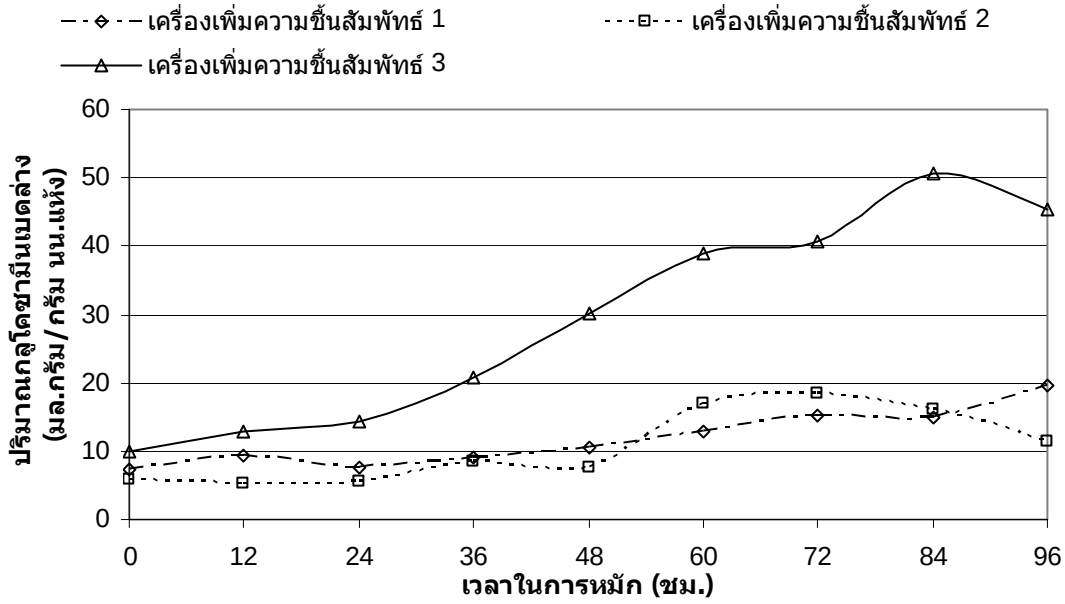
ปริมาณกลูโคซามีนเป็นตัวบ่งชี้การเจริญของรา *R. oligosporus* เนื่องจากกลูโคซามีนเป็นโมโนเมอร์ของไคตินซึ่งเป็นสารประกอบที่พบบริเวณผนังเซลล์ของรา ดังนั้นปริมาณกลูโคซามีนที่สกัดได้จากตัวอย่างจะทำให้ทราบความสามารถในการเจริญของรา *R. oligosporus* ไม่ว่าจะเป็นการขยายขนาดของเซลล์ หรือการเพิ่มจำนวนไมซีเลียม จากทดลองพบว่าในช่วงแรกของการหมักรา *R. oligosporus* จะเจริญอย่างรวดเร็วทำให้มีปริมาณกลูโคซามีนเพิ่มอย่างรวดเร็วจนกระทั่งชั่วโมงที่ 48 เมื่ออาหารเริ่มจำกัดรา *R. oligosporus* ชะลอการเจริญมีผลให้ปริมาณกลูโคซามีนมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักในช่วงหลังของการทดลอง ในการทดลองที่ใช้อากาศจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ช่วยให้รา *R. oligosporus* เจริญได้ดี พบว่ามีปริมาณกลูโคซามีนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองการทดลอง คือ มีปริมาณกลูโคซามีนในเบดบนสูงสุดในชั่วโมงที่ 96 เท่ากับ 33.05 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ดังภาพที่ 45 และในเบดล่างมีปริมาณกลูโคซามีนเท่ากับ 50.64 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในชั่วโมงที่ 84 ดังภาพที่ 46 ในการทดลองที่ใช้อากาศจากเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 และ 2 มีปริมาณกลูโคซามีนสูงสุดในเบดบนเท่ากับ 11.26 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งในชั่วโมงที่ 60 และ 22.02 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งในชั่วโมงที่ 84 และมีปริมาณกลูโคซามีนสูงสุดในเบดล่างเท่ากับ 19.52 มิลลิกรัมมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในชั่วโมงที่ 96 และ18.54 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในชั่วโมงที่ 72 จากการทดลองพบว่าเครื่องเพิ่มความชื้น

สัมพัทธ์แบบที่ 3 สามารถช่วยให้รา *R. oligosporus* เจริญได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 และ 2 โดยพิจารณาจากปริมาณกลูโคซามีนที่มีปริมาณสูง



ภาพที่ 45 ปริมาณกลูโคซามีนเบดบน ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที

จากการทดลองในตอนที่ 2 พบว่าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ช่วยให้รา *R. oligosporus* เจริญได้ดีกว่า การใช้อากาศจากเครื่องเพิ่มความชื้นแบบที่ 1 และ 2 เนื่องจากมีปริมาณกลูโคซามีนสูงที่สุดทั้งในเบดบนและเบดล่าง จึงจะนำเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ไปทดลองเพิ่มความเร็วอากาศในการหมักรา *R. oligosporus* จาก 0.1 เป็น 0.15 เมตรต่อวินาที เนื่องจากที่ความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที มีบางช่วงของการทดลองมีอุณหภูมิเกิน 42 องศาเซลเซียส การเพิ่มความเร็วอากาศคาดว่าจะถ่ายเทความร้อนออกจากเบดได้ดีขึ้น นอกจากนั้นยังช่วยพาออกซิเจนเข้าสู่วัสดุหมักได้มากขึ้นซึ่งคาดว่าจะช่วยให้รา *R. oligosporus* เจริญได้ดีขึ้น



ภาพที่ 46 ปริมาณกลูโคซามีนเบดล่าง ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที

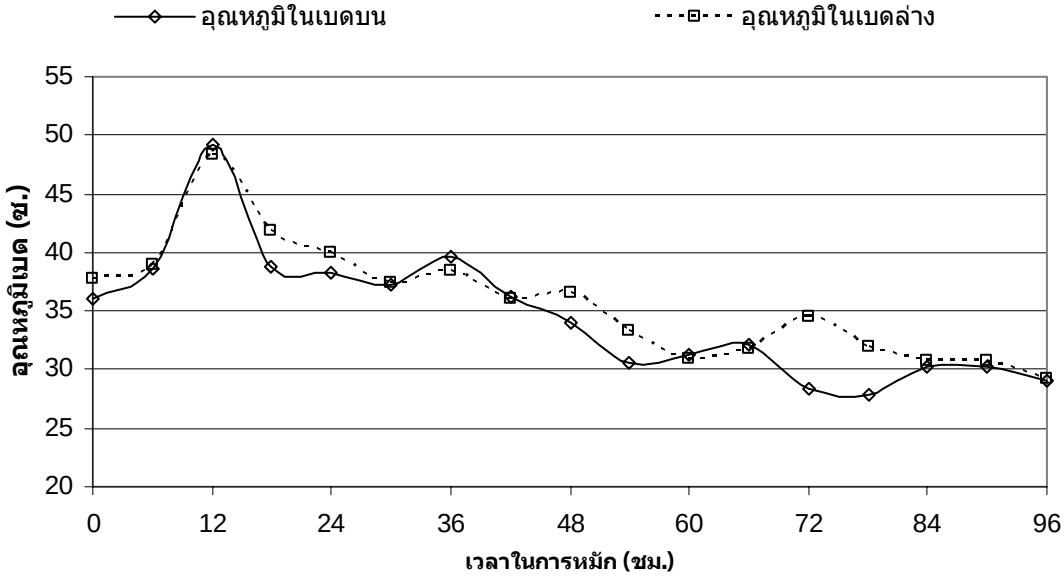
3. การหมักรา *R. oligosporus* ในถังหมักแพคเบดแบบสองชั้น ที่ความเร็วอากาศในถังหมัก 0.15 เมตรต่อวินาที

การทดลองในตอนที่ 3 นี้จะเป็นการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 โดยจะทำการหมักรา *R. oligosporus* ในสภาวะเดียวกับการทดลองที่ 2 แต่เพิ่มความเร็วอากาศในถังหมักแพคเบดจาก 0.1 เป็น 0.15 เมตรต่อวินาที

ทำการหมักรา *R. oligosporus* บนวัสดุหมักผสมระหว่างกากมันสำปะหลังกับรำข้าวเจ้าด้วยสัดส่วน 70 ต่อ 30 โดยน้ำหนัก ปรับความชื้นวัสดุหมักให้ได้ 55 เปอร์เซ็นต์ ใส่ต้นเชื้อรา *R. oligosporus* 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุหมักหลังจากปรับความชื้น บรรจุลงในตะแกรงกลมที่ถูกแบ่งออกเป็น 8 ส่วนด้วยแผ่นกั้นพลาสติก ใส่วัสดุหมักในตะแกรงสูง 10 เซนติเมตร ให้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 มาระบายความร้อนในวัสดุหมักด้วยความเร็วอากาศในถังหมักแพคเบด 0.15 เมตรต่อวินาที ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 12 หลังจากการหมักจนสิ้นสุดระยะเวลาหมัก

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในวัสดุหมักแสดงในภาพที่ 47 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในวัสดุหมักคล้ายกับการทดลองในตอนที่ 2 คือในช่วงแรกอุณหภูมิในวัสดุหมักจะลดลงและเพิ่มขึ้น

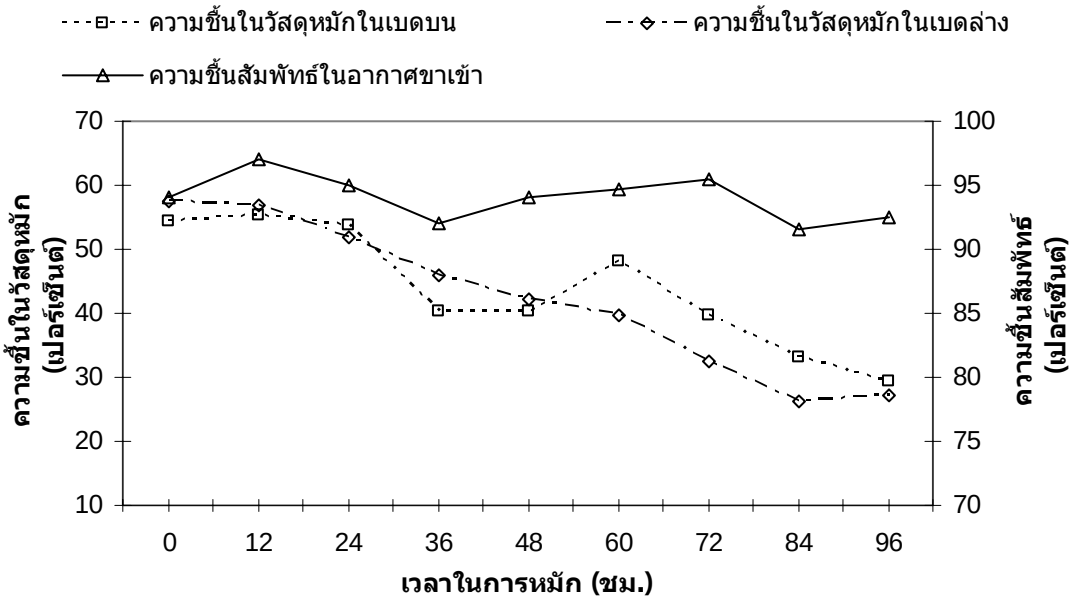
จนถึงในชั่วโมงที่ 12 มีอุณหภูมิภายในวัสดุหมักเบดบนและเบดล่างเท่ากับ 49.15 และ 48.33 องศาเซลเซียส ให้อากาศเพื่อระบายความร้อนในวัสดุหมักที่ความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที หลังจากที่ให้อากาศในชั่วโมงที่ 12 แล้วอุณหภูมิในวัสดุหมักลดลงและอยู่ในช่วง 30-42 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะกับการเจริญของรา *R. oligosporus*



ภาพที่ 47 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเบดบนและล่าง ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที

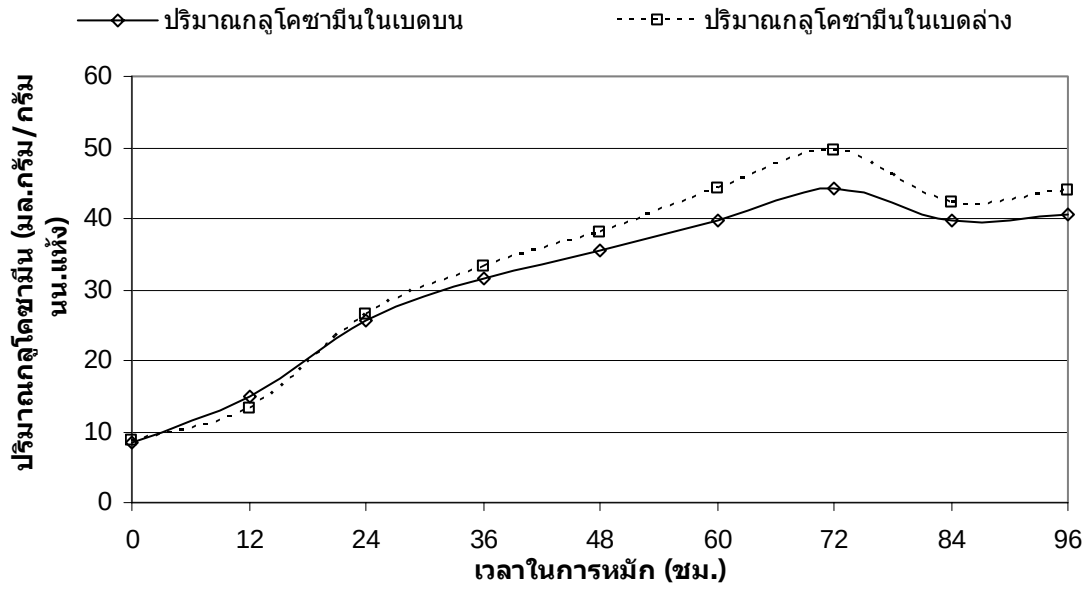
ภาพที่ 48 แสดงปริมาณความชื้นในวัสดุหมักที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการหมัก ปริมาณความชื้นในวัสดุหมักจะลดลงตลอดการทดลอง โดยที่ปริมาณความชื้นในวัสดุหมักในเบดบนและเบดล่างมีปริมาณใกล้เคียงกับการทดลองที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ที่ความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที ที่ความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที มีปริมาณความชื้นในชั่วโมงที่ 96 เท่ากับ 29.35 และ 27.14 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าการเพิ่มความเร็วอากาศจาก 0.1 เป็น 0.15 เมตรต่อวินาที ไม่มีผลต่อการลดลงของความชื้นในวัสดุหมัก ทั้งที่เมื่อความเร็วอากาศสูงอากาศจะพาความชื้นออกจากวัสดุหมักได้มากกว่า (Mahmoud *et al*., 2003; Dai and Zhang, 2000) จากการทดลองพบว่าทั้งสองการทดลองมีอุณหภูมิในเบดใกล้เคียงกันแต่มีความเร็วอากาศต่างกัน มีการลดลงของความชื้นในวัสดุหมักใกล้เคียงกันด้วย แสดงว่าการลดลงของความชื้นในวัสดุหมักที่เกิดจากอากาศพาความชื้นออกจากวัสดุหมัก ไม่ส่งผลต่อการลดลงของความชื้นในวัสดุหมัก แต่การลดลงของความชื้นในวัสดุหมักเกิดจากอุณหภูมิในเบดสูง ส่งผลให้อุณหภูมิรอบๆเบดสูงจึงทำให้

ความชื้นสัมพัทธ์รอบๆเบดลดต่ำลงความชื้นในวัสดุหมักจึงระเหยได้ง่าย ทั้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขาเข้าถังหมักมีค่ามากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ตลอดการทดลอง



ภาพที่ 48 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุหมักในเบดบนและล่าง และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขาเข้าถังหมักแพคเบด ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที

ภาพที่ 49 แสดงปริมาณกลูโคซามีนในระหว่างการหมัก พบว่าในชั่วโมงที่ 0-12 ปริมาณกลูโคซามีนยังมีปริมาณไม่มากนัก แต่หลังจากชั่วโมงที่ 12 ปริมาณกลูโคซามีนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงชั่วโมงที่ 72 ปริมาณกลูโคซามีนมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักอาจเนื่องมาจากอาหารในวัสดุหมักเริ่มขาดแคลน โดยที่มีปริมาณกลูโคซามีนสูงสุดในเบดบนและเบดล่างเท่ากับ 44.31 และ 49.46 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณกลูโคซามีน พบว่าการทดลองที่ความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที มีปริมาณกลูโคซามีนในชั่วโมงที่ 72 สูงกว่าการทดลองที่ความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที แสดงว่าการให้อากาศที่ความเร็วในถังหมักแพคเบดเท่ากับ 0.15 เมตรต่อวินาที ช่วยให้รา *R. oligosporus* เจริญได้ดีกว่าที่ความเร็วอากาศในถังหมักแพคเบดเท่ากับ 0.1 เมตรต่อวินาที และการให้อากาศจะช่วยคุมอุณหภูมิในวัสดุหมักให้อยู่ในช่วง 30 – 42 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่รา *R. oligosporus* เจริญได้ดี และการเพิ่มความเร็วอากาศช่วยพาออกซิเจนเข้าสู่วัสดุหมักได้มากกว่าจึงช่วยให้รา *R. oligosporus* เจริญได้ดีเพราะรา *R. oligosporus* ใช้ออกซิเจนในการเจริญ



ภาพที่ 49 ปริมาณกลูโคซามีนในเบดบนและล่าง ในการหมักรา *R. oligosporus* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที

จากการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ที่ความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที พบว่า สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ตลอดการทดลอง นอกจากนั้นช่วยให้รา *R. oligosporus* เจริญได้ดีกว่าการทดลองที่ให้อากาศระบายความร้อนเท่ากับ 0.1 เมตรต่อวินาที หลังจากนั้นทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ในการหมักชนิดอื่น เช่น รา *A .oryzae* ว่าสามารถช่วยให้รา *A .oryzae* เจริญได้ดีหรือไม่ เนื่องจากราทั้งสองชนิดเจริญได้ในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน

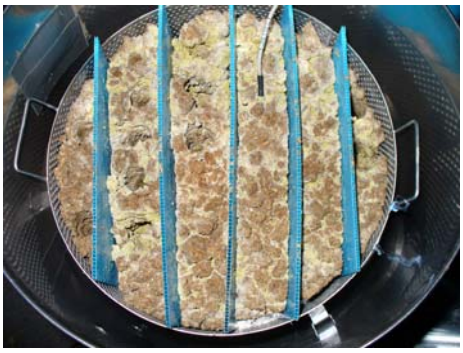
4. การหมักรา *A . oryzae* ในถังหมักแพคเบดแบบชั้นเดียว ที่ความเร็วอากาศในถังหมัก 0.15 เมตรต่อวินาที

การทดลองนี้เป็นการทดสอบการใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ในการหมักรา *A. oryzae* บนวัสดุหมักผสมระหว่างรำข้าวสาลีกับรำข้าวเจ้าด้วยสัดส่วน 75 ต่อ 25 โดยน้ำหนัก ปรับความชื้นวัสดุหมักให้ได้ 50 เปอร์เซ็นต์ ใส่ต้นเชื้อรา *A. oryzae* 0.3 เปอร์เซ็นต์และแป้งจำนวน 10 เปอร์เซ็นต์ บรรจุลงในตะแกรงกลมที่ถูกแบ่งออกเป็น 6 ส่วนด้วยแผ่นกั้นพลาสติก ใส่วัสดุหมักในตะแกรงสูง 10 เซนติเมตร ให้อากาศในชั่วโมงที่ 12 ด้วยความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที

การเจริญของรา *A. oryzae* บนวัสดุหมักผสมระหว่างกากมันสำปะหลังกับรำข้าวเจ้า ดังภาพที่ 50 พบว่าเมื่อทำการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ราจะสร้างเส้นใยสปอร์สีขาว ที่เรียกว่า ไมซีเลียม ปกคลุมวัสดุหมัก และในชั่วโมงที่ 60 ราจะเริ่มสร้างสปอร์ โดยสปอร์ของรา *A. oryzae* มีสีเหลืองแกมเขียว และจะเข้มขึ้นเรื่อยๆตามปริมาณสปอร์ที่เพิ่มขึ้น

ชั่วโมงที่ 0

ชั่วโมงที่ 24



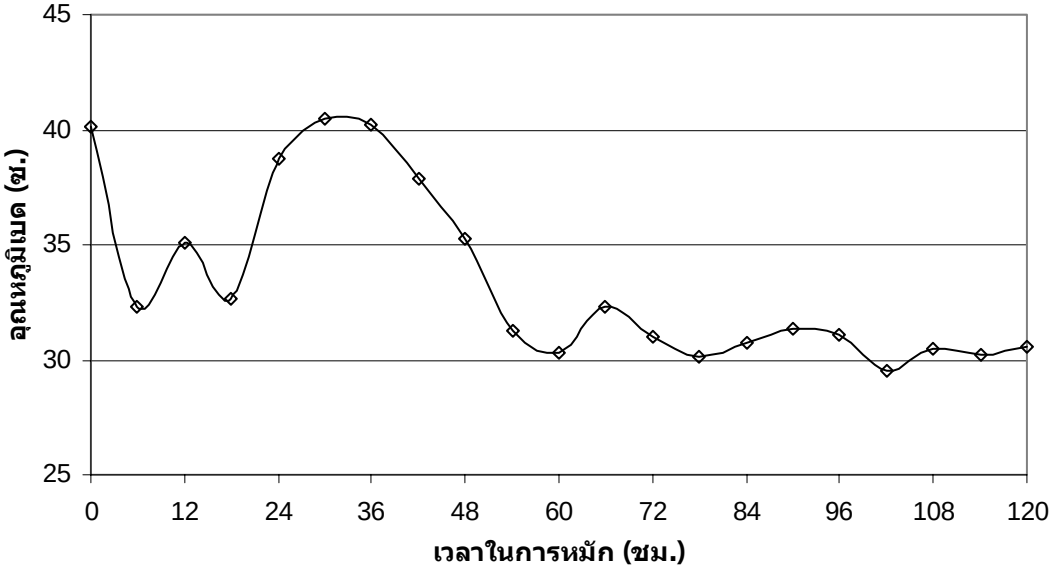
ชั่วโมงที่ 60

ชั่วโมงที่ 120

ภาพที่ 50 รูปวัสดุหมักที่ชั่วโมงที่ 0, 24, 60 และ120

จากภาพที่ 51 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบดตลอดระยะเวลาการหมัก 120 ชั่วโมง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเหมือนกับการทดลองที่ผ่านมา คือ ในช่วงแรกอุณหภูมิวัสดุหมักจะลดลงแล้วเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆจนอุณหภูมิในเบดเท่ากับ 35.07 องศาเซลเซียส ในชั่วโมงที่ 12 จึงมีการเปิดลมที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็วลม 0.15 เมตรต่อวินาที มาระบายความร้อนในเบด ให้อุณหภูมิในเบดอยู่ในช่วงที่เหมาะกับการเจริญของรา *A. oryzae* หลังจากเปิดลมแล้วอุณหภูมิในวัสดุหมักจะลดลง เนื่องจากรา *A. oryzae*

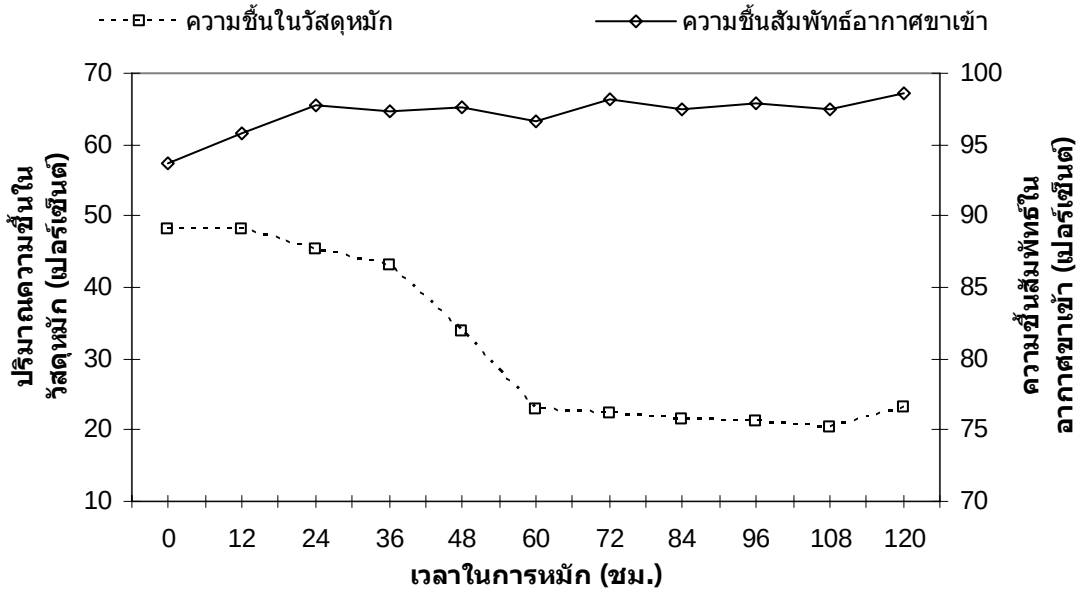
จะปรับตัวกับสภาวะใหม่ ระยะปรับตัวของรา *A. oryzae* อยู่ระหว่างชั่วโมงที่ 12-18 ดังภาพที่ 51 และรา *A. oryzae* เริ่มเจริญอีกครั้งจนถึงชั่วโมงที่ 60 อุณหภูมิในเบดลดต่ำลงแสดงว่าราเริ่มชะลอการเจริญคาดว่าเนื่องจากอาหารเริ่มขาดแคลน สังเกตได้จากภาพที่ 50 พบว่าวัสดุหมักในชั่วโมงที่ 60 แล ชั่วโมงที่ 120 มีลักษณะคล้ายกัน



ภาพที่ 51 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเบด ในการเลี้ยงรา *A. oryzae* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที

จากภาพที่ 52 แสดงปริมาณความชื้นในวัสดุหมักที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการหมักรา *A. oryzae* ปริมาณความชื้นในวัสดุหมักจะลดลงตลอดการทดลอง โดยที่มีความชื้นในวัสดุหมักเริ่มต้นเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ และมีการให้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็ว 0.15 เมตรต่อวินาที ซึ่งเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้เฉลี่ย 97.38 เปอร์เซ็นต์ และมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ตลอดการทดลอง ดังภาพที่ 52 ซึ่งถือว่ามีค่าใกล้เคียงกับที่อัตราเร็วลม 0.1 เมตรต่อวินาที เมื่ออัตราเร็วอากาศสูงขึ้นทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ลดต่ำลง (Mahmoud, 2004; Iyuke, 2001) ปริมาณความชื้นในวัสดุหมักลดลงอย่างรวดเร็วในชั่วโมงที่ 24-60 เนื่องจากรา *A. oryzae* มีการเจริญอย่างรวดเร็ว มีผลให้อุณหภูมิในเบดสูง จึงทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุหมักอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 52 และหลังจากชั่วโมงที่ 60 ปริมาณความชื้นในวัสดุหมักเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากอุณหภูมิวัสดุหมักและอุณหภูมิอากาศขาเข้าถังหมักมีค่าใกล้เคียง

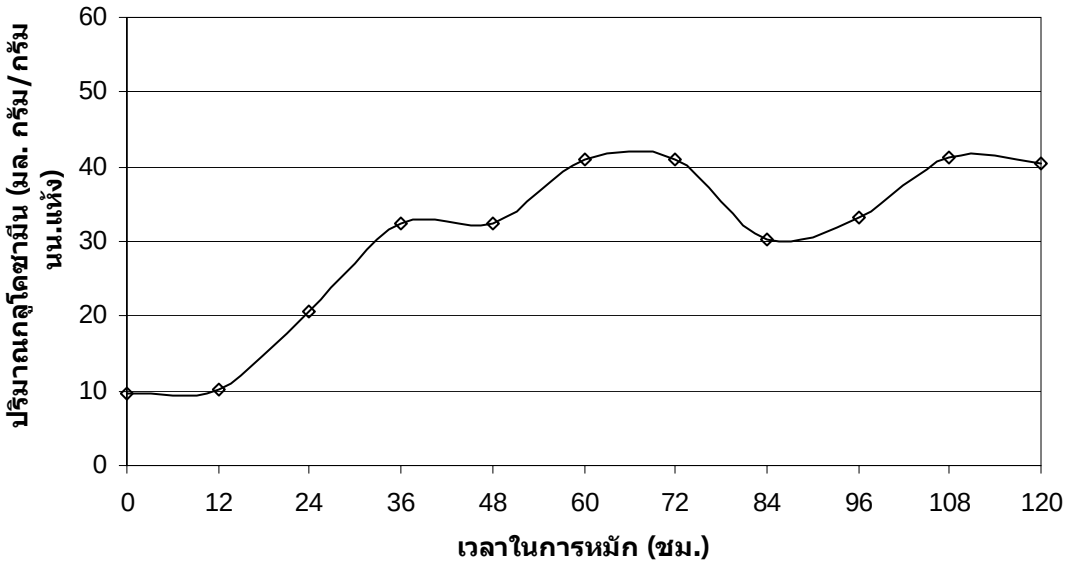
กัน ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศไม่ลดลงเนื่องจากอุณหภูมิบริเวณเบดสูงทำให้เกิดการระเหยของน้ำในวัสดุหมักน้อย และในชั่วโมงที่ 120 วัสดุหมักมีปริมาณความชื้น 23.06 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 52 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุหมักและความชื้นสัมพัทธ์ ในการเลี้ยงรา *A. oryzae* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที

จากภาพที่ 53 แสดงปริมาณกลูโคซามีนในระหว่างการหมัก พบว่าปริมาณกลูโคซามีนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงชั่วโมงที่ 12-60 แสดงว่ารา *A. oryzae* เจริญได้ดี และหลังจากชั่วโมงที่ 60 ปริมาณกลูโคซามีนมีค่าคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในวัสดุหมัก มีปริมาณกลูโคซามีนสูงสุดในชั่วโมงที่ 108 เท่ากับ 41.20 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง มีปริมาณกลูโคซามีนมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณกลูโคซามีนที่ได้จากหมักรา *R. oligosporus* คือ มีปริมาณกลูโคซามีนสูงสุดในเบดบนและเบดล่างเท่ากับ 44.31 และ 49.46 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

จากการทดลองสรุปได้ว่า เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 สามารถช่วยให้รา *A. oryzae* และรา *R. oligosporus* เจริญได้ดีโดยดูได้จากปริมาณกลูโคซามีนที่เพิ่มขึ้นอย่างมากในการทดลองตอนที่ 2 และ 3



ภาพที่ 53 ปริมาณกลูโคซามีน ในการเลี้ยงรา *A. oryzae* ใช้อากาศที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยความเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที

สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ไว้ 3 แบบ และทดสอบประสิทธิภาพการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศโดยเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทั้ง 3 แบบ นาน 84 ชั่วโมง โดยไม่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ และนำเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทั้ง 3 แบบไปหมักรา *R. oligosporus* ในถังหมักแพคเบดแบบสองชั้น ที่ความเร็วอากาศในถังหมัก 0.1 เมตรต่อวินาที เพื่อหาเครื่องเพิ่มความชื้นที่เหมาะสมกับการหมักรา *R. oligosporus* หลังจากนั้นนำเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมไปหมักรา *R. oligosporus* ในถังหมักแพคเบดแบบสองชั้น ที่ความเร็วอากาศในถังหมัก 0.15 เมตรต่อวินาที สุดท้ายนำเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมมาทดลองเลี้ยงรา *A. oryzae* ในถังหมักแพคเบดแบบชั้นเดียว ด้วยอัตราเร็วอากาศ 0.15 เมตรต่อวินาที ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ 3 พบว่า เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้เฉลี่ย 79 เปอร์เซ็นต์ เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 2 สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้เฉลี่ย 85 เปอร์เซ็นต์ และเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 สามารถเพิ่มความชื้นได้เฉลี่ย 98.1 เปอร์เซ็นต์ และมีความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ตลอดการทดลอง

2. ในการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทั้ง 3 แบบ ด้วยการหมักรา *R. oligosporus* โดยเริ่มให้อากาศในชั่วโมงที่ 12 ด้วยความเร็วอากาศในถังหมัก 0.1 เมตรต่อวินาที และทำการหมักเป็นเวลา 96 ชั่วโมง พบว่าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 สามารถช่วยให้รา *R. oligosporus* เจริญได้ดี มีปริมาณกลูโคซามีนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 และ 2 คือ มีปริมาณกลูโคซามีนสูงสุดเพิ่มขึ้น 193 เปอร์เซ็นต์ ในเบดบน และ 159 เปอร์เซ็นต์ ในเบดล่าง จากการทดลองที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 มีปริมาณกลูโคซามีนสูงสุดในเบดบนและเบดล่างเท่ากับ 33.05 และ 50.64 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

3. ผลการทดสอบเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ด้วยการหมักรา *R. oligosporus* และรา *A. oryzae* ให้อากาศในชั่วโมงที่ 12 ด้วยความเร็วอากาศเท่ากับ 0.15 เมตรต่อวินาที พบว่าสามารถช่วยให้รา *R. oligosporus* เจริญได้ดีมากกว่าที่ความเร็วอากาศ 0.1 เมตรต่อวินาที มีปริมาณกลูโคซามีนสูงสุดในเบดบนและเบดล่างเท่ากับ 49.15 และ 48.33 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งเพิ่มขึ้นจากการทดลองที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 เท่ากับ 293 และ 153 เปอร์เซ็นต์ ในเบดบนและล่าง นอกจากนั้นยังช่วยให้รา *A. oryzae* เจริญได้ดี มีปริมาณกลูโคซามีนสูงสุดเท่ากับ 41.20 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

ข้อเสนอแนะ

1. การหมักในถังหมักแบบแพคเบดมักพบปัญหาในการระบายความร้อนซึ่งแก้ปัญหาโดยให้อากาศที่ผ่านถังเพิ่มความชื้นมาระบายความร้อนในถังแพคเบด แต่ก็ยังทำให้ความชื้นของวัสดุหมักลดลง แม้ว่าอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูงก็ตาม ซึ่งส่งผลต่อการเจริญของรา ดังนั้นถ้ามีระบบควบคุมอุณหภูมิช่วยให้การเจริญของราดีขึ้น

2. การลดลงของความชื้นในวัสดุหมักลดลงเนื่องจากอุณหภูมิในวัสดุหมักสูง เมื่ออุณหภูมิในวัสดุหมักสูงกว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าถังหมัก ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศรอบๆเบดมีอุณหภูมิสูงทำให้ความชื้นสัมพัทธ์บริเวณนั้นลดต่ำลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงซึ่งทำให้ปริมาณความชื้นที่อากาศนั้นมีได้ ณ. อุณหภูมินั้นมีมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศลดลง จึงควรมีระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเบด 5 องศาเซลเซียส ซึ่งจะช่วยให้ความชื้นสัมพัทธ์รอบเบดที่อุณหภูมิสูงมีความชื้นสัมพัทธ์สูงตามไปด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมอุตุนิยมวิทยา. 2545. **อากาศบ้านเรา.** แหล่งที่มา: http://www.tmd.go.th/knowledge/book_weather 06.html. August 7, 2005.

กำเนิด สุภัณวงษ์. 2534. **จุลชีวอุตสาหกรรม.** สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ. 309 น.

จรัญ ฉัตรมานพ. 2548. **การหมักกากมันสำปะหลังโดยใช้ถังหมักแพคเบดแนวใหม่.** วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

จุฬารัตน์ ครองแถว. 2547. **การผลิตต้นเชื้อรา *Rhizopus oligosporus* โดยวิธีการหมักแบบแห้งในถัง แพคเบด.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ชัยสัวสดิ์ เทียนวิบูลย์. 2523. **การทำความเย็นและปรับอากาศ.** โรงพิมพ์ ก.วิวรรธน์. กรุงเทพฯ. 309 น.

ดุษณี ธนะบริพัฒน์. 2537. **จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม**. ภาควิชาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.

ประนอม ศรัยสวัสดิ์. 2546. **ข่าวสารเมล็ดพันธุ์พืช**. ปีที่ 10 (3)

พวงพร โชติกไกร. 2546. **จุลชีววิทยาของอาหารและนม.** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. กรุงเทพฯ. 331 น.

พิบูลย์ มงคลสุข. 2541. **เชื้อราวิทยา.** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. กรุงเทพฯ. 168 น.

พิไลพรรณ พงษ์พูล. 2525. **ราวิทยาเบื้องต้น.** สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ. 250 น.

มณีรัตน์ ติรนันทกุล. 2542. **การศึกษาทดลองหมักถั่วเหลืองแบบอาหารแข็งในระบบแพคเบด.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

วราวุฒิ ครูส่ง. 2529. **เทคโนโลยีชีวภาพ.** สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ. 163 น.

วราวุฒิ ครูส่ง. และรุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2532. **เทคโนโลยีการหมักในอุตสาหกรรม.** สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ. 209 น.

สมใจ ศิริโภค. 2537. **เทคโนโลยีการหมัก.** ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ. กรุงเทพฯ. 250 น.

สุพจน์ ใช้เทียมวงศ์. 2545. **เทคโนโลยีการหมัก.** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. กรุงเทพฯ. 393 น.

อรุณี อภิชาติสรางกูร. 2530. **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารทั่วไป.** มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่. 235 น.

Armstrong Humidification Group. 2005a. **Basic Application Principles.** Available Source: http://www.armstrong-intl.com/common/hvacsolutionsource/basicprinciples.pdf, August 7, 2005.

Armstrong Humidification Group. 2005b. **Determining Humidity Requirements of Materials.** Humidity Requirements of Materials. Available Source: http://www.armstrong-intl.com/ products/ humidifiers/ hrequire.php3. August 7, 2005.

Armstrong Humidification Group. 2005c. **Understanding How Humidifiers Work.** Available Source: http://www.armstrong-intl.com/common/hvacsolutionsource/ humidifierswork.pdf. August 7, 2005.

Bilgrami, K.S. and R.N. Verma. 1978**. Physiology of fungi.** Vikas Publishing House PVT, Ltd., New Dehli. 507 p.

BioImages: The Virtual Field-Guide (UK). 1976. ***Rhizopus*: sporangiophores.** Available source: http://www.bioimages.org.uk/HTML/R151967.HTM, August 13, 2004. August 7, 2005.

Cochran, T.W. and J.R. Vercellotti. 1978. Hexosamine biosynthesis of fungi as a reliable index of fungal biomass accumulation in liquid and solid media. **Carbohyd. Res.** 61: 529-553.

Dai, Y.J. and H.F. Zhang. 2000. Experimental investigation of a solar desalination unit with humidification and dehumidification. **Desalination.** 130: 169-175.

Deacon, J.W. 1997. **Modern mycology.** Oxford : Blackwell Science. 303 p.

Felder, R.M. and R.W. Rousseau. 1999. Balances on Nonreactive Processes. pp. 384-389. **Elementary Principles of Chemical Processes. Ed 3**rd. John Wiley & Sons, Inc.

Francis, F., A. Sabu, K.M. Nampoothiri, S. Ramachandran, S. Ghosh, G. Szakacs and A. Pandey. 2003. Use of response surface methodology for optimizing process parameters for the production of α-amylase by *Aspergillus oryzae.* **Biochemical Engineering Journal.** 15: 107-115.

Frazier, W.C. 1967. **Food microbiology.** McGraw-Hill, Inc., America. 537 p.

Gervais, P. and P. Molin. 2003. The role of water in solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal.** 13: 85-101.

Ghildyal, N.P., M. Ramakrisna, B.K. Lonsane and N.G. Karanth. 1992. Gaseous concentration gradients in tray type solid state fermentors: effect on yield and productivities. **Bioprocess Engineering.** 8: 67-72.

Ghildyal, N.P., M.K. Gowthaman, K.S.M.S. Raghava Rao and N.G. Karanth. 1994. Interaction of transport resistances with biochemical reaction in packed-bed solid-state fermentation: Effect of temperature gradients. **Enzyme and Microbial Technology.** 31: 253-257.

Hamidi-Esfahani, Z., S.A. Shojaosadati and A. Rinzema. 2004. Modelling of simultaneous effect of moisture and temperature on *A. niger* growth in solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal.** 21: 265–272

Hesseltine, C.W. 1979. Microorganism involved in food fermentation in tropical Asia. *In* **Proceedings of the International Symposium on Microbiological Aspects of Food Storage, Proceedings and Fermentation in Tropical Asia.** Bogor, Indonesia.

Iyuke, S.E., A.B. Mohamad and W.R.W. Daud. 2001. Estimation of humidification load from humidifier column by convective heat transfer in water-air-vapour system. **Chemical Engineering Science.** 56: 4949-4956

Ko, S.D. 1985. Some microbiological aspects of tempe starters. *In* **Proceedings of Asian Symposium on Non-salted Soybean Fermentation.** Tsukuba, Japan.

Lindenfelser, L.A. and A. Ciegler. 1975. Solid-substrate fermentor for ochratoxin A production. **Appl. Microbiol.** 29: 323-327.

Mahmoud, B.A., I. Houcine, A. Guizani and M. Mâalej. 2003. Experimental study of a multiple-effect humidification solar desalination technique. **Desalination.** 170: 209-221.

Mahmoud, B.A., I. Houcine, A. Guizani and M. Mâalej. 2004. Theoretical and experimental study of a pad humidifier used in a seawater desalination process. **Desalination.** 168: 1-12.

McCabe, W.L., J.C. Smith and P. Harriott. 2001. Humidification Operations, pp. 596-621 **Unit Operations of Chemical Engineering. ed 6th**. McGRAW-hill international edition.

Mitchell, D.A. and B.K. Lonsane. 1992. Definition, characteristics and potential, pp. 1-13. *In* H.W. Doelle, D.A. Mitchell and C.E. Rolz, eds. **Solid Substrate Cultivation.** Elsevier Applied Science, London.

Mudgett, R.E. 1986. Solid-state fermentation, pp. 66-83. In A.L. Demain and N.A. Solomon (eds.). Manual of Industrial Microbiology and Technology. **American Society for Microbiology**, Washington D.C.

Murata, K. 1977. Antioxidants and vitamins in tempeh. *In* **Symposium on Indiginous Fermented Food.** Bangkok, Thailand. Cited in Steinkraus, K.H., R.E. Cullen, P.S. Pederson and L.F. Nellis. 1983. Handbook of Indiginous Fermented Foods. Marcel Dekker, Inc. New York.

Nagel, F.J., J. Tramper, M.S.N. Bakker and A. Rinzema. 2001a. Temperature control in a continuously mixed bioreactor for solid-state fermentation**. Biotechnol. Bioeng.** 72: 219-230.

Nagel, F.J., J. Tramper, M.S.N. Bakker and A. Rinzema. 2001b. Model for on-line moisture-content control during solid-state fermentation**. Biotechnol. Bioeng.** 72: 231-243.

Nout, M.J.R. and F.M. Rombouts. 1990. A review: recent developments in tempe research. **J. Appl. Bacteriol.** 69: 609-633.

Raimbault, M. 1998. General and microbiological aspects of solid substrate fermentation. **Electronic Journal of Biotechnology**. 1: 174-188.

Sangsurasak, P., and D. A. Mitchell. 1995. The investigation of transient multidimensional heat transfer in solid state fermentation. **The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal.** 60: 199-204.

Shurtleff, W. and A. Aoyagi. 1980. **Tempe Production.** New Age Foods. Lafayette, California.

Silman, R.W. 1980. Enzyme formation during solid-substrate fermentation in rotating vessels **Biotechnol. Bioeng.** 22: 411-420.

Smit, J.E. 1985. **Biotechnology Principles**. American Society for Microbiology, Washington D.C. 348 p.

Stuart, D.M., D. A. Mitchell, M. R. Johns and J. D. Litster. 1999. Solid-state fermentation in rotating drum bioreactors: Operating variables affect performance through their effects on transport phenomena**. Biotechnol. Bioeng.** 63: 383—391.

Takamine, J. 1914. Enzymes of *Aspergillus oryzae* and the application of its amyloclastic enzyme to the fermentation industry. **Ind. Eng. Chem.** 6: 824-828.

The LESA project kirdkao observatory. 2003. ความชื้นและเสถียรภาพของอากาศ. โครงการ การเรียนรู้เรื่องวิทยาศาสตร์โลกและอวกาศ. แหล่งที่มา: http://www.lesa.in.th/atmosphere/ air_moisture/ air_moisture/atm_moisture.htm, August 7, 2005.

Tunga, R., R. Banerjee and B.C. Bhattacharyya. 1999. Studies of some physical parameters for large scale protease production by SSF. **Bioprocess Eng.** 21: 107–112.

University of Tokyo. 2005. Available Source: http://www.u-tokyo.ac.jp/stu03/guidance/ H17_html/html/ 13nougaku.htm. August 7, 2005.

Walas, S.M. 1988. **Chemical Process Equipment: Selection and Design.** Butterworth Publishers., New York.

Wang, H.L., E.W. Swain and C.W. Hesseltine. 1975. Mass production of *Rhizopus oligosporus* spores and their application in tempeh fermentation. **J. Food Sci.** 40: 168-170.

Winarno, F.G. and N.R. Reddy. 1986. Tempe. *In* Reddy, N.R., M.D. Pierson and D.K. Salunkhe, eds. **Legume-Based Fermented Foods.** CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida.

Yanniotis, S. and K. Xerodemas. 2003. Air humidification for seawater desalination. **Desalination.** 158: 313-319.

ภาคผนวก

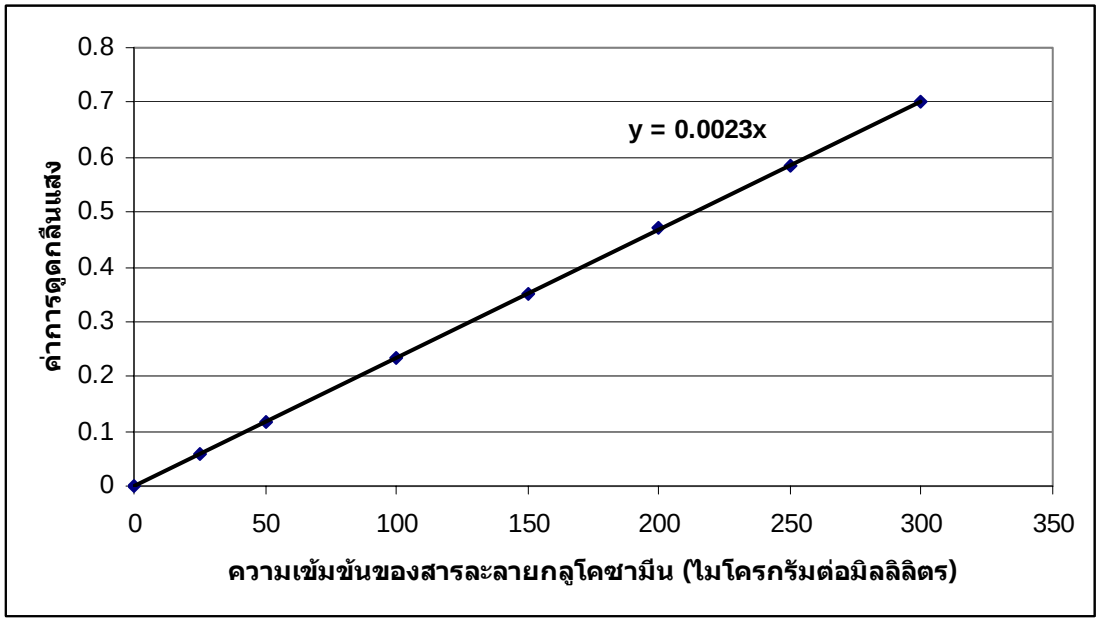
ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐาน

1. <u>กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคซามีน</u>

<u>ตารางผนวกที่ ก1</u> ค่าการดูดกลืนแสงในการหากราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคซามีน

ความเข้มข้น (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000	150	0.350
25	0.058	200	0.470
50	0.116	250	0.583
100	0.233	300	0.700



<u>ภาพผนวกที่ ก1</u> กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคซามีน

$$\text{ปริมาณกลูโคซามีน} = \frac{y}{0.00233}\frac{\mu g}{ml} * \frac{10}{0.5}\frac{ml}{g} * \frac{50}{2}\frac{ml}{ml} * \frac{1}{0.001}\frac{mg}{\mu g}$$

ภาคผนวก ข

ตารางข้อมูลผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ข ความชื้นสัมพัทธ์ก่อนและหลังผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3

เวลา (ชั่วโมง)	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศขาเข้าเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)			ความชื้นสัมพัทธ์อากาศขาออกเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)		
	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
0	65	72	68.4	90	92	92.63
12	53	58	69.2	72	83	98.37
24	60	66	63.8	79	88	97.83
36	48	58	69.63	70	82	99.03
48	70	63	64.6	82	86	97.93
60	60	55	68.7	77	79	98.93
72	68	65	68.83	84	90	98.23
84	60	55	69.17	73	80	99

ตารางผนวกที่ ข2 อุณหภูมิในเบดบนและล่าง ในการหมักรา *R. oligosporus* ที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3 ให้อากาศด้วยความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในเบดบน (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิในเบดล่าง (องศาเซลเซียส)		
	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
0	34.06	34.97	37	36.8	37.2	38.11
6	30.61	31.42	35.07	31.83	32.64	34.16
12	29.52	33.96	43.8	31.32	37.9	39.13
18	33.85	49.26	45.04	43.29	53.17	47.82
24	50.9	54.19	45.35	51.73	51.93	47.1
30	45.14	52.24	43.19	51.11	50.9	45.24
36	38.22	49.77	43.19	49.05	48.23	42.78
42	33.85	46.48	37.2	41.03	40.82	38.72
48	36.49	43.6	34.87	42.16	37.71	39.43
54	29.42	41.65	32.94	40.14	35.27	39.43
60	26.8	41.75	33.96	27.09	34.16	35.17

เวลา	อุณหภูมิในเบดบน (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิในเบดล่าง (องศาเซลเซียส)		
(ชั่วโมง)	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
66	29.23	43.5	33.85	30.1	34.46	33.65
72	28.35	28.94	34.16	30.1	31.62	35.48
78	26.51	28.26	33.65	27.19	30.41	33.96
84	26.22	29.52	34.68	26.51	30.1	34.82
90	28.74	31.52	33.96	27.58	31.72	30.91
96	28.55	30.2	33.93	27.48	30.41	31.21

ตารางผนวกที่ ข3 ความชื้นในวัสดุหมัก ในการหมักรา *R. oligosporus* ที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3 ให้อากาศด้วยความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที

เวลา	ความชื้นในวัสดุหมักในเบดบน (เปอร์เซ็นต์)			ความชื้นในวัสดุหมักในเบดล่าง (เปอร์เซ็นต์)		
(ชั่วโมง)	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
0	54.55	55.92	56.83	54.18	53.87	56.32
12	53.72	54.48	56.05	53.34	53.36	56.32
24	51.30	51.19	47.28	50.07	50.88	52.61
36	47.34	34.26	47.44	44.99	39.18	40.73
48	38.37	33.97	46.14	32.78	35.48	43.46
60	27.21	26.46	30.79	26.12	30.93	32.55
72	18.70	27.87	30.55	19.93	28.21	27.30
84	17.46	22.46	29.67	14.50	25.12	41.16
96	17.36	18.44	33.82	14.44	21.97	27.18

ตารางผนวกที่ ข4 ปริมาณกลูโคซามีน ในการหมักรา *R. oligosporus* ที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1, 2 และ3 ให้อากาศด้วความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที

เวลา	ปริมาณกลูโคซามีนในเบดบน			ปริมาณกลูโคซามีนในเบดล่าง		
(ชั่วโมง)	(มล. กรัม/กรัม นน.แห้ง)			(มล. กรัม/กรัม นน.แห้ง)		
	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
0	7.782	9.848	9.764	7.239	5.717	10.086
12	7.456	9.848	10.837	9.413	5.391	12.876
24	6.586	15.021	22.425	7.565	5.609	14.378
36	9.739	14.195	24.356	8.978	8.435	20.708

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณกลูโคซามีนในเบดบน (มล. กรัม/กรัม นน.แห้ง)			ปริมาณกลูโคซามีนในเบดล่าง (มล. กรัม/กรัม นน.แห้ง)		
	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
48	8.000	13.761	31.438	10.609	7.674	30.258
60	11.261	18.543	29.614	13.000	16.913	38.948
72	8.761	20.717	32.082	15.174	18.543	40.665
84	8.761	22.022	31.653	15.065	16.152	50.644
96	6.913	14.304	33.047	19.522	11.370	45.386

ตารางผนวกที่ ข5 อุณหภูมิในเบดบนและล่าง และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขาเข้าถังหมัก ในการหมักรา *R. oligosporus* ที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ให้อากาศด้วยความเร็ว 0.15 เมตรต่อวินาที

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิวัสดุหมัก (องศาเซลเซียส)		ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
	เบดบน	เบดล่าง	
0	35.98	37.71	94.0
6	38.62	39.03	-
12	49.15	48.33	97.0
18	38.82	41.85	-
24	38.32	40.04	95.0
30	37.30	37.4	-
36	39.64	38.42	92.0
42	36.19	36.08	-
48	34.06	36.49	94.0
54	30.61	33.24	-
60	31.32	31.01	94.7
66	32.13	31.72	-
72	28.45	34.56	95.5
78	27.77	31.93	-
84	30.20	30.71	91.5
90	30.30	30.71	-
96	29.00	29.25	92.5

ตารางผนวกที่ ข6 ความชื้นในวัสดุหมักและปริมาณกลูโคซามีน ในการหมักรา *R. oligosporus* ที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ให้อากาศด้วยความเร็ว 0.15 เมตรต่อวินาที

เวลา (ชั่วโมง)	ความชื้นในวัสดุหมัก (เปอร์เซ็นต์)		ปริมาณกลูโคซามีน (มล. กรัม/กรัม นน. แห้ง)	
	เบดบน	เบดล่าง	เบดบน	เบดล่าง
0	54.31	57.38	8.369	8.691
12	55.43	56.86	14.807	13.305
24	53.86	51.91	25.536	26.502
36	40.31	46.00	31.438	33.369
48	40.43	42.16	35.515	38.09
60	48.26	39.57	39.807	44.313
72	39.72	32.40	44.313	49.463
84	33.04	26.29	39.592	42.382
96	29.35	27.14	40.451	43.884

ตารางผนวกที่ ข7 อุณหภูมิในเบด ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขาเข้าถังหมัก ความชื้นในวัสดุหมัก และปริมาณกลูโคซามีน ในการหมักรา *A. oryzae* ที่ใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 ให้อากาศด้วยความเร็ว 0.15 เมตรต่อวินาที

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิวัสดุหมัก (องศาเซลเซียส)	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	ความชื้นในวัสดุหมัก (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณกลูโคซามีน (มล. กรัม/กรัม นน. แห้ง)
0	40.1	93.7	48.17	9.549
6	32.33	97.9	-	-
12	35.07	94.5	48.17	10.300
18	32.64	94.7	-	-
24	38.72	97.8	45.39	20.601
30	40.45	98.8	-	-
36	40.24	97.4	43.11	32.511
42	37.91	94.7	-	-
48	35.27	97.6	33.94	32.403
54	31.22	98.3	-	-
60	30.3	96.7	22.89	40.987
66	32.33	95.6	-	-
72	31.01	98.2	22.26	40.987

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิวัสดุหมัก (องศาเซลเซียส)	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	ความชื้นในวัสดุหมัก (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณกลูโคซามีน (มล. กรัม/กรัม นน. แห้ง)
78	30.10	99	-	-
84	30.71	97.5	21.51	30.365
90	31.32	96.2	-	-
96	31.1	97.9	21.35	33.154
102	29.52	98.8	-	-
108	30.52	97.5	20.26	41.202
114	30.2	96.4	-	-
120	30.58	98.6	23.06	40.343

ภาคผนวก ค

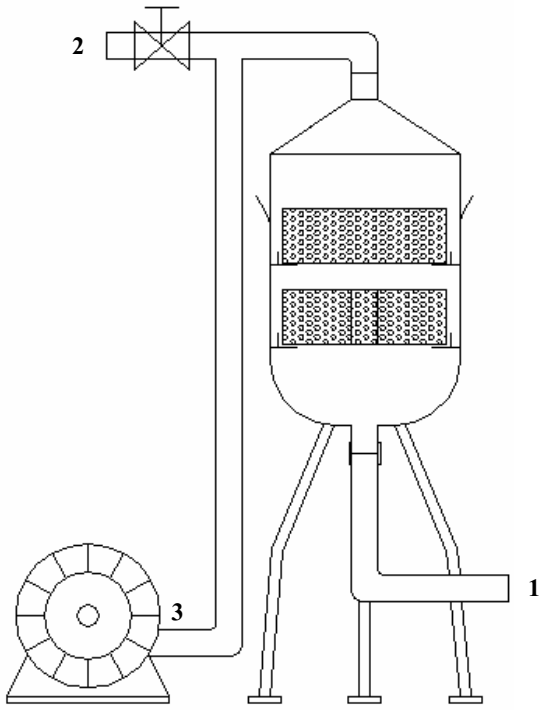
วิธีการคำนวณ

1. วิธีการคำนวณความเร็วลมในถังหมัก

สูตร $A_3V_3 = A_2V_2 + A_1V_1$

A = พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)

V = ความเร็วอากาศ (เมตรต่อวินาที)



<u>ภาพผนวกที่ ค1</u> ถังหมักแพคเบดและพัดลมดูดอากาศ

2. วิธีการคำนวณระยะเวลาที่อากาศอยู่ในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ (retention time Rt)

2.1 วิธีการคำนวณระยะเวลาที่อากาศอยู่ในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

สูตร $A_1V_1 = A_2V_2$

A_1 พื้นที่หน้าตัดถังหมักแพคเบด (ตารางเมตร)

A_2 พื้นที่หน้าตัดเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ (ตารางเมตร)

V_1 ความเร็วในถังหมัก (เมตรต่อวินาที)

V_2 ความเร็วในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ (เมตรต่อวินาที)

สูตร $Rt = S/V_2$

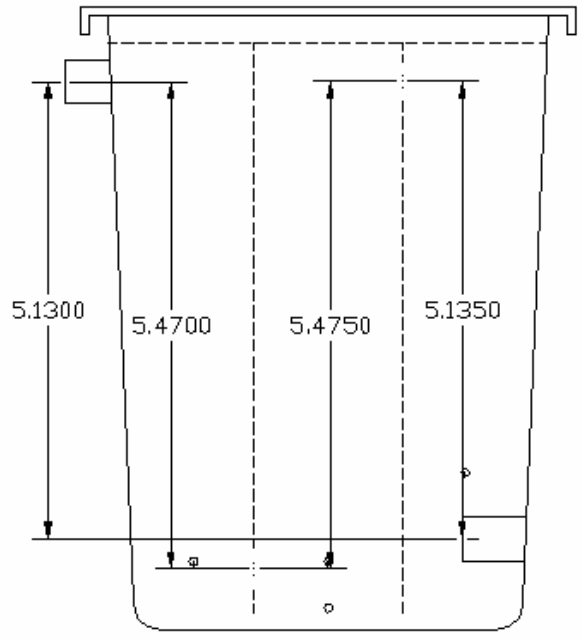
S ระยะทางในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ (เมตร)

V_2 ความเร็วในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ (เมตรต่อวินาที)

หมายเหตุ

ระยะทางในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 1 และ2 เท่ากับ 0.513 เมตร

ระยะทางในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3 แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 0.547, 0.5475 และ 0.5135 เมตร



อัตราส่วน 1:10 เซนติเมตร

ภาพผนวกที่ ค1 ภายในเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์แบบที่ 3