



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

Drying of Spirulina for Small Business Enterprises

ผู้วิจัย

พศ.ดร.ราม แยมแสงสังข์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากเงินรายได้
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2550

การอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ราม แยมแสงสังข์ และนางสาวอรภรณ์ บัวหลวง
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
หาดใหญ่ สงขลา 90112

บทคัดย่อ

สาหร่ายเกลียวทองเป็น ไซยาโนแบคทีเรียที่เต็มไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการและร่างกายมนุษย์สามารถย่อยได้ง่าย สาหร่ายเกลียวทองในทางการค้าจะอยู่ในรูปผง อัลเม็ด และแคปซูลใช้สำหรับเสริมอาหารและเป็นยาบำรุงร่างกาย การอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองสามารถทำได้หลายวิธี สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองชั้นบาง (ความหนา 2-4 มิลลิเมตร) โดยการพาแบบบังคับในการศึกษานี้มี 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาผลของความหนาของชั้นสาหร่ายเกลียวทองและอุณหภูมิอากาศต่อเวลาที่ต้องใช้เพื่อลดความชื้นให้เหลือไม่เกิน 7.5% มาตรฐานแห้งหรือ 7% มาตรฐานเปียก ในการทดลองนี้ใช้เครื่องอบแห้งทรงกระบอกยาว 1.2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตร และปล่อยอากาศร้อนพุ่งชนตั้งฉากกับผิวสาหร่ายเกลียวทอง สภาพที่ทำให้การทดลองคืออุณหภูมิอากาศในช่วง 40-60°C ความเร็วอากาศอบแห้งเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที และความหนาของชั้นสาหร่ายเท่ากับ 2 และ 4 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นสาหร่ายจะแห้งเร็วขึ้นเนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนและมวลสูงขึ้น ขณะเดียวกันที่ความหนาของชั้นสาหร่าย 4 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าที่ความหนา 2 มิลลิเมตร 2 เท่า จากนั้นทำการทดลองที่ความหนาของชั้นสาหร่ายเกลียวทอง 2 มิลลิเมตร ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 40, 50 และ 60 °C ใช้เวลาในการอบแห้ง 12, 7 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ ทุกสถานะที่ทำการศึกษสามารถลดความชื้นของสาหร่ายจาก 90% มาตรฐานเปียก ลงเหลือ 6% มาตรฐานเปียก ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบพุ่งชนด้วยอากาศซึ่งเหมาะสำหรับการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทอง ขนาดของห้องอบแห้งคือ กว้าง 1 เมตร ยาว 1.2 เมตร สูง 1.2 เมตร ประกอบด้วยถาดอบแห้ง 6 ถาด เครื่องอบแห้งนี้มีความจุ 2.7-2.8 กิโลกรัม สาหร่ายเกลียวทองสด เมื่อใช้ความหนาของชั้นสาหร่าย 2 มิลลิเมตร การกระจายตัวของอากาศพุ่งชนวัดได้จากความแตกต่างอุณหภูมิและความชื้นในแต่ละถาดอบแห้ง พบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความชื้นสุดท้ายของสาหร่ายอบแห้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลมสูงขึ้นเพราะการถ่ายโอนมวลเกิดง่าย

ขึ้นที่ความเร็วลมสูง นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าความเปียกของผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจากการสลายตัวของ chlorophyll เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดและเชื้อ *Enterobacteria* มีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง $42\pm 2-57\pm 5^{\circ}\text{C}$ แต่ไม่สามารถลดเชื้อ *Staphylococcus aureus* และ Enterobacteriaceae count plate ให้ผ่านมาตรฐาน ISO 9002 จึงเพิ่ม อุณหภูมิอบแห้งเป็น 80°C 15 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิอบแห้งเป็น 60°C 3 ชั่วโมง 45 นาที พบว่า สามารถลดเชื้อจุลินทรีย์ทุกตัวให้ผ่านมาตรฐานได้ยกเว้น *Clostridium perfringens* และมีปริมาณ chlorophyll สูงกว่าอบที่ $51\pm 4-57\pm 5^{\circ}\text{C}$ ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งแสดงโดยอัตราการระเหย จำเพาะของความชื้น (SMER) ปรากฏว่าเมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมเพิ่มขึ้นค่า SMER สูงขึ้น

KEYWORDS: การอบแห้ง, สาหร่ายเกลียวทอง, การพาแบบบังคับ

ABSTRACT

Spirulina is a cyanobacteria with therapeutic benefits, filled with nutrients and easily digested. Commercially, Spirulina is available as a powder, tablet and capsule that can be added to foods and health tonics. Spirulina can be dried several ways. This research studied, the drying of Spirulina is thin layer (2-4 mm) by direct forced convection (impingement). The studied was divided two steps, the first step to study the effect of the thickness of Spirulina film layer and the temperature of impinge air on the drying time required in order to decrease the moisture content to less than 7.5% dry basis or 7% wet basis. In this study, a cylindrical drying chamber with length 1.2 m and a diameter of 0.5 m was used and injected with impinged hot air that flows vertically over the Spirulina surface. Conditions investigated were air temperatures from 40-60°C, air velocity was 1 m/s and the thickness of Spirulina were 2 and 4 mm. Preliminary results showed that higher air temperatures dried faster due to increasing the heat and mass transfer, while the 4 mm layer film took only 2 times longer than the 2 mm layer film. Moreover the drying time for a 2 mm film layer and air velocity of 1 m/s, at 40, 50, and 60°C were 12, 7, and 5 hours, respectively. All conditions can reduced the moisture content of the Spirulina from 90% w.b. to 6% w.b. In the second step, a pilot scale was designed and constructed. The dimensions of the chamber were height 1.2 m, length 1.2 m, and width 1 m of the dryer consists of 3 levels with 2 trays on each level. This pilot dryer has the drying capacity of about 2.7-2.8 kg of fresh Spirulina per batch when the thickness of Spirulina film was 2 mm. Distribution of impinged air was determined by measuring the difference of temperature and moisture content of the Spirulina on each tray. The effectiveness of the pilot dryer was investigated and showed that the higher temperatures have higher standard deviation. However, the final moisture content of Spirulina was not significantly difference. A higher air velocity resulted in a higher drying rate because the higher air velocity the moisture can remove easier than the lower air velocity. The higher drying temperature resulted in decreasing greenness of the product due to increasing chlorophyll degradation. When the higher drying temperature (51 ± 4 - $57\pm 5^\circ\text{C}$) were reduced total bacteria and Enterobacteria but can't destroy *Staphylococcus aureus* and Enterobacteria to acceptance for ISO 9002. It was found the drying temperature were 80°C for 15 min. after that reduce to 60°C for 3 hr 45 min. can destroy for all microbiologically but it was found *Clostridium perfringens* and have

amount of chlorophyll more than 51 ± 4 - 57 ± 5 °C. For the higher air drying and air velocity resulted in high SMER.

KEYWORDS: Drying/ Spirulina/ Forced Convection

คำนำ

ปัจจุบันการเพาะเลี้ยงและแปรรูปสาหร่ายเกลียวทองมีการทำอย่างแพร่หลายในภาคใต้ของประเทศไทย เนื่องจากสาหร่ายเกลียวทองมีประโยชน์ต่อร่างกาย เพราะมีปริมาณโปรตีนมากกว่า 60% เบตาแคโรทีน (Betacarotene) ธาตุเหล็ก วิตามินบี 12 และกรดไขมันจำเป็นที่หายาก เช่น กรดแกมมาไลโนเลนิก (Gamma Linolenic) ที่พบเฉพาะในพืชบางชนิดเท่านั้น อีกทั้งยังมีวิตามิน เกลือแร่และสารอาหารอื่นที่จำเป็นต่อร่างกาย มีงานศึกษาวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับประโยชน์ของสาหร่ายเกลียวทองต่อมนุษย์และสัตว์ นอกจากนี้ยังมีสมบัติในการรักษาโรคอีกด้วย

กระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์สาหร่ายอย่างหนึ่งที่ได้รับความสนใจคือกระบวนการอบแห้ง ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่นิยมใช้วิธีอบแห้งแบบพ่นฝอยซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษากระบวนการอบแห้งวิธีใหม่ที่สามารถลดค่าใช้จ่ายทั้งด้านพลังงานและรักษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ควบคู่กันไป

ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์โดยตรงกับผู้ประกอบการรายย่อยและผู้อื่นที่ต้องการข้อมูลสถานะการอบแห้งระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อกันคว้าหรือนำไปประยุกต์ใช้ในการดำเนินกิจการต่าง ๆ ไม่มากก็น้อย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการตารางภาคผนวก	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำต้นเรื่อง	i
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	3
1.3 วัตถุประสงค์	6
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ตรวจเอกสาร	
2.1 ข้อมูลทั่วไปของสาหร่ายเกลียวทอง	7
2.2 คุณสมบัติที่สำคัญของสาหร่ายเกลียวทอง	8
2.3 การบำบัดและเสริมสุขภาพของสาหร่ายสไปรูลิना	10
2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับจุลินทรีย์ในอาหาร	12
2.5 ความรู้พื้นฐานในการอบแห้ง	20
2.6 อัตราการอบแห้ง	21
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง	24
2.8 คุณภาพอาหารกับการอบแห้ง	26
2.9 การถ่ายเทความร้อน	26
2.10 การอบด้วยระบบพุ่งชน (Impingement)	27
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	
3.1 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์	38
3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	40

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลองจากเครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ	46
4.1.1 ผลของความหนาสำหรับต่อการอบแห้ง	46
4.1.2 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น	48
4.2 ผลการทดลองจากเครื่องอบแห้งระดับโรงงานขนาดเล็ก	51
4.2.1 ผลการกระจายอุณหภูมิในห้องอบแห้ง	51
4.2.2 ผลการกระจายความชื้น	53
4.2.3 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการอบแห้ง	55
4.2.4 ผลของความเร็วลมต่ออัตราการอบแห้ง	57
4.2.5 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสี	58
4.2.6 ผลของอุณหภูมิต่อคุณค่าทางโภชนาการ	62
4.2.7 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อความชื้นเปลือกพลังงาน	63
4.2.8 คุณภาพทางจุลชีวะวิทยา	65
4.2.9 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 การอบแห้งสำหรับรายเกษตรกร	73
5.2 คุณภาพสำหรับรายเกษตรกรหลังการอบแห้ง	73
5.3 ความชื้นเปลือกพลังงาน	74
5.4 ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก ก.	80
ภาคผนวก ข.	105
ภาคผนวก ค.	110

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1. ส่วนประกอบของสาหร่ายเกลียวทอง	9
2. ข้อมูลสาหร่ายเกลียวทอง สไปรูไลนา ชนิดแคปซูล และชนิดอัลเม็คบริษัท กรีนไคมอนด์ จำกัด	10
3. ตัวแปรที่ใช้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการอบแห้ง	41
4. เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ 60 °C ความเร็วลม 1 m/s	49
5. การกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบ	53
6. ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของสาหร่ายที่อุณหภูมิต่าง ๆ	59
7. ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงคุณค่าอาหาร	63
8. เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยา อบที่ 42±2 - 57±5°C	66
9. การเปลี่ยนแปลงสีสาหร่ายเกลียวทองเมื่ออบที่ 80°C	67
10. เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยา อบที่ 80°C	68
11. คุณภาพทางโภชนาการของสาหร่ายแห้งเมื่ออบที่ 80°C เวลา 15 นาที อบต่อที่ 60 °C 3 ชั่วโมง 45 นาที	69
12. ค่าใช้จ่ายในการผลิตสาหร่ายเกลียวทองแห้ง	70
13. ข้อมูลสำหรับการคำนวณทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งสาหร่ายเกลียวทอง	71
14. การคำนวณค่า Internal Rate Of Return (IRR)	72

รายการตารางภาคผนวก

ตารางที่	หน้า
1. อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 60°C ความหนาของชั้นสำหรับ 4 mm	80
2. อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 60°C ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm	81
3. อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 50°C ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm	81
4. อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 40°C ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm	82
5. การกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดในตู้อบเมื่ออุณหภูมิ เท่ากับ 40°C, 1.3 m/s	83
6. อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 42±2°C, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm	84
7. อัตราการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 42±2°C, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm	85
8. Specific Moisture Evaporation Rate (SMER) (อุณหภูมิ 42±2°C, 1.3 m/s)	85
9. อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงความชื้น (อุณหภูมิ 42±2°C, 1.3 m/s)	86
10. การกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดในตู้อบเมื่ออุณหภูมิ เท่ากับ 50°C, 1.3 m/s	87
11. การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 51±4°C, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm	88
12. อัตราการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 51±4°C, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm	88
13. Specific Moisture Evaporation Rate (SMER) (อุณหภูมิ 51±4°C, 1.3 m/s)	89
14. อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงความชื้น (อุณหภูมิ 51±4°C, 1.3 m/s)	89
15. การกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดในตู้อบเมื่ออุณหภูมิ เท่ากับ 60°C, 1.3 m/s	90
16. การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 57±5°C, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm	90

รายการตารางภาคผนวก (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
17. อัตราการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $57\pm 5^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm	91
18. Specific Moisture Evaporation Rate (SMER) (อุณหภูมิ $57\pm 5^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)	91
19. อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงความชื้น (อุณหภูมิ $57\pm 5^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)	91
20. การกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดในตู้อบเมื่ออุณหภูมิ เท่ากับ 60°C , 2.6 m/s	92
21. การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $61\pm 6^{\circ}\text{C}$, 2.6 m/s ความหนา ของชั้นสำหรับ 2 mm	92
22. อัตราการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $61\pm 6^{\circ}\text{C}$, 2.6 m/s ความหนา ของชั้นสำหรับ 2 mm	93
23. Specific Moisture Evaporation Rate (SMER) (อุณหภูมิ $61\pm 6^{\circ}\text{C}$, 2.6 m/s)	93
24. อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงความชื้น (อุณหภูมิ $61\pm 6^{\circ}\text{C}$, 2.6 m/s)	93
25. การเปลี่ยนแปลงสีที่อุณหภูมิต่าง ๆ	94

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1. เส้นแสดงคุณสมบัติการอบแห้งของวัสดุ	23
2. A drying air jet onto a food slab: flow of moisture during process.	27
3. แสดงการจัดเรียงตัวของท่อ	28
4. แสดงลักษณะลำอากาศที่ออกจากท่อ (Nozzle)	29
5. A high speed cooking oven having an air impingement heater with an improved orifice configuration.	29
6. Conveyerized oven with moisture laden air impingement and method	30
7. Conveyer oven with improved air return and method	31
8. Impingement oven airflow devices and method	31
9. สหรัยเกลียวทองสด	38
10. Schematic of Air Impingement Drying Operation	38
11. Air Impingement Drying Channel	39
12. Model และเครื่องอบแห้งแบบพุ้งชนด้วยอากาศ	42
13. สหรัยแห้งหลังจากการอบแห้ง	46
14. กราฟแสดงความหนาของชั้นสหรัยต่ออัตราการอบแห้งสหรัยเกลียวทอง (อุณหภูมิอบแห้ง 60°C ความเร็วลม 1.0 m/s ความชื้นเริ่มต้น 88±1% w.b.)	47
15. อัตราการอบแห้งที่ความหนาของชั้นสหรัยเกลียวทอง 2 และ 4 mm (อุณหภูมิอบแห้ง 60°C ความเร็วลม 1.0 m/s ความชื้นเริ่มต้น 88±1% w.b.)	48
16. ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ความหนาของชั้นสหรัยเกลียวทอง 2 mm, ความเร็วลม 1.0 m/s ความชื้นเริ่มต้น 87±8 % (w.b.)	49
17. อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ (ความเร็วลม 1.0 m/s) ความหนาของชั้นสหรัยเกลียวทอง 2 mm, ความเร็วลม 1.0 m/s ความชื้นเริ่มต้น 87±8 % (w.b.)	50
18. อุณหภูมิตำแหน่งต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 40°C ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสหรัย 2 mm (เมื่อ temp out คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้งก่อนเข้าห้องอบ)	51
19. อุณหภูมิตำแหน่งต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 50°C ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสหรัย 2 mm (เมื่อ temp out คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้งก่อนเข้าห้องอบ)	52

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
20. อุณหภูมิตำแหน่งต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 60°C ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm (เมื่อ temp out คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้งก่อนเข้าห้องอบ)	52
21. การกระจายความชื้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 42±2°C ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm ความชื้นเริ่มต้น 10.68±0.02 (d.b.)	53
22. การกระจายความชื้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 51±4°C ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm ความชื้นเริ่มต้น 10.70 (d.b.)	54
23. การกระจายความชื้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิอบแห้ง 57±5°C ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm ความชื้นเริ่มต้น 10.60±0.01 (d.b.)	54
24. ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณความชื้นของสำหรับเมื่อความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm ความชื้นเริ่มต้น 10.52±0.09 (d.b.)	55
25. ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ยต่ออัตราความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm ความชื้นเริ่มต้น 10.52±0.09 (d.b.)	55
26. ผลของความเร็วลมต่อปริมาณความชื้นเฉลี่ยต่ออัตราของสำหรับ ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm ความชื้นเริ่มต้น 10.94±0.47 (d.b.)	57
27. ผลของความเร็วลมต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ยต่ออัตราของสำหรับ ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm ความชื้นเริ่มต้น 10.94±0.47 (d.b.)	57
28. ระดับสี L, a และ b	58
29. ค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm	60
30. ค่าความเขียวของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm	61
31. ค่าความเหลืองของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm	61
32. ค่าความแตกต่างของสีรวมที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm	62
33. อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่สภาวะอบแห้งต่าง ๆ	64
34. ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่ออัตราการระเหยความชื้นจำเพาะ	65

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
35. อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเร็วลม 1.3 m/s	97
36. ผลิตภัณฑ์สาหร่ายเกลียวทองแห้งยี่ห้อสไปรูเมท a. ขวดผลิตภัณฑ์สไปรูเมท b. ผงสาหร่ายแห้งที่บรรจุในแคปซูลยี่ห้อสไปรูเมท	98
37. ภายในเครื่องอบแห้ง a. สาหร่ายระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ $42\pm 2^{\circ}\text{C}$ b. ลักษณะหัวฉีดเหนือถาดอบ	98
38. สาหร่ายเกลียวทองถาดที่ 2 ขณะอบแห้งที่อุณหภูมิ $42\pm 2^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา A. 0 ชั่วโมง B. 1 ชั่วโมง C. 2 ชั่วโมง D. 3 ชั่วโมง E. 4 ชั่วโมง F. 5 ชั่วโมง G. 6 ชั่วโมง H. 7 ชั่วโมง I. 8 ชั่วโมง J. 9 ชั่วโมง K. 10 ชั่วโมง	100
39. สาหร่ายเกลียวทองถาดที่ 2 ขณะอบแห้งที่อุณหภูมิ $57\pm 5^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา A. 0 ชั่วโมง B. 1 ชั่วโมง C. 2 ชั่วโมง D. 3 ชั่วโมง E. 4 ชั่วโมง F. 5 ชั่วโมง G. สาหร่ายแห้งสุดท้าย H. สาหร่ายแห้งบรรจุในถุงซิปล็อก	102
40. สาหร่ายเกลียวทองถาดที่ 2 ขณะอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C ที่เวลา A. 0 นาที B. 5 นาที C. 10 นาที D. 15 นาที จากนั้นอบที่ 60°C ที่เวลา E. 1 ชั่วโมง F. 2 ชั่วโมง G. 3 ชั่วโมง H. 4 ชั่วโมง I. สาหร่ายแห้งสุดท้าย	103
41. การผลิตสาหร่ายแห้งโดยการตากแดด A สาหร่ายที่เลี้ยงไว้ในบ่อ B สาหร่ายหลังจากเก็บเกี่ยวและกรอง C ตากแห้งสาหร่ายเกลียวทอง D สาหร่ายหลังการตากแดด E บีนสาหร่ายแห้งเป็นสาหร่ายผง F สาหร่ายผงบรรจุแคปซูล	104

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

สาหร่ายเกลียวทองมีประโยชน์ต่อสุขภาพและเป็นที่ยอมรับในแอฟริกาและอเมริกา มาเป็นเวลากว่าศตวรรษ แต่นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีประโยชน์ต่อร่างกาย เพราะมีปริมาณ โปรตีนมากกว่า 60% เบตาแคโรทีน (Betacarotene) ธาตุเหล็ก วิตามินบี 12 และกรดไขมันจำเป็นที่หายากเช่น กรดแกมมาไลโนเลนิก (Gamma Linolenic) ที่พบเฉพาะในพืชบางชนิดเท่านั้น อีกทั้งยังมีวิตามิน เกลือแร่และสารอาหารอื่นที่จำเป็นต่อร่างกาย มีงานศึกษาวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับประโยชน์ของสาหร่ายเกลียวทองต่อมนุษย์และสัตว์

สาหร่ายเกลียวทองจัดอยู่ในจำพวกสาหร่ายสีน้ำเงิน-เขียว (Blue-green-algae, cyanobacteria) มีวิวัฒนาการมาจากการผสมกันระหว่างแบคทีเรียและพืชสีเขียวกว่า 3,600 ล้านปีมาแล้ว มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Arthrospira* อยู่ใน Phylum: Cyanophyta, Class: Cyanophyceae, Order: Oscillatoriales, Family: Oscillatoriaceae, Genus: *Spirulina* ที่นิยมเลี้ยงในประเทศไทยมักเป็น Species: *platensis* (สุภัทร, มปป.) เซลล์สาหร่ายจะไม่มีนิวเคลียสหรือคลอโรพลาสต์ขยายพันธ์ด้วยการขาดท่อน (Fragmentation) ไม่สามารถสกัดในโตรเจนในอากาศได้ จึงไม่มีพิษต่อร่างกาย เมื่อนำมารับประทานเหมือนสาหร่ายชนิดที่สามารถสกัดในโตรเจนได้สาหร่ายเกลียวทอง มีคุณสมบัติ Antioxidant, Probiotic, Phytochemical และ Nutraceutical (สุภัทร, มปป.)

ลักษณะทั่วไปของสาหร่ายเกลียวทอง เป็นสาหร่ายหลายเซลล์สายสั้น ๆ บิดตัวเป็นเกลียว มีความกว้าง 3-8 ไมโครเมตร ยาว 300-500 ไมโครเมตร พบเห็นอยู่ทั่วไปในน้ำจืด น้ำเค็ม และน้ำกร่อย โดยเฉพาะในน้ำที่มีค่าความเป็นด่างสูง และมีค่าความเค็มสูง เจริญเติบโตได้ดีที่ pH 8 อุณหภูมิ 32-40°C (ยูดดี, 2542) นอกจากนี้สาหร่ายเกลียวทองยังมีสมบัติในการรักษาโรค เช่น สารไฟโคไซยานิน (Phycocyanin) ในสาหร่ายเกลียวทอง เป็นตัวต่อต้านการออกซิไดซ์และป้องกันการอักเสบ สารโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ต่อต้านการบวมและเชื้อไวรัส กรดแกมมาไลโนเลนิก ใช้ลดคลอเลสเตอรอล (Desmorieux *et al.*, 2004) ในวงการอุตสาหกรรมอาหารสมัยใหม่มีการเสริมสาหร่ายเกลียวทองเข้าไปในอาหารหลายชนิด เช่น ชูป สาหร่ายโนริ ส่วนในประเทศไทยได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการทำอาหารอัดเม็ดเป็นอาหารเสริมซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ต้อง

มีความชื้นต่ำเพื่อให้สามารถเก็บรักษาไว้ได้เป็นเวลานาน สำหรับวิธีการอบแห้งนั้นมีด้วยกันหลายวิธีแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป เช่น การตากแห้งโดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ถือเป็นวิธีการอบแห้งที่ประหยัดแต่ใช้เวลานาน นอกจากนี้ยังมีโอกาสที่ผลิตภัณฑ์จะเกิดการปนเปื้อนจากฝุ่นละอองและเชื้อโรคต่าง ๆ ได้มาก ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้มากแต่ใช้พลังงานมากและผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็ยังคงเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการอบแห้งใหม่ ๆ ขึ้นมาเพื่อลดข้อบกพร่องของวิธีอบแห้งแบบเดิมทั้งในแง่การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

นักวิศวกรด้านอาหารจึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวให้น้อยลง ซึ่งการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ อัตราการกำจัดความชื้นในการอบแห้งถูกควบคุมโดยความเร็วของอากาศอบแห้ง เมื่ออากาศร้อนพุ่งชนผิวอาหารชั้น ใอน้ำภายในอาหารจะแพร่ผ่านชั้นขอบเขต (Boundary layer) และระเหยออกไป การเปลี่ยนแปลงความดันไอน้ำเกิดจากความแตกต่างระหว่างความชื้นภายในและภายนอกผิวอาหาร ชั้นขอบเขตความชื้นเป็นตัวกีดขวางการถ่ายโอนความร้อนและการกำจัดไอน้ำระหว่างการอบแห้ง ซึ่งการพาความร้อนแบบบังคับในลำอากาศพุ่งชนมีส่วนในการทำลายชั้นขอบเขตความชื้น ดังนั้นจึงเป็นการลดความต้านทานการถ่ายโอนความร้อนได้ (De Bonis and Ruocco, 2005)

วิธีการอบแห้งแบบพุ่งชนเป็นกระบวนการกำจัดน้ำจากอาหารโดยการพาของอากาศแบบบังคับเพื่อยึดอายุการเก็บรักษาของอาหารมีใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ สำหรับในอุตสาหกรรมอาหารนั้นใช้สำหรับการอบแห้งและปรุงสุกอาหาร เช่น ขนมปัง คุกกี้ และแคร็กเกอร์ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะแห้งเร็วและมีการกระจายความชื้นสม่ำเสมอกว่าใช้เตาอบแบบพาความร้อนแบบขนาน (Parallel flow: Moreira, 2001)

ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาทดลองการอบแห้งสำหรับเกลียวทองชั้นบางภายใต้สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ (อุณหภูมิ ความหนาของชั้นสำหรับ และความเร็วลมของอากาศพุ่งชน) ต่ออัตราการอบแห้ง คุณภาพทางโภชนาการและคุณภาพทางชีวภาพ

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

สาหร่ายเป็นจุลินทรีย์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสภาพแวดล้อมของโลก และความเป็นอยู่ของมนุษย์ เป็นส่วนหนึ่งของต้นทางห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศ เป็นตัวการในการรักษาสมดุลทางธรรมชาติ สามารถสร้างสารพิเศษบางชนิดที่มีประโยชน์และโทษต่อมนุษย์ ฉะนั้นจึงมีการศึกษาความหลากหลายทางชีวภาพของสาหร่าย เพื่อที่จะรวบรวมและจัดจำแนกให้เป็นระบบสามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต

การศึกษาค้นคว้าหาแหล่งอาหารโปรตีนแหล่งอื่นนอกเหนือจากโปรตีนจากเนื้อสัตว์และพืช ซึ่งนับวันการผลิตจะไม่เพียงพอกับการเพิ่มของประชากรโลก สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร โดยความร่วมมือระหว่างรัฐบาลไทย-เยอรมัน ได้เห็นความสำคัญของสาหร่ายเป็นแหล่งอาหารโปรตีนและสารเคมีที่มีมูลค่าสูง เพราะประเทศไทยเป็นประเทศในเขตร้อนซึ่งเหมาะต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้ตลอดทั้งปีโดยอาศัยพลังงานจากรังสีอาทิตย์ จึงได้จัดตั้งหน่วยปฏิบัติการสาหร่ายขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2513 เพื่อศึกษาค้นคว้า ทดลองและวิจัย การเพาะเลี้ยงสาหร่าย โดยทำการสำรวจรวบรวมสายพันธุ์สาหร่ายน้ำจืดจากแหล่งน้ำต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย แยกเชื้อสาหร่ายบริสุทธิ์และเก็บรักษาสายพันธุ์สาหร่ายในสภาพที่เป็นวุ้น ซึ่งในระยะแรกศึกษาเกี่ยวกับการเจริญเติบโตของสาหร่ายในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ ในระยะต่อมาทดลองทำอาหารบางชนิดโดยการผสมสาหร่ายเพื่อทดสอบความนิยมของผู้บริโภค รวมทั้งการทดสอบความเป็นพิษของสาหร่ายด้วย

เทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

สายพันธุ์สาหร่ายที่จะนำมาเพาะเลี้ยงในเชิงพาณิชย์ ควรเป็นสายพันธุ์ที่มีการเจริญเติบโตได้รวดเร็ว มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ไม่มีสารพิษ ทนทานต่ออุณหภูมิสูง ถ้าเป็นเซลล์ขนาดใหญ่ก็จะง่ายต่อการเก็บเกี่ยว

เทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายมี 3 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ

1. การเพาะเลี้ยง (Algal cultivation) ตั้งแต่การเพาะเลี้ยงหัวเชื้อสาหร่ายในห้องควบคุม การเพาะเลี้ยงในอ่างขนาดใหญ่ การกวน การให้อากาศ และการใส่สารอาหาร
2. การเก็บเกี่ยว (Harvesting) โดยจะใช้เครื่องมือและวิธีการต่าง ๆ ตามแต่ชนิดของสาหร่าย เช่น เครื่องเหวี่ยง การตกตะกอน การกรอง
3. การทำแห้ง (Drying) โดยวิธีต่าง ๆ เช่น การตากแดด (Sun-drying) ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar-drying) การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum-drying) การอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray-drying) การอบแห้งแบบระเหิด (Freeze-drying)

การใช้ประโยชน์จากสาหร่าย

- **ใช้เป็นอาหารมนุษย์** มนุษย์รู้จักนำสาหร่ายมาใช้เป็นอาหารนานนับพันปีแล้ว เช่น ชาวจีน ญี่ปุ่น ใช้สาหร่ายสีน้ำตาล (Laminaria) และสาหร่ายสีแดง (Porphyra) หรือที่เรียกว่า จิฉ่าย มาทำอาหารพวกแกงจืด ญี่ปุ่นผสม *Chlorella* sp. ลงในชา ซุป น้ำผลไม้ บะหมี่ และไอศกรีม สำหรับห้องปฏิบัติการสาหร่ายตามธรรมชาติ คัดแยกสายพันธุ์บริสุทธิ์ วิเคราะห์ปริมาณ โปรตีน 40-50% ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายในห้องควบคุมเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเลี้ยงในอ่างขนาดใหญ่เพื่อเข้าสู่อุตสาหกรรม ซึ่งผลงานวิจัยมีมากมาย เช่น การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina* Sp. ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีโซเดียมไบคาร์บอเนตระดับต่าง ๆ กัน การคัดเลือกหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว *Spirulina* Sp. เพื่อใช้เป็นอาหารมนุษย์ การเพาะเลี้ยงสาหร่ายพันธุ์พื้นบ้านเพื่อหาปริมาณ โปรตีนเปรียบเทียบกับพันธุ์ *Scenedesmus acutus* (Selection of Local Algal Strains Related to Protein Content Compared with *Scenedesmus acutus*) เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของสาหร่ายจากการเพาะเลี้ยงด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ 2 ชนิด (Growth Comparison of Green Algae Cultivated in Two Different Media.)

สำหรับสาหร่ายเกลียวทอง เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันในรูปของอาหารเสริมสุขภาพ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ มีปริมาณ โปรตีนสูงถึง 60% และเป็น โปรตีนที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็นกระจุกกระจายอยู่ในเซลล์อย่างได้สัดส่วน มีวิตามิน เกลือแร่ และสารให้สีธรรมชาติจำนวนมาก นอกจากนี้สาหร่ายเกลียวทองยังมีเซลล์ขนาดใหญ่ สามารถเก็บเกี่ยวได้ง่าย ผนังเซลล์บาง จึงถูกย่อยและดูดซึมได้เร็วกว่าสาหร่ายสีเขียวซึ่งมีผนังเซลล์หนา

- **ใช้เป็นอาหารสัตว์** สาหร่ายสามารถนำไปเลี้ยงสัตว์กระเพาะเคี้ยว เช่น หมู และสัตว์ปีกได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้สาหร่ายยังเป็นอาหารที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำวัยอ่อนที่กินพืชเป็นอาหาร เช่น ปลา กุ้ง และแพลงตอนสัตว์ เช่น ไรแดง ไรน้ำเค็ม ในประเทศญี่ปุ่นใช้สาหร่ายเกลียวทองเลี้ยงปลาไหล ปลาเทร้า กุ้ง ปลาคาร์พสี เป็นต้น ทำให้เศรษฐกิจของอุตสาหกรรมการเลี้ยงปลาสวยงามได้พัฒนาก้าวไกลออกไปมาก ผลงานวิจัย เช่น การเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina* Sp. จากน้ำทิ้งแหล่งชุมชนเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ การศึกษาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของสาหร่าย *Chlorella* Sp. (K3) สำหรับนำไปเลี้ยงพวกโคอะตอม แพลงตอนสัตว์ (*Lapadella benjamini*) ที่ระดับความหนาแน่นแตกต่างกัน การนำ *Chlorella* Sp. ที่ได้จากการเลี้ยงในน้ำทิ้งโรงงานผลิตน้ำตาลแล้วเหลือมาเลี้ยงไรแดง ความเป็นไปได้ในการเลี้ยงหอยมุกน้ำจืด *Chamberlain hainesiana* ด้วยสาหร่ายชนิดต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ เป็นต้น

- **ใช้ในการกำจัดน้ำเสีย** การใช้สาหร่ายในการกำจัดน้ำเสียร่วมกับแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียจะทำการย่อยสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน ให้เป็นสารประกอบอินทรีย์ เช่น แอมโมเนียม ไนเตรต คาร์บอนไดออกไซด์ และเกลือแร่ต่าง ๆ ในสภาพการเกิดที่มีอากาศ (aerobic) หรือไม่มีอากาศ (anaerobic) จากนั้นสาหร่ายจะใช้สารประกอบเหล่านี้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมต่าง ๆ สำหรับสาหร่ายที่ได้จากระบบกำจัดน้ำเสียนี้ อาจนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ ปุ๋ยพืชสด หรือใช้ในการทำแก๊สชีวภาพได้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่เพาะเลี้ยงในมูลหมูผสมมูลไก่ที่มีการหมุนเวียนของสารอาหารแตกต่างกัน การผลิตสาหร่ายเกลียวทอง จากน้ำทิ้งโรงงานแป้งมันสำปะหลัง การเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทองจากน้ำทิ้งโรงงานน้ำอัดลม เป็นต้น

- **ใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพ** สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว (Blue green algae) รู้จักกันแพร่หลายในแง่ของการใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพ จากการศึกษาของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย พบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในนาข้าวบางชนิดสามารถตรึงไนโตรเจนในอากาศให้เป็นสารประกอบไนเตรต เช่น แอมโมเนียม ทำให้ข้าวเจริญเติบโต ส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ *Anabaena* sp. และ *Nostoc* sp. พันธุ์ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย พบในประเทศและให้ผลผลิตดี มีชื่อว่า *Anabaena siamensis*

- **ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง** สาหร่ายประกอบด้วยสารเคมีบางชนิดที่ช่วยในการรักษาผิวหนัง เช่น เคนฟา Kanembu ที่อยู่รอบทะเลสาบชาด ได้ใช้สาหร่ายเกลียวทองรักษาโรคผิวหนังบางชนิด การศึกษาในประเทศญี่ปุ่นพบว่า เครื่องสำอางที่ผสมสาหร่ายและสารสกัดจากสาหร่ายเกลียวทองช่วยให้ผิวพรรณดีขึ้นและลดริ้วรอย ส่วนในประเทศไทยก็ได้มีบริษัทหลายแห่งที่ใช้สาหร่ายเกลียวทองเป็นเครื่องสำอางในรูปครีมบำรุงผิว

- **ใช้ในอุตสาหกรรมยา** นักวิทยาศาสตร์และนายแพทย์หลายท่านได้ทดลองใช้สาหร่ายเกลียวทองในการป้องกันและรักษาโรคต่าง ๆ เช่น โรคเบาหวาน โรคกระเพาะ อีกทั้งยังช่วยลดความเครียดและความไม่สมดุลในร่างกาย ในประเทศฝรั่งเศส ได้ทดลองใช้ยาที่ผสมสาหร่ายเกลียวทองทาแผล ทำให้แผลแห้งเร็วขึ้น ชาดูแมกนีเซียมในคลอโรฟิลล์ยังมีบทบาทอย่างสำคัญในการรักษาบาดแผล มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อป้องกันการเกิดของแบคทีเรียและช่วยสร้างเซลล์ขึ้นมาใหม่ด้วย คลอโรฟิลล์ในสาหร่ายมีโครงสร้างเหมือนสารสีแดงในเลือด (hemo-globin) นักวิทยาศาสตร์จึงแนะนำให้ใช้คลอโรฟิลล์รักษาโรคโลหิตจาง นอกจากนี้สาหร่ายบางชนิดมีสารปฏิชีวนะซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวงการแพทย์ ได้แก่ cyanophycin หรือ marinamycin ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคต่าง ๆ ได้ สาหร่ายสีน้ำเงินแกม

เชื้อ *scytonema* No.11 เป็นสาหร่ายที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย แยกได้จากดินนาจังหวัดพิษณุโลก พบว่า สามารถผลิตสารปฏิชีวนะ Cyanobacterin ซึ่งมีคุณสมบัติ เป็นทั้ง algicide และ bacteriocide ที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายและแบคทีเรียบางชนิดได้

- ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ สาหร่ายสีแดงพวก Gelidium และ Gracilaria สามารถนำไปสกัดทำเป็นวุ้น เพื่อนำไปใช้ในการประกอบอาหาร และเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์สาหร่ายสีน้ำตาลพวก Laminaria, Ascophyllum และ Macrocystis นำไปสกัดเป็น แอลจินหรือแอลจินเนต ซึ่งนำไปใช้ในการทำนม ขนมห้าง ไอศกรีม ขนมหวาน ลูกกวาด สบู่ แชมพูสระผม เป็นต้น

ปัจจุบันห้องปฏิบัติการสาหร่ายนอกจากจะพัฒนากรรมวิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่าย เป็นแหล่งอาหารโปรตีนแล้ว ยังได้นำสายพันธุ์สาหร่ายที่มีศักยภาพที่สามารถผลิตในเชิงพาณิชย์ เช่น Chlorella, Scenedesmus, Spirulina, Dunaliella และ Haematococcus มาศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงเพื่อผลิตสารอาหารหรือสารเคมีที่มีมูลค่าสูง

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ ความหนาของชั้นสาหร่าย และความเร็วลมของอากาศรอบห้องต่ออัตราการอบแห้ง คุณภาพทางโภชนาการและคุณภาพทางชีวภาพ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยอากาศร้อนระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก
2. หาอัตราการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ด้วยเครื่องอบแห้งที่ออกแบบขึ้น
3. วิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพและคุณค่าทางอาหารหลังการอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็กได้
2. ทราบผลของอุณหภูมิ ความหนาของชั้นสาหร่าย และความเร็วลมของอากาศรอบห้องต่ออัตราการอบแห้ง คุณภาพทางโภชนาการและคุณภาพทางชีวภาพ

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 ข้อมูลทั่วไปของสาหร่ายเกลียวทอง

สาหร่ายเกลียวทอง เป็นสิ่งมีชีวิตชั้นต่ำพวกโพรคาริโอท (Prokaryotes) ซึ่งยังไม่มีนิวเคลียสที่แท้จริงที่ค้นพบแล้วมีประมาณ 30 ชนิด (Species) ชนิดที่มีรายงานการทดลองและใช้ประโยชน์มากที่สุดคือ *S. platensis* และ *S. maxima* (<http://www.gd-l.com/faq.htm>) สาหร่ายเกลียวทองเป็นสาหร่ายที่จัดอยู่ในพวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ลักษณะโดยทั่วไปเป็นสาหร่ายหลายเซลล์ มีลักษณะเป็นสายสั้น ๆ บิดตัวไปมาเป็นเกลียว เจริญเติบโตได้ดีในน้ำกร่อยในเซลล์ไม่มีสารพวกเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบ พลังเซลล์บางและนุ่ม ต่างจากสาหร่ายคลอเรลลา ซึ่งเป็นสาหร่ายเซลล์เดียว มีผนังเซลล์หนา จึงทำให้ยากต่อการย่อยและการดูดซึม สำหรับสาหร่ายเกลียวทองร่างกายมนุษย์สามารถย่อยและดูดซึมได้สูงถึง 95% ทำให้ร่างกายสามารถใช้ประโยชน์จากสารอาหารในสาหร่ายเกลียวทองได้มาก สาหร่ายเกลียวทองมีโปรตีนสูงถึง 65-70% ของน้ำหนักแห้ง และพบว่าในสาหร่ายเกลียวทองมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าเนื้อสัตว์และไข่ไก่ถึง 3 เท่า และโปรตีนนี้ยังประกอบด้วยกรดอะมิโนคุณภาพดีที่ร่างกายต้องการ (Essential amino acids) ถึง 8 ชนิด ได้แก่

1. ไอโซลิวซีน (ISOLEUCINE - 4.13%): จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตที่ดีการพัฒนาเขาวนปัญญาและการรักษาสมดุลของไนโตรเจนในร่างกาย ไอโซลิวซีนใช้สำหรับสังเคราะห์กรดอะมิโนไม่จำเป็นชนิดอื่นๆ

2. ลิวซีน (LEUCINE - 5.80%): เป็นสารกระตุ้นการทำงานของสมอง เพิ่มระดับพลังงานให้แก่กล้ามเนื้อ

3. ไลซีน (LYSINE - 4.00%): สร้างภูมิคุ้มกันในเลือดทั้งหมด ทำให้ระบบหมุนเวียนโลหิตแข็งแรงและควบคุมให้เซลล์เจริญเติบโตตามปกติ

4. เมธิโอนีน (METHIONINE - 2.17%): เร่งอัตราการเผาผลาญไขมันและองค์ประกอบของไขมัน (Lipid) กระตุ้นกรดอะมิโนที่บำรุงรักษาสุขภาพของตับ เป็นสารต้านความเครียด ทำให้เส้นประสาทผ่อนคลาย

5. เฟนิลอะลานีน (PHENYLALANINE - 3.95%): จำเป็นสำหรับต่อมไทรอยด์ในการสร้างไทร็อกซิน (Thyroxin) ซึ่งเป็นสารกระตุ้นอัตราการเผาผลาญอาหารของร่างกาย

6. เทรโอนีน (THREONINE - 4.17%): ช่วยให้การล้างงานของลำไส้ การย่อย และการดูด

นมสารอาหารดีชั้น

7. **ทริปโตเฟน (TRYPTOPHANE - 1.13%)**: ทำให้ร่างกายใช้ประโยชน์จากวิตามิน B ได้มากขึ้น ทำให้เส้นประสาทแข็งแรงขึ้นและมีอารมณ์คงที่มากยิ่งขึ้น ส่งเสริมให้เกิดความรู้สึกสงบผ่อนคลาย

8. **วาลีน (VALINE - 6.00%)**: กระตุ้นสมรรถนะของสมองและการประสานงานกันของกล้ามเนื้อ

นอกจากนี้สาหร่ายเกลียวทองยังประกอบไปด้วย กรดแกมมาไลโนเลนิก (GLA) ที่มีปริมาณสูงกว่าพืชชนิดอื่น ซึ่งกรดนี้มีคุณสมบัติ ช่วยลดไขมันในเลือด ลดความดันโลหิต บรรเทาอาการข้ออักเสบ ปวดประจำเดือน ผิวหนังอักเสบ และสิวฝ้า

วิตามินที่มีอยู่ในสาหร่ายเกลียวทอง ได้แก่ วิตามินบี 12 ซึ่งปกติจะมีมากในเนื้อสัตว์และมีปริมาณน้อยมากในพืชทั่ว ๆ ไป ผู้ที่รับประทานมังสวิรัตจึงมักขาดวิตามินบี 12 ซึ่งทำให้เกิดโลหิตจางได้ สาหร่ายเกลียวทองจึงเป็นทางเลือกสำหรับผู้รับประทานอาหารมังสวิรัต ทั้งนี้เพราะสาหร่ายเกลียวทองเป็นพืชที่มีวิตามินบี 12 สูง วิตามินอีกชนิดหนึ่งที่มีมากในสาหร่ายเกลียวทองคือวิตามินเอซึ่งอยู่ในรูปของเบต้า-แคโรทีน (Beta-carotene) มีบทบาทสำคัญในการลดอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าผู้ที่รับประทานเบต้าแคโรทีนจะมีภูมิคุ้มกันโรคสูง ประโยชน์ของเบต้าแคโรทีนจึงนำมาใช้เป็นสารต้านมะเร็งชนิดต่าง ๆ เป็นแหล่งอาหารที่มีวิตามินอี วิตามินซี วิตามินบี 1 บี 6 และไนอาซินสูง นอกจากวิตามินต่าง ๆ แล้ว สาหร่ายเกลียวทองยังอุดมไปด้วยเกลือแร่ที่จำเป็นต่อร่างกายอีกมากมาย เช่น ธาตุเหล็ก สังกะสี แมงกานีส ทองแดง เซเลเนียม และแคลเซียม นอกจากนี้เม็ดสีในสาหร่ายเกลียวทองยังประกอบด้วยสีเขียวของคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) สีน้ำเงินของไฟโคไซยานิน (Phycocyanin) สีส้มของเบต้าแคโรทีน (Beta-carotene) มีรายงานวิจัยหลายเรื่องพิสูจน์ว่า คลอโรฟิลล์ หรืออนุพันธ์ มีผลต่อการเจริญของแบคทีเรียและสัตว์ การเผาผลาญอาหาร การหายใจ กระตุ้นการสร้างเม็ดเลือดแดงการทำงานของฮอร์โมน และการกำจัดสารพิษออกจากร่างกาย

2.2 คุณสมบัติที่สำคัญของสาหร่ายเกลียวทอง (สาหร่ายเกลียวทอง, 2547)

สาหร่ายเกลียวทองมีประโยชน์และสมบัติที่สำคัญที่ทำให้มีผู้สนใจคือ

1. ความปลอดภัยและปราศจากสารพิษโดยสิ้นเชิง

จากการทดสอบทางด้านเภสัชวิทยาเกี่ยวกับ สาหร่ายเกลียวทอง พบว่าไม่มีพิษ และไม่มีผลข้างเคียงต่ออวัยวะต่าง ๆ ของร่างกายตั้งแต่ระบบประสาทส่วนกลางลงมา

2. มีคุณค่าทางอาหารสูง

จากการวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการพบว่า ส่วนประกอบทางชีวเคมีของสาหร่ายเกลียวทองมีสารอาหารต่าง ๆ เกือบครบถ้วนและมีปริมาณสูงเมื่อเทียบกับอาหารชนิดอื่น ๆ ส่วนประกอบของสาหร่ายเกลียวทองที่นำมาผลิตเป็นอาหารเสริมสาหร่ายเกลียวทองพบว่าประกอบด้วยสารต่าง ๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของสาหร่ายเกลียวทอง (สาหร่ายเกลียวทอง, 2547)

ส่วนประกอบอาหาร	ร้อยละของน้ำหนัก
ความชื้น	4.74
เถ้า	6.18
โปรตีน	63.92
ไขมัน	2.47
ใยอาหาร	7.44
คาร์โบไฮเดรต ไม่รวมใยอาหาร	15.25
น้ำตาล	ไม่พบ
แร่ธาตุ	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม
โซเดียม	356.96
โพแทสเซียม	1041.04
แคลเซียม	332.25
แมกนีเซียม	261.47
เหล็ก	50.24
วิตามิน	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม
เบต้า-แคโรทีน คำนวณเป็น วิตามิน เอ	17.152
วิตามิน บี 1	0.048
วิตามิน บี 2	3.59
วิตามิน อี	3.30

ข้อมูลปริมาณสารอาหารในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมสาหร่ายเกลียวทองที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบันของบริษัท กรีน ไคมอน จำกัด แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลสารหายเกลียวทอง สไปรูไลนา ชนิดแคปซูล และชนิดอัดเม็ดบริษัท กรีน ไคมอนด์ จำกัด (บริษัท กรีน ไคมอนด์ จำกัด, มปป.)*

CHEMICAL ANALYSIS	
Moisture	3.03%
Protein	68-80%
Carbohydrates	16.08%
Phycocyanin	0.92%
Carotenoids	0.35%
Beta Carotene	0.88%
Chlorophyll	1.20%
Minerals	8.74%

*บริษัทกรีน ไคมอนด์ จำกัด

บุญสมฟาร์ม (Factory)

86-87 ม.6 ต.ทุ่งรี อ.แม่วาง เชียงใหม่ Tel: 053-363602

สาขาเชียงใหม่

ถนนเวียงแก้ว ใกล้วิทยาลัยเทคนิคเชียงใหม่ Tel: 053-223935, 053-416242-3

สาขาสีคิ้ว Tel: 044-249734

สาขานนทบุรี (Sale & Marketing office)

51/2 หมู่ 9 ถ.พิบูลสงคราม ต.สวนใหญ่ จ.นนทบุรี

Tel: 02-9665556

2.3 การบำบัดและเสริมสุขภาพของสารหายเกลียวทอง (ยิวดี, 2542.)

1. องค์ประกอบของสารหายเกลียวทองมีคุณค่าทางอาหารเหนือกว่าอาหารชนิดอื่น

องค์ประกอบสำคัญของสารหายเกลียวทองคือมีปริมาณ โปรตีนถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งสูงกว่าปริมาณ โปรตีนที่มีในเนื้อวัวหรือในไข่ถึง 3/2 เท่า นอกจากนั้นสารหายเกลียวทองยังประกอบด้วยคลอโรฟิลล์และไฟโคไซยานิน จำนวนมาก คลอโรฟิลล์จะช่วยบำรุงผิวพรรณ ช่วยรักษาโรคผิวหนัง กระตุ้นให้แผลแห้งและหายเร็วขึ้น ช่วยร่างกายขับสารพิษต่างๆ ลดอาการท้องผูก ช่วยฟื้นฟูตับที่เสื่อมสลาย ช่วยลดอาการอักเสบของแผลในกระเพาะอาหาร ส่วนไฟโคไซยานินเป็นสารให้สีประเภทบิลิรูบิน เป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารหายเกลียวทองให้สารหายเกลียวทองมีสีเขียวเข้มน้ำเงิน ไฟโคไซยานินมีความสำคัญต่อการทำงานของตับและการ

ย่อยสลายกรดอะมิโนช่วยทำให้ภูมิคุ้มกันโรคของร่างกายดีขึ้นและยังช่วยป้องกันการแพร่กระจายของเนื้องอก และสาหร่ายเกลียวทองยังมีคาโรทีนอยด์หรือ จะเรียก โปรวิตามิน(Provitamin) ซึ่งเป็นสารที่เปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้

2. สาหร่ายเกลียวทองมีคลอโรฟิลล์ที่มีสารต้านการอักเสบของโรคกระเพาะอาหารอักเสบหรือโรคแผลเปื่อยในกระเพาะอาหาร

ยาสำหรับรักษาโรคกระเพาะอาหารอักเสบและโรคแผลเปื่อยในกระเพาะอาหารนั้นต้องมีคลอโรฟิลล์ผสมอยู่ด้วย ทั้งนี้เพราะคลอโรฟิลล์เป็นสารที่ให้ผลทางการรักษาอาการอักเสบของเยื่อในกระเพาะหรือเยื่อหุลอดคลุม เป็นยาที่ใช้ในการรักษาโรคกระเพาะอาหารอักเสบ โรคแผลเปื่อยในกระเพาะอาหารและโรคหลอดลมอักเสบ

3. สาหร่ายเกลียวทองมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการรักษาโรค

ในการรักษาโรค การที่มีโปรตีน วิตามิน และเกลือแร่สูง ย่อมเป็นส่วนเสริมพลังงานภายในร่างกายในการที่จะช่วยฟื้นฟูกำลังวังชาของคนไข้จากโรคต่างๆ สาหร่ายเกลียวทองจึงมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการรักษาโรคและผู้ที่มีอาการหรือสภาวะต่างๆ ดังนี้

1. เหนื่อยง่าย และเป็นกังวลเกี่ยวกับสุขภาพ
2. เป็นหวัดง่าย
3. กินผักสีเขียวหรือผักไม่เพียงพอ
4. มีอาการวิงเวียนอยู่เสมอ
5. มีอาการขาดอาหาร, กินไม่ครบหมูหรือไม่ครบมื้อ
6. กำลังอดอาหารเพื่อลดความอ้วน

ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายเกลียวทองมีวิตามินสูง มีเกลือแร่ คลอโรฟิลล์มากมายและมีโปรตีนที่ย่อยง่าย

4. สาหร่ายเกลียวทองช่วยเสริมการรักษาสุขภาพของตับและป้องกันเซลล์ของตับจากพิษแอลกอฮอล์

ปริมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของเนื้อตับเป็นสาร โปรตีนและน้ำย่อยที่ทำหน้าที่ในการสลายสารต่าง ๆ ก็สร้างขึ้นมาจากโปรตีนทั้งสิ้น ดังนั้นการรักษาสุขภาพของตับไว้ได้ โดยให้กินอาหารที่มีโปรตีนเพียงพอเสมอ ตับที่แข็งแรงจะมีไขมันประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ถ้าสัดส่วนนี้เพิ่มขึ้นไปถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ตับจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและเซลล์ตับก็จะขยายใหญ่ขึ้นด้วย ซึ่งเป็นเครื่องชี้ว่า มีการสะสมไขมันในตับเพิ่มขึ้น เมื่อมีการสะสมไขมันไว้ในเซลล์ของตับอันเนื่องมาจากตับได้รับสารอาหารโปรตีนไม่เพียงพอ เป็นโรคที่มักพบบ่อยในผู้ที่ดื่มแอลกอฮอล์โดยไม่กินกับแกล้ม เพราะในการขจัดแอลกอฮอล์นั้นจะต้องมีสารอาหารโปรตีนหล่อเลี้ยงตับอย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการสะสมของไขมันในเซลล์ของตับ ถ้ามีปริมาณโปรตีนมากพอ ไขมัน

ใดๆ ที่ไม่ถูกเผาผลาญลงก็จะถูกส่งไปเก็บไว้ในเซลล์ไขมันได้ผิวหนัง สารอาหารที่โปรตีนต้องการก็คือ เมทไทโอนีน (Methionine) ซึ่งเป็นกรดอะมิโนชนิดหนึ่งที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีน กรดอะมิโนนอกจากจะเป็นสารอาหารสำคัญของโครงสร้างของเซลล์แล้ว ยังเป็นตัวป้องกันเซลล์ของตับจากพิษของแอลกอฮอล์อีกด้วย ดังนั้นโปรตีนคุณภาพดีจากสาหร่ายเกลียวทองประกอบด้วย เมทไทโอนีน ประมาณ 1.3-2.0 g ต่อ 100 g มีมากกว่า ปลาทู ถั่วเหลือง ไข่ และเนื้อวัว 3-5 เท่า จึงสามารถเสริมการรักษาสุขภาพของตับไว้ได้

2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับจุลินทรีย์ในอาหาร

จุลินทรีย์ เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ แบ่งออกเป็น 3 พวกใหญ่ๆ คือ แบคทีเรีย รา และยีสต์ มีบทบาทสำคัญต่ออาหาร ทั้งที่ก่อให้เกิดโทษ คือ ทำให้อาหารเน่าเสีย และเกิดอาหารเป็นพิษ ส่วนในด้านที่เป็นประโยชน์คือ ทำให้เกิดความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์อาหาร และการถนอมอาหาร เช่น ขนมนึ่ง เนยแข็ง ไวน์ เบียร์ น้ำปลา ปลาร้า เป็นต้น ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ล้วนเกิดจากการหมัก โดยจุลินทรีย์ที่อาจปนเปื้อนในอาหารอยู่แล้ว หรือมนุษย์เติมลงไป ในสมัยโบราณมนุษย์บริโภคนมเปรี้ยวกันมานานแล้ว โดยทำจากการเก็บรักษานมอย่างคิดจนเกิดกลิ่น และรสแปลกใหม่ และเก็บได้นานขึ้น จนในปี ค.ศ.1857 หลุยส์ ปาสเตอร์ พบว่าแบคทีเรียเป็นสาเหตุให้นมเปรี้ยว จึงเริ่มมีการศึกษาค้นคว้าเรื่องจุลินทรีย์ในอาหารขึ้นอย่างกว้างขวาง

สาเหตุส่วนใหญ่ของการเกิดโรคในอาหารคือ

1. การให้ความร้อนแก่อาหารไม่เพียงพอที่จะทำลายเชื้อจุลินทรีย์
2. เก็บอาหารไว้ที่ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเติบโตของจุลินทรีย์
3. มีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์จากแหล่งต่างๆ เข้าสู่ผลิตภัณฑ์อาหาร
4. สุขลักษณะของผู้ผลิตอาหารไม่ถูกต้อง
5. การทำความสะอาดบริเวณผลิตอาหารอย่างไม่ถูกวิธี

บทบาทของจุลินทรีย์ในการทำให้อาหารเป็นพิษ

จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะปนเปื้อนในอาหารและ ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกของอาหาร แต่ก่อให้เกิดโรค หรือเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค โดยมีกลไกต่างๆกัน เช่น เกิดจากการบริโภคอาหารที่มีจุลินทรีย์เหล่านี้เข้าไป และจุลินทรีย์เหล่านั้นไปเจริญเติบโตหรือสร้างสารพิษภายในร่างกายผู้บริโภคซึ่ง เราเรียกกลไกนี้ว่า Infection จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นกลุ่ม

Enterobacteriaceae เช่น *Salmonella spp.*, *Escherichia coli*, *Shigella spp.* และ *Yersinia enterocolitica* เกิดจากการบริโภคอาหารที่มีสารพิษที่จุลินทรีย์สร้างไว้เข้าไปซึ่งเราเรียกกลไกนี้ว่า Intoxication เช่น *Staphylococcus aureus*, *Clostridium botulinum*

จุลินทรีย์ในอาหารต่างก็มีทั้งประโยชน์ และมีโทษต่อมนุษย์ ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์และประเภทของอาหาร จุลินทรีย์ชนิดเดียวกันอาจเป็นประโยชน์ในอาหารชนิดหนึ่งแต่ก่อให้เกิดการเน่าเสียในอาหารอีกชนิดหนึ่ง ดังนั้นจุลินทรีย์กลุ่มที่มีประโยชน์ต่อมนุษย์จึงมีการศึกษาและพัฒนานำไปใช้ในกระบวนการผลิตอาหารอย่างมากมาย ขณะเดียวกันจุลินทรีย์กลุ่มที่ก่อให้เกิดโทษก็ต้องป้องกัน ควบคุมไม่ให้เกิดการปนเปื้อนเข้ามาในอาหาร ทั้งนี้เพื่อให้ผู้บริโภคได้รับประทานอาหารที่มีประโยชน์และปลอดภัย

จุลินทรีย์กลุ่มที่ทำให้คุณสมบัติของอาหารเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ไม่พึงปรารถนาต่อการบริโภค เนื่องจากการเจริญเติบโตของเชื้อรา การเน่าเสียของอาหารเกิดได้จากทั้งเชื้อแบคทีเรีย เชื้อยีสต์ เชื้อรา เช่น ขนมหึงเปลี่ยนสี กลิ่นและลักษณะการเน่าเสียของผักผลไม้ส่วนมากเกิดจากเชื้อราเพราะสามารถทนต่อสภาวะความเป็นกรดได้ดี เช่น *Penicillium digitatum* เป็นเชื้อราที่เกิดที่ผลส้มหรือเชื้อแบคทีเรีย กลุ่ม *Erwinia spp.* และ *Pseudomonas spp.* ที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสารเพคติน ทำให้ผักผลไม้เน่า มีลักษณะแฉะ และให้กลิ่นเหม็น ส่วนการเน่าเสียของเนื้อสัตว์สดมักจะเกิดเมื่อกบนผิวและมีกลิ่นเหม็นซึ่งเกิดจากเชื้อแบคทีเรียเป็นส่วนใหญ่ การเก็บรักษาอาหารอย่างไม่ถูกวิธีจึงมีผลต่อการเน่าเสียของอาหาร ปกติหากเก็บไว้ที่อุณหภูมิค่า เช่น ตู้เย็น จะสามารถยืดอายุการเก็บของอาหารได้ แต่ก็ยังมีเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดที่ยังสามารถเจริญเติบโตได้ดีในที่ที่อุณหภูมิค่า การเก็บอาหารในสภาวะสุญญากาศก็ยังสามารถเน่าเสียได้เช่นกัน เช่น การเน่าเสียของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ในภาชนะบรรจุสุญญากาศ เกิดจากเชื้อแบคทีเรียกลุ่มแลคติกที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียบางชนิดที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีแม้ไม่มีก๊าซออกซิเจน

แบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคในอาหาร ประกอบด้วย

ซาลโมเนลลา (*Salmonella*)

ซาลโมเนลลาเป็นแบคทีเรียที่มีลักษณะรูปท่อน เคลื่อนที่โดยใช้แฟลเจลลารอบเซลล์ ต้องการออกซิเจนในการเติบโต อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเติบโตของเชื้อซาลโมเนลลาประมาณ 37°C ช่วง pH ในการเติบโตอยู่ระหว่าง 4.1-9.0 ส่วนค่า Aw (ปริมาณน้ำอิสระในอาหารที่จุลินทรีย์นำไปใช้ในการเติบโต) ค่าที่ต่ำสุดสำหรับการเติบโตประมาณ 0.93-0.95 เชื้อซาลโมเนลลามี

ความสามารถในการทนความร้อนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิด สายพันธุ์ และผลจากสิ่งแวดล้อมในการเติบโต

แหล่งที่มาของเชื้อซาลโมเนลลา เชื้อซาลโมเนลลาสามารถติดต่อจากสัตว์มาสู่คน และสัตว์อื่นๆ เช่น หมู สัตว์ปีก แมลง วัว ควาย สุนัข แมว และม้า เป็นต้น สำหรับการติดเชื้อในคนนั้น ส่วนมากจะได้รับเชื้อปะปนมากับน้ำและอาหาร และบางครั้งอาจเกิดจากสัตว์เลี้ยงที่อาศัยตามอาคารบ้านเรือน ซึ่งเป็นพาหะของเชื้อ หรือหากมีผู้ป่วยเป็นโรค Salmonellosis ทำงานที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปอาหารแล้วมีสุขลักษณะส่วนบุคคลที่ไม่ดีพอ เช่น ไข่ดิบขาว และหลังจากกลับจากห้องน้ำมิได้มีการล้างมือให้สะอาดเสียก่อนเชื้อซาลโมเนลลาก็มีโอกาสที่จะปนเปื้อนลงไปยังอาหารได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เชื้อซาลโมเนลลาเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดอาการท้องร่วงประกอบกับเชื้อมีอัตราการแพร่ระบาดสูง จึงสามารถพบผู้ป่วยที่เป็นโรคจากเชื้อมีในอัตราสูงด้วย ซาลโมเนลลาเป็นแบคทีเรียที่ทำให้อาหารเป็นพิษ และสามารถถ่ายทอดได้โดยอาหารที่มักจะมีเชื้อซาลโมเนลลา ได้แก่ อาหารประเภทเนื้อ เช่น พายเนื้อ ไส้กรอก แฮม เบคอน แชนนวิช และมักเป็นอาหารที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังพบในเนื้อไก่ ไช้ นม และผลิตภัณฑ์ปลา และอาหารทะเลที่ไม่ได้ผ่านความร้อนอย่างเพียงพอ อาหารสุกๆ ดิบๆ ไม่ว่าจะเป็นแฮม ลาบ ยำ ปูเค็ม ปูดอง ผักสด

อันตรายของเชื้อซาลโมเนลลา ซาลโมเนลลาเป็นแบคทีเรียที่ทำให้อาหารเป็นพิษที่เรียกว่า *Salmonellosis* อาการจะเกิดขึ้นหลังจากบริโภคอาหารที่มีการปนเปื้อนแล้วประมาณ 6-48 ชั่วโมง และจะมีอาการอยู่ในระหว่าง 1-5 วัน เมื่อร่างกายเราได้รับเชื้อซาลโมเนลลาเข้าสู่ร่างกายแล้ว เชื้อโรคจะมุ่งเข้าสู่เซลล์น้ำเหลืองของลำไส้เล็ก และจะเจริญแบ่งตัวที่นั่น ในระยะนี้จะยังไม่มีอาการอะไร เป็นระยะฟักตัว ต่อมาเชื้อจะแพร่เข้าสู่กระแสเลือด และกระจายสู่ส่วนต่างๆ ของร่างกาย ผู้ป่วยจะเริ่มแสดงอาการในรายที่ไม่มีโรคอื่นแทรกซ้อน จะมีชีพจรเต้นช้ากว่าปกติ ผู้ป่วยที่เสียชีวิตด้วยโรคนี้อาจจะเสียชีวิตเนื่องจากเลือดออกในลำไส้เล็ก และลำไส้ทะลุ สำหรับอาการทั่วไปของผู้ที่ได้รับเชื้อคือ คลื่นไส้ อาเจียน ท้องเดิน ปวดศีรษะ ปวดท้อง มีไข้ หนาวสั่น และอ่อนเพลีย โดยความรุนแรงของอาการที่เกิดขึ้นนั้นจะแตกต่างกันไปตามปริมาณเชื้อที่บริโภค ชนิดของเชื้อที่บริโภค และความต้านทานของผู้บริโภค ทั้งนี้เชื้อซาลโมเนลลามีหลายชนิดแต่ละชนิดมีลักษณะทางนิเวศวิทยาที่แตกต่างกันไป จึงทำให้การติดเชื้อ และอาการของโรคแตกต่างกันตามไปด้วย สำหรับโรคที่เกิดจากเชื้อซาลโมเนลลาที่สำคัญได้แก่ โรคกระเพาะอาหารและลำไส้อักเสบ (Gastroenteritis) โรคโลหิตเป็นพิษ (Septicemia) และ ไข้ไทฟอยด์ (Typhoid Fever)

โรคกระเพาะอาหาร และลำไส้อักเสบ : โรคชนิดนี้มีสาเหตุมาจากการติดเชื้อ *S.typhimurium* เชื้อมีระยะฟักตัว 4-48 ชั่วโมงอาการในระยะแรกจะคลื่นไส้ อาเจียน เจ็บปวด

บริเวณท้อง หรือท้องร่วง ผู้ป่วยจะมีอุณหภูมิร่างกายสูงถึง 38-39 องศาเซลเซียส และจะพบเม็ดเลือดขาวปะปนมากับอุจจาระด้วย อาการผู้ป่วยจะกลับเข้าสู่ภาวะปกติภายใน 5 วัน ไม่ว่าจะได้รับการรักษาหรือไม่ก็ตาม

โรคโลหิตเป็นพิษ: โรคชนิดนี้เป็นผลมาจากมีเชื้อ *S.cholerae* อยู่ในร่างกายเป็นเวลานาน เชื้อจะเข้าสู่กระแสเลือด และสามารถแพร่กระจายไปเจริญตามส่วนต่างๆ ของร่างกายทำให้เกิดการอักเสบที่อวัยวะต่างๆ เช่น ไต ตับ ม้าม หัวใจ ปอด และเยื่อหุ้มประสาทเป็นต้น สำหรับอาการที่เกิดขึ้น ได้แก่ การคลื่นเนื้อครันตัว หรือหนาวสั่น เบื่ออาหาร และน้ำหนักตัวลดลง

ไข้ไทฟอยด์: มีสาเหตุมาจากเชื้อ *S.typi* และ *S.paratyphi* ชนิด A, B, C โดยอาจได้รับเชื้อโดยตรงจากผู้ป่วย หรือผู้ที่เป็นพาหะหรืออาจได้รับเชื้อทางอ้อม โดยปนเปื้อนอยู่ในอาหารหรือน้ำ เมื่อเข้าสู่ร่างกายแล้ว เชื้อมีระยะฟักตัว 3-35 วัน แต่โดยทั่วไปประมาณ 7-14 วัน สำหรับอาการที่ปรากฏได้แก่ อาการหนาวสั่น อ่อนเพลีย ปวดศีรษะ ปวดหลัง ท้องร่วง และมีอุจจาระเหม็นมาก ในบางรายอาจเกิดหลอดลมอักเสบได้ อุณหภูมิในร่างกายเพิ่มสูงขึ้น 39-40°C จะมีอาการเช่นนี้นาน 1-2 สัปดาห์ และอาการไข้จะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งถึงสัปดาห์ที่ 4 จะไม่มีอาการไข้เลย ในผู้ป่วยที่ไม่ได้มีการรักษาจนถึงสัปดาห์ที่ 2-3 จะเกิดจุดสีแดงขนาดประมาณ 2-5 มิลลิเมตรตามผิวหนัง เนื่องมาจากเชื้อแพร่กระจายอยู่ตามเส้นเลือดฝอยจำนวนมาก ผู้ป่วยอาจมีอาการทางสมองและคลื่น คลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง เจ็บคออย่างรุนแรง ชีพจรเต้นเร็ว มีเลือดออกตามบริเวณลำไส้ และอุจจาระจะมีเนื้อเยื่อเมือกออกมาด้วย

ปริมาณที่ทำให้เกิดโรค เชื้อซาลโมเนลลาปริมาณประมาณ 10^8 - 10^9 เซลล์ สามารถทำให้เกิดโรค Salmonellosis ได้ แต่ในบางกรณีแม้จะมีปริมาณต่ำกว่าก็สามารถทำให้เกิดโรคได้เช่นกัน

วิธีป้องกัน เชื้อซาลโมเนลลาถูกทำลายได้ง่ายที่อุณหภูมิ 60°C นาน 4-5 นาที หรืออุณหภูมิ 100°C นาน 1 นาที ดังนั้นการรับประทานอาหารที่ปรุงสุกใหม่ๆ และรับประทานในขณะที่ยังร้อนจะช่วยลดการติดเชื้อมอนเนลลาได้ การแช่เย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4°C ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อซาลโมเนลลาได้ สำหรับในใจนั้นหลายคนอาจคิดว่าไข่ที่มีเปลือกหุ้มโดยที่เปลือกไม่มีรอยร้าวหรือแตกเชื้อโรคจะไม่สามารถปนเปื้อนเข้าไปได้ แต่ในความเป็นจริงแล้วเปลือกไข่นั้นมีความพรุน ซึ่งหากเปลือกไข่มีเชื้อซาลโมเนลลาอยู่บนนั้นก็ยังสามารถผ่านเข้าไปในไข่ขาว และไข่แดงได้ ดังนั้นในการปรุงอาหารที่มีไข่เป็นส่วนประกอบจึงควรจะต้องปรุงให้สุกด้วยความร้อนที่เหมาะสม นอกจากนี้ควรล้างอุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องใช้ที่ใช้ในการบรรจุ หั่นหรือรองหั่นอาหารที่ไข่เสร็จแล้วให้สะอาด เนื่องจากอาจเกิดการปนเปื้อนขึ้นอีกครั้งถ้าหากเรานำภาชนะที่มีการ

ปนเปื้อนนั่น ไปบรรจุ หรือหั่น หรือรองหั่นอาหารที่ผ่านการแปรรูปแล้ว ตัวอย่างเช่น ถ้าเรานำมีดที่หั่นเนื้อหมูดิบไปหั่นผักสดที่ล้างสะอาดแล้วโดยที่มีดนั้น ไม่ได้ทำการล้างน้ำให้สะอาดก่อนก็จะทำให้ผักสดมีโอกาสปนเปื้อนเชื้อซาลโมเนลลาได้อีกครั้ง

เชื้อสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส (Staphylococcus Aureus)

อันตรายจากเชื้อสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส เป็นแบคทีเรียที่มีลักษณะกลม เรียงตัวเป็นกลุ่มคล้ายพวงอุ้งน หรือเป็นคู่ หรือเป็นสายสั้นๆ ไม่เคลื่อนที่ โคโลนิมีสีเหลืองหรือสีทอง เจริญเติบโตได้ดีในสภาพอากาศที่มีออกซิเจน ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเติบโตคือ 35-40°C ช่วง pH หรือความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการเติบโตอยู่ที่ 7-7.5 ส่วนค่า Aw (ปริมาณน้ำอิสระในอาหารที่จุลินทรีย์นำไปใช้ในการเติบโต) ต่ำสุดสำหรับการเติบโตในสภาพมีออกซิเจนประมาณ 0.86 สภาพไม่มีออกซิเจน 0.90

สแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส บางสายพันธุ์ผลิตสารพิษที่เรียกว่า เอนเทอโรทอกซิน ทำให้อาหารเป็นพิษ ซึ่งเอนเทอโรทอกซินที่ผลิตมีหลายชนิดแต่ชนิดที่พบว่าทำให้เกิดอาหารเป็นพิษบ่อย คือ ชนิดเอ และดี โดยช่วงอุณหภูมิที่เชื้อชนิดนี้จะผลิตเอนเทอโรทอกซินอยู่ระหว่าง 15.6 และ 46.1°C และผลิตได้ดีที่อุณหภูมิ 40°C

แหล่งที่มาของเชื้อ สแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส จะมีชีวิตอยู่ได้ในอากาศฝุ่นละออง ขยะมูลฝอย น้ำ อาหารและนม หรืออาหารบรรจุเสร็จ สภาพแวดล้อมภายนอกมนุษย์และสัตว์ ซึ่งมนุษย์และสัตว์นั้นเป็นแหล่งของเชื้อชนิดนี้ โดยจะพบอยู่ตามทางเดินหายใจ ลำคอ หรือ เส้นผม และผิวหนังถึง 50% หรือมากกว่านี้ในคนที่มีสุขภาพดี และอาจพบเชื้อชนิดนี้ 60-80% ในผู้ที่สัมผัสโดยตรงกับผู้ป่วยหรือผู้ที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมในโรงพยาบาล ตลอดจนผู้ประกอบอาหาร รวมทั้งในขั้นตอนของการบรรจุและสภาพแวดล้อมนอกนั้นก็ก็เป็นสาเหตุส่วนใหญ่ที่ทำให้เกิดการปนเปื้อน สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่งก็คือ การเก็บอาหารไว้ในอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมเป็นผลให้อาหารที่มีการปนเปื้อนอยู่แล้วมีการเพิ่มจำนวนของเชื้อและสร้างสารพิษได้อย่างรวดเร็ว อาหารที่มักพบเชื้อ สแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส ปนเปื้อนได้แก่ เนื้อและผลิตภัณฑ์เนื้อ เนื้อสัตว์ปีกและผลิตภัณฑ์จากไข่ อาหารประเภทสลัดเช่น ไข่ ทูน่า เนื้อไก่ มันฝรั่ง และมักกะโรนี ผลิตภัณฑ์นม อบ ครีมพาย เอแคลร์ ซอกโกแลต แชนวิช และผลิตภัณฑ์นม ที่เก็บไว้ในอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม และเก็บไว้เป็นเวลานานก่อนรับประทาน

อันตรายของเชื้อ สแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส บางสายพันธุ์สามารถสร้างสารพิษคือ เอนเทอโรทอกซิน ซึ่งเป็นโปรตีนที่ทนต่อความร้อนได้ดี และเป็นสาเหตุทำให้เกิดอาการเจ็บป่วยในมนุษย์ สารพิษชนิดนี้ทนความร้อนถึงระดับ 143.3°C เป็นเวลา 9 วินาทีได้ ดังนั้น

อุณหภูมิในการหุงต้มธรรมดาหรืออุณหภูมิน้ำเดือดจึงไม่สามารถทำลายสารพิษชนิดนี้ได้ โรคอาหารเป็นพิษที่เกิดจากเชื้อ สแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส นั้นมีชื่อเรียกว่า Staphyloenterotoxiosis และ Staphyloenterotoxemia

ลักษณะอาการที่บ่งบอกว่าติดเชื้อ สแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส นั้นจะแสดงให้เห็นอย่างรวดเร็วและรุนแรงในหลายๆ กรณี ซึ่งอาการทั่วไปของผู้ได้รับเชื้อที่พบคือ ผู้ป่วยมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน วิงเวียน เป็นตะคริวในช่องท้องและอ่อนเพลียในผู้ป่วยบางรายอาจมีอาการอื่นแทรกซ้อน หลายรายจะมีอาการปวดหัว เป็นตะคริวที่กล้ามเนื้อ และมีการเปลี่ยนแปลงความดันโลหิตเป็นระยะๆ รวมทั้งอาจมีการเต้นของชีพจรผิดปกติซึ่งโดยทั่วไปอาการจะดีขึ้นภายใน 2-3 วัน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพความต้านทานสารพิษของร่างกาย ปริมาณการปนเปื้อนของเชื้อในอาหาร และปริมาณสารพิษที่สร้างขึ้นในอาหาร รวมทั้งสภาพร่างกายโดยทั่วไปของผู้ที่ได้รับเชื้อมด้วย

ปริมาณที่ทำให้เกิดโรคเมื่อเรารับประทานอาหารที่มีสารพิษปนเปื้อนในปริมาณน้อยกว่า 1 ไมโครกรัมจะสามารถทำให้เกิดอาการเจ็บป่วยได้ ซึ่งสารพิษชนิดนี้จะมีปริมาณสูงมากเมื่อมีเชื้อ สแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส ปนเปื้อนอยู่ในอาหาร 100,000 ต่อกรัมอาหาร

วิธีป้องกันด้านผู้ปรุงอาหาร สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในระหว่างการเตรียมอาหารหรือปรุงอาหารนั้นก็คือ ผู้ปรุงต้องไม่ไอ หรือจามรดอาหาร ควรรับประทานอาหารขณะร้อน หากต้องการเก็บรักษาอาหารควรเก็บไว้ในตู้เย็น ไม่ควรเก็บอาหารที่เตรียมเสร็จแล้วไว้ในที่ที่อุณหภูมิสูง เพราะจะเป็นสาเหตุให้มีการเพิ่มจำนวนเชื้ออย่างรวดเร็วซึ่งกรณีดังกล่าวเป็นกรณีที่พบได้บ่อยในการเกิดอาหารเป็นพิษจากเชื้อ สแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส

บาซิลลัส ซีเรียส (Bacillus Cereus)

อันตรายจากเชื้อบาซิลลัส ซีเรียส เป็นแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นรูปท่อนตรง ขนาด $0.3 - 2.2 \times 1.2 - 7.0$ ไมโครเมตร ส่วนใหญ่เคลื่อนที่ได้ สร้างสปอร์และสร้างสารพิษ ซึ่งจะจับสารพิษออกมาขณะปนเปื้อนอยู่ในอาหาร ช่วงอุณหภูมิในการเติบโตอยู่ระหว่าง $30-37^{\circ}\text{C}$ แต่บางสายพันธุ์เติบโตได้ที่อุณหภูมิ $4-5^{\circ}\text{C}$ สำหรับค่า pH ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อชนิดนี้อยู่ระหว่าง 6-7 และสามารถเติบโตได้ดีในสภาพที่มีออกซิเจน และจะสร้างสารพิษเมื่ออยู่ภายใต้สภาพที่มีออกซิเจนน้อย

แหล่งที่มาของเชื้อบาซิลลัส ซีเรียส พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ ในดิน ผุ่นละอองผลิตภัณฑ์จากพืช เช่น ข้าว ธัญพืช แป้ง ผลิตภัณฑ์จากแป้ง เครื่องเทศ ผลิตภัณฑ์จากสัตว์และเครื่องปรุงแต่งรสต่างๆ นอกจากนี้ยังพบในอุจจาระของคนที่มีสุขภาพปกติได้ประมาณ 15% อาหารที่พบว่ามีการปนเปื้อนของเชื้อ บาซิลลัส ซีเรียส จนทำให้เกิดอาการอาเจียนได้แก่ อาหารประเภท

ข้าว และแป้ง อาทิ มั้กะโรนี และข้าวผัด เนยแข็ง ผลิตภัณฑ์จากวานิลลาที่ทำในลักษณะซัดไส้ครีม ส่วนอาหารที่พบว่ามีการปนเปื้อนของเชื้อจนทำให้เกิดอาการท้องร่วง ได้แก่ ผักต่างๆ สลัด อาหารที่มีเนื้อสัตว์เป็นส่วนประกอบ ซอส ซุป และอาหารที่มีแป้งและครีมเป็นส่วนประกอบ

อันตรายของเชื้อบาซิลลัส ซีเรียส เป็นแบคทีเรียที่สร้างสารพิษ การเกิดพิษมี 2 ลักษณะอาการคือ ทำให้อาเจียน (Emetic illness) และทำให้ท้องเสีย (Diarrhea illness) อาการอาเจียนมักเกิดจากการได้รับสารพิษชนิดที่มีความคงทน ที่สามารถมีชีวิตรอดได้ในอุณหภูมิสูงและค่าความเป็นกรด-ด่างสูง โดยผู้ป่วยจะเกิดอาการคลื่นไส้และอาเจียน ภายหลังจากการบริโภคอาหารที่มีสารพิษเข้าไป 11-15 ชั่วโมง แต่โดยทั่วไปมักปรากฏอาการภายหลังจากการบริโภคอาหารที่มีสารพิษเข้าไป 30 นาทีถึง 6 ชั่วโมง

ส่วนอาการท้องเสียมักเกิดจากสารพิษชนิดที่ไม่ทนความร้อนและกรด ตามปกติใช้เวลาพักตัวประมาณ 6-12 ชั่วโมง หลังจากรับประทานอาหารที่มีการปนเปื้อนสารพิษของเชื้อ อาการประกอบด้วย การปวดท้องและถ่ายอุจจาระเหลว เนื่องจากมีน้ำมาก โดยทั่วไปอาการจะทรงอยู่ไม่เกิน 24 ชั่วโมง แล้วจะทุเลาลง

วิธีป้องกันบาซิลลัส ซีเรียส เป็นเชื้อชนิดที่ก่อปัญหาภัยกับอุตสาหกรรมการจัดการบริการอาหารที่ต้องมีการเตรียมอาหารจำนวนมาก หรือต้องจัดเตรียมอาหารขึ้นล่วงหน้าเป็นเวลานานๆ ก่อนนำไปบริโภค เพราะหากในระหว่างการปรุง และการเก็บรักษามีการปฏิบัติที่ไม่ถูกสุขลักษณะหรือไม่สะอาด จะทำให้เกิดการปนเปื้อนของเชื้อชนิดนี้ขึ้น ซึ่งกว่าที่จะนำอาหารไปบริโภค เชื้อชนิดนี้อาจเพิ่มจำนวนในอาหารมากขึ้นเรื่อยๆ ได้

ดังนั้น โน้จั่นตอนของการจัดเตรียม การเก็บรักษา และการขนส่งอาหารจึงต้องกระทำอย่างระมัดระวัง และรักษาความสะอาด โดยเฉพาะอาหารที่ทำให้สุกแล้ว ไม่ควรเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องนานเกินควร

Clostridium perfringens

C. perfringens เป็นเชื้อแบคทีเรียที่พบในลำไส้ของคนและสัตว์ ถ้าปริมาณปนเปื้อนของเชื้อนี้ในอาหารที่รับประทานมากเพียงพอ เชื้อก็จะสร้างพิษขึ้นทำให้เกิดอาหารเป็นพิษได้ *C. perfringens* นี้จะมีสปอร์ซึ่งทนต่อความร้อน การปรุงอาหารที่ความร้อนไม่เกิน 60°C จะไม่สามารถฆ่าเชื้อนี้ได้แม้จะมีระยะเวลาตามที่ตาม อาหารจำพวกเนื้อ, เป็ด ไก่ หรือที่มีน้ำขลุกขลิกจะพบมากที่สุด ดังนั้นอาหารที่ปรุงสุกแล้วร้อนๆ ควรเสิร์ฟทันทีหรือเก็บไว้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 °C หากต้องการเก็บอาหารจำพวกดังกล่าวไว้ปริมาณมากๆ ก็ควรแบ่งเป็นจำนวนน้อยๆ และแยกแช่เย็น เพื่อให้อาหารเย็นลงอย่างรวดเร็วและเมื่อนำมารับประทานก็ต้องอุ่นในความร้อนไม่ต่ำกว่า 73.8 °C

สารพิษจากเชื้อรา (Mycotoxin)

สารพิษจากเชื้อรา (mycotoxin) คือสารพิษธรรมชาติที่สร้างจากเชื้อรา เมื่อคนหรือสัตว์ได้รับสารพิษจากเชื้อราเข้าไป แม้ในปริมาณน้อย ก็ทำให้เกิดอาการพิษ (mycotoxicosis) ซึ่งไม่สามารถรักษาให้หายได้โดยการให้ยา อาการดังกล่าวไม่สามารถถ่ายทอดจากคนหนึ่งไปสู่คนอื่นได้ และมีหลักฐานว่าอาการดังกล่าวเกิดจากการรับประทานอาหารที่มีการปนเปื้อนของเชื้อราและสารพิษจากเชื้อรา การปนเปื้อนดังกล่าวเกิดขึ้นได้ตั้งแต่การเพาะปลูก การเก็บเกี่ยว การเก็บรักษา และการนำผลิตผลทางการเกษตรมาผลิตเป็นอาหาร

สารพิษจากเชื้อราทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพร่างกายมากหรือน้อยขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ ประกอบด้วย เช่น ความสมบูรณ์ของร่างกาย การดื่มสุรา การได้รับการรักษาด้วยยาบางชนิด อาหารที่รับประทาน เป็นต้น อาการพิษเกิดขึ้นเนื่องจากสารพิษจากเชื้อราเข้าไปทำลาย DNA , RNA และโปรตีน ทำให้เกิดพิษต่ออวัยวะต่าง ๆ แบ่งเป็น

- พิษต่อตับ (hepatotoxin) ได้แก่ อฟลาทอกซิน (aflatoxin)
- พิษต่อไต (nephrotoxin) ได้แก่ ออกคราทอกซิน (ochratoxin)
- พิษต่อระบบประสาท (neurotoxin) ได้แก่ พาทุลิน (patulin)
- พิษต่อระบบทางเดินอาหาร (alimentary tract toxin) ได้แก่ ไทรโคธีซีน (trichothecene)
- พิษต่อระบบฮอร์โมน (estrogenic mycotoxin) ได้แก่ ซีราลีโนน (zearalenone)
- พิษอื่น ๆ (other mycotoxin) ได้แก่ เออร์กอต (ergot)

สารพิษจากเชื้อราที่มีการศึกษากันแพร่หลายคือ อฟลาทอกซิน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งที่ตับและอวัยวะอื่น ๆ เช่น ไต ระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร ระบบประสาท ระบบสืบพันธุ์ และระบบภูมิคุ้มกัน สร้างจากเชื้อราตระกูล *Aspergillus* เช่น *A.flavus*, *A. parasiticus* อฟลาทอกซินเรืองแสงได้ เมื่อส่องดูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต โดยอฟลาทอกซินบีและเอ็ม จะเรืองแสงสีฟ้า อฟลาทอกซินจี เรืองแสงสีเขียว อฟลาทอกซินทนความร้อนได้สูงถึง 260°C และคงตัวในสภาพที่เป็นกรด แต่จะสลายตัวในสภาพที่เป็นด่าง นอกจากนี้ยังสลายตัวภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต อฟลาทอกซินละลายน้ำได้เล็กน้อย เมื่อเข้าสู่ร่างกายบางส่วนจะถูกขับออกในรูปแบบเดิม บางส่วนจะถูกขบวนการของร่างกายเปลี่ยนแปลงเป็นสารตัวอื่น (metabolites) ซึ่งมีพิษมากขึ้นหรือน้อยลงก็ได้ สารดังกล่าวจะถูกสะสมในร่างกาย บางส่วนถูกขับออกทางปัสสาวะ อุจจาระและทางน้ำนม สาร

metabolite ที่มีพิษมากที่สุดคือ aflatoxin B₁ , - 2 , 3 – epoxide ซึ่งจะไปจับกับ DNA , RNA ทำให้การสังเคราะห์โปรตีนในเซลล์ผิดปกติ และทำให้เกิดมะเร็งที่ตับในที่สุด

อาการที่แสดงออกเมื่อ สัตว์ต่าง ๆ เช่น ไก่ หมู วัว ได้รับอฟลาทอกซิน คือ เบื่ออาหาร น้ำหนักลด มีน้ำไหลออกจากจมูก ตีข่าน ท้องมาร ตกเลือดตาย อฟลาทอกซินมักปนเปื้อนในถั่วลิสง ข้าวโพด และผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ปริมาณการปนเปื้อนของอฟลาทอกซินในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรถูกนำมาใช้เป็นเครื่องต่อรองราคาในการซื้อขายผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ทั้งในระดับประเทศและระหว่างประเทศ ทำให้แต่ละประเทศกำหนดค่าการปนเปื้อนเพื่อปกป้องผลประโยชน์ เช่น ประเทศไทยกำหนดให้มีการปนเปื้อนของอฟลาทอกซินได้ไม่เกิน 20 ไมโครกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม หรือ 20 พีพีบี ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 98 พ.ศ.2529 คณะกรรมการอาหารระหว่างประเทศ (Codex Alimentarius Commission) กำหนดให้มีการปนเปื้อนของอฟลาทอกซินในถั่วลิสงที่ต้องนำไปผ่านขบวนการต่อไป ได้ไม่เกิน 15 พีพีบี ทั้งนี้เพื่อปกป้องสุขภาพอนามัยของผู้บริโภค และให้เป็นธรรมในด้านการค้าระหว่างประเทศ

2.5 ความรู้พื้นฐานในการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเท ด้วยวิธีการใดวิธีการหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุ โดยการระเหยน้ำโดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย โดยทั่วไปจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง การถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังวัสดุจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการถ่ายเทมวลจากวัสดุไปยังอากาศ ความร้อนสัมผัสที่ได้รับจากอากาศส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุ ซึ่งอัตราการระเหยของน้ำหรืออัตราการอบแห้งของวัสดุจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วอากาศอบแห้ง โดยทั่วไปแล้วอัตราการอบแห้งจะคงที่ในช่วงเวลาหนึ่งหลังจากนั้นอัตราการอบแห้งจะลดลง และมีค่าเป็นศูนย์เมื่อความชื้นถึงสภาวะสมดุล (กิตติพงษ์, 2538) การเคลื่อนที่ของน้ำเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจากภายในชั้นอาหารออกมาที่ผิวมี 2 วิธี (จิตธนา, 2540) คือ

2.5.1. การเคลื่อนที่ด้วยแรงผ่านช่องแคบ (Capillary force)

เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเซลล์โปรงมีช่องว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกันเป็นทางแคบ ๆ เกิดแรงดันของน้ำขึ้นมาจากท่อ การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นได้สะดวกรวดเร็ว แต่จะหยุดเมื่อน้ำในทางแคบ ๆ นั้น ขาดตอนลง

2.5.2. การเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (Diffusion) ผ่านเซลล์

เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเนื้อแน่น ไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์หรือเกิดในอาหารที่อมน้ำแห้งไประยะหนึ่งทีแรงผ่านไปช่องแคบหมดไปแล้ว น้ำจะต้องแพร่ผ่านเซลล์จึงเคลื่อนที่ได้ช้า

2.6 อัตราการอบแห้ง

ลักษณะการเคลื่อนย้ายของน้ำในอาหารมีผลต่ออัตราการอบแห้ง (การสูญเสียน้ำต่อหนึ่งหน่วยเวลา) ถ้าอาหารมีเนื้อโปร่งการเคลื่อนที่เป็นแบบการไหลผ่านช่องแคบ น้ำเคลื่อนที่มาที่ผิวอาหารได้เร็วกว่าการกลายเป็นไอ การระเหยของน้ำเกิดขึ้นอย่างอิสระด้วยอัตราเร็วคงที่ เรียกรวมทั้งช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อการไหลผ่านช่องแคบหมดไป น้ำต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ที่ช้าลงมากจนมาที่ผิวไม่เพียงพอผิวอาหารจึงแห้ง การระเหยเกิดขึ้นได้ช้าลง อัตราการอบแห้งจึงลดลง เรียกการทำแห้งช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

การทำแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นของอากาศในเตาสมดุลกับความชื้นของอาหาร และเรียกความชื้นของอาหารขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษาระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่อุณหภูมิคงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็จะเท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย ค่าความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิในวัสดุและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

พฤติกรรมของการอบแห้งโดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกันคือ เมื่ออบแห้งวัสดุขึ้นด้วยลมร้อนที่มีอุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วลมคงที่ ทันทึที่ลมร้อนสัมผัสกับผิวของวัสดุขึ้น อุณหภูมิของวัสดุขึ้นจะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะคงที่ (steady state) เนื่องจากในช่วงนี้อัตราการอบแห้งของวัสดุขึ้นมีค่าคงตัว จึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant drying rate period) ช่วงนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นของวัสดุลดลงจนเท่ากับความชื้นวิกฤติ (critical moisture content) หลังจากนั้นอุณหภูมิที่ผิวหน้าของวัสดุจะเพิ่มขึ้นและอัตราการอบแห้งจะลดลงเรื่อย ๆ จึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling drying rate period) จนเท่ากับความชื้นวิกฤติ และในที่สุดอัตราการอบแห้งจะเท่ากับศูนย์ เมื่อความชื้นในวัสดุสมดุลกับความชื้นในลมร้อน ซึ่งเป็นความชื้นต่ำสุด ซึ่งหมายถึงค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) ของวัสดุภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งนั้น

2.6.1 การอบแห้งชั้นบางและสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน

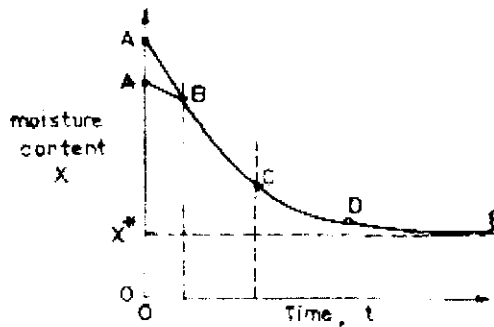
ปกติแล้วจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งวัสดุ โดยเมื่อมีการผ่านอากาศร้อนไปที่ตัววัสดุ การถ่ายเทความร้อนจากกระแสอากาศไปยังผิววัสดุ และการถ่ายเทมวลจากวัสดุไปยังกระแสอากาศจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ความร้อนจากอากาศที่วัสดุได้รับส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการทำให้น้ำระเหย วัสดุจากสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนเมื่อถูกทำให้แห้งในลักษณะชั้นบางที่สภาวะอากาศคงที่ อัตราการอบแห้งจะคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่งจากนั้นจะลดลงเรียกว่าความชื้นวิกฤติ ถ้าความชื้นวิกฤติจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและสภาวะในการอบแห้ง

2.6.2 ช่วงการอบแห้ง

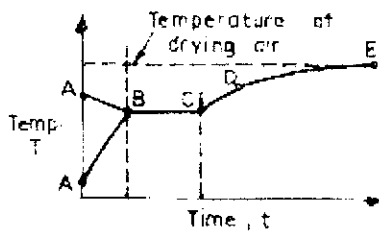
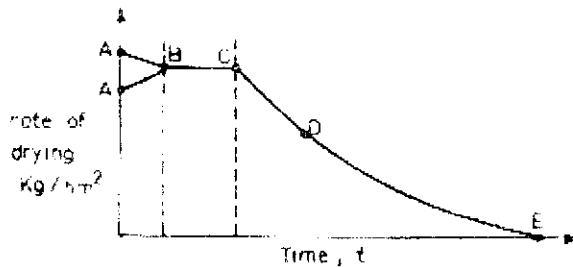
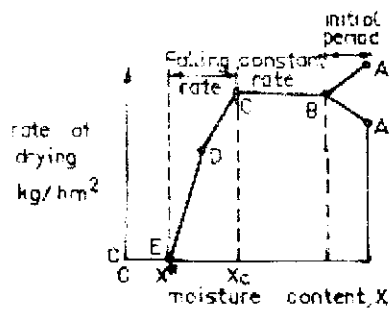
ปกติแล้วในการอบแห้งเริ่มต้นด้วยวัสดุที่มีความชื้นสูงและลดต่ำลงจนเข้าสู่ค่าความชื้นสมดุล

2.6.2.1 ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ (Heating up period) จากภาพประกอบ 1 ช่วง AB แทนช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ (Heating up period) โดยที่ผิวของวัสดุอาจอืดตัวด้วยน้ำ เมื่อลมร้อนสัมผัสวัสดุการระเหยของน้ำจะเกิดขึ้น ในช่วงนี้อัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับความเร็วลม อุณหภูมิและความชื้นของอากาศอบแห้งเท่านั้น

DRYING CURVE



DRYING RATE CURVES



ภาพประกอบ 1 เส้นแสดงคุณสมบัติการอบแห้งของวัสดุ (Avci and Can, 1999)

2.6.2.2 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying rate period)

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (ภาพประกอบ 1) นี้จะมีลักษณะหรือกลไกของการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวลระหว่างวัสดุกับอากาศเหมือนกับ การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเป็โยกของเทอร์โมมิเตอร์ คือ จะเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบ ๆ ผิวของวัสดุเท่านั้น โดยมีตัวแปรที่มีผลเกี่ยวข้องกับอัตราการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของ

กระแสน้ำอากาศโดยมีอัตราการระเหยของน้ำเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากอากาศมายังวัสดุต่อความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำหรือเท่ากับอัตราการถ่ายเทมวล ดังสมการ

$$m'_{w'} = h' A (T_{\infty} - T_{w,h}) / h_{f,c} \quad (1)$$

เมื่อ $m'_{w'}$ คือ อัตราการระเหยของน้ำ, kg/h
 h' คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ, $\text{kJ/m}^2\text{C}$
 A คือ พื้นที่สัมผัสของวัสดุกับอากาศ, m^2
 T_{∞} คือ อุณหภูมิของกระแสน้ำอากาศ, $^{\circ}\text{C}$
 $T_{w,h}$ คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก, $^{\circ}\text{C}$
 $h_{f,c}$ คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอ, kJ/kg

จากสมการ (1) จะเห็นว่า อัตราการระเหยของน้ำจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วลมโดยวิธีนี้จะทำให้ความหนาของชั้นอากาศนิ่งที่อยู่รอบ ๆ ผิววัสดุมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มอัตราการระเหยน้ำได้อีกโดยการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง หรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งเป็นการทำให้ผลต่างของอัตราส่วนความชื้นของอากาศที่มีค่าเพิ่มขึ้น

2.6.2.3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying rate period)

ในช่วงของอัตราการอบแห้งลดลงนี้ ความชื้นของวัสดุจะมีค่าต่ำกว่าปริมาณความชื้นวิกฤติ การถ่ายเทความร้อนและมวล มิได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความร้อนขึ้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนหรืออัตราการอบแห้งลดลง และจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุทำให้เกิดเกรเดียนต์ความชื้นและอุณหภูมิในวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าสูงขึ้นและสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเหลว ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง (สมชาติ, 2540)

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งได้แก่

1. **ธรรมชาติของอาหาร** อาหารเนื้อโปร่งมีการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารแบบผ่านช่องแคบซึ่งเร็วกว่าการแพร่ในอาหารเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารเนื้อโปร่งจึงแห้งได้เร็วกว่าอาหารเนื้อแน่น

อาหารที่มีน้ำตาลสูงจะเหนียวเหนอะหนะกีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำจึงแห้งช้า อาหารที่มีการลวก นวดคลึง ทำให้เซลล์แตกจึงแห้งได้เร็วขึ้น

2. **ขนาดและรูปร่าง** มีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักเช่น รูปร่างเหมือนกัน ขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงแห้งได้เร็วกว่า แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปได้ ถ้าชิ้นเล็กมากทับถมกันการระเหยเกิดได้เฉพาะที่ผิวสัมผัสอากาศจึงเกิดได้ช้าทั้ง ๆ ที่พื้นที่ต่อหน่วยน้ำหนักมาก

3. **ตำแหน่งของอาหารในเตา** น้ำในอาหารที่สัมผัสกับลมร้อนได้ดีกว่า หรือสัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำย่อมระเหยได้ดีกว่า

4. **ปริมาณอากาศต่อถาด** ถ้าปริมาณอากาศต่อถาดมากเกินไป อาหารส่วนล่างไม่ได้สัมผัสกับอากาศร้อนหรือได้รับความร้อนจากถาดแล้วแต่ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจาย ผ่านชั้นอาหารคอนบนออกมาได้จึงแห้งช้า

5. **ความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศร้อน** อากาศที่มีความชื้นมากอยู่แล้วจะรับไอน้ำได้น้อยจะมีผลในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

6. **อุณหภูมิของอากาศร้อน** ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำจึงมีผลต่อการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่กระจายของน้ำดีขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมระหว่างที่ผิววัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น

7. **ความเร็วของลมร้อน** ลมร้อนมีหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปด้วย เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นการเคลื่อนที่ของน้ำดีขึ้น โดยเฉพาะอัตราการอบแห้งคงที่ ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น น้ำจะเกาะอยู่ที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมาก เมื่อความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุ จะทำให้ฟิล์มอากาศนิ่งมีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วยการเคลื่อนย้ายน้ำเกิดขึ้นเต็มที่ที่ความเร็วลม 244 เมตรต่อนาที นอกจากนี้ความเร็วลมทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนของอากาศในเตาอากาศจึงสัมผัสอาหารได้ดีขึ้น

8. **ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง** เมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิมดัวที่ผิววัสดุและอัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลดีขึ้น ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การถ่ายเทความร้อนและมวลจะไม่จำกัดอยู่เฉพาะที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นภายในผิวและเนื้อวัสดุด้วย

2.8 คุณภาพอาหารกับการอบแห้ง (สมชาติ, 2540)

การอบแห้งมีผลกระทบต่อคุณภาพอาหาร ทั้งนี้เนื่องจากอาหารมีการสูญเสียน้ำ และได้รับความร้อน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้อย่างชัดเจนระหว่างการอบแห้งได้แก่ การหดตัวของชิ้นอาหาร การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงอาจทำให้ผิวของชิ้นอาหารแข็งตัวอย่างรวดเร็วและขัดขวางการแพร่ของน้ำจากภายในชิ้นมาสู่ผิวเป็นผลให้อัตราการอบแห้งลดลงอย่างรวดเร็วนอกจากการหดตัวของชิ้นอาหารแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง พร้อม ๆ กับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพซึ่งมีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง เช่น สี กลิ่น เนื้อของผลิตภัณฑ์ ความหนืด คุณค่าทางอาหาร เป็นต้น ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reactions) มักเกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร ส่วนใหญ่แล้วจะไม่ใช่สิ่งที่ต้องการเพราะอาจทำให้รสชาติไม่ดี ลักษณะภายนอกไม่น่าดูการเกิดสีน้ำตาลในอาหารมีสองแบบคือ เกิดจากปฏิกริยาที่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องและปฏิกริยาที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง กรณีแรกเกิดจากการที่เอนไซม์ที่ยังคงทำงานอยู่เมื่อถูกกับอากาศจะเกิดสีน้ำตาล ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องแต่มิ่่น้ำตาลเกี่ยวข้องด้วย อาจแบ่งได้เป็นปฏิกริยาคาราเมลไลเซชัน (Caramelization reaction) ซึ่งเป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อนสูงมากเกินไป ส่วนปฏิกริยามัลลาร์ด (Maillard reaction) เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเมื่อมีสารประกอบไนโตรเจนอยู่ ซึ่งเกิดเมื่อได้รับความร้อนสูง

2.9 การถ่ายเทความร้อน

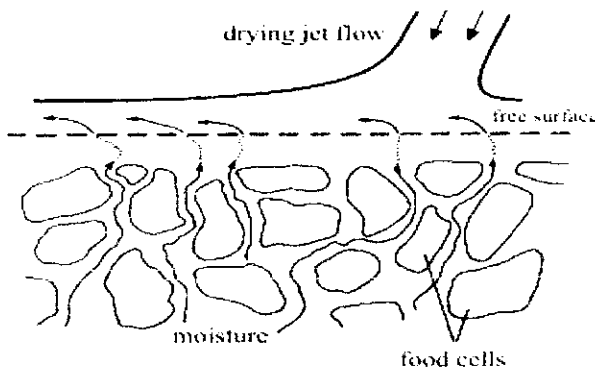
ระหว่างกระบวนการอบแห้งจะเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นในบริเวณที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ คือ อุณหภูมิของเครื่องมือที่ใช้ในการอบและอาหารที่ต้องการทำให้แห้ง การถ่ายเทความร้อนมี 3 แบบ คือ

- 1) การนำความร้อน (Conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งจะเกิดกับอาหารที่มีลักษณะเป็นของแข็ง
- 2) การพาความร้อน (Convection) จะเกิดกับอาหารที่เป็นของเหลว โดยกระแสความร้อนจะถูกพาผ่านช่องว่างที่เป็นอากาศหรือแก๊สจากของเหลวชนิดหนึ่งไปยังของเหลวอีกชนิดหนึ่ง
- 3) การแผ่รังสี (Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสีความร้อนไปยังอาหาร ซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีอบอาหารในสุญญากาศและการอบแห้งแบบเยือกแข็ง

ในทางปฏิบัติ การถ่ายเทความร้อนในการอบแห้งอาจเกิดขึ้นพร้อมกันทั้ง 2 หรือ 3 แบบก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของอาหารที่นำไปอบแห้ง

2.10 การอบด้วยระบบพุ่งชน (Impingement)

การอบแห้งเป็นการกำจัดน้ำอิสระ (Unbound water) ที่ผิวของอาหารออกโดยใช้ความร้อนที่ได้รับจากลำอากาศอบแห้งซึ่งการลดความชื้นสัมพัทธ์ของผลิตภัณฑ์นี้ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตและการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์มีผลดีต่อการขนส่งและลดค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บ ในทางกลับกันการอบแห้งเป็นสาเหตุของการเสื่อมคุณภาพและคุณค่าอาหาร นักวิศวกรด้านอาหารจึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวให้น้อยลงซึ่งการอบแห้งแบบพุ่งชนเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ อัตราการกำจัดความชื้นในการอบแห้งแบบพุ่งชนถูกควบคุมโดยความเร็วของอากาศอบแห้ง เมื่ออากาศร้อนพุ่งชนผิวอาหารขึ้น ไอน้ำภายในอาหารจะแพร่ผ่านชั้นขอบเขต (Boundary layer) และระเหยออกไปแสดงดังภาพประกอบ 2 การเปลี่ยนแปลงความดันไอน้ำเกิดจากความแตกต่างระหว่างความชื้นภายในและภายนอกผิวอาหาร ชั้นขอบเขตความชื้นเป็นตัวกีดขวางการถ่ายโอนความร้อนและการกำจัดน้ำระหว่างการอบแห้ง ซึ่งการพาความร้อนแบบบังคับในลำอากาศพุ่งชนมีส่วนในการทำลายชั้นขอบเขตความชื้น ดังนั้นจึงเป็นการลดความต้านทานการถ่ายโอนความร้อนได้ (De Bonis and Ruocco, 2005)



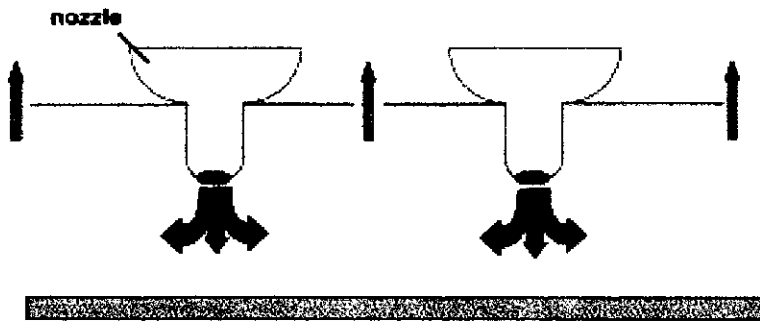
ภาพประกอบ 2 A drying air jet onto a food slab: flow of moisture during process. (De Bonis and Ruocco, 2005)

วิธีการอบแห้งแบบพุ่งชนเป็นกระบวนการกำจัดน้ำจากอาหาร โดยการพาของอากาศแบบบังคับเพื่อยึดอายุการเก็บของอาหารมีใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมกระชายและสิ่งทอ สำหรับในอุตสาหกรรมอาหารนั้นใช้สำหรับการอบแห้งและปรุงสุกอาหาร เช่น ขนมปังคุกกี้นี้ และแคร็กเกอร์ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะแห้งเร็วและมีการกระจายความชื้นสม่ำเสมอกว่าใช้เตาอบแบบพาความร้อน การทำงานของเตาอบแบบพุ่งชนคือ อากาศในรูปแบบของลำอากาศออกจากท่อไหลตั้งฉากกับผิวผลิตภัณฑ์ (Xue and Walker, 2002) ซึ่งเป็นการกำจัดชั้นของ

ฟิล์มอากาศนิ่งและความชื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ช่วยลดความต้านทานการถ่ายโอนความร้อนและมวลทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง

2.10.1 หลักการของการอบแห้งแบบพุ้งชน

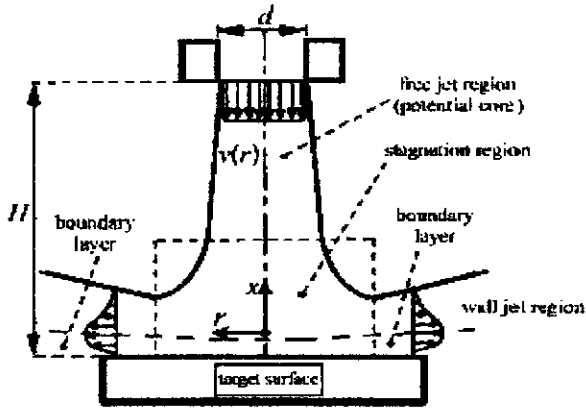
ภาพประกอบ 3 แสดงตัวอย่างการไหลของอากาศออกจากท่อ (Nozzle) ซึ่งมีลักษณะหลากหลายกันไปอาจจะใช้ท่อเดี่ยวหรือหลายท่อก็ได้ โครงสร้างของท่อนี้มีความสำคัญต่อราคาค่าเนิการและคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้



ภาพประกอบ 3 แสดงการจัดเรียงตัวของหัวฉีด (Moreira, 2001)

ภาพประกอบ 4 แสดงลำอากาศที่ปล่อยออกจากท่อกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง D ทำให้เกิดการกระจายความเร็วของอากาศ รูปแบบการไหลจากท่อแบ่งเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงลำอากาศอิสระ (Free jet region) ช่วงพุ้งชนหรือช่วงการไหลหยุดนิ่ง (Impingement หรือ stagnation flow region) และช่วงที่ลำอากาศไหลไปตามแนวผนังวัสดุ (Wall jet region) (Sarkar and Singh, 2004) ซึ่งลำอากาศอิสระ (Free jet) ที่ออกจากท่อปะทะบนผิววัสดุเกิดช่วงหยุดนิ่ง (Stagnation region) และช่วงที่ลำอากาศไหลไปตามแนวผนังวัสดุ (Wall jet region) ถ้าอาหารที่ถูกพุ้งชนอิมตัวไปด้วยน้ำของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะระเหยกลายเป็นไอซึ่งขึ้นอยู่กับความชื้นที่ได้รับ น้ำจะเคลื่อนที่จากภายในวัสดุไปยังผิวด้วยแรงแคปิลลารี (Capillary forces) และโดยการแพร่กระจายเนื่องจากความแตกต่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวและภายในเนื้อวัสดุ ขณะเดียวกันไอน้ำที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ออกไปโดยการแพร่ในอากาศเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความดันไอ (De Bonis and Ruocco, 2005) อย่างไรก็ตามเมื่อระยะทางระหว่างทางออกของท่อกับผิววัสดุอบแห้งเพิ่มขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมระหว่างลำอากาศและอากาศแวดล้อมเนื่องจากขอบเขตอิสระ (Free boundary layer) ของลำอากาศกว้างขึ้นและโพเทนเชียลคอร์ (Potential core) หดสั้นลง นอกจากนี้กระแสไหลของโพเทนเชียลคอร์จะมีรูปร่างความเร็ว (Velocity profile) ไม่สม่ำเสมอและความเร็ว

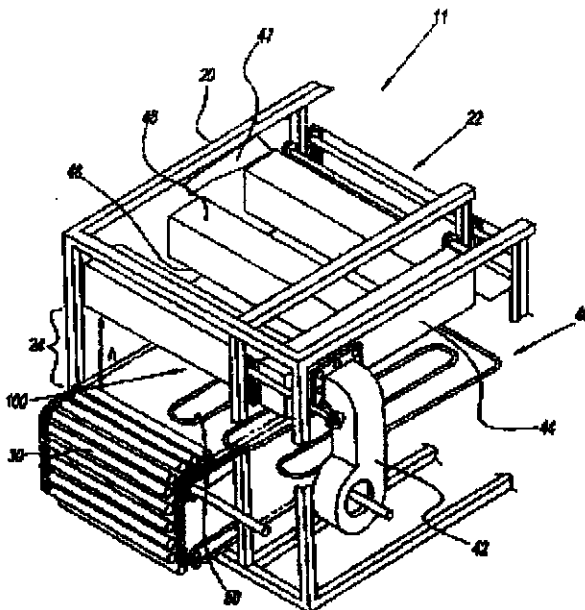
สูงสุด (ตรงกลาง) ลดลงเมื่อระยะทางจากทางออกของท่อกับผิววัสดุอบแห้งเพิ่มขึ้น (Moreira, 2001)



ภาพประกอบ 4 แสดงลักษณะลำอากาศที่ออกจากท่อ (Nozzle) (Angioletti, Nino and Ruocco, 2001)

การพ่นด้วยอากาศใช้ได้ทั้งในอุตสาหกรรมหล่อเย็นและอุตสาหกรรมที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิเนื่องจากกระบวนการนี้มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและมวลสูง (Braud *et al.*, 2001) โดยทั่วไปแล้วจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการพ่นชน รูปร่างของลำอากาศมีความสัมพันธ์กับการใช้งาน

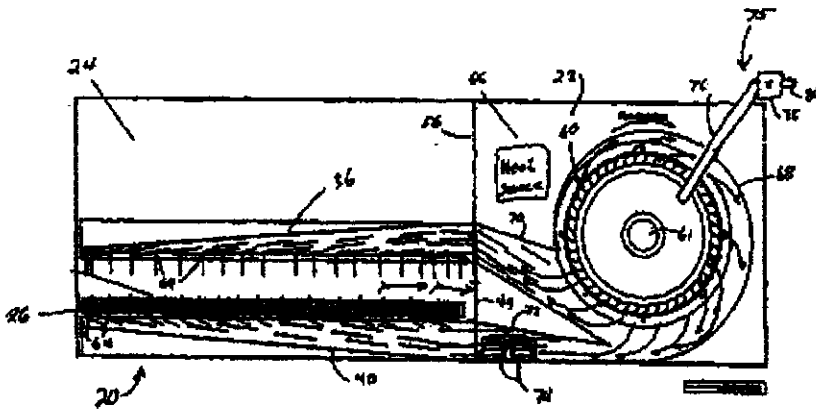
2.10.2 เครื่องอบแห้งที่ได้รับการจดสิทธิบัตร



ภาพประกอบ 5 A high speed cooking oven having an air impingement heater with an improved orifice configuration

Patent number : CA2528539

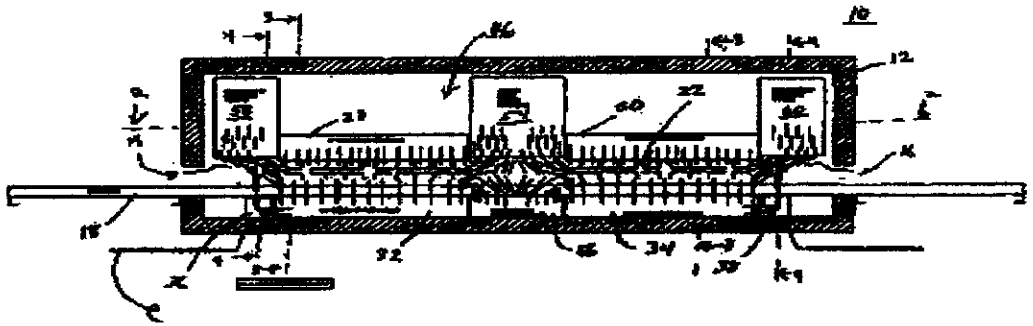
ภาพประกอบ 5 แสดงถึงเตาอบแบบพุ้งชนด้วยอากาศซึ่งมีสายพานลำเลียงสำหรับเคลื่อนย้ายอาหารผ่านความร้อนที่ปล่อยออกจากเครื่องทำความร้อน เตาอบแบบพุ้งชนด้วยอากาศประกอบด้วย พัดลมที่มีท่อส่งลม (42) พลีนัม (Plenum) (44) และท่อสำหรับพ่นอากาศ (46) อยู่เหนือสายพานลำเลียง (30) บริเวณท่อสำหรับพ่นอากาศ (46) มีช่อง (Orifices) ที่มีรูปร่างเหมาะสมสำหรับปล่อยอากาศพุ้งชนบนผิวผลิตภัณฑ์ เช่น ช่องวงกลม ช่องกากบาท เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างของช่องปล่อยอากาศนี้ปรับปรุงขึ้นเพื่อให้การไหลของอากาศบนผิวอาหารหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความร้อนสามารถทะลุผ่านเข้าไปในผิวอาหารได้สูงขึ้น เป็นการเพิ่มการถ่ายโอนความร้อน ลดเวลาในการปรุงสุกอาหารได้



ภาพประกอบ 6 Conveyerized oven with moisture laden air impingement and method

Patent number : WO03082024

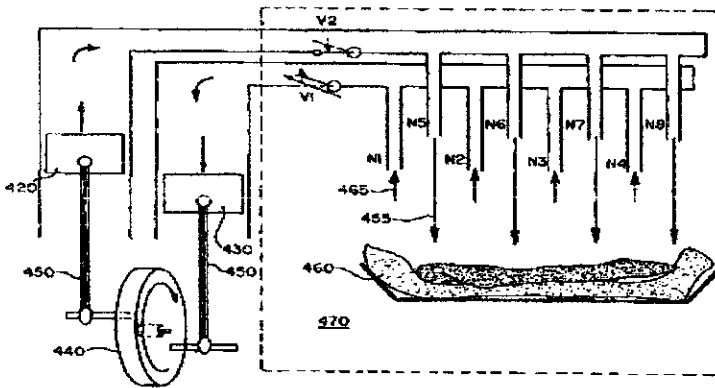
ภาพประกอบ 6 แสดงถึงเตาอบแบบสายพานลำเลียงซึ่งมีห้องให้ความร้อน (22) และห้องอบแห้ง (24) ในห้องอบแห้งมีสายพานเพื่อลำเลียงอาหารระหว่างจุดทางเข้าและทางออก พัดลมเป่าอากาศ เครื่องทำความร้อน (74) และเครื่องปล่อยความชื้น (75) ใช้ในการให้ความร้อนและปล่อยความชื้นไหลไปยังอุปกรณ์ปล่อยอากาศพุ้งชน ดังนั้นลำอากาศที่ออกมาจะร้อนและมีความชื้น แหล่งให้ความร้อน (Heat source) อาจเป็นเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าหรือใช้แก๊สก็ได้ แล้วแต่ความต้องการ อุณหภูมิของอากาศพุ้งชนที่ถูกปล่อยไปยังด้านล่างและด้านบนของผลิตภัณฑ์สามารถควบคุมให้มีอุณหภูมิเท่ากันหรือต่างกันก็ได้



ภาพประกอบ 7 Conveyor oven with improved air return and method

Patent number : WO2005027644

ภาพประกอบ 7 แสดงถึงเตาอบแบบสายพานลำเลียง ซึ่งมีอากาศพุ่งชนไปยังสายพานลำเลียงและไหลหมุนเวียนตามแนวสายพานไปยังทางเข้าและออก เตาอบแบบนี้ประกอบด้วย ท่อปล่อยอากาศไหลในรูปของอากาศพุ่งชน สายพานลำเลียงทำหน้าที่ขนส่งอาหารผ่านห้องอบแห้ง พัดลมอย่างน้อย 1 ตัวพัดอากาศเข้าไปในห้องอบแห้ง กระแสอากาศแรกไหลขวางห้องอบแห้งจากทางเข้าไปยังทางออก ส่วนอีกกระแสหนึ่งไปทิศทางตรงข้ามกันเพื่อป้องกันกระแสอากาศแรกออกไปภายนอก



ภาพประกอบ 8 Impingement oven airflow devices and method

Patent number : WO 0056169

ภาพประกอบ 8 แสดงถึงเตาอบที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการอบอาหารเช่น พืชฯ ซึ่งใช้เวลาในการอบสั้น เช่น 5 นาทีต่อชิ้น ข้อดีของเตานี้คือ ปรับปรุงการควบคุมคุณภาพโดยการควบคุมอุณหภูมิในเตาอบให้สม่ำเสมอ โดยเฉพาะความร้อนที่ผลิตภัณฑ์แต่ละชิ้นได้รับ ลดเวลาในการอบโดยเพิ่มประสิทธิภาพของลำอากาศพุ่งชนและควบคุมการไหลของอากาศที่สัมผัสผลิตภัณฑ์

ให้สม่ำเสมอ สามารถใช้หัวฉีด (Nozzle) อัดอากาศแทนพัดลมได้ และขณะเดินเครื่องไม่มีเสียงดังรบกวน

2.10.4 การทดสอบคุณภาพวัสดุหลังการอบแห้ง

1. การหาปริมาณความชื้น (Moisture Content) ณ เวลาใดๆ

$$X_w = \frac{(W-L_s)}{W} \quad (3)$$

$$X_s = \frac{(W-L_s)}{L_s} \quad (4)$$

X_w = ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis)

X_s = ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis)

W = มวลที่เวลาใดๆ (g)

L_s = มวลแห้งที่ไม่มีน้ำ (g)

2. การหาอัตราการอบแห้ง (Constant Drying Rate)

$$R = \frac{(L_s \Delta X)}{A \cdot \Delta t} \quad (5)$$

R = อัตราการอบแห้งหรือฟลักซ์ความชื้นที่ระเหยออกจากของแข็ง (ความชื้นที่ระเหยต่อเวลาต่อพื้นที่การถ่ายโอนความร้อน) ($\text{g}/\text{min m}^2$)

ΔX = การเปลี่ยนแปลงของความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis)

L_s = น้ำหนักของของแข็งหรือโบนเดรย (Bone Dry) (g)

Δt = ระยะเวลาในการอบ (min.)

A = พื้นที่การถ่ายโอนความร้อน (m^2)

3. การทดสอบคุณสมบัติของสารย่อยกลีวทอง

- การดูสีของสารย่อยกลีวทอง แสดงค่าในรูปของ L , a , b และ ΔE โดยเปรียบเทียบสีของสารย่อยก่อนการอบและสีหลังจากผ่านการอบแบบชนด้วยอากาศ

- วิเคราะห์คุณค่าทางอาหารของสาหร่ายเกลียวทองหลังผ่านการอบแห้งแบบชนด้วยอากาศ ซึ่งการวิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมีที่นิยมวิเคราะห์มีหลายชนิดเช่น Morist และคณะ (2001) ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน กรดอะมิโน คาร์โบไฮเดรต กรดไขมัน กรดนิวคลีอิก สารคลอโรฟิลล์และไฟโคไซยานิน และปริมาณ microbiology
- วิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคตามมาตรฐาน ISO 9002 ทั้งหมด 8 ชนิดประกอบด้วยปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด (total viable aerobic bacteria count, TVC), *Enterobacteria*, *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus D*, *Salmonella* sp., *Pseudomonas*, sulphite-reducing *Clostridia* and *Escherichia coli*.

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การอบแห้งด้วยลมร้อนมีใช้กันอย่างแพร่หลายกับผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งโดยเตาอบที่แบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งด้วยลมร้อนมากมาย

Erdogdu และคณะ (2007) ศึกษาการใช้ระบบหล่อเย็นแบบพุ้งชนด้วยอากาศเป็นตัวเลือกเย็นไข่มุกก่อนปอกเปลือกเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการผลิต ซึ่งหากหล่อเย็นโดยการจุ่มน้ำจะทำให้การหล่อเย็นเกิดเร็วขึ้นแต่น้ำที่ใช้ในกระบวนการมักก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสียและอาจก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนเมื่อใช้เป็นเวลานาน กระบวนการพุ้งชนด้วยอากาศผลิตผลิตภัณฑ์ความร้อนสูงบริเวณผิวผลิตภัณฑ์ จึงมีการศึกษาการหล่อเย็นไข่มุกโดยใช้ระบบการพุ้งชนด้วยอากาศ (24°C) ผ่านช่องแคบ (H/D ของท่ออากาศ เป็นระยะระหว่างทางออกของอากาศต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศ $\text{Re} = 7,000$) จากนั้นแก้สมการความต่อเนื่อง สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน โดยใช้ Fluent 6.0 เพื่อออกแบบการไหลอากาศแบบปั่นป่วนและประยุกต์ใช้กับ K-E turbulence model ทดสอบโมเดลนี้กับการไหลที่ได้จากการทดลองและข้อมูลอุณหภูมิจากตำแหน่งต่าง ๆ ของไข่มุก ใช้สภาวะหล่อเย็นต่างกัน (อากาศพุ้งชน 0°C และน้ำหล่อเย็น 0°C) ในการจำลองสมการและเปรียบเทียบผลที่ได้กับระบบอากาศพุ้งชนอื่น ๆ ผลจากการศึกษานี้แสดงถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น H/D (อัตราส่วนระหว่างระยะห่างจากหัวฉีดกับผิววัสดุอบแห้งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางช่องปล่อยลม), d/D (อัตราส่วนระหว่างขนาดของผลิตภัณฑ์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางช่องปล่อยลม), การจัดเรียง nozzle และผลของ Re ต่อระบบการพุ้งชน โดยนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับระบบหล่อเย็นอื่น (เช่น ใช้น้ำพ่นฝอย)

Dirita และคณะ (2007) ศึกษาการใช้อากาศหล่อเย็นอาหารทรงกระบอกผลการทดสอบพบว่าการกระจายอุณหภูมิกายในเนื้ออาหาร และที่ผิวอาหารมีความสัมพันธ์กับสนามการ

ไหลเนื่องจากแรงกระทำระหว่างอาหารและลำอากาศพุ่งชน การกระจายของตัวเลข Nusselt ในอากาศหล่อเย็นขึ้นกับอัตราการถ่ายโอนความร้อนซึ่งสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้จากการนำความร้อนในอาหาร บริเวณที่ถูกหล่อเย็นได้ช้าที่สุดจะพบที่บริเวณใจกลางของอาหารขึ้นอยู่กับสถานะขอบเขตเชิงความร้อนที่ให้กับอาหาร

Anderson และ Singh (2005) กล่าวว่าอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งเติบโตอย่างต่อเนื่องจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาปรับปรุงวิธีการทำละลายโดยไม่ต้องการวิธีที่ช้าและวิธีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างการละลาย เช่น การใช้ microwave จึงมีการศึกษาเทคนิคพุ่งชนด้วยอากาศเพื่อปรับปรุงวิธีการละลายอาหารแช่แข็งโดยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนารูปแบบการพุ่งชนด้วยอากาศเพื่อละลายอาหารและเพื่อตรวจสอบรูปแบบที่ได้จากการทดลองผลิตภัณฑ์แช่แข็งซึ่งถูกทำให้ละลายโดยใช้ระบบพุ่งชน ไซเนื้อ (Tylose gel) เป็นชิ้นทดสอบ การละลายของ Tylose disk (เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 cmหนา 1.98 cm) ใช้อากาศอุณหภูมิ 6°C เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการหล่อเย็นที่ไม่ใช้ระบบพุ่งชนกับระบบพุ่งชนพบว่า การหล่อเย็นที่ไม่ใช้ระบบพุ่งชนใช้เวลาในการหล่อเย็นมากกว่า 12 ชั่วโมง ขณะที่การละลายภายใต้ลำอากาศพุ่งชนใช้เวลาน้อยกว่า 3 ชั่วโมง

Sarkar และ Singh (2004) ศึกษารูปร่างทางกายภาพของการพุ่งชนด้วยอากาศในกระบวนการผลิตอาหารเพื่อหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของระบบพุ่งชนพบว่าอัตราส่วนระหว่างความลึกของท่อกับเส้นผ่านศูนย์กลางรู มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 6 ทำให้เกิดรูปร่างการไหลที่ทางออกท่อสม่ำเสมอและการกระจายตัวในช่วงลำอิสระ (Free jet region) ต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อลำอากาศยาวขึ้นช่วงลำอิสระอาจเกิดการงอหรือหดสั้นลงได้ อัตราส่วนระยะห่างทางออกของท่อกับผิวผลิตภัณฑ์คือเส้นผ่านศูนย์กลางรูควรอยู่ในช่วง 6-8 เนื่องจากช่วงนี้โพเทนเชียลคอร์เสื่อมลงอย่างเต็มที่และการกระจายพลังงานเนื่องจากความยาวของลำอากาศไม่สูงมากนัก

Moreira (2001) ศึกษาการอบแห้งอาหารโดยใช้อากาศร้อนและไอน้ำร้อนยิ่งยวดในเตาอบแบบพุ่งชนด้วยอากาศพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (สูงกว่า 130°C) แผ่นขนมปังจะแห้งเร็วขึ้นเมื่ออบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดเทียบกับอากาศร้อน (ที่สภาวะเดียวกัน) การอบแห้งแบบขนด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดจะได้แผ่นมันฝรั่งที่มีการเปลี่ยนแปลงสีต่ำและสูญเสียคุณค่าอาหารต่ำ (วิตามิน C) กว่าอบแห้งด้วยอากาศร้อน แผ่นมันฝรั่งแห้งเร็วขึ้นที่อุณหภูมิไอน้ำยิ่งยวดสูงและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูง

Wahlby และคณะ (2000) ศึกษาอิทธิพลของการไหลของอากาศและอุณหภูมิอากาศต่อการปรุงสุกขนมปังและเนื้อหมูในเตาอบแบบพุ่งชนเปรียบเทียบกับเตาอบอ้างอิงที่ใช้อากาศร้อนพบว่าเมื่ออบในเตาอบแบบขนใช้เวลาในการปรุงสุกสั้นกว่าในเตาอบอ้างอิง 50% เมื่ออบที่อุณหภูมิเดียวกันและเกิดสีน้ำตาลสม่ำเสมอมากกว่าเตาอบอ้างอิง คุณภาพขนมปังที่อบในเตา

อบแบบพุ่งชนและเตาอบอ้างอิงไม่แตกต่างกันเมื่อใช้เวลาในการอบเท่ากันแต่ใช้อุณหภูมิอากาศในเตาอบแบบพุ่งชนต่ำกว่าแบบอ้างอิงถึง 25°C ซึ่งแสดงว่าใช้พลังงานในการอบต่ำกว่า

Lujan-Acosta และ Moreira (1997) ใช้วิธีการอบแห้งแบบชนด้วยอากาศเพื่อลดปริมาณน้ำมันในแผ่นขนมปังทอรัทิลลาพบว่าแผ่นขนมปังแห้งขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นและแห้งเร็วขึ้นเล็กน้อยเมื่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น การหดตัวของแผ่นขนมปังอยู่ระหว่าง 10% และ 14% จากเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นที่ปริมาณความชื้นสมดุล และอุณหภูมิอากาศไม่มีผลต่อการหดตัว ขณะที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำการหดตัวจะสูง ส่วนโครงสร้างของแผ่นขนมปังแปรผันขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (177°C) เมื่อทอดแผ่นขนมปังที่อบแล้วจะได้แผ่นขนมปังที่มีไขมันต่ำ (143 g/kg) เมื่อเทียบกับแผ่นขนมปังที่ไม่ผ่านการอบ (ปริมาณน้ำมัน 220-280 g/kg)

จากที่กล่าวมาข้างต้นถึงประโยชน์ของสาหร่ายเกลียวทองทั้งทางด้านคุณค่าทางอาหารและสมบัติในการรักษาโรคของสาหร่ายเกลียวทองจึงมีงานวิจัยศึกษาถึงคุณสมบัติของสารต่าง ๆ ในสาหร่ายเกลียวทองต่อการรักษาโรครวมทั้งการผลิตสาหร่ายเกลียวทองเพื่อเป็นอาหาร

Lodi และคณะ (2007) ศึกษาการใช้สาหร่ายเกลียวทองกำจัดโครเมียม(III) โดยใช้สาหร่ายเกลียวทองแห้งและสาหร่ายเกลียวทองที่คุดน้ำกลับเป็นตัวดูดซับโครเมียม(III) จากน้ำโดยแปรความเข้มข้นของชีวมวล (จาก 1-3 กรัมต่อลิตร) และความเข้มข้นโลหะ (จาก 25-200 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของชีวมวลเพิ่มขึ้น การกำจัดเพิ่มขึ้น จนถึงความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น = 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (การกำจัด 95% ที่ความเข้มข้นของชีวมวล 3 มิลลิกรัมต่อลิตร) จลนศาสตร์ของการดูดซับทางชีวภาพดีขึ้นที่ความเข้มข้นโครเมียม (III) ต่ำ (ค่าคงที่การดูดซับ = 1.41 และ 1.44 ต่อชั่วโมง ที่ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น = 35 มิลลิกรัมต่อลิตรและความเข้มข้นของชีวมวล = 1 กรัมต่อลิตร สำหรับชีวมวลแห้งและชีวมวลที่คุดน้ำกลับตามลำดับ) ที่ความเข้มข้นของโครเมียม (III) สูงขึ้นจาก 75-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ชีวมวลที่คุดน้ำกลับมีการกำจัดสูงกว่าชีวมวลแห้ง

Desmorieux และ Decaen (2005) หาความสัมพันธ์สมดุลของสาหร่ายเกลียวทองโดยศึกษา sorption isotherm ของสาหร่ายเกลียวทองที่อุณหภูมิอากาศ $25-40^{\circ}\text{C}$ พบว่าค่าปริมาณความชื้นสมดุลไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของอากาศอบแห้งแต่ขึ้นอยู่กับวิธีการวัดซึ่งสามารถทำนาย sorption isotherm ได้จาก Henderson model จากนั้นศึกษาการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองชั้นบางแบบพาความร้อนที่อุณหภูมิ $40-60^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 1.9-3.8 m/s พบว่าเมื่ออบที่อุณหภูมิอากาศสูงกว่า 40°C โดยความเร็วสูงกว่า 2.5 m/s มีอัตราการอบแห้งสูงสุด $2.2 \text{ g}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dm}}/\text{s}$ (กรัมน้ำต่อกิโลกรัมของแห้งต่อวินาที) และสมการการอบแห้งชั้นบางแสดงในรูปฟังก์ชันโพลีโนเมียล

Morist และคณะ (2001) ศึกษาการเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทองในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องเพื่อใช้ผลิตเป็นอาหาร โดยมีจุดประสงค์การผลิตเพื่อได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายสำหรับบริโภคเป็นอาหารเหลว ซึ่งประกอบด้วยน้ำสาหร่ายเข้มข้นและเป็นอาหารแห้งแข็งเพื่อใช้สำหรับบริโภคบนโลกและในยานอวกาศ ขั้นตอนการผลิตเริ่มจากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ modified Zarrouk ในถังปฏิกรณ์มีในโคโรเจนไหลผ่านภายใต้สภาวะอุณหภูมิ $36 \pm 1^{\circ}\text{C}$ pH 9.5 ± 0.1 อัตราการไหล 1.5 l/min ออกซิเจนละลายต่ำกว่า 12 ppm ความเข้มข้นชีวมวลคงที่ 1.8 g/l การเก็บเกี่ยวใช้จานหมุนเหวี่ยงแบบต่อเนื่องอัตราการไหล $1-20 \text{ l/h}$ ความเร็วการหมุน $1,000-10,000$ รอบต่อนาที opening times ระหว่าง 0.5 และ 2 วินาที discharge times จาก $30-120$ นาที ถังเซลล์ในตัวกรองที่มีพื้นที่ทั้งหมด 240 cm^2 หลังจากเก็บเกี่ยวและล้างเซลล์แล้ว การผลิตเป็นอาหารทำได้ 3 วิธีคือ ทำแห้งโดยการแช่แข็ง การอบแห้งแบบพ่นฝอย และพาสเจอไรเซชัน สำหรับการทำให้แห้งโดยการแช่แข็งทำโดยแช่แข็งอย่างน้อย 10 นาที ใช้ในโคโรเจนเหลว 24 ชั่วโมง จากนั้นเก็บในตู้เย็น การทำให้แห้งแบบพ่นฝอยดำเนินการที่สภาวะอุณหภูมิอากาศออก 90°C อุณหภูมิอากาศเข้า 200°C อัตราการไหล 1 l/h ความดัน 3.5 บาร์ ความเร็วรอบของอะคอมไมเซอร์ $20,000-30,000 \text{ rpm}$ พาสเจอไรเซชันใช้เครื่องมือ HTST (อุณหภูมิสูง เวลาสั้น) อัตราการไหล 50 l/h สารละลายที่ผ่านการพาสเจอไรเซชันแล้วออกจากเครื่องพาสเจอไรเซอร์ที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อลดการปนเปื้อน จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ พบว่าทั้ง 3 วิธีมีผลต่อปริมาณจุลินทรีย์และคุณภาพผลิตภัณฑ์คือ สาหร่ายที่ผ่านการพาสเจอไรซ์มีโอกาสปนเปื้อนง่ายกว่าเนื่องจากมีปริมาณน้ำสูง สำหรับการทำให้แห้งแบบแช่แข็งเป็นวิธีที่มีการใช้กันมากที่สุดเนื่องจากได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง สำหรับการอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทางการค้าเนื่องจากนอกจากจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงแล้วยังบรรจุน้ำน้อย จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมีของสาหร่ายเกลียวทองที่ผ่านกระบวนการ pasteurize และอบแห้งแบบพ่นฝอยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการอบแห้งแบบแช่แข็งซึ่งใช้เป็นอ้างอิงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและสูญเสียคุณค่าอาหารน้อยที่สุด พบว่าทั้ง 3 วิธีให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้รับจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยมีปริมาณน้ำประมาณ 3%

บุษยา บุนนาค (2544) กล่าวว่าในประเทศไทย การติดเชื้อไวรัสเริม (HSV) ยังนับว่าเป็นปัญหาสำคัญของประเทศ โรคเริมเป็นโรคที่ติดต่อง่าย พบว่าโดยทั่วไปในกลุ่มประชากรที่สำรวจจะมีแอนติบอดี Herpes simplex virus type 1 (HSV-1) และ type 2 (HSV-2) สูงถึงร้อยละ 60 และ 55 ตามลำดับ การรักษาจะใช้ยาต้านไวรัส คือ Acyclovir ที่มีราคาค่อนข้างแพง และการใช้ยาในประเทศไทยมีอัตราเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 ต่อปี ได้พบว่าสารสกัดหยาบของไขมันและสารที่สกัดด้วยน้ำจากสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina platensis*) มีคุณสมบัติเป็นสารต้านไวรัสเริม (Herpes simplex

virus type 1, HSV-1) และยังได้พัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิต เช่นเดียวกันกับกรณีพญาขอ การศึกษาโดยละเอียดถึงสารต้านไวรัสจากสาหร่ายเกลียวทอง นอกจากจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการพัฒนาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายภายในประเทศ ยังเป็นข้อมูลที่จะนำไปสู่การพัฒนาเป็นยาในที่สุด โครงการวิจัยนี้มุ่งที่จะพัฒนาตำรับยาที่มีฤทธิ์ต้านไวรัสจากพืชสมุนไพรพญาขอและสาหร่ายเกลียวทอง การควบคุมคุณภาพยาโดยควบคุมปริมาณสารออกฤทธิ์ นอกจากนี้จะดำเนินการสังเคราะห์ glycolipid derivatives อื่นๆ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของโครงสร้างทางเคมีและคุณสมบัติในการต้านไวรัส ข้อมูลนี้จะนำไปใช้ในการพัฒนาคุณภาพของยาต่อไป

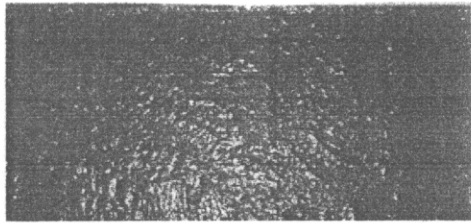
Harashi และคณะ (1993) พบว่า calcium spirulan (Ca-SP) ซึ่งเป็นซัลเฟต โพลีแซคคาไรด์ในสาหร่ายสไปรูลินามีฤทธิ์ต้านเชื้อ HSV-1 และ HIV-1 (Human immunodeficiency virus type 1) โดยมีค่า IC 50 = 9.7 ± 0.79 และ 9.3 ± 1.7 $\mu\text{g/ml}$ ตามลำดับ โดยพบว่า calcium ion และ calcium ion และ sulfate group มีส่วนสำคัญที่ทำให้ Polysaccharide มีฤทธิ์ต้านเชื้อดังกล่าว

Hayashi และคณะ (1993) พบว่าสาหร่ายเกลียวทองที่สกัดด้วยน้ำมีโพลีแซคคาไรด์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยมีฤทธิ์ต้านเชื้อ HIV-1 โดยมีค่า EC 50 อยู่ระหว่าง 0.3 และ 1.2 $\mu\text{g/ml}$ นอกจากนี้สารสกัดที่ละลายน้ำได้ของสาหร่ายเกลียวทอง ความเข้มข้น 1 mg/ml มีฤทธิ์ต้านเชื้อ HSV-1 ในเซลล์ HeLa โดยสามารถยับยั้งการสังเคราะห์โปรตีนจำเพาะของ virus และไม่มีผลกระทบต่อการสังเคราะห์โปรตีนใน host cell หากเติมสารสกัดให้กับเซลล์ภายในเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนเกิด infection

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์



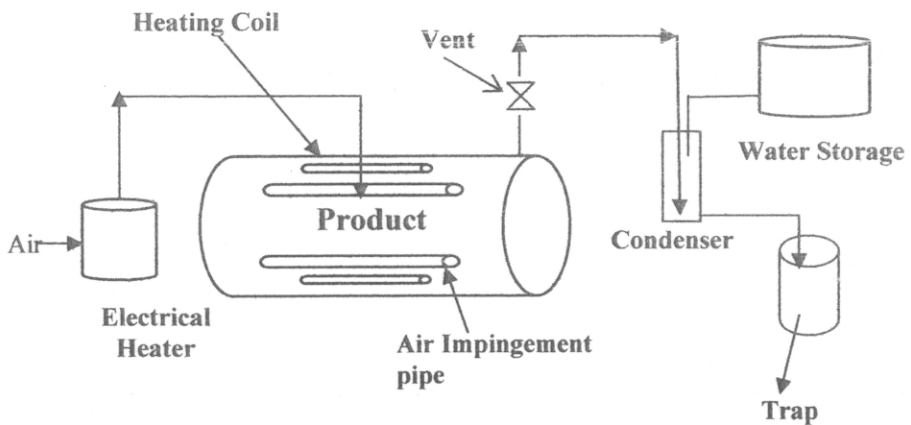
ภาพประกอบ 9 สาหร่ายเกลียวทองสด

- สาหร่ายเกลียวทองสด

จากบริษัท Herb Spirulina อำเภอบางกล่ำ จังหวัดสงขลา มีความชื้นเริ่มต้นอยู่

ในช่วง 91 ± 1 % มาตรฐานเปียก

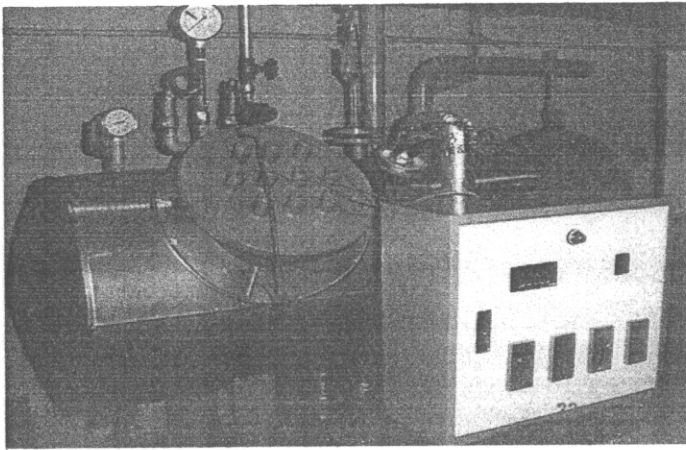
- เครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ



ภาพประกอบ 10 Schematic of Air Impingement Drying Operation.

(Yamsaengsung and Buaphud, 2003)

เครื่องอบแห้งแบบพ่นด้วยอากาศดังแสดงในภาพประกอบ 10 แสดงโครงสร้างของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย Compressor ทำหน้าที่อัดอากาศอบแห้งผ่านขดลวดไฟฟ้า (Electrical heater) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง ภายในห้องอบแห้งประกอบด้วยขดลวดความร้อน (heater coil) ขนาด 1000 วัตต์ 2 ตัว อยู่เหนือและใต้ถาดอบแห้ง, ถาดอะลูมิเนียมอบแห้งขนาด กว้าง 37 ยาว 79 สูง 2.5 cm, สายวัดอุณหภูมิแบบ K (thermocouple type K) สำหรับวัดอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งและท่อปล่อยลมพ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว จำนวน 2 ท่อ



ภาพประกอบ 11 Air Impingement Drying Channel

(Yamsaengsung and Buaphud, 2003)

ภาพประกอบ 11 แสดงภาพถ่ายเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองหลักการทำงานของเครื่องคือ เครื่องอัดอากาศส่งลมไปตามท่อผ่านวาล์วสำหรับปรับอัตราการไหลของลมจากนั้นลมเข้าสู่กล่องผ่านแท่งทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยแท่งความร้อนนี้ต่อกับชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นลมร้อนไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งและผ่านท่อปล่อยลมขนาด 2 นิ้ว ซึ่งมีช่องปล่อยลมวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm เรียงตามแนวยาวของท่อ จำนวน 11 ช่อง/ท่อ ท่อปล่อยลมนี้อยู่เหนือและใต้ถาดอบแห้ง

- เตอบไฟฟ้า

เตอบไฟฟ้าใช้ในการหาความชื้นเริ่มต้นของสาหร่ายเกลียวทองโดยอบที่ $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 72 ชั่วโมง

- สายวัดอุณหภูมิ (Thermocouples)

ใช้สายวัดอุณหภูมิแบบ K วัดอุณหภูมิในห้องอบแห้ง

- เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล

สามารถชั่งน้ำหนักสูงสุดได้ $5,100 \pm 0.01$ g ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ

3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะทำ ณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี โดยใช้สาหร่ายเกลียวทองสดจากบริษัท Herb Spirulina อำเภอบางกล่ำ จังหวัดสงขลา มีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 91 ± 1 % มาตรฐานเปียก มาดำเนินการทดลอง ขอบเขตงานวิจัยเพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบขนด้วยอากาศ เริ่มจากอบสาหร่ายเกลียวทองเพื่อหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการอบแห้ง โดยใช้เครื่องอบแห้งไม้อ่างพาราที่มีระบบพุงขนด้วยอากาศข้อมูลที่ได้รับประกอบด้วยปริมาณสาหร่ายที่สามารถอบได้ในแต่ละครั้ง เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง จากการทดลองดังกล่าวทำให้ได้ความรู้พื้นฐานที่สามารถนำมาออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบพุงขนด้วยอากาศที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก จากนั้นทำการทดลองอบสาหร่ายเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่าย การวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพและคุณค่าทางอาหารหลังการอบจะดำเนินการที่คณะอุตสาหกรรมเกษตร โดยการดำเนินการวิจัยมีกิจกรรมหลักดังนี้

3.2.1 ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการอบสาหร่ายเกลียวทองแบบขนด้วยอากาศ

- ใช้สาหร่ายเกลียวทองสดจากบริษัท Herb Spirulina อำเภอบางกล่ำ จังหวัดสงขลา ได้จากการใช้ผ้าขาวบางกรองสาหร่ายที่เลี้ยงไว้ในบ่อ เนื้อสาหร่ายส่วนที่ติดอยู่บนผ้าขาวบางล้างด้วยน้ำสะอาด 2-3 ครั้ง กรองจนได้ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 91 ± 1 % มาตรฐานเปียก ก่อนดำเนินการทดลองเปิดเครื่องอบแห้งทิ้งไว้อย่างน้อยสองชั่วโมงเพื่อให้สภาวะการอบแห้งคงที่ จากนั้นเกลี่ยสาหร่ายเกลียวทอง 600 g ต่อถาด (สำหรับถาดขนาดกว้าง 37 ยาว 79 สูง 2.5 cm และ 430 g สำหรับถาดขนาดกว้าง 50 cm ยาว 50 cm สูง 2 cm) และใส่ในหีองอบแห้ง บันทึกน้ำหนักตัวอย่างทุก ๆ 60 นาที จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 7 % มาตรฐานเปียก เพื่อลดความผิดพลาดของการทดลองแต่ละการทดลองทำซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง

- สำหรับการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักสาหร่ายที่เวลาต่าง ๆ จะทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรคือ อุณหภูมิของอากาศอบแห้งและความหนาของชั้นสาหร่าย เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสาหร่ายที่เวลาต่าง ๆ ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

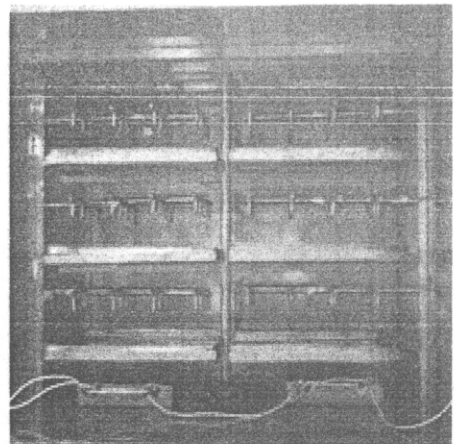
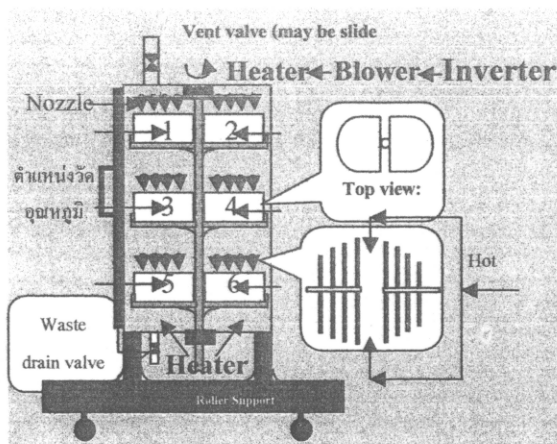
ตารางที่ 3 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการอบแห้ง

ความเร็วอากาศอบแห้ง	1 m/s
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	40, 50 และ 60 °C
ความหนาของชั้นสำหรับ	2 และ 4 mm

ซึ่งที่อุณหภูมิสูงกว่า 60°C ทำให้เกิดการสลายตัวของสารไพโคไซยานินและเกิดปฏิกิริยามิลลาร์ดเพิ่มขึ้น (Desmorieux and Decaen, 2005)

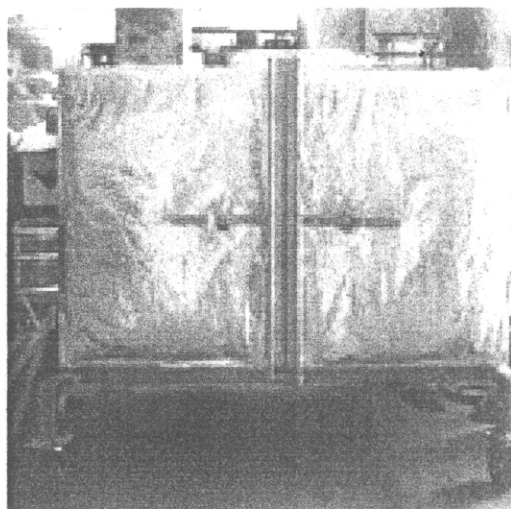
3.2.2 ออกแบบเครื่องอบแห้งแบบขนด้วยอากาศที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

จากงานวิจัยในหลาย ๆ ประเทศได้ศึกษาการอบแห้งแบบพุ้งขนด้วยอากาศพบว่ามีการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าการอบแห้งแบบพาความร้อนแบบไหลขนาน (Parallel flow) ในงานวิจัยนี้จึงออกแบบเครื่องอบแห้งแบบการพาความร้อน ซึ่งปัญหาสำคัญหลักของการออกแบบเครื่องอบแห้ง คือลักษณะการไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ ปัจจัยเบื้องต้นที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบเครื่องอบแห้งจะคำนวณจากปริมาณการผลิตสำหรับแห้งประมาณ 2.5 kg/ครั้ง ลดความชื้นประมาณ 91±1% (w.b.) เหลือไม่เกิน 7% (w.b.) ถาดบรรจุสำหรับมีขนาด 0.50× 0.50 m² จำนวน 6 ถาด รวมพื้นที่อบแห้ง 1.5 m² ส่วนห้องอบแห้งมีขนาด 1.20× 1.20× 1.00 m ผนังหุ้มฉนวนใยแก้วขนาดด้านละ 1 inch

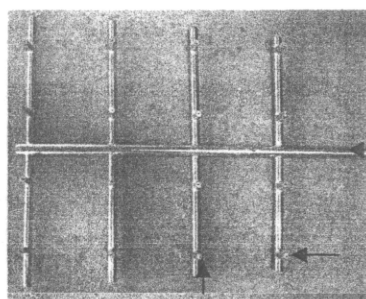


a) Model เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

b) ภายในเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น



c) ภายนอกเครื่องอบแห้ง



Sub-impingement pipe

d) ส่วนประกอบท่อปล่อยอากาศ

ภาพประกอบ 12 Model และเครื่องอบแห้งแบบพุ้งชนด้วยอากาศ

เครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นมีหลักการทำงานคือ อากาศจากพัดลมไหลไปตามท่อผ่านแท่งความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ โดยพัดลมนี้จะต่อกับอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อปรับปริมาณไฟฟ้าที่ให้กับพัดลมซึ่งเป็นการปรับความเร็วลมที่ออกจากพัดลมเข้าสู่ห้องอบแห้งจากนั้นอากาศอบแห้งผ่านท่อปล่อยอากาศ (ภาพประกอบ 12 d) ที่อยู่เหนือถาดอบแต่ละถาด โดยอากาศอบแห้งจะไหลตั้งฉากกับผิวผลิตภัณฑ์อบแห้ง รายละเอียดของเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นประกอบด้วย

1. พัดลม

แบบแรงเหวี่ยงรัศมีซี่หือ HASCON electric motor ความเร็ว 2,840 rpm กระแสสลับ 220 V

2. Inverter

รุ่น NSI -2-003 3 HP, 2.2 kW, 220 V ความถี่ 0.1-400 Hz สำหรับปรับปริมาณไฟฟ้าที่เข้าพัดลมเพื่อให้ได้ความเร็วลมที่ต้องการ

3. กล้องควบคุมอุณหภูมิ

ภายในประกอบด้วย main breaker, temperature controller และ switch on-off

4. แท่งความร้อน

ใช้แท่งความร้อนแบบครึ่งรูปตัว I 1000 watt ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งก่อนเข้าสู่เครื่องอบแห้ง และแท่งความร้อนภายในห้องอบแห้งทั้งหมด 4 ตัว สำหรับให้ความร้อนภายในห้องอบแห้งและรักษาอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง

5. ห้องอบแห้ง (ภาพประกอบ 12 b) และ c))

ขนาด กว้าง 1.20 m ยาว 1.0 m สูง 1.2 m โครงสร้างภายในทำด้วยเหล็กหนา 4 mm ปกคลุมด้วยฉนวนใยแก้วหนา 1 inch ภาชนะทำจากอะลูมิเนียมที่หนา 1.2 mm ขนาด กว้าง 50 cm ยาว 50 cm สูง 2 cm จำนวน 6 ภาชนะ สามารถบรรจุสาหร่ายสดประมาณ 430-450 g/ภาชนะ (ความหนาของชั้นสาหร่าย 2 mm) ด้านบนของภาชนะมีท่อปล่อยอากาศอบแห้งดังรูปที่ 14 d) หัวฉีด (nozzle) เจาะเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm จำนวน 96 ช่อง ระยะห่างระหว่างทางออกของอากาศอบแห้งกับผิวผลิตภัณฑ์อบแห้งเท่ากับ 4 cm เพื่อบังคับให้อากาศที่ไหลออกจากท่อเป็นแนวตรงตั้งฉากกับผิววัสดุอบแห้ง

6. เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K

เป็นตัววัดอุณหภูมิเหนือภาชนะตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิแสดงดังภาพประกอบ 14

7. มาตรฐานไฟฟ้า

วัดพลังงานไฟฟ้ารวมโดยใช้มาตรฐานไฟฟ้า 3 Phase ต่อเข้ากับแท่งความร้อนนอกเครื่องอบ, แท่งความร้อนภายในตู้อบแห้ง 4 ตัวและพัดลม

3.2.3 ทดลองวัดการกระจายตัวของอากาศอบแห้ง

ในการทดสอบการกระจายอากาศอบแห้งใช้สาหร่ายเกลียวทองประมาณ 430 ± 5 g ความหนาของชั้นสาหร่าย 2 mm อุณหภูมิอบแห้ง $40-60^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 1.3 m/s วัดปริมาณความชื้นในแต่ละภาชนะและวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องอบแห้ง

3.2.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออัตราการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทอง

- อบสาหร่ายเกลียวทองด้วยเครื่องอบแห้งที่ออกแบบขึ้นที่อุณหภูมิ $40-60^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 1.3 m/s

- หาปริมาณความชื้นและการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยเก็บข้อมูล ทุก ๆ 1 ชั่วโมง

3.2.5 วิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพและคุณค่าทางอาหาร

หลังจากการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่าง ๆ จะได้สาหร่ายเกลียวทองที่มีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 7 % (w.b.) จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ประมาณ 300 g ส่งวิเคราะห์สี องค์ประกอบทางชีวเคมี และปริมาณจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในผลิตภัณฑ์อาหารแห้งโดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

- คูสีของสาหร่ายหลังอบแสดงในรูปของ L, a, b เปรียบเทียบกับสีของสาหร่ายก่อนอบแห้ง

- วิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมี
- Total fat
- Protein
- Total carbohydrate
- Chlorophyll
- วิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ (ตามมาตรฐาน ISO 9002)
- Total aerobics
- Staphylococcus aureus
- Salmonella sp.
- Escherichia coli.
- Enterobacteria
- Streptococcus D
- sulphite-reducing Clostridia
- Pseudomonas

โดยส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่คณะอุตสาหกรรมการเกษตร

3.2.6 ศึกษาผลของความเร็วจานอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น

ทำการทดลองอบแห้งสำหรับรายเกลียวทอง โดยแปรความเร็วลมจาก 1.3 m/s เป็น 2.6 m/s (เป็นความเร็วลมสูงสุดของพัดลม) จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพและคุณค่าทางอาหารของสำหรับรายเกลียวทอง

3.2.7 วิเคราะห์พลังงาน

ระหว่างการอบแห้งจะเกิดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าซึ่งสามารถวัดได้จากมาตรวัดไฟฟ้า บันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้ก่อนและหลังการอบแห้ง การสิ้นเปลืองพลังงานหาได้จากพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้หลังลบก่อนการอบแห้ง

ระหว่างกระบวนการอบแห้ง การสิ้นเปลืองพลังงานสัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่ระเหยไป (kg) และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh) แสดงดังสมการที่ 8 (Wang and Sheng, 2006)

$$\text{Energy consumption rate} = \frac{\text{Consumed energy value}}{\text{Value dehydrated moisture content}} \quad (\text{kWh} / \text{kg}) \quad (8)$$

นอกจากนี้ประสิทธิภาพระบบอบแห้งสามารถแสดงได้ด้วยค่า Specific moisture evaporation rate (SMER) (Chua *et al.*, 2002) SMER หาได้จากสมการที่ 9

$$SMER = \frac{\text{Amount of water evaporated}}{\text{Energy input to the dryer}} \quad (\text{kg} / \text{kWh}) \quad (9)$$

บทที่ 4

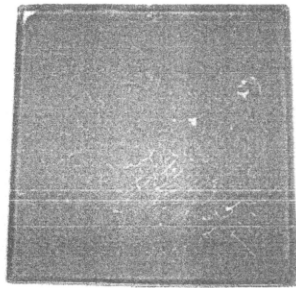
ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองจากเครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ

ในการทดลองนี้จะใช้เครื่องอบแห้งดังกล่าวประกอบ 13 เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสาหร่ายเกลียวทองซึ่งประกอบด้วยความหนาของชั้นสาหร่ายและอุณหภูมิอากาศอบแห้ง

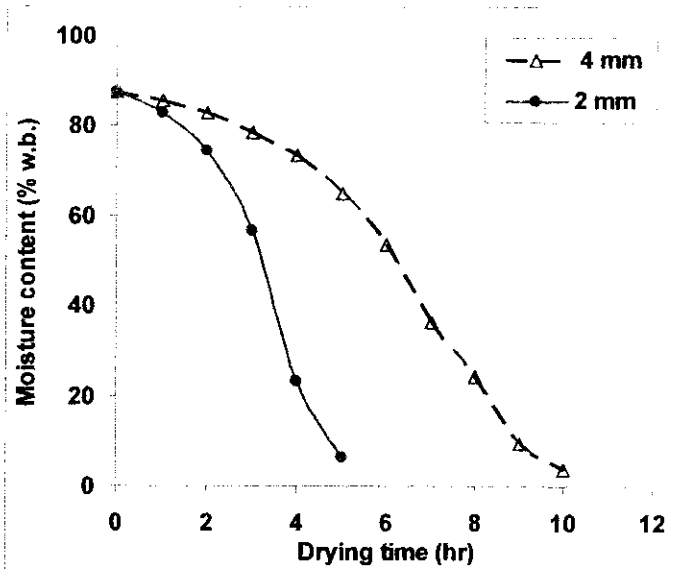
4.1.1 ผลของความหนาสาหร่ายต่อการอบแห้ง

ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมสาหร่ายอบแห้งความชื้นสุดท้ายต้องไม่เกิน 7.5% (d.b.) หรือไม่เกิน 7% (w.b.) (Desmorieux and Decaen, 2005) การอบแห้งผลิตภัณฑ์จะดำเนินต่อไปจนกว่าจะได้รับความชื้นของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ ภาพประกอบ 13 แสดงผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากการอบแห้ง



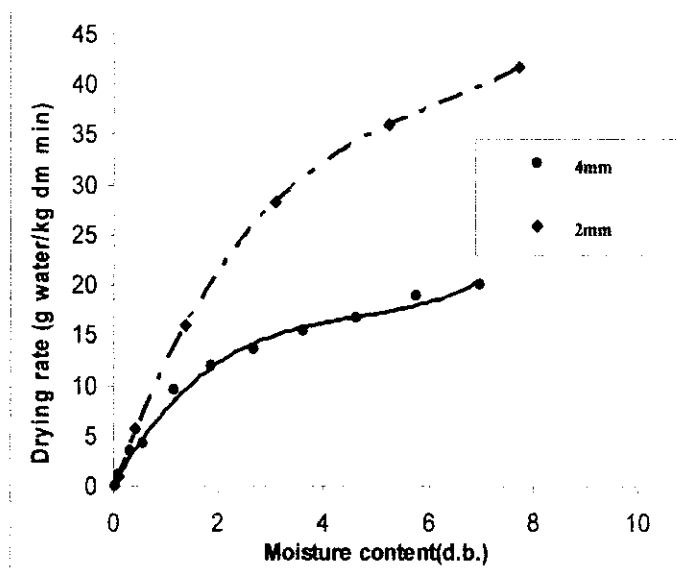
ภาพประกอบ 13 สาหร่ายแห้งหลังจากการอบแห้ง

จากการทดลองใช้สาหร่ายเกลียวทองสดจากบริษัท Herb Spirulina อำเภอบางกล้า จังหวัดสงขลา มีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง $91 \pm 1\%$ มาตรฐานเปียก อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 60°C ความเร็วลม 1.0 m/s โดยแปรความหนาของชั้นสาหร่ายเป็น 2 และ 4 mm เพื่อหาความหนาที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองได้ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 14 กราฟแสดงความหนาของชั้นสาหร่ายต่ออัตราการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทอง (อุณหภูมิอบแห้ง 60°C ความเร็วลม 1.0 m/s ความชื้นเริ่มต้น $88\pm 1\%$ w.b.)

กราฟปริมาณความชื้นกับเวลาการอบแห้งสำหรับการอบแห้งด้วยอากาศของสาหร่ายเกลียวทองซึ่งได้รับอิทธิพลจากความหนาของชั้นสาหร่ายแสดงดังภาพประกอบ 14 พบว่าเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นต้องการเวลาในการอบแห้งเพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายตามที่ต้องการเพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ Wang และ Xi (2005) ซึ่งทำการทดลองอบแห้งแครอทที่ความหนาต่าง ๆ กัน ขณะเดียวกันเมื่อความหนาของชั้นสาหร่ายเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 50% (เมื่อเปรียบเทียบความหนา 2 mm ใช้เวลา 5 ชั่วโมง ความหนา 4 mm ใช้เวลา 10 ชั่วโมง) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อความหนาของชั้นสาหร่ายเพิ่มขึ้นความต้านทานต่อการถ่ายโอนความร้อนและถ่ายโอนความชื้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยทำให้ความชื้นที่มีอยู่ภายในผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าวัสดุอบแห้งได้ช้า นอกจากนี้เมื่อใช้ความหนาของสาหร่ายเป็น 4 mm สาหร่ายแห้งสุดท้ายที่ได้มีความชื้นไม่สม่ำเสมอกล่าวคือบริเวณผิวหน้าจะแห้งเร็วเมื่ออบไปเป็นเวลานานผิวหน้าสาหร่ายจะไหม้ดำส่วนสาหร่ายที่อยู่ด้านล่างไม่แห้งสนิทเนื่องจากน้ำไม่สามารถระเหยผ่านผิวหน้าสาหร่ายได้มีผลให้เกาะออกจากถาดอบยาก

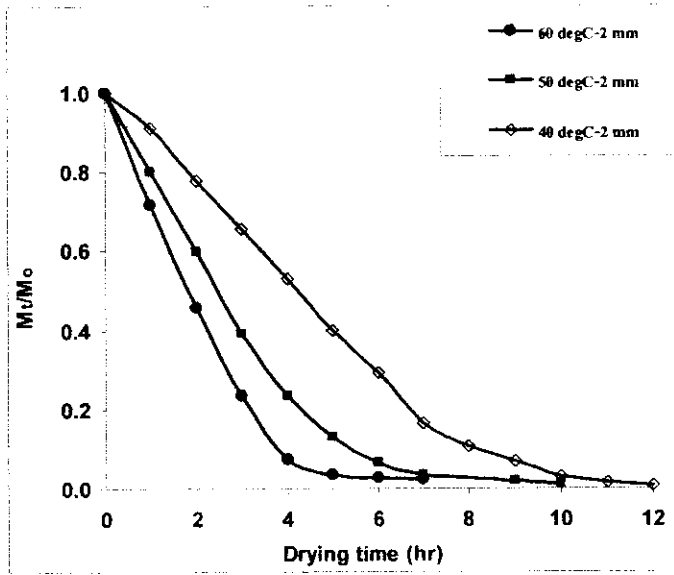


ภาพประกอบ 15 อัตราการอบแห้งที่ความหนาของชั้นสำหรับวัสดุของ 2 และ 4 mm (อุณหภูมิอบแห้ง 60°C ความเร็วลม 1.0 m/s ความชื้นเริ่มต้น 88±1% w.b.)

ภาพประกอบ 15 แสดงผลของความหนาของสารยัดต่ออัตราการอบแห้งพบว่าเมื่อความหนาของชั้นสารยัดเพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งลดลงอย่างรวดเร็วที่ปริมาณความชื้นของตัวอย่างเท่ากัน เกิดจากเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นความต้านทานในการถ่ายโอนความร้อนและมวลจะสูงขึ้นและพบว่าไม่ปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ตลอดการอบแห้งสารยัดปรากฏเฉพาะอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น ในช่วงของอัตราการอบแห้งลดลงนี้การถ่ายเทความร้อนและมวลมิได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้นแต่เกิดจากการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวหน้าของวัสดุอบแห้งด้วย ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ ไปยังผิวหน้าช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศทำให้อัตราการถ่ายเทความชื้นหรืออัตราการอบแห้งลดลง และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนี้จะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ

4.1.2 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น

จากการทดลองอบสารยัดชั้นบาง (ความหนาไม่เกิน 2 mm) ที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C ความเร็วลม 1 m/s ด้วยถาดอบขนาด กว้าง 37 cm ยาว 79 cm สูง 2.5 cm จากการทดลองได้ผลดังแสดงดังภาพประกอบ 18

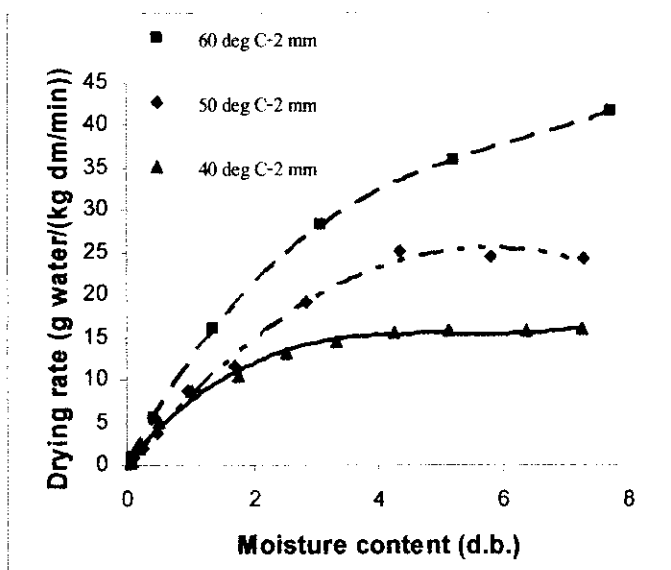


ภาพประกอบ 16 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ความหนาของชั้นสำหรับยางเกลียวทอง 2 mm, ความเร็วลม 1.0 m/s ความชื้นเริ่มต้น 87 ± 8 % (w.b.)

จากกราฟพบว่าทั้ง 3 อุณหภูมิให้กราฟที่มีลักษณะเดียวกัน อย่างไรก็ตามอุณหภูมิมิผลต่อเวลาการอบแห้งอย่างมากกล่าวคือเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นปริมาณความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วและส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด (ภาพประกอบ 18) จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการถ่ายโอนมวลในตัวอย่างเร็วขึ้นเมื่อความร้อนที่ตัวอย่างได้รับสูงขึ้น (Wang and Sheng, 2006) เวลาที่ใช้ในการอบแห้งรวมทั้งอุณหภูมิอบแห้ง 40, 50 และ 60°C แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ 60°C ความเร็วลม 1 m/s

อุณหภูมิอบแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)	ความชื้นเริ่มต้น (% w.b.)	ความชื้นสุดท้าย (% w.b.)	เวลาอบแห้ง (hr)
40	87.80	6.09	12
50	86.21	6.04	7
60	87.42	6.42	5



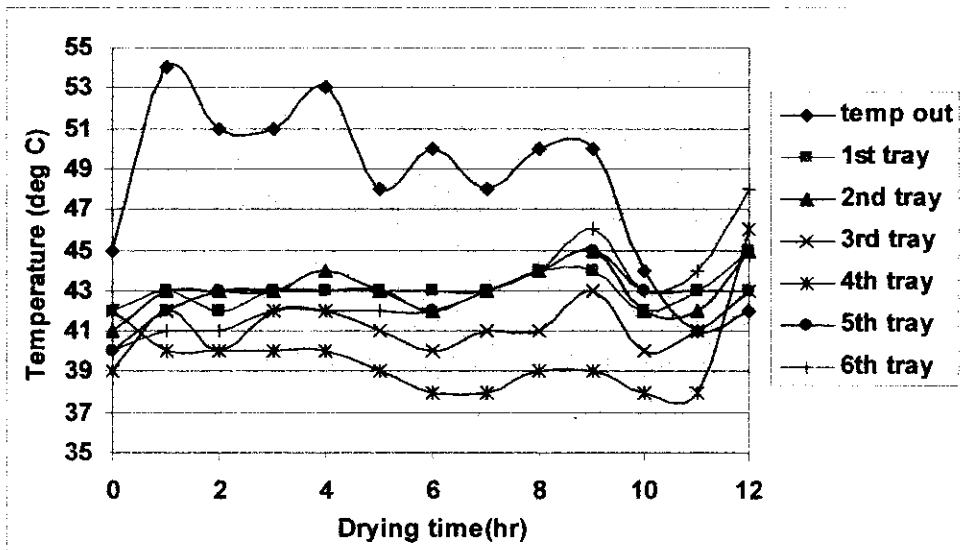
ภาพประกอบ 17 อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ (ความเร็วลม 1.0 m/s) ความหนาของชั้นสำหรับเกลียวทอง 2 mm, ความเร็วลม 1.0 m/s ความชื้นเริ่มต้น 87 ± 8 % (w.b.)

จากภาพประกอบ 17 แสดงให้เห็นว่าอัตราการอบแห้งสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้นที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน ซึ่งให้เห็นว่าการถ่ายโอนมวลเร็วขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นภายในวัสดุเกิดง่ายขึ้น และพบว่าการอบแห้งสำหรับเกลียวทองที่อุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ (60°C ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที) จะปรากฏเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้นซึ่งช่วงนี้การถ่ายโอนมวลเป็นตัวควบคุมกระบวนการอบแห้ง ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนี้อัตราการอบแห้งเริ่มต้นจะสูง (อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น) และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อวัสดุอบแห้งเริ่มมีความชื้นต่ำ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากช่วงแรกเกิดการระเหยของน้ำที่ผิววัสดุเมื่อการอบแห้งดำเนินไปอัตราการอบแห้งจะลดลงตามความชื้นที่ลดลงน้ำที่ระเหยขณะนั้นเป็นน้ำภายในโครงสร้างวัสดุระเหยผ่านรูพรุนของวัสดุไปยังผิววัสดุก่อนจะระเหยไปยังอากาศภายนอกช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนี้ชี้ให้เห็นว่าความต้านทานการถ่ายโอนความร้อนและมวลภายในเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับอุณหภูมิอากาศต่ำ (40 และ 50°C) จะปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย ในช่วงนี้เกิดจากการระเหยของน้ำที่ผิวของวัสดุหลังจากน้ำที่ผิวของวัสดุมีปริมาณลดลงจะเกิดช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

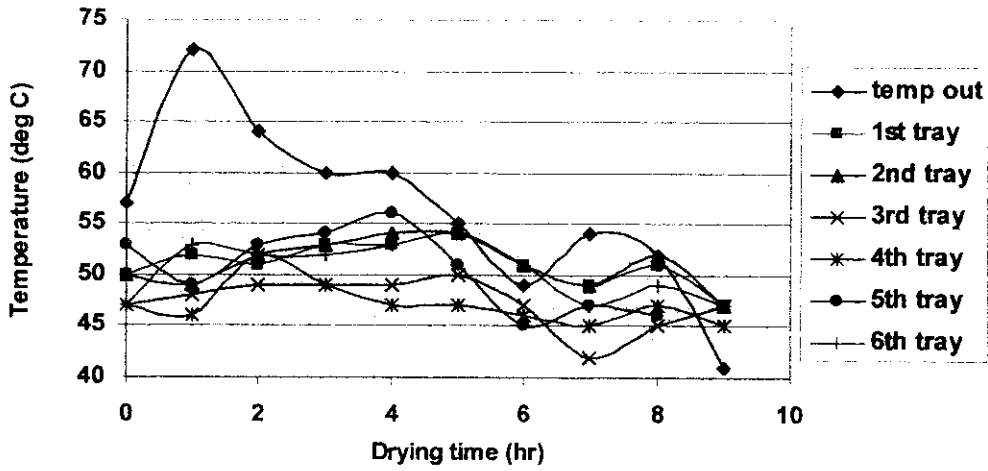
4.2 ผลการทดลองจากเครื่องอบแห้งระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก (ที่ออกแบบขึ้น)

4.2.1 ผลการกระจายอุณหภูมิในห้องอบแห้ง

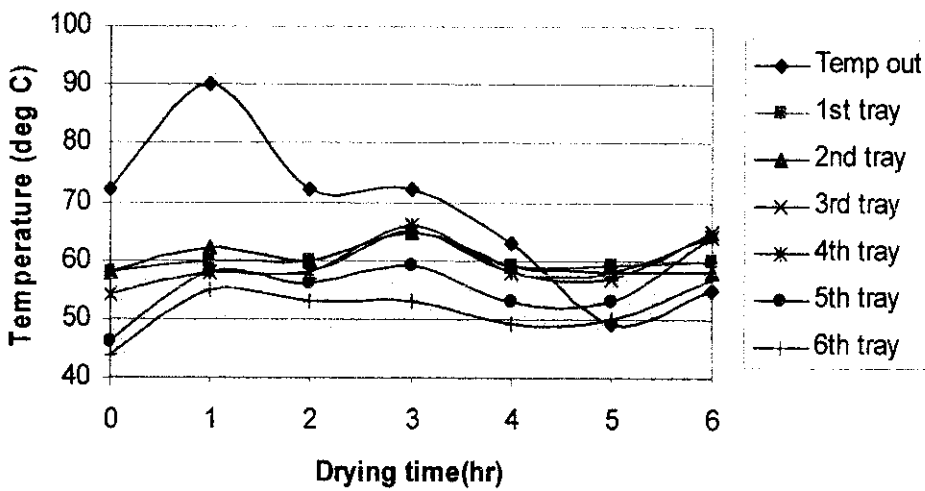
ในการทดลองวัดการกระจายอุณหภูมิในห้องอบแห้ง ทำได้โดยการวัดปริมาณความชื้นในแต่ละถาดและวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องอบแห้ง (ภาพประกอบ 12 a) โดยทำการอบสำหรับที่ 40, 50 และ 60 °C ความเร็วอากาศ 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm จากการทดลองวัดและเก็บข้อมูลอุณหภูมิอากาศอบแห้งเหนือถาดอบแต่ละถาดได้ผลการทดสอบดัง ภาพประกอบ 18 ภาพประกอบ 19 และภาพประกอบ 20 โดยในห้องอบแห้งนี้ได้ติดตั้งแห้งให้ความร้อน 4 ตัวได้ถาดที่ 5 และ 6



ภาพประกอบ 18 อุณหภูมิตำแหน่งต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 40°C ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm (เมื่อ temp out คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้งก่อนเข้าห้องอบ)



ภาพประกอบ 19 อุณหภูมิตำแหน่งต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 50°C ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสาหร่าย 2 mm (เมื่อ temp out คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้งก่อนเข้าห้องอบ)



ภาพประกอบ 20 อุณหภูมิตำแหน่งต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 60°C ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสาหร่าย 2 mm (เมื่อ temp out คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้งก่อนเข้าห้องอบ)

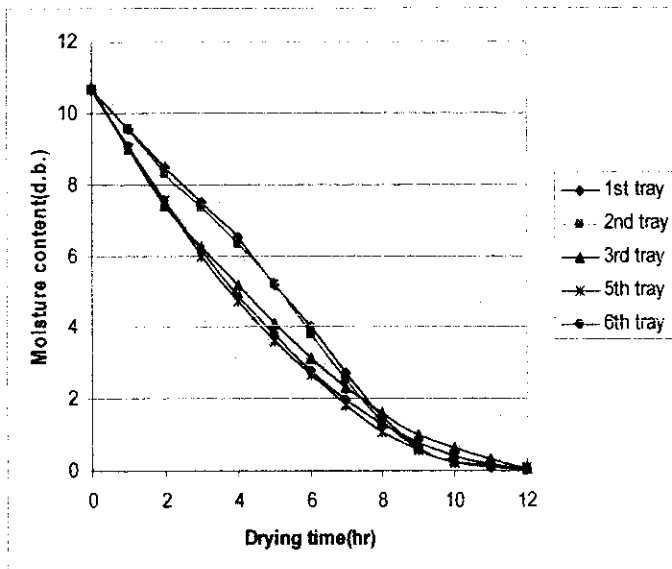
จากภาพประกอบ 20 ถึง 22 ทำให้ทราบว่า การกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้สูงขึ้น โดยบริเวณที่ติดกับแหล่งให้ความร้อน (ภาคที่ 5 และ 6) มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบ

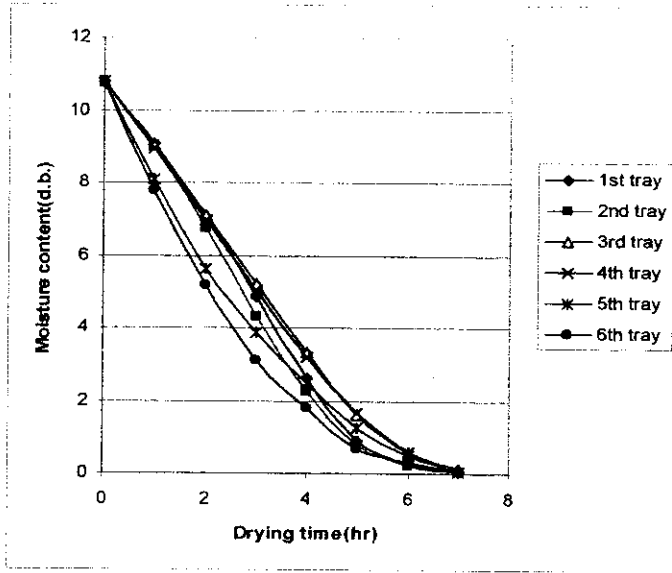
อุณหภูมิที่ตั้งไว้ °C	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
42.45	2.57
51.31	4.44
57.74	5.01

4.2.2 ผลการกระจายความชื้น

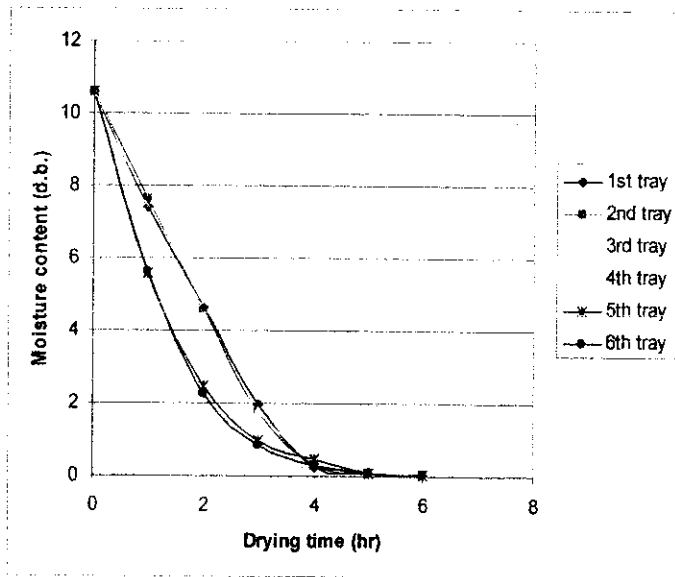
จากภาพประกอบ 21 ถึง 23 กราฟการกระจายความชื้นที่ตำแหน่งจะเห็นว่า สอดคล้องกับการกระจายอุณหภูมิคือที่อุณหภูมิต่ำเพิ่มขึ้นการกระจายความชื้นของผลิตภัณฑ์ (วัดโดยชั่งน้ำหนักทุก ๆ ชั่วโมงจากนั้นคำนวณความชื้นของสาหร่าย) ที่เวลาต่าง ๆ เพิ่มขึ้นด้วย ความชื้นของถาดที่ 5 และ 6 ลดลงเร็วกว่าถาดอื่น ๆ เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากเครื่องทำความร้อน ภายในห้องอบแห้งมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามความชื้นที่เวลาต่างๆ ไม่แตกต่างกันมากนัก



ภาพประกอบ 21 การกระจายความชื้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย $42 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสาหร่าย 2 mm ความชื้นเริ่มต้น $10.68 \pm 0.02 \text{ (d.b.)}$

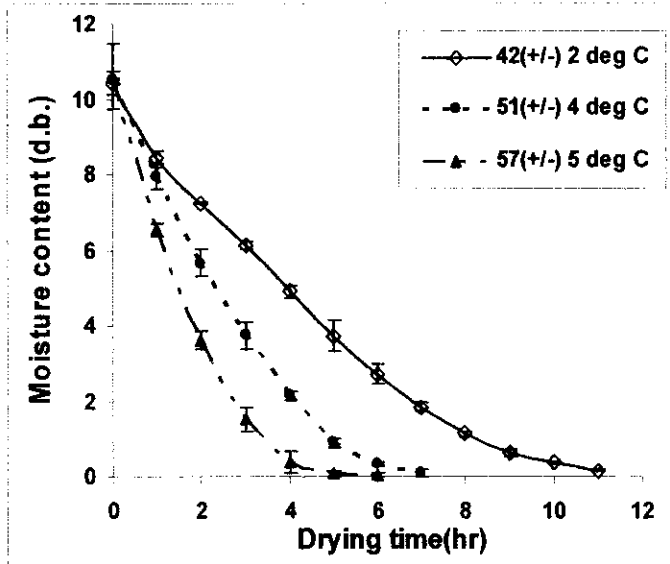


ภาพประกอบ 22 การกระจายความชื้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย $51 \pm 4^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm ความชื้นเริ่มต้น 10.70 (d.b.)

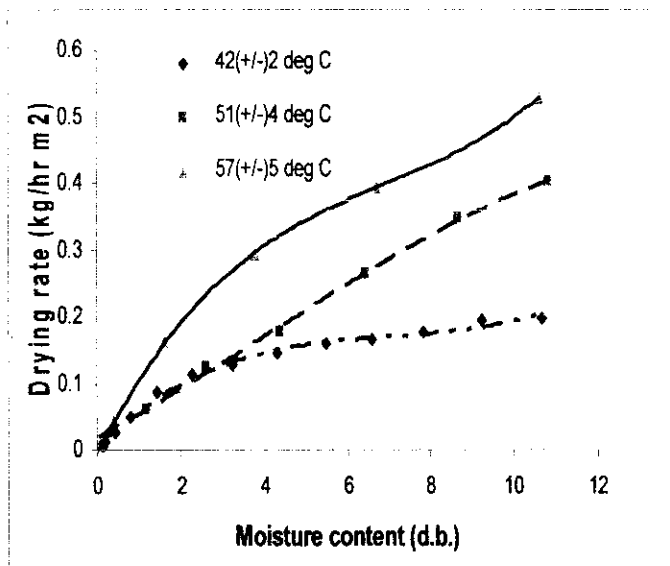


ภาพประกอบ 23 การกระจายความชื้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิอบแห้ง $57 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm ความชื้นเริ่มต้น $10.60 \pm 0.01 \text{ (d.b.)}$

4.2.3 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการอบแห้ง



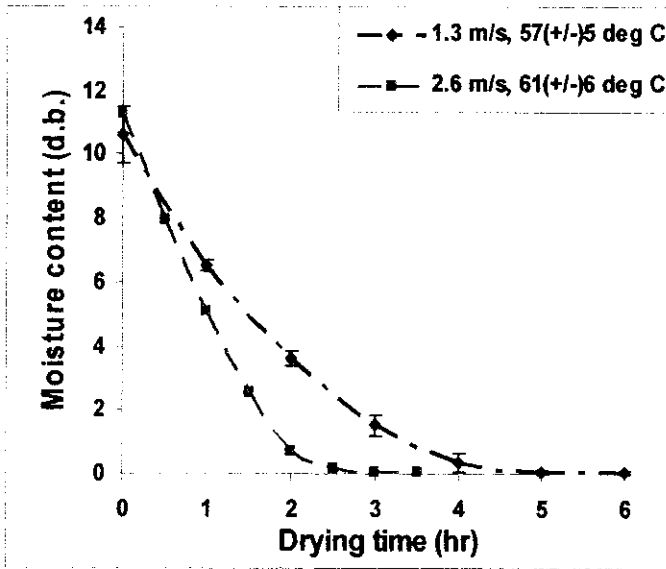
ภาพประกอบ 24 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณความชื้นของสาหร่ายเมื่อความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสาหร่าย 2 mm ความชื้นเริ่มต้น 10.52 ± 0.09 (d.b.)



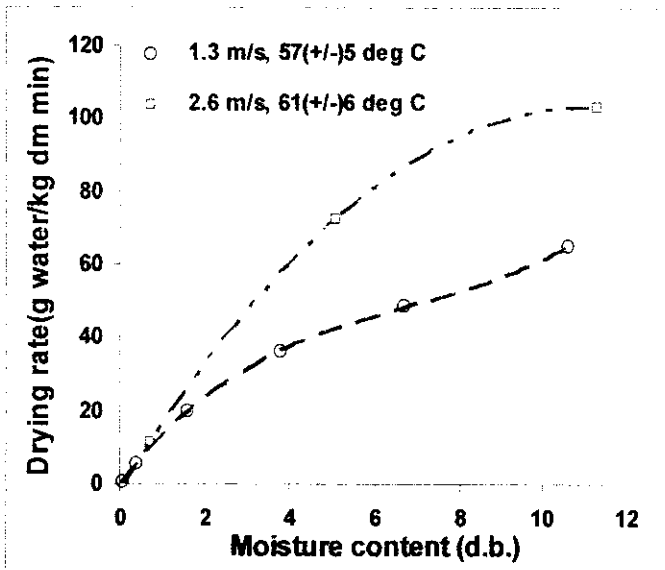
ภาพประกอบ 25 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ยต่อภาคความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสาหร่าย 2 mm ความชื้นเริ่มต้น 10.52 ± 0.09 (d.b.)

ภาพประกอบ 24 แสดงผลของอุณหภูมิต่อความชื้นเฉลี่ยแต่ละภาคของสาหร่ายเกลียวทองพบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้นความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลให้อัตรการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นและเวลาอบแห้งลดลง เพื่ออธิบายปรากฏการณ์นี้คำนวณอัตรการอบแห้งที่เวลาและอุณหภูมิต่าง ๆ เขียนกราฟกับปริมาณความชื้นแสดงดังภาพประกอบ 25 ที่อุณหภูมิอากาศต่ำ ($42 \pm 2^{\circ}\text{C}$) อัตรการอบแห้งของสาหร่ายเกลียวทองปรากฏช่วงอัตรการอบแห้งคงที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Desmorieux และ Decaen (2005) ซึ่งกล่าวว่าการอบสาหร่ายเกลียวทองแบบการพาที่อุณหภูมิอากาศต่ำ (อุณหภูมิ 40°C ความเร็วลมต่ำกว่า 2.5 m/s) มักปรากฏช่วงอัตรการอบแห้งคงที่ ซึ่งเกิดจากการระเหยของน้ำที่ผิววัสดุไปยังอากาศแวดล้อมเมื่อความชื้นลดลงจะปรากฏช่วงอัตรการอบแห้งลดลงเนื่องจากการระเหยของความชื้นที่อยู่ภายใน โครงสร้างวัสดุอบแห้ง ไปยังผิววัสดุทำได้ช้ากว่าจึงเกิดช่วงอัตรการอบแห้งลดลง สำหรับที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะปรากฏเฉพาะช่วงอัตรการอบแห้งลดลงเท่านั้น ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุ ไปยังผิวหน้า การถ่ายโอนมวลเป็นตัวควบคุมกระบวนการอบแห้งในช่วงอัตรการอบแห้งลดลงนี้ช่วงแรกของ การอบแห้งอัตรการอบแห้งเฉลี่ยจะสูง (อัตรการอบแห้งสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น) และค่อย ๆ ลดลงเมื่อวัสดุมีความชื้นลดลงที่อัตรการอบแห้งช่วงแรกสูงเนื่องจากการระเหยในช่วงแรกเกิดจากน้ำที่อยู่บริเวณผิวหน้าของวัสดุ เมื่อกระบวนการอบดำเนิน ไปอัตรการอบแห้งเฉลี่ยจะลดลงตามความชื้นที่ลดลง ช่วงอัตรการอบแห้งลดลงมี 2 ช่วง คือ ช่วงแรกที่มีความชื้นสูงกว่า 2.0 มาตรฐานเปียก ช่วงอัตรการอบแห้งลดลงนี้ชี้ให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตรการอบแห้งลดลง ช่วงที่ 2 ความชื้นสูงกว่า 2.0 เรียกความชื้นนี้ว่าจุดเปลี่ยน (inflexion point) (Wang and Sheng, 2007) คือจุดที่เปลี่ยนจากความชื้นสูงไปยังความชื้นต่ำการอบแห้งที่เร็วขึ้นอาจเกิดจากโครงสร้างของวัสดุอบแห้งถูกเปิดออกส่งผลให้การระเหยและการเคลื่อนย้ายน้ำเร็วขึ้น (Wang and Xi, 2005) ช่วงอัตรการเปลี่ยนความชื้นหรืออัตรการอบแห้งลดลงถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ

4.2.4 ผลของความเร็วมต่ออัตราการอบแห้ง



ภาพประกอบ 26 ผลของความเร็วมต่อปริมาณความชื้นเฉลี่ยต่อภาคของสาหร่าย ความหนาชั้นสาหร่าย 2 mm ความชื้นเริ่มต้น 10.94 ± 0.47 (d.b.)



ภาพประกอบ 27 ผลของความเร็วมต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ยต่อภาคของสาหร่าย ความหนาชั้นสาหร่าย 2 mm ความชื้นเริ่มต้น 10.94 ± 0.47 (d.b.)

ภาพประกอบ 26 แสดงผลของความเร็วมต่อปริมาณความชื้นเฉลี่ยต่อตาของสาหร่ายพบว่าเมื่อความเร็วมเพิ่มขึ้นความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วและอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากเมื่อความเร็วมเพิ่มขึ้นการเคลื่อนที่ของน้ำดีขึ้น

4.2.5 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสี

สีเป็นสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งของอาหารซึ่งเป็นจุดขายของผลิตภัณฑ์ ปัญหาปกติของการอบแห้งอย่างหนึ่งของการอบแห้งสาหร่ายคือการเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลคุณภาพสีที่ดีควรมีสีเขียว สำหรับการเปลี่ยนสีของสาหร่ายเกลียวทองหลังสิ้นสุดการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงจากการวัดค่าสี (ค่า L , a , และ b) โดยใช้เครื่อง HunterLab ColorFlex (A60-1010-615 Model Colorimeter, Hunter Lab, Reston, VA) แสดงดังภาพประกอบ 28

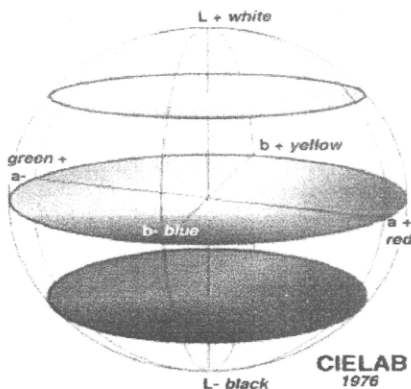
ค่า Hunter L คือค่าความสว่าง $L = 0$ สีดำ $L = 100$ สีขาว

-a คือค่าความเขียว

+a คือค่าความแดง

-b คือค่าความน้ำเงิน

+b คือค่าความเหลือง



ภาพประกอบ 28 ระดับสี L , a และ b

ระดับของสี L , a , b สามารถเสนออยู่ในรูป ΔE (total color change parameter; สมการที่ 10) (Shi *et al.*, 2007)

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (10)$$

Where

ΔE = total color change parameter

$\Delta L = L - L_0$; $\Delta a = a - a_0$; $\Delta b = b - b_0$

subscript 0 represent initial values of the lightness, redness and yellowness of the sample prior to drying, respectively.

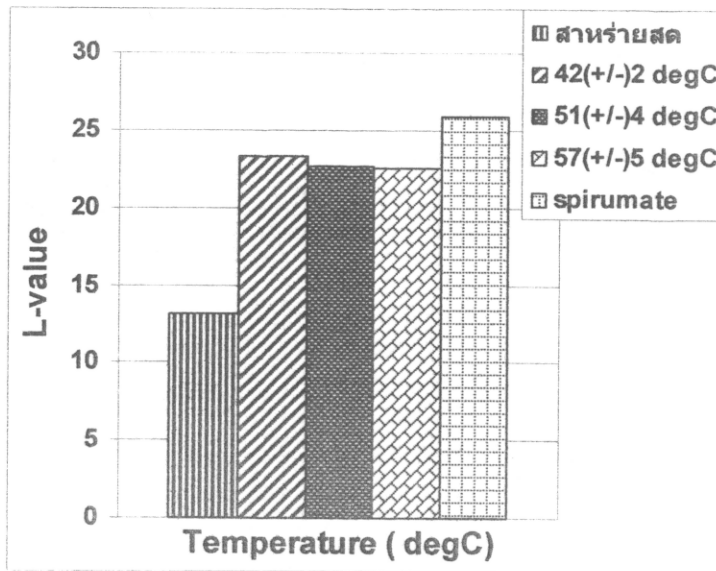
ตารางที่ 6 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของสาหร่ายที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Drying Temperature (°C)	$\Delta L/L_0$	$\Delta a/a_0$	$\Delta b/b_0$	ΔE
42±2	0.78	-0.58	-0.37	12.37
51±4	0.73	-0.51	-0.45	11.98
57±5	0.72	-0.49	-0.50	12.07

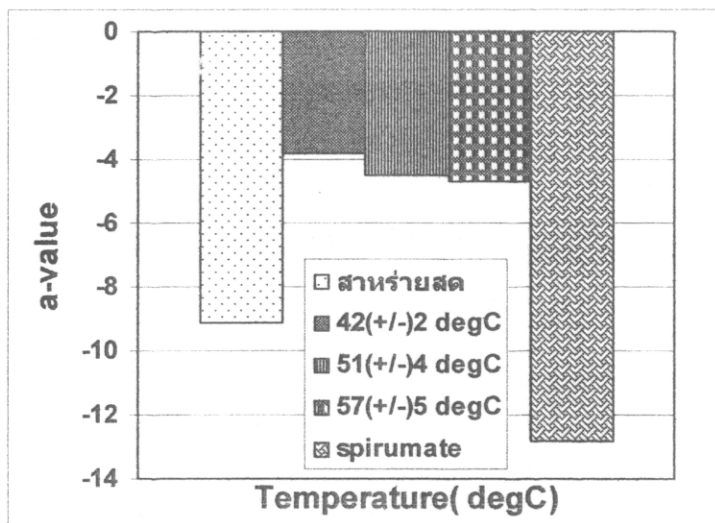
ผลของสภาวะการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่าง ตาราง 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของสาหร่ายในเทอมของการเปลี่ยนแปลง $\Delta L/L_0$ (lightness), $\Delta a/a_0$ (greenness) และ $\Delta b/b_0$ (yellowness) พบว่าทุก ๆ สภาวะของการอบแห้งให้ผลการทดลองคือค่า L และ b ของตัวอย่างอบแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างสดมีค่าลดลง ส่วนค่า a มีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองนี้สามารถพิจารณาได้ว่ามีปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) และการสลายตัวของสารที่มีสี (pigment destruction) เกิดขึ้นในตัวอย่างอบแห้ง (Methakhup *et al.*, 2005) ในกรณีของความสว่างพบว่าอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสว่างของสาหร่าย กล่าวคือความสว่างของสาหร่ายแห้งลดลง (ค่า $\Delta L/L_0$ ลดลง) เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเขียวของสาหร่ายอบแห้งสังเกตได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นความเขียวของสาหร่ายลดลง (ค่า $\Delta a/a_0$ เพิ่มขึ้น) ผลของอุณหภูมิต่อความเหลืองของสาหร่าย (b value) พบว่าความเหลืองลดลง (ค่า $\Delta b/b_0$ ลดลง) เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงสีรวมทั้งทุกสภาวะไม่แตกต่างกันมากนัก

จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 42±2°C สามารถรักษาสีเขียวของสาหร่ายได้ดีกว่าที่สภาวะอื่น ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงสีในการอบแห้งคือการสลายตัวของสารคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) และปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard

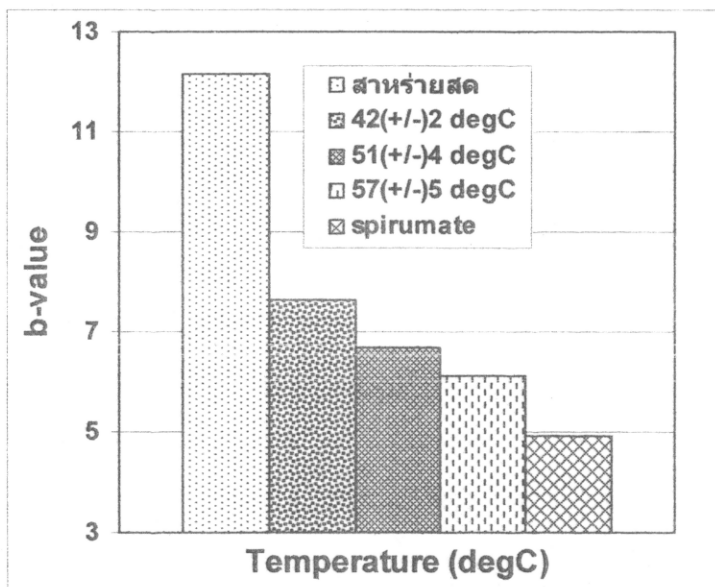
reaction) เกิดเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง (Chua *et al.*, 2002) ดังนั้นการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำให้สีที่ดีกว่าการอบที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่า L, a, b และ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีรวมของสาหร่ายแห้งที่อบในช่วงที่ทำการศึกษากับผลิตภัณฑ์สาหร่ายเกลียวทองแห้งสปิริสัฟลาเทนซีสที่มีขายตามท้องตลาดชนิดแคปซูล ขนาดบรรจุ 100 แคปซูล น้ำหนักสุทธิ 60 กรัม ยี่ห้อสไปรูเมท ซึ่งได้รับการรับรองคุณภาพจากมาตรฐาน ISO 9001 GMP HACCP ผลิตและจำหน่ายโดยบริษัท แอดวานซ์ สไปรูลิน่า ไบโอเทคโนโลยี จำกัด ที่ตั้ง 351 ม.1 ต.ศาลา อ.เกาะกา จ.ลำปาง 52130 ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพประกอบ 29-32



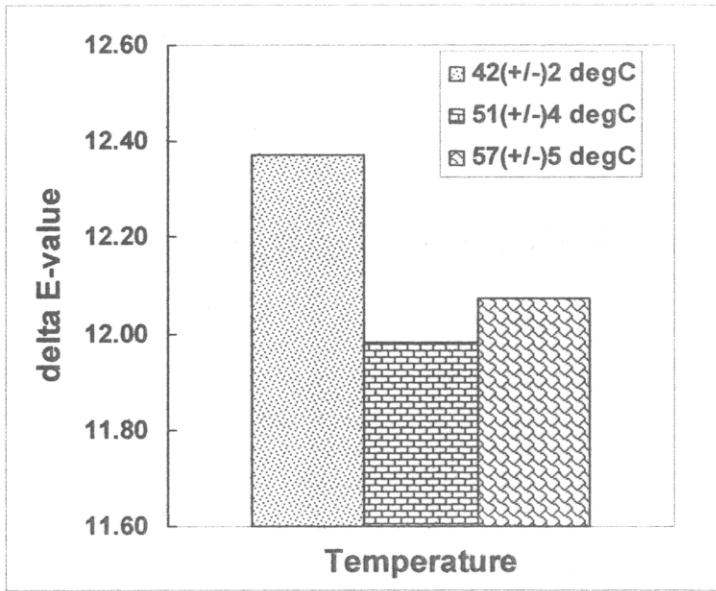
ภาพประกอบ 29 ค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสาหร่าย 2 mm



ภาพประกอบ 30 ค่าความเคี้ยวของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้น
สำหรับ 2 mm



ภาพประกอบ 31 ค่าความเหลืองของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้น
สำหรับ 2 mm



ภาพประกอบ 32 ค่าความแตกต่างของสีรวมที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเร็วลม 1.3 m/s ความหนาชั้นสำหรับ 2 mm

ภาพประกอบ 29 – 32 แสดงค่าความสว่าง ค่าความเขียว และค่าความเหลืองของผลิตภัณฑ์เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งในช่วงที่ทำการศึกษา มีผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ ค่า L อยู่ในช่วง 22.55-23.34 ถือว่าแตกต่างกันไม่มากนัก ค่า a มีค่าเป็นลบอยู่ในช่วง (-3.84) – (-4.66) ค่าความเหลืองของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 อุณหภูมิมีค่าอยู่ในช่วง 6.11-7.64 ค่าความต่างแตกต่างสีรวมของผลิตภัณฑ์ไม่แตกต่างกันมากนัก (11.98-12.37) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่า L, a และ b ระหว่างการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นกับสำหรับแห้งยี่ห้อสไปรูเมทพบว่าค่าความสว่างของสไปรูเมทสูงกว่าเมื่ออบที่ 40, 50 และ 60°C เท่ากับ 11.14, 14.32 และ 15.03% ตามลำดับ ค่าความเขียวของสไปรูเมทสูงกว่าเมื่ออบที่ 40, 50 และ 60°C เท่ากับ 233.25, 185.64 และ 174.61% ตามลำดับ ค่าความเหลืองต่ำกว่าเมื่ออบที่ 40, 50 และ 60°C เท่ากับ 35.43, 26.04 และ 19.26% ตามลำดับ

4.2.6 ผลของอุณหภูมิต่อคุณค่าทางโภชนาการ

ความปลอดภัยจากจุลินทรีย์เป็นความต้องการพื้นฐานในการเตรียมอาหารซึ่งมีความสำคัญเท่ากับคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร องค์ประกอบบางตัวเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับวิธีการผลิตและการเก็บรักษา จึงมีการศึกษาผลของการอบแห้งต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ เมื่ออบแห้งที่ 42±2, 51±4 และ 57±5°C แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณค่าอาหาร

Nutrient	อุณหภูมิอบแห้ง		
	42±2°C	51±4°C	57±5°C
Protein,%	61.41	54.28	57.32
Crude fat,%	0.42	0.14	0.14
Moisture,%	8.95	10.71	8.5
Ash,%	5.22	4.25	4.02
Total Carbohydrate,%	24.00*	30.62*	30.02*
Chlorophyll รวม, g/100g	1.82	1.51	1.42
Chlorophyll A, g/100g	1.44	1.18	1.38
Chlorophyll B, g/100g	0.37	0.33	0.04

*รวม Crude fiber

จากตารางที่ 7 ปริมาณโปรตีนในตัวอย่างสาหร่ายเกลียวทองสอดคล้องกับที่รายงานในงานวิจัยเกี่ยวกับสาหร่ายเกลียวทองอื่น ๆ คือมีค่าอยู่ในช่วง 45-70% (Morist *et al.*, 2001; สาหร่ายเกลียวทอง, 2547; บริษัท กรีน ไคมอนด์ จำกัด, มปป.) นอกจากนี้พบว่าปริมาณไขมันคาร์โบไฮเดรต และ โปรตีนไม่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอากาศอบแห้งอย่างชัดเจนในช่วงที่ทำการศึกษา ปริมาณคลอโรฟิลล์รวมลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น และปริมาณคลอโรฟิลล์ของสาหร่ายแห้งที่อบด้วยวิธีนี้มีปริมาณสูงกว่าจากรายงานของ Morist และคณะ (2001), บริษัท กรีน ไคมอนด์ จำกัด และวารสารอาหารและยา ซึ่งพบว่าโดยทั่วไปแล้วปริมาณคลอโรฟิลล์ในสาหร่ายเกลียวทองมีประมาณ 1-1.20% ของน้ำหนักแห้ง

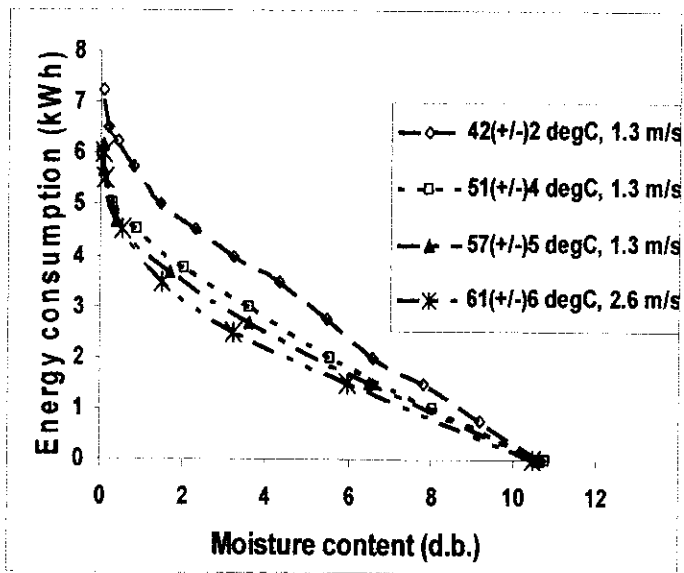
4.2.7 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อความสิ้นเปลืองพลังงาน

4.2.7.1 Energy consumption rate

ระหว่างกระบวนการอบแห้ง การสิ้นเปลืองพลังงานสัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่หายไป (กิโลกรัม) และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh) แสดงดังสมการที่ 8

จากภาพประกอบ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองพลังงานและปริมาณความชื้น ปรากฏว่าที่ความชื้นเดียวกันอุณหภูมิอบแห้งลดลง ความสิ้นเปลืองพลังงานสูงขึ้น อาจเกิดจากที่อุณหภูมิต่ำใช้เวลาในการอบแห้งสูงจึงใช้พลังงานมากกว่า ในภาพประกอบ 33 ในช่วงความชื้นน้อยกว่า 2 มาตรฐานแห้งใช้พลังงานมากและกราฟมีความชันมากกว่าช่วงอัตราการ

อบแห้งลดลงช่วงแรก (ความชื้นสูงกว่า 2 มาตรฐานแห้ง) ซึ่งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่ 2 นี้ความชื้นในสารถ่ายเกลียวทองมีค่าน้อยมากการเคลื่อนย้ายของน้ำส่วนใหญ่เป็นแบบ symplastic transport ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านเยื่อหุ้มพลาสมา (plasma membrane) และไซโตพลาสซึม (cytoplasm) จึงต้องการพลังงานมากในการกำจัดน้ำ

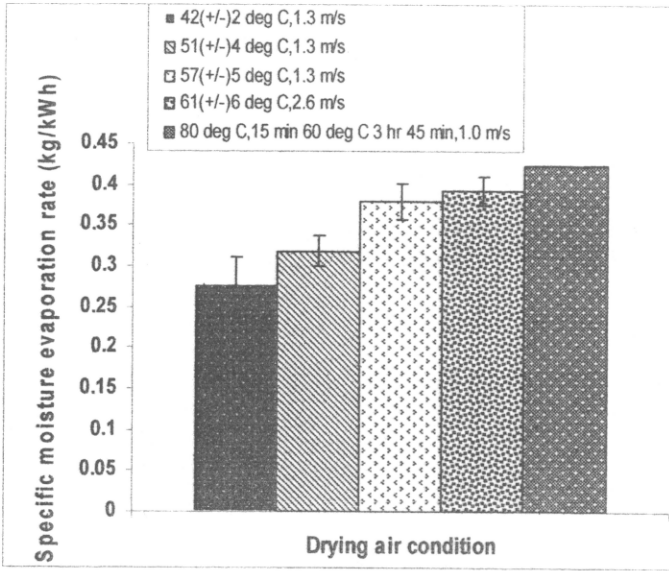


ภาพประกอบ 33 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่สภาวะอบแห้งต่าง ๆ

4.2.7.2 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่ออัตราการระเหยความชื้นจำเพาะ

เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบอบแห้งด้วยอากาศจากค่าอัตราการระเหยความชื้นจำเพาะ (Specific moisture evaporation rate, SMER) (Chua *et al.*, 2002) ซึ่งทำได้จากสมการ

ภาพประกอบ 34 พบว่าเมื่ออบที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่า SMER เพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นใช้เวลาในการอบแห้งลดลงจึงสิ้นเปลืองพลังงานน้อย เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นค่า SMER เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้น อาจกล่าวได้ว่าเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงความเร็วลมสูงความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่าที่ความเร็วลมต่ำกว่า(ค่า SMER เพิ่มขึ้น 7.55, 28.07 และ 43.17% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40°C เป็น 50, 60°C ความเร็วลม 1.3 m/s และ 80°C 15 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิเป็น 60°C อบต่อ 3 ชั่วโมง 45 นาที ความเร็วลม 1.0 m/s ตามลำดับ)



ภาพประกอบ 34 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่ออัตราการระเหยความชื้นจำเพาะ

4.2.8 คุณภาพทางจุลชีววิทยา

เมื่อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในอาหาร จะมีการเจริญเติบโต การแบ่งตัวเพิ่มจำนวน และเป็นสาเหตุให้อาหารมีการเปลี่ยนแปลงคือ อาหารเน่าเสียหรืออาจมีสารพิษเกิดขึ้นได้ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ผู้บริโภคเจ็บป่วยได้ จุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษมีมากมายหลายชนิด ซึ่งมาตรฐานหรือเกณฑ์ข้อกำหนดที่เกี่ยวกับการควบคุมจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคนั้นปกติมักจะเป็นข้อตกลงทางการค้าระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขายที่จะกำหนดว่าอาหารจะต้องตรวจพบจุลินทรีย์แต่ละชนิดได้ไม่เกินเท่าใด ซึ่งอาหารแต่ละชนิดมีข้อกำหนดให้ตรวจพบจุลินทรีย์ได้ในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร

ความร้อนที่ใช้ในระหว่างการอบแห้งเป็นสาเหตุของการลดจำนวนของจุลินทรีย์ แต่ผลของความร้อนขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอีกทั้งกระบวนการทำแห้งที่ใช้ ตามปกติแล้วเชื้อยีสต์ทั้งหมดและเชื้อแบคทีเรียส่วนใหญ่ จะถูกทำลายด้วยความร้อนที่ใช้ แต่สปอร์ของแบคทีเรียและเชื้อรา รวมทั้งเซลล์ปกติของแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติในการต้านทานความร้อนสามารถมีชีวิตรอดจากความร้อนที่ใช้ได้ ดังนั้นเพื่อให้การผลิตอาหารถูกสุขลักษณะจึงนำไปสู่การตรวจวิเคราะห์จุลินทรีย์ในอาหาร

คุณภาพทางจุลชีววิทยาที่ตรวจคือ การวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด (total viable aerobic bacteria count, TVC), *Enterobacteria*, *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus D*, *Salmonella sp.*, *Pseudomonas*, sulphite-reducing *Clostridia* and *Escherichia coli* ตามมาตรฐาน ISO 9002 (the International Organization for Standardization (ISO 9002))(Morist *et al.*, 2001)

ตารางที่ 8 เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยา อบที่ 42±2 - 57±5°C

	สด	42±2°C	51±4°C	57±5°C	ISO9002	หน่วย
Total bacteria count	3.4x10 ⁴	5.0x10 ⁸	1.7x10 ⁷	1.7x10 ³	<1.0x10 ⁵	CFU/g
<i>Staphylococcus aureus</i>	<3	<3	<3	<3	Not detected	MPN/g
<i>Salmonella sp.</i>	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected	ในอาหาร 25 กรัม
<i>Escherichia coli</i>	<3	<3	<3	<3	<3	MPN/g
Enterobacteriaceae count plate	2.0x10 ²	<10	<10	<10	<3	CFU/g
<i>Streptococcus D</i>	-	-	-	-	Not detected	MPN/g
<i>Pseudomonas sp</i>	-	-	-	-	Not detected	MPN/g
<i>Clostridium perfringens</i>	-	-	-	-	Not detected	ในอาหาร 0.01 กรัม

*วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FDA 2001 Bacteriological Analytical Manual U.S. Food and Drug Administration.

จากตารางที่ 8 เมื่ออบที่ 42±2°C ใช้เวลา 12 ชั่วโมง 51±4°C ใช้เวลา 7 ชั่วโมง 57±5°C ใช้เวลา 6 ชั่วโมง (ความเร็วลม 1.3 m/s) จากตารางพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งครั้งนี้สามารถลดจำนวนแบคทีเรียได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจำนวนแบคทีเรียในตัวอย่างลดลงและเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C สามารถลดปริมาณแบคทีเรียผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ISO 9002 แต่ไม่สามารถลดเชื้อ *Staphylococcus aureus* และเชื้อ Enterobacteriaceae ให้อยู่ในระดับตามข้อกำหนดของ ISO 9002 ได้ การทดสอบประสิทธิภาพของการอบแห้งเพื่อทำลายเชื้อดังกล่าวจะต้องทำต่อไปโดยใช้ปริมาณความร้อนที่สูงขึ้น

จากการศึกษาข้อมูลพบว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคที่มีสปอร์ที่ทนต่อความร้อน เช่น เชื้อ *Clostridium perfringens* การให้ความร้อนกับอาหารที่มีเชื้อนี้ไม่สามารถฆ่าได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°C แม้ว่าจะมีเวลานานก็ตาม เมื่อนำมาบริโภคต้องให้ความร้อนไม่ต่ำกว่า 73.8°C ดังนั้นในการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองเพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคจึงต้องทำที่อุณหภูมิสูงกว่า

60°C สำหรับสาหร่ายเกลียวทองเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที จากนั้นสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงสีระหว่างการอบแห้งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การเปลี่ยนแปลงสีสาหร่ายเกลียวทองเมื่ออบที่ 80°C

เวลาอบแห้ง (นาที)	การเปลี่ยนแปลงสี
5	ไม่มีการเปลี่ยนสี
10	ไม่มีการเปลี่ยนสี
15	ไม่มีการเปลี่ยนสี
20	เริ่มเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาล

จากตารางจะเห็นว่าเมื่ออบสาหร่ายที่ 80 °C เป็นเวลามากกว่า 15 นาที สาหร่ายจะเริ่มเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาล ซึ่งแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดเนื่องจากในสาหร่ายมีสารเอมีนเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยา อีกสาเหตุหนึ่งอาจเกิดเนื่องจากการสูญเสียรงควัตถุคลอโรฟิลล์โดยเมื่อได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานานจะเปลี่ยนเป็นฟีโอไฟติน (pheophytin) ซึ่งมีสีเขียวแกมน้ำตาล ดังนั้นจึงเลือกทำการอบแห้งสาหร่ายที่ 80 °C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิเป็น 60°C อบต่อ ไปจนได้ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ไม่เกิน 7% (w.b.) เนื่องจากไม่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดบราวน์จึงไม่ควรอบที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน นอกจากนี้ติดตั้งเครื่องกรองอากาศกรองลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเพื่อลดการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์จากอากาศอบแห้ง จากการทดลองได้ผลดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยา อบที่ 80°C

	80°C 15 min	ISO9002	หน่วย
	60°C 3 hr 45 min		
Total bacteria count	5.5x10 ³	<1.0x10 ⁵	CFU/g
<i>Staphylococcus aureus</i>	Not detected	Not detected	MPN/g
<i>Salmonella</i> sp.	Not detected	Not detected	ในอาหาร 25 g
<i>Escherichia coli</i>	<3	<3	MPN/g
Enterobacteriaceae count plate	<3	<3	CFU/g
<i>Streptococcus</i> D	Not detected	Not detected	MPN/g
<i>Pseudomonas</i> sp	Not detected	Not detected	MPN/g
<i>Clostridium perfringens</i>	3.6	Not detected	MPN/g

*วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FDA 2001 Bacteriological Analytical Manual U.S. Food and Drug Administration.

จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออบที่อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 80°C ปริมาณเชื้อทุกตัวผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ISO 9002 ยกเว้น *Clostridium perfringens* ซึ่งมีปริมาณสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนด อาจใช้วิธีอื่นในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์เช่น งานวิจัยของยุทธพงศ์และคณะ (2550) ใช้รังสีแกมมา 8 กิโลเกรย์ กำจัด *B. cereus* และ *C. perfringens* ในปลาร้า สำหรับผู้ที่ได้รับจุลินทรีย์ตัวนี้เข้าสู่ร่างกายจะมีอาการคลื่นไส้ ท้องเสียและถ่ายท้อง ส่วนมากไม่อาเจียน

การผลิตอาหารเสริมสุขภาพนอกจากต้องให้ความสนใจเกี่ยวกับความปลอดภัยจากจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคแล้วยังต้องคำนึงถึงปริมาณสารอาหารที่มีอยู่ในอาหารนั้นด้วย สำหรับสหารายที่ 80°C เป็นเวลา 15 นาที อบต่อที่ 60°C 3 ชั่วโมง 45 นาที วิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 คุณภาพทางโภชนาการของสาหร่ายแห้งเมื่ออบที่ 80°C เวลา 15 นาที อบต่อที่ 60 °C 3 ชั่วโมง 45 นาที

Nutrient	ปริมาณสารอาหาร, %
Protein	64.17
Crude fat	0.47
Moisture	7.91
Ash	4.36
Carbohydrate	23.09
Crude fiber	1.84
Chlorophyll รวม	1.68
Chlorophyll A	1.40
Chlorophyll B	0.28

จากตารางที่ 11 คุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายแห้งเมื่ออบที่ 80°C เวลา 15 นาที อบต่อที่ 60 °C 3 ชั่วโมง 45 นาที พบว่ามีปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และใยอาหารสูงกว่าจากรายงานเรื่องสาหร่ายเกลียวทอง (2547) เมื่ออบที่ 80°C เวลา 15 นาที อบต่อที่ 60 °C 3 ชั่วโมง 45 นาที มีปริมาณคลอโรฟิลล์สูงกว่าอบที่ 51±4 และ 57±5°C เท่ากับ 11.26 และ 18.31% ตามลำดับ เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งต่ำกว่า 1.75 และ 1.50 เท่าตามลำดับ แต่มีปริมาณคลอโรฟิลล์ต่ำกว่าอบที่ 42±2°C 7.69% เนื่องจากที่อุณหภูมิอบแห้งสูงการสลายตัวของคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้น

4.3 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

จากผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ทางด้านคุณค่าทางโภชนาการและคุณภาพทางจุลชีวพบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดในช่วงที่ทำการศึกษาคือที่อุณหภูมิ 80°C เวลา 15 นาที อบต่อที่ 60 °C 3 ชั่วโมง 45 นาที การคำนวณค่าใช้จ่ายในการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทอง จะมีเงินลงทุนเริ่มต้น ในการวิเคราะห์จะวิเคราะห์สำหรับการลงทุนที่มาจากกรณีที่ลงทุนเองนอกจากเงินลงทุนเริ่มต้นแล้ว ยังสามารถแบ่งค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมขึ้นมา ออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ค่าใช้จ่ายคงที่ (Fixed Cost) และ ค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable Cost) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้ (วารุณี เตีย, 2540)

ค่าใช้จ่ายคงที่ ประกอบด้วย

ก. ค่าเสื่อมราคา (Depreciation Cost) คือ ค่าเสื่อมของอุปกรณ์ และเครื่องจักรตามอายุการใช้งาน

ใช้วิธีคำนวณแบบเส้นตรง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$D = \frac{P - S}{L} \quad (11)$$

เมื่อ D = ค่าเสื่อมราคา, (บาท/ปี)

P = มูลค่าแรกซื้อ, บาท

S = มูลค่าซาก, บาท (ไม่นำมาคิด)

L = อายุการใช้งาน, ปี (กำหนดให้มีอายุการใช้งาน 10 ปี)

สำหรับค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งแสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าใช้จ่ายในการผลิตสาหร่ายเกลียวทองแห้ง

รายการ	จำนวน	ราคา(บาท)	รวม (บาท)
เบรกเกอร์ EA53B 3P 40A FUJI	1	960	960
คอนแทคเตอร์ SC-5-1 220V/380V FUJI 32A	1	640	640
สวิตช์ควบคุมอุณหภูมิ TEH48-93301 (0-399)	1	1,600	1,600
ลูกเต้ากระเบื้อง (30A-2) 2 ช่อง	3	20	60
ฟิวส์กระบอก 16A 10X38 มิล RO15 OEZ	6	12	72
ฐานฟิวส์ช็อกเก็ต 10X38 RT18-32/IP circon	3	45	135
เบรกเกอร์BS-1110YT 2P 10A National	1	95	95
สายทนร้อน 3.5 มิล	2	40	80
หางปลาแจกหุ้ม 2-5 น้ำเงิน	100	0.67	67
ตู้ LVT 2	1	735	735
เทอร์มินอลสายนิวตรอน 8P ใหญ่ 12808	1	70	70
ขายึดเทอร์มินอลสายนิวตรอน	1	20	20
รางแมกเนติก/รีเลย์	1	40	40
VCT 4x2.5 PVC/PVC 750 V	10	78	780
สายควบคุมอุณหภูมิ CA-N-3M	5	250	1,250
Heater 1000 Watt	6	1,000	6,000
High pressure blower	20,000	1	20,000
Inverter	14,980	1	14,980
ค่าสร้างตู้อบแห้ง	70,000	1	70,000
รวมค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง			117,584

จากตารางที่ 12 สามารถคำนวณค่าเสื่อมราคาได้จากสมการที่ 11 ได้เท่ากับ 11,758.40 บาท/ปี หรือ 979.87 บาท/เดือน

ค่าใช้จ่ายแปรผัน ประกอบด้วย

ก. ค่าบำรุงรักษา 1,500 บาท/เดือน ประมาณการจากการสอบถามจากช่างซ่อมบำรุงในภาควิชาวิศวกรรมวิศวกรรมเคมี

ข. ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง

ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย = 1.89 บาท/kWh

ค. ค่าแรงงาน สำหรับการอบแห้งสาหร่าย

กำหนดให้ใช้แรงงาน 1 คน ที่อัตราค่าจ้างแรงงาน 8,000 บาท/เดือน ในส่วนของรายรับที่ได้จากการอบแห้ง สาหร่ายพวงนำไปขายเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร หากมีการผลิตวันละ 8 ชั่วโมง ใช้สาหร่ายสด 5.16 kg (คิดจากสาหร่ายสด 430 g/ ถาด จำนวน 6 ถาด/การอบแห้ง 1 ครั้ง) ราคา 1,000 บาท/ kg ซึ่งจะได้สาหร่ายแห้งประมาณ 516 g ใช้ไฟฟ้า 11 kWh ขายกรัมละ 3.50 บาท

ตารางที่ 13 ข้อมูลสำหรับการคำนวณทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งสาหร่ายเกลียวทอง

รายจ่าย	ราคา (บาท/เดือน)	รายรับ	ราคา (บาท/เดือน)
ค่าเสื่อมราคา	979.87	ขายสาหร่ายแห้ง (3,500.00 บาท/kg)	54,180.00
ค่าบำรุงรักษา	1,500.00		
ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้	623.70		
ค่าจ้างแรงงาน	8,000.00		
ค่าสาหร่ายสด	15,480.00		
รวมรายจ่าย	26,583.57		

คำนวณค่า Internal Rate Of Return (IRR) อัตราผลตอบแทนขี้อลด (internal rate of return) เป็นอัตราดอกเบี้ยที่ให้สำหรับการลงทุนที่ประกอบด้วยรายจ่าย (ค่าลบ) และรายรับ (ค่าบวก) ที่เกิดขึ้นในช่วงปกติ

ตารางที่ 14 การคำนวณค่า Internal Rate Of Return (IRR)

ECONOMIC ANALYSIS		
Investment Cost	117,758.40	บาท
Monthly Revenue	46,440.00	บาท/เดือน
Monthly Operation Cost	26,583.57	บาท/เดือน

IRR Calculations	Cash Flow	IRR
Initial Investment	-117,758.40	-
Month 1	19,856.43	#NUM!
Month 2	19,856.43	#NUM!
Month 3	19,856.43	-28%
Month 4	19,856.43	-14%
Month 5	19,856.43	-5%
Month 6	19,856.43	0%
Month 7	19,856.43	4%
Month 8	19,856.43	7%
Month 9	19,856.43	9%
Month 10	19,856.43	11%
Month 11	19,856.43	12%
Month 12	19,856.43	13%
IRR after 12 months	13%	

จากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าการลงทุนบ่อแห่งสาหร่ายเกลียวทองด้วยเครื่องบ่อแห่งระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็กนี้มีความสามารถคืนทุนภายใน 6 เดือน นอกจากนี้อัตราผลตอบแทนขั้วลหลังจากครบ 1 ปี คือ 13%

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ทำการทดลองหาอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 42 ± 2 , 51 ± 4 และ $57\pm 5^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 1.3 m/s และที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง $61\pm 6^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 2.6 m/s ด้วยตู้อบขนาด $1.2\times 1.2\times 1.0$ cm หัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องปล่อยลม 2 mm วิเคราะห์สี คุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายและปริมาณจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคหลังการอบที่สภาวะต่าง ๆ จากนั้นวิเคราะห์ความสัมพันธ์พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 การอบแห้งสาหร่ายเกลียวทอง

การอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ กันพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองประกอบด้วย

1. ความหนาของชั้นสาหร่ายเกลียวทอง เมื่อความหนาของชั้นสาหร่ายเพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้นด้วย
2. อุณหภูมิอากาศอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ($42\pm 2^{\circ}\text{C}$) ปรากฏช่วงอบแห้งคงที่ซึ่งในช่วงนี้การระเหยของความชื้นเกิดขึ้นที่ผิววัสดุเท่านั้น เมื่อการอบแห้งดำเนินไปปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเนื่องจากความต้านทานการถ่ายโอนมวลและความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุไปยังผิวหน้าช้าลง สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะปรากฏเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น
3. ความเร็วลม เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากที่ความเร็วลมสูงการเคลื่อนที่ของความชื้นเกิดได้ง่ายและรวดเร็วขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น

5.2 คุณภาพสาหร่ายเกลียวทองหลังการอบแห้ง

จากการวิเคราะห์คุณภาพสาหร่ายหลังการอบแห้งทั้งทางด้านกายภาพ ทางโภชนาการ และทางด้านจุลินทรีย์พบว่า

1. การอบแห้งที่อุณหภูมิ $42 \pm 2^{\circ}\text{C}$ สามารถรักษาสีเขียวของสาหร่ายได้ดีกว่าที่สภาวะอื่น ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงสีในการอบแห้งด้วยอากาศร้อน คือการสลายตัวของสารคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) และปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง

2. ปริมาณโปรตีนที่อบด้วยเครื่องอบแห้งนี้อยู่ในช่วง 54-64% ของสาหร่ายแห้ง ปริมาณไขมันและคาร์โบไฮเดรตไม่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอากาศอบแห้งอย่างชัดเจนในช่วงที่ทำการศึกษา ปริมาณคลอโรฟิลล์รวมลดลงเมื่ออุณหภูมิตอบแห้งเพิ่มขึ้น การทดลองอบแห้งด้วยอากาศทั้ง 3 อุณหภูมิให้ผลผลิตสุดท้ายที่มีปริมาณคลอโรฟิลล์สูงกว่าอ้างอิง

3. จากการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์พบว่าเมื่ออุณหภูมิตอบแห้งเพิ่มขึ้นในช่วง $42 \pm 2 - 57 \pm 5^{\circ}\text{C}$ สามารถลดปริมาณจำนวนแบคทีเรียได้ และปริมาณแบคทีเรียผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ISO 9002 แต่ไม่สามารถลดเชื้อ *Staphylococcus aureus* และเชื้อ Enterobacteriaceae ให้อยู่ในระดับตามข้อกำหนดของ ISO 9002 ได้ จึงทดลองที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงเหลือ 60°C (ความเร็วลม 1.0 m/s) เนื่องจากไม่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดครบวงนึ่งจึงไม่ควรอบที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน นอกจากนั้นติดตั้งเครื่องกรองอากาศกรองลมก่อนเข้าห้องอบแห้งพบว่าเมื่ออบที่อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 80°C ปริมาณเชื้อ total viable aerobic bacteria count (TVC), *Enterobacteria*, *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus D*, *Salmonella sp.*, *Pseudomonas*, และ *Escherichia coli* ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ISO 9002 ยกเว้น *Clostridium perfringens* ซึ่งมีปริมาณสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนด

5.3 ความสิ้นเปลืองพลังงาน

1. เมื่ออุณหภูมิตอบแห้งลดลงความสิ้นเปลืองพลังงานสูงขึ้น (ค่า SMER เพิ่มขึ้น 7.55, 28.07 และ 43.17% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40°C เป็น $50, 60^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 1.3 m/s และ 80°C 15 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิเป็น 60°C อดต่อ 3 ชั่วโมง 45 นาที ความเร็วลม 1.0 m/s ตามลำดับ) เนื่องจากใช้เวลารอบแห้งนานขึ้นจึงใช้พลังงานอบแห้งสูงขึ้น

2. ความเร็วลมสูงความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่าที่ความเร็วลมต่ำกว่า (ค่า SMER เพิ่มขึ้น 3.52% เมื่อความเร็วลมเพิ่มจาก 1.3 m/s เป็น 2.6 m/s) เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งต่ำ

5.4 สถานะที่เหมาะสมสำหรับอบแห้งสาหร่ายเกลียวทอง

จากการศึกษาด้านสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งในสถานะที่ทำการศึกษา พบว่าการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองที่อุณหภูมิ 80°C 15 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิเป็น 60°C อบอุ่น 3 ชั่วโมง 45 นาที ความเร็วลม 1.0 m/s ให้ผลดีที่สุดด้านปริมาณจุลินทรีย์ และความสิ้นเปลืองพลังงาน กล่าวคือมีปริมาณจุลินทรีย์ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ISO 9002 และมีค่า SMER สูงกว่าที่สถานะอื่นที่ทำการศึกษา

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่หลากหลายขึ้น เพื่อหาข้อดีที่เด่นชัดของการอบแห้งด้วยอากาศ
2. ควรมีการพัฒนาการใช้พลังงานอื่นร่วมกับการอบแห้งด้วยอากาศ เพื่อให้มีการประหยัดพลังงานได้มากขึ้น

บรรณานุกรม

- กิตติพงษ์ เจริญวัฒน์ชัย. 2538. การศึกษาพารามิเตอร์ของการอบแห้งเนื้อในเมล็ดมะม่วงหิมพานต์. รายงานการวิจัยระดับปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- จิตรนา แจ่มเมฆและคณะ. 2540. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จูไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ. 2546. การถ่ายโอนมวลและหลักปฏิบัติการเฉพาะหน่วยพื้นฐาน Mass Transfer and Basic Unit Operations. ภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- บุษยา บุญนาค. 2544. สารออกฤทธิ์ต้านไวรัสจากสาหร่าย Antiviral Compounds from Microalgae สายวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี.
- บริษัท กรีนไคมอนด์ จำกัด. มปป. สาหร่ายเกลียวทอง สไปรูไลน่า ชนิดแคปซูล และชนิดอัดเม็ด [online]. Available: www.gd-1.com/gd1.htm [11มกราคม, 2549]
- เมทินันท์ จินดาทวีผล. ตำแหน่ง กรรมการผู้จัดการห้างหุ้นส่วนสามัญ เอ็มเอสสไปรูไลน่า. 2549. ผู้ให้สัมภาษณ์, 27 พฤศจิกายน 2549.
- ยุทธพงศ์ ประชาสิทธิศักดิ์ เสาวพงศ์ เจริญ และ สุรศักดิ์ สัจจบุตร. 2550. การยืดอายุการเก็บรักษา และการปรับปรุงคุณภาพทางจุลินทรีย์ของปลาร้าด้วยรังสีแกมมา. รายงานวิชาการ. 14 มีนาคม พ.ศ.2550.
- ยุวดี สมิทธิวาสน์. 2542. สาหร่ายเกลียวทอง แบคทีเรียที่มากด้วยคุณสมบัติ. หนังสือพิมพ์ เติมนิวส์วันอาทิตย์ที่ 13 มิถุนายน 2542.
- วารุณี เตีย. 2540. การวิเคราะห์พลังงานทางเศรษฐศาสตร์และการศึกษาการประหยัด และการอนุรักษ์พลังงานในอุตสาหกรรม, เอกสารประกอบการบรรยายสาขาวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สนทยา โสสนุข. 2546. บริษัท ทางด้านจุลินทรีย์อุตสาหกรรม. รายงานวิชาจุลินทรีย์ อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา [online]. Available:http://yalar.yru.ac.th/~dolah/notes/4034605-2-48/FV-13/FV_40465207813.doc [4 กรกฎาคม, 2550]

สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 1-3.

สาหร่ายเกลียวทอง. 2547. โภชนาการเพื่อสุขภาพ. ว.สมาคมร้านขายยา, 22(1):59-63.

สุภัทร์ ไชยกุล. มปป. รู้จักกับสาหร่ายสีไปรูลินา (Spirulina). เวทีวิชาการ. ว.อาหารและยา, 5.

อัตราค่าจ้างแรงงานขั้นต่ำ อัตราปรับใหม่ 1 มกราคม 2550. [online]. Available:

<http://www.trclabourunion.com/c384.htm>

Anderson, B. A. and Singh, R. P. 2005. Modeling the thawing of frozen foods using air impingement technology. *International Journal of Refrigeration*. 29:294-304.

Avci, A. and Can, M. 1999. The analysis of the drying process on unsteady forced convection in thin films of ink. *Applied Thermal Engineering*. 19(6):641-657.

Angioletti, M., Nino, G. and Ruocco, G. 2005. CFD turbulent modeling of jet impingement and its validation by particle image velocimetry and mass transfer measurements. *Int. J. Thermal Sci*, 44:349-356.

Bozkurt, H. and Bayram, M. 2006. Colour and textural attributes of sucuk during ripening. *Meat Science*, 73(2):344-350.

Braud, L. M., Moreira, R.G. and Castell-Perez, M. E. 2001. Mathematical modeling of impingement drying of corn tortillas. *Journal of Food Engineering*, 50:121-128.

Carols, N. and Mitchellc, H. 2004. "A high speed cooking oven having an air impingement heater with an improved orifice configuration". U.S. Pat CA2528539. Dec 23, 2004.

Chen, Y. C., Ma, C. F., Qin, M. and Li, Y.X. 2005. "Theoretical study on impingement heat transfer with single- phase free-surface slot jets". *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48:3381-3386.

Chua, K.J. Chou, S.K. Ho, J.C. and Hawlader, M.N.A. 2002. Heat pump drying: Recent developments and future trends. *Drying Tech*, 20(8):1579-1610.

David z, O. 2000. "Impingement oven airflow devices and method". U.S. Pat WO0056169. Nov 20, 2000.

De Bonis, M. V. and Ruocco, G. 2005. Modelling local heat and mass transfer in food slabs due to air jet impingement. *Journal of Food Engineering*, 78:230-237.

Desmoricux, H. and Decaen, N. 2005. Convective drying of spirulina in thin layer. *Journal of Engineering*, 66:497-503.

- Dirita, C., De Bonis, M. V. And Ruocco, G. 2007. Analysis of food cooling by jet impingement, including inherent conduction. *Journal of Food Engineering*, 80:21-20.
- Douglas s, J. and Paul r, M. 2003. "Conveyerized oven with moisture laden air impingement and method". U.S. Pat WO03082024. Nov 27, 2003.
- Douglas s, J. and Roberto, N. 2005. "Conveyer oven with improved air return and method". U.S. Pat WO2005027644. Mar 31, 2005.
- Kim, Y. Y., Kim, S. K., Jeong, G. H. and Jeong, S. 2005. An experimental study on the quantitative interpretation of local convective heat transfer for a plate fin and tube heat exchanger using the lumped capacitance method. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49:230-239.
- Erdogdu, F., Ferrua, M., Singh, S. K. And Singh, R. P. 2007. Air-impingement cooling of boiled eggs: Analysis of flow visualization and heat transfer. *Journal of Food Engineering*, 79: 920-928.
- Hayashi, K., Hayashi, T. and Moria, N. 1993. An extraction from *Spirulina platensis* is a selective inhibitor of Herpes simplex virus type 1 penetration into HeLa cell, *Plytotherapy*, 7:76-80.
- Hayashi, K., Hayashi, T. and Moria, N. 1993. A nature sulfated polysaccharide, calcium spirulan, isolated from *Spirulina platensis*: in vitro and ex vivo evaluation of anti herpes simplex virus and anti- human immunodeficiency virus activities. *AID Research and Human Retroviruses*, 12(15):1463-1467.
- Lodi, A., Soletto, D., Solisio, C. and Converti, A. 2007. Chromium (III) removal by *Spirulina platensis* biomass. *Chem. Eng. J*, in press.
- Lujan-Acosta, J. and Moreira, R. G. 1997. Reduction of oil in tortilla chips using impingement drying. *Lebesm- Wiss. U.-Technol*, 30:834-840.
- Methakhup. S., Chiewchan, N. and Devahastin, S. 2005. Effects of drying methods and conditions on drying kinetics and quality of Indian gooseberry flake. *LWT*, 38:579-587.
- Moreira, R. G. 2001. Impingement drying of foods using hot air and superheated steam. *Journal of Engineering*, 49:291-295.
- Morist, A., Montesinos, J. L., Cusido, J. A. and Godia, F. 2001. Recovery and treatment of *spirulina platensis* cells cultured in a continuous photobioreactor to be used as food. *Process Biochem*, 37:535-547.

- National Food Institute Thailand (2547). ภัยในอาหาร, สถาบันอาหาร, พฤษภาคม 2547, p.15- 18.
- Sarkar, A. and Singh, K. P. 2004. Air impingement technology for food processing: visualization studies. *Lebensm- Wiss. U.-Technol*, 37:873-879.
- Shi, Q. L., Xue, C.H., Zhao. Y., Li, Z. J. and Wang, X. Y. 2007. Drying characteristics of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier. *Journal of Food Engineering*, 84(1):12-20.
- Wahlby, U., Skjoldebrand, C., Junker, E. 2000. Impact of impingement on cooking time and food quality. *Journal of Engineering*, 43:179-187.
- Wang, J. and Sheng, K. 2007. Far-infrared and microwave drying of peach. *LWT*, 39:247-255.
- Wang, J. and Xi, Y. S. 2005. Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. *Journal of Food Engineering*, 68(4):505-511.
- Xue, J. and Walker, C.E. 2002. Humidity change and its effects on baking in an electrically heated air jet impingement oven. *Food Research International*, 36:561-569.
- Yamsaengsung, R. and Buaphud, K. 2003. Superheated steam drying of rubber wood. PSU-UNS International Conference 2003. Songkla, Dec, 11-12, 2003.

ภาคผนวก ก.

1. ผลการทดลองจากเครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ

1.1 อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 60°C ความหนาของชั้นสำหรับ 4 mm

ตารางที่ 1 อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 60°C ความหนาของชั้นสำหรับ 4 mm

Drying time (hr)	Drying rate(g water/(kg dm min)			Moisture content, d.b.		
	1	2	average	1	2	average
0	16.46	20.00	18.23	7.05	6.87	6.96
1	17.19	18.83	18.01	5.29	6.43	5.86
2	22	16.68	19.34	4.38	5.18	4.78
3	13.45	15.45	14.45	3.14	4.10	3.62
4	15.93	13.61	14.77	1.68	3.84	2.76
5	11.72	11.92	11.82	2.21	1.53	1.87
6	9.88	9.62	9.75	1.26	1.06	1.16
7	4.15	4.31	4.23	0.66	0.48	0.57
8	3.75	3.55	3.65	0.36	0.28	0.32
9	1.11	1.05	1.08	0.11	0.09	0.10
10	0.03	0.07	0.05	0.06	0.02	0.04

1.2 อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 60°C ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm

ตารางที่ 2 อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 60°C ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm

Drying time(hr)	Moisture content d.b.			rate(g water/kg dm min)		
	1	2	average	1	2	average
0	8.59	6.87	7.73	50.94	32.47	41.70
1	5.53	4.92	5.23	39.86	32.08	35.97
2	3.14	3.00	3.07	32.18	24.30	28.24
3	1.21	1.54	1.37	15.25	16.61	15.93
4	0.29	0.54	0.42	4.04	7.27	5.66
5	0.05	0.11	0.08	0.85	1.11	0.98

1.3 อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 50°C ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm

ตารางที่ 3 อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 50°C ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm

Drying time (hr)	Moisture content, d.b.				Drying rate(g water/(kg dm min)			
	1	2	3	average	1	2	3	average
0	7.38	7.28	7.20	7.28	36.84	20.97	15.00	24.27
1	5.17	6.02	6.30	5.83	29.64	21.81	22.31	24.59
2	3.39	4.71	4.96	4.35	23.94	31.38	19.99	25.10
3	1.95	2.83	3.76	2.85	17.91	23.18	16.68	19.26
4	0.88	1.44	2.76	1.69	5.00	13.21	16.60	11.60
5	0.46	0.64	1.76	0.95	5.24	7.53	13.06	8.61
6	0.26	0.19	0.98	0.48	2.74	0.10	8.60	3.81
7	0.10	0.18	0.46	0.25	0.24	0.86	5.02	2.04
8	0.09	0.13	0.16	0.13	0.21	0.83	1.36	0.80

1.4 อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 40°C ความหนาของชั้นสาหร่าย 2 mm

ตารางที่ 4 อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 40°C ความหนาของชั้นสาหร่าย 2 mm

Drying time (hr)	Moisture content, d.b.			Drying rate (g water/kg dm min)		
	1	2	average	1	2	average
0	7.11	7.54	7.25	15.28	16.62	15.95
1	6.95	6.98	6.38	15.66	15.85	15.76
2	6.57	5.62	5.14	16.16	15.27	15.72
3	5.68	4.77	4.25	15.70	15.47	15.58
4	4.80	3.83	3.32	14.24	14.51	14.37
5	3.63	2.98	2.52	13.17	13.14	13.16
6	2.78	2.19	1.76	10.93	10.23	10.58
7	1.54	1.35	1.03	10.51	6.84	8.67
8	1.27	0.72	0.51	7.57	2.69	5.13
9	1.09	0.27	0.20	3.42	0.71	2.07
10	0.51	0.06	0.08	0.87	0.13	0.50
11	0.24	0.01	0.05	0.13	0.50	0.31

2. ผลการทดลองจากเครื่องอบแห้งระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

2.1 การกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดในตู้อบเมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 40°C, 1.3 m/s

ตารางที่ 5 การกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดในตู้อบเมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 40°C, 1.3 m/s

time(hr)	air temperature out	temperature in dryer					
		tray 1	tray 2	tray 3	tray 4	tray 5	tray 6
0	38	40	39	38	38	38	36
1	51	42	43	42	38	41	40
2	51	43	43	43	42	42	40
3	52	42	42	42	41	43	40
4	62	43	44	44	42	40	39
5	53	42	44	44	43	42	39
6	53	43	44	44	44	42	39
7	49	43	43	42	43	51	39
8	45	43	44	44	45	42	40
9	45	44	44	44	45	42	40
10	43	44	44	44	43	37	40
11	45	46	46	47	46	43	43
12	46	46	46	46	47	43	42

2.2 อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $42\pm 2^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm

ตารางที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $42\pm 2^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm

Drying time, hr	Moisture content d.b. ในแต่ละภาค							Standard deviation
	1	2	3	4	5	6	average	
0	10.68	10.68	10.70	10.71	10.65	10.65	10.68	0.02
1	9.53	9.53	9.12	9.03	9.03	9.05	9.21	0.24
2	8.50	8.29	7.59	7.41	7.54	7.52	7.81	0.46
3	7.49	7.38	6.25	6.23	5.99	6.17	6.59	0.66
4	6.50	6.33	5.29	5.17	4.73	4.88	5.48	0.75
5	5.18	5.23	3.97	4.09	3.60	3.77	4.31	0.72
6	4.00	3.80	3.06	3.12	2.67	2.76	3.23	0.55
7	2.71	2.55	2.34	2.31	1.82	1.96	2.28	0.34
8	1.52	1.38	1.77	1.60	1.09	1.29	1.44	0.24
9	0.63	0.56	1.27	1.00	0.58	0.75	0.80	0.28
10	0.24	0.22	0.91	0.61	0.22	0.41	0.44	0.28
11	0.07	0.08	0.45	0.31	0.12	0.17	0.20	0.15
12	0.06	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.01

ตารางที่ 7 อัตราการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $42\pm 2^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสาหร่าย 2 mm

Drying time, hr	Drying Rate(g water/(kg dm min) ในแต่ละภาค							
	1	2	3	4	5	6	average	Standard deviation
1	19.20	19.13	26.37	27.92	27.02	26.62	24.38	4.07
2	19.65	20.59	25.48	27.03	24.81	25.50	23.84	2.99
3	19.75	20.26	22.29	19.66	25.84	22.47	21.71	2.37
4	20.56	21.42	19.05	17.62	20.98	21.52	20.19	1.54
5	21.88	20.36	19.42	17.95	18.81	18.50	19.49	1.43
6	21.78	20.91	15.31	16.31	15.52	16.94	17.80	2.82
7	21.43	20.80	11.97	13.43	14.22	13.25	15.85	4.15
8	19.91	19.44	9.52	11.78	12.14	11.25	14.01	4.48
9	14.80	13.70	8.23	10.09	8.45	9.02	10.72	2.83
10	6.54	5.64	5.95	6.39	6.00	5.55	6.01	0.40
11	2.79	2.36	4.21	5.01	1.67	4.03	3.34	1.27
12	0.15	0.55	0.52	4.22	0.84	1.85	1.36	1.52

2.3 Specific Moisture Evaporation Rate (SMER) (อุณหภูมิ $42\pm 2^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)

ตารางที่ 8 Specific Moisture Evaporation Rate (SMER) (อุณหภูมิ $42\pm 2^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)

น้ำที่ระเหยทั้งหมด (kg)				พลังงานที่ใช้ kWh				SMER			
1	2	3	average	1	2	3	average	1	2	3	average
2.16	2.34	2.34	2.28	7.50	7.00	7.00	7.17	0.29	0.33	0.33	0.32

2.4 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงความชื้น (อุณหภูมิ $42\pm 2^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)

ตารางที่ 9 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงความชื้น (อุณหภูมิ $42\pm 2^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)

energy consumption (kWh)			Moisture content d.b.		
1	2	average	1	2	average
0	0	0	10.68	10.67	10.68
1	0.5	0.75	9.26	9.17	9.22
1.5	1.5	1.5	8.03	7.59	7.81
2	2	2	6.71	6.47	6.59
3	2.5	2.75	5.49	5.49	5.49
3.5	3.5	3.5	4.32	4.32	4.32
4	4	4	3.35	3.12	3.24
4.5	4.5	4.5	2.48	2.09	2.28
5	5	5	1.66	1.23	1.44
5.5	6	5.75	0.98	0.62	0.80
6	6.5	6.25	0.59	0.29	0.44
6.5	6.5	6.5	0.27	0.14	0.20
7	7.5	7.25	0.05	0.07	0.06

2.5 การกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดในตู้อบเมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 50°C , 1.3 m/s

ตารางที่ 10 การกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดในตู้อบเมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 50°C , 1.3 m/s

time(hr)	air temperature out	temperature in dryer					
		tray 1	tray 2	tray 3	tray 4	tray 5	tray 6
0	52	53	52	46	49	49	44
1	66	51	52	49	49	52	52
2	67	52	52	49	50	51	51
3	65	54	54	53	53	52	52
4	59	50	51	49	51	49	47
5	61	54	54	56	55	52	50
6	59	54	54	54	54	54	53
7	47	49	49	48	51	52	52

2.6 อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $51\pm 4^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm

ตารางที่ 11 การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $51\pm 4^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm

Drying time, hr	Moisture content d.b. ในแต่ละภาค							Standard deviation
	1	2	3	4	5	6	average	
0	10.79	10.79	10.79	10.79	10.79	10.79	10.79	0.00
1	9.09	9.01	9.03	8.96	8.09	7.79	8.66	0.57
2	7.04	6.72	7.10	6.94	5.63	5.17	6.43	0.82
3	4.86	4.31	5.21	5.05	3.85	3.09	4.39	0.82
4	2.59	2.27	3.31	3.21	2.46	1.80	2.61	0.57
5	0.91	0.79	1.63	1.64	1.27	0.69	1.16	0.42
6	0.25	0.22	0.57	0.60	0.49	0.33	0.41	0.17
7	0.03	0.06	0.11	0.05	0.04	0.03	0.05	0.03

ตารางที่ 12 อัตราการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $51\pm 4^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm

Drying time, hr	Drying Rate(g water/(kg dm min) ในแต่ละภาค							Standard deviation
	1	2	3	4	5	6	average	
1	28.28	29.61	42.43	40.16	76.91	79.09	49.41	22.85
2	34.20	38.21	36.37	36.42	55.50	56.09	42.80	10.15
3	36.36	40.24	28.93	31.61	29.97	27.24	32.39	4.95
4	37.93	34.00	17.72	18.56	12.03	10.00	21.71	11.58
5	27.87	24.63	14.74	15.32	3.83	4.57	15.16	9.92
6	11.02	9.42	12.59	9.50	0.66	1.69	7.48	5.03
7	3.64	2.75	7.60	6.80	0.31	0.62	3.62	3.05

2.7 Specific Moisture Evaporation Rate (SMER) (อุณหภูมิ $51\pm 4^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)ตารางที่ 13 Specific Moisture Evaporation Rate (SMER) (อุณหภูมิ $51\pm 4^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)

น้ำที่ระเหยทั้งหมด (kg)				พลังงานที่ใช้ kWh				SMER			
1	2	3	average	1	2	3	average	1	2	3	average
2.38	2.26	2.36	2.33	7.00	7.50	7.50	7.33	0.34	0.30	0.31	0.32

2.8 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงความชื้น (อุณหภูมิ $51\pm 4^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)ตารางที่ 14 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงความชื้น (อุณหภูมิ $51\pm 4^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)

energy consumption (kWh)			Moisture content d.b.		
1	2	average	1	2	average
0	0	0	9.96	11.62	10.79
1	1	1	7.28	8.84	8.06
2	2	2	5.32	5.80	5.56
3	3	3	3.57	3.61	3.59
4	3.5	3.75	2.20	1.86	2.03
4.5	4.5	4.5	1.16	0.59	0.87
5	5	5	0.51	0.08	0.30
6	6	6	0.08	0.03	0.05

2.9 การกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดในตู้อบเมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 60°C , 1.3 m/s

ตารางที่ 15 การกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดในตู้อบเมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 60°C , 1.3 m/s

time(hr)	air temperature out	temperature in dryer					
		tray 1	tray 2	tray 3	tray 4	tray 5	tray 6
0	53	54	54	48	43	45	49
1	86	59	61	64	64	58	57
2	85	61	61	60	56	60	62
3	92	61	61	64	63	60	60
4	69	61	61	59	57	60	60
5	66	60	59	50	48	56	57
6	67	58	58	60	60	58	58

2.10 อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $57\pm 5^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm

ตารางที่ 16 การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $57\pm 5^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm

Drying time, hr	Moisture content d.b. ในแต่ละถาด							Standard deviation
	1	2	3	4	5	6	average	
0	10.60	10.59	10.59	10.59	10.61	10.59	10.60	0.01
1	7.41	7.61	6.45	7.45	5.58	5.63	6.69	0.93
2	4.65	4.59	3.87	4.81	2.45	2.27	3.78	1.14
3	1.94	1.76	1.78	2.35	1.00	0.87	1.61	0.57
4	0.27	0.30	0.45	0.68	0.45	0.28	0.41	0.16
5	0.08	0.10	0.08	0.14	0.08	0.06	0.09	0.03
6	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.01

ตารางที่ 17 อัตราการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $57\pm 5^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสำหรับ 2 mm

Drying time, hr	Drying Rate(g water/(kg dm min) ในแต่ละภาค							average	Standard deviation
	1	2	3	4	5	6			
1	53.14	49.66	69.06	52.40	83.03	82.81	65.02	15.45	
2	46.07	50.38	42.94	43.94	51.64	55.87	48.47	5.00	
3	45.13	47.21	34.92	41.07	23.91	23.47	35.95	10.38	
4	27.80	24.30	22.08	27.79	8.79	9.73	20.08	8.67	
5	3.16	3.35	6.15	9.05	6.09	3.61	5.24	2.31	
6	0.40	0.62	0.39	1.30	0.48	0.17	0.56	0.39	

2.11 Specific Moisture Evaporation Rate (SMER) (อุณหภูมิ $57\pm 5^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)

ตารางที่ 18 Specific Moisture Evaporation Rate (SMER) (อุณหภูมิ $57\pm 5^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)

น้ำที่ระเหยทั้งหมด (kg)				พลังงานที่ใช้ kWh				SMER			
1	2	3	average	1	2	3	average	1	2	3	average
2.34	2.30	2.37	2.34	6.00	6.50	6.00	6.17	0.39	0.35	0.39	0.38

2.12 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงความชื้น (อุณหภูมิ $57\pm 5^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)

ตารางที่ 19 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงความชื้น (อุณหภูมิ $57\pm 5^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s)

energy consumption (kWh)				Moisture content d.b.			
1	2	3	average	1	2	3	average
0.0	0	0	0.0	10.46	9.22	12.15	10.61
1.5	1.5	1.5	1.5	5.98	5.72	7.88	6.53
2.5	3	2.5	2.7	3.22	2.87	4.76	3.62
3.5	4	3.5	3.7	1.50	1.03	2.54	1.69
4.5	5	4.5	4.7	0.52	0.11	0.51	0.38
5.5	6	5.5	5.7	0.12	0.03	0.10	0.08
6.0	6.5	6	6.2	0.09	0.02	0.06	0.06

2.13 การกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดในตู้อบเมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 60°C , 2.6 m/s

ตารางที่ 20 การกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดในตู้อบเมื่ออุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 60°C , 2.6 m/s

time(hr)	air temperature out	temperature in dryer					
		tray 1	tray 2	tray 3	tray 4	tray 5	tray 6
0	63	60	60	58	58	62	61
0.5	74	64	65	57	60	65	58
1	81	65	66	54	53	64	63
1.5	81	60	61	52	49	61	62
2	80	61	62	53	56	60	60
2.5	66	60	61	52	57	61	61
3	57	60	62	57	56	64	63
3.5	59	61	61	58	59	62	62

2.14 อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $61\pm 6^{\circ}\text{C}$, 2.6 m/s ความหนาของชั้นสาหร่าย 2 mm

ตารางที่ 21 การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $61\pm 6^{\circ}\text{C}$, 2.6 m/s ความหนาของชั้นสาหร่าย 2 mm

Drying time, hr	Moisture content d.b. ในแต่ละถาด							Standard deviation
	1	2	3	4	5	6	average	
0	11.27	11.27	11.27	11.27	11.27	11.27	11.27	0.00
1	5.63	6.48	5.50	5.84	3.29	3.76	5.08	1.26
2	0.75	1.38	0.98	0.97	0.17	0.16	0.73	0.49
3	0.07	0.10	0.09	0.06	0.02	0.00	0.06	0.04

ตารางที่ 22 อัตราการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ $61\pm 6^{\circ}\text{C}$, 1.3 m/s ความหนาของชั้นสาหร่าย 2 mm

Drying time, hr	Drying Rate(g water/(kg dm min) ในแต่ละภาค							Standard deviation
	1	2	3	4	5	6	average	
1	93.99	79.90	96.25	90.48	132.99	125.17	103.13	21.01
2	81.44	84.96	75.30	81.23	51.97	60.07	72.50	13.38
3	11.19	21.35	14.90	15.17	2.66	2.55	11.30	7.49

2.15 Specific Moisture Evaporation Rate (SMER) (อุณหภูมิ $61\pm 6^{\circ}\text{C}$, 2.6 m/s)

ตารางที่ 23 Specific Moisture Evaporation Rate (SMER) (อุณหภูมิ $61\pm 6^{\circ}\text{C}$, 2.6 m/s)

น้ำที่ระเหยทั้งหมด (kg)				พลังงานที่ใช้ kWh				SMER			
1	2	3	average	1	2	3	average	1	2	3	average
2.34	2.30	2.37	2.34	6.00	6.50	6.00	6.17	0.39	0.35	0.39	0.38

2.16 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงความชื้น (อุณหภูมิ $61\pm 6^{\circ}\text{C}$, 2.6 m/s)

ตารางที่ 24 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงความชื้น (อุณหภูมิ $61\pm 6^{\circ}\text{C}$, 2.6 m/s)

energy consumption (kWh)			Moisture content d.b.		
1	2	average	1	2	average
0	0	0	11.03	11.51	11.27
1	1	1	6.43	9.49	7.96
2	2	2	3.94	6.22	5.08
3.5	3.5	3.5	2.86	2.28	2.57
4.5	4.5	4.5	1.26	0.20	0.73
5.5	5.5	5.5	0.19	0.13	0.16
6	6	6	0.08	0.04	0.06
6	6	6	0.04	0.04	0.04

ตารางที่ 25 การเปลี่ยนแปลงสีที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Drying Temperature (°C)	L	a	b
สาหร่ายสด	13.12	-9.13	12.18
42±2	23.34	-3.84	7.64
51±4	22.69	-4.48	6.67
57±5	22.55	-4.66	6.11
80°C 15 min, 60°C 3 hr 45 min	21.11	-3.3	5.91
Spirumate	25.94	-12.80	4.93

3. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

อัตราการระเหยของน้ำจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วลม โดยวิธีนี้จะทำให้ความหนาของชั้นอากาศนิ่งที่อยู่รอบ ๆ ผิวน้ำลดลง

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนในการอบแห้งแบบไหลเวียนแทรกผ่านนี้สามารถหาได้จากสมการ (10) (จูไรวัลย์, 2546)

$$h = 1.17G^{0.37} \quad (10)$$

เมื่อ h = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน มีหน่วย $W/m^2 K$

G = ความเร็วเชิงมวลของอากาศ มีหน่วย $kg/hr m^2$

สมการนี้ใช้ได้เมื่อก๊าซร้อนเป็นอากาศร้อนเคลื่อนที่ตั้งฉากกับพื้นที่อบแห้ง โดยก๊าซร้อนมีช่วงความเร็วเชิงมวลเป็น $3900-19500 kg/hr m^2$ หรือช่วงความเร็วลมเป็น $0.9-4.6 m/s$

1. การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเมื่อสภาวะการอบแห้งเป็นดังนี้

1. ความเร็วลมเท่ากับ $1.3 m/s$
2. อุณหภูมิการอบแห้ง $42 \pm 2^\circ C$
3. อุณหภูมิกระเปาะเปียก $25^\circ C$

จากแผนภูมิอากาศชื้น (สมชาติ, 2540) อ่านค่าปริมาตรจำเพาะของอากาศ (humid volume) ที่เข้าสู่เครื่องได้ $0.908 m^3/kg$ dry air อัตราส่วนความชื้น $0.013 kg/kg$ dry air

คำนวณความหนาแน่นของอากาศแห้ง $1 kg$ + ความชื้น $0.013 kg$ ได้

$$\rho = \frac{1 + 0.013}{0.908} = 1.116 \frac{kg}{m^3}$$

ดังนั้นอัตราของก๊าซที่เข้าสู่เครื่องเป็น

$$G = \rho v = (1.116 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(1.3 \frac{\text{m}}{\text{s}})(3600 \frac{\text{s}}{\text{hr}}) = 5221.20 \frac{\text{kg}}{\text{hr m}^2}$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเป็น

$$h = 1.17G^{0.37} = 1.17(5221.20)^{0.37} = 27.78 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

2. การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเมื่อสภาวะการอบแห้งเป็นดังนี้

1. ความเร็วลมเท่ากับ 1.3 m/s
2. อุณหภูมิการอบแห้ง $51 \pm 4^\circ\text{C}$
3. อุณหภูมิกระเปาะเปียก 25°C

จากแผนภูมิอากาศชื้น (สมชาติ, 2540) อ่านค่าปริมาตรจำเพาะของอากาศ (humid volume) ที่เข้าสู่เครื่องได้ $0.930 \text{ m}^3/\text{kg dry air}$ อัตราส่วนความชื้น $0.0097 \text{ kg/kg dry air}$

คำนวณความหนาแน่นของอากาศแห้ง 1 kg + ความชื้น 0.0097 kg ได้

$$\rho = \frac{1 + 0.0097}{0.930} = 1.086 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

ดังนั้นอัตราของก๊าซที่เข้าสู่เครื่องเป็น

$$G = \rho v = (1.086 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(1.3 \frac{\text{m}}{\text{s}})(3600 \frac{\text{s}}{\text{hr}}) = 5082.48 \frac{\text{kg}}{\text{hr m}^2}$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเป็น

$$h = 1.17G^{0.37} = 1.17(5082.48)^{0.37} = 27.51 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

3. การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเมื่อสภาวะการอบแห้งเป็นดังนี้

1. ความเร็วลมเท่ากับ 1.3 m/s
2. อุณหภูมิการอบแห้ง $57 \pm 5^\circ\text{C}$
3. อุณหภูมิกระเปาะเปียก 25°C

จากแผนภูมิอากาศชื้น (สมชาติ, 2540) อ่านค่าปริมาตรจำเพาะของอากาศ (humid volume) ที่เข้าสู่เครื่องได้ $0.940 \text{ m}^3/\text{kg dry air}$ อัตราส่วนความชื้น $0.007 \text{ kg/kg dry air}$

คำนวณความหนาแน่นของอากาศแห้ง 1 kg + ความชื้น 0.007 kg ได้

$$\rho = \frac{1 + 0.007}{0.940} = 1.071 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

ดังนั้นอัตราของก๊าซที่เข้าสู่เครื่องเป็น

$$G = \rho v = (1.071 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(1.3 \frac{\text{m}}{\text{s}})(3600 \frac{\text{s}}{\text{hr}}) = 5012.28 \frac{\text{kg}}{\text{hr m}^2}$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเป็น

$$h = 1.17G^{0.37} = 1.17(5012.28)^{0.37} = 27.37 \frac{W}{m^2 K}$$

4. การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเมื่อสภาวะการอบแห้งเป็นดังนี้

1. ความเร็วลมเท่ากับ 2.6 m/s
2. อุณหภูมิการอบแห้ง $61 \pm 6^\circ C$
3. อุณหภูมิกระเปาะเปียก $25^\circ C$

จากแผนภูมิอากาศชื้น (สมชาติ, 2540) อ่านค่าปริมาตรจำเพาะของอากาศ (humid volume) ที่เข้าสู่เครื่อง ได้ $0.950 \text{ m}^3/\text{kg dry air}$ อัตราส่วนความชื้น $0.004 \text{ kg/kg dry air}$

คำนวณความหนาแน่นของอากาศแห้ง $1 \text{ kg} +$ ความชื้น 0.007 kg ได้

$$\rho = \frac{1 + 0.004}{0.950} = 1.057 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

ดังนั้นอัตราของก๊าซที่เข้าสู่เครื่องเป็น

$$G = \rho v = (1.057 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(2.6 \frac{\text{m}}{\text{s}})(3600 \frac{\text{s}}{\text{hr}}) = 9892.04 \frac{\text{kg}}{\text{hr m}^2}$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเป็น

$$h = 1.17G^{0.37} = 1.17(9892.04)^{0.37} = 35.19 \frac{W}{m^2 K}$$

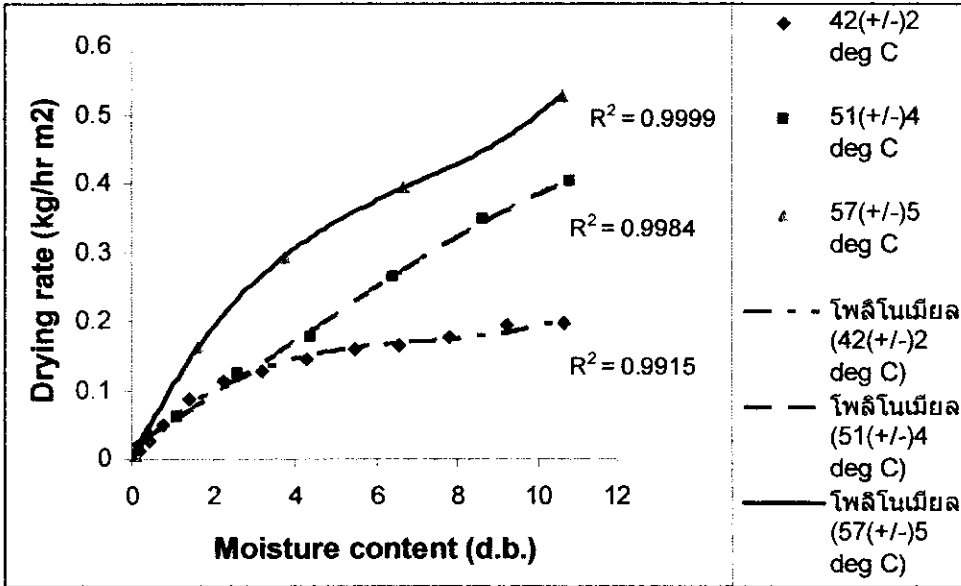
จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสามารถคำนวณอัตราการอบแห้งรวม

ในช่วงอัตราคงที่ได้จากสมการที่ 10 (จูไรวัลย์, 2546)

$$R_{CT} = R_C A = \frac{h(T - T_w)A}{\lambda_w} \quad (10)$$

- เมื่อ
- R_{CT} = อัตราการอบแห้งรวม, $\text{kg H}_2\text{O/hr}$
 - R_C = อัตราการอบแห้งคงที่, $\text{kg H}_2\text{O/hr m}^2$
 - h = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน, $\text{W/m}^2 \text{ K}$
 - T = อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, K
 - T_w = อุณหภูมิกระเปาะเปียก, K
 - A = พื้นที่อบแห้ง, m^2
 - λ_w = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ, J/kg

จากภาพประกอบ 35 จะเห็นว่าเฉพาะที่อุณหภูมิอบแห้ง $42 \pm 2^\circ\text{C}$ ปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งที่มีค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 0.16 kg/hr m^2



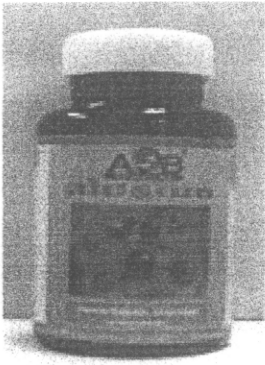
ภาพประกอบ 35 อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเร็วลม 1.3 m/s

สามารถคำนวณอัตราการอบแห้งคงที่ได้เมื่ออุณหภูมิกระแห้ง 42°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก 25°C จากตารางไอน้ำจะได้ค่า $\lambda_w = 2442.3 \text{ kJ/kg}$

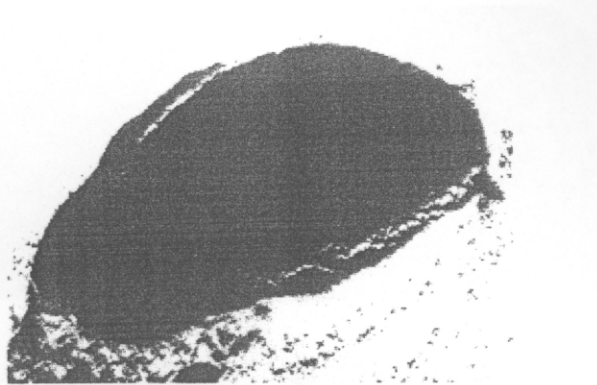
$$R_c = \frac{(27.78 \frac{W}{m^2 K})(42 - 25)K}{2442.3 \times 1000 J / kg} (3600 \frac{s}{hr}) = 0.70 \frac{kg}{hr m^2}$$

จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง 4 เท่า เนื่องจากสมการนี้มาจากสมมติฐานที่ว่าวัสดุอบแห้งได้รับความร้อนและปริมาณลมสม่ำเสมอตลอดช่วงการอบแห้ง แต่การทดลองจริงเนื่องจากมีหัวฉีด เหนือถาดอบแห้งแต่ละถาด 16 หัวฉีด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องปล่อยลม 2 มิลลิเมตร ดังนั้นลมที่วัสดุอบแห้งได้รับจึงไม่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งถาดอบ

5. ผลิตภัณฑ์สาหร่ายเกลียวทองแห้งสปิชีส์ฟลาเทนซิสที่มีขายตามท้องตลาดชนิดแคปซูล ขนาด 100 แคปซูล น้ำหนักสุทธิ 60 กรัม ยี่ห้อสไปรูเมท ซึ่งได้รับการรับรองคุณภาพจากมาตรฐาน ISO 9001 GMP HACCP ผลิตและจำหน่ายโดยบริษัท แอดวานซ์ สไปรูลิना ไบโอเทคโนโลยี จำกัด ที่ตั้ง 351 ม.1 ต.ศาลา อ.เกาะคา จ.ลำปาง 52130 แสดงผังภาพประกอบ 36a และ b



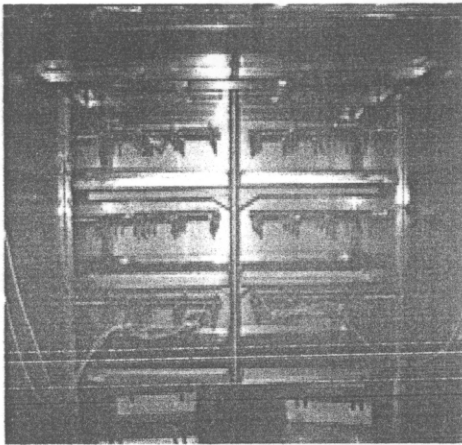
a.



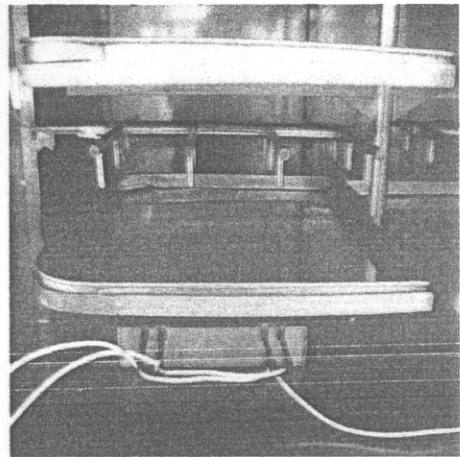
b.

ภาพประกอบ 36 ผลิตภัณฑ์สำหรับยาลูกอมของยี่ห้อสไปรูเมท a. ขวดผลิตภัณฑ์สไปรูเมท
b. ผงสำหรับยาลูกอมในแคปซูลยี่ห้อสไปรูเมท

6. ภาพประกอบสำหรับยาลูกอมของระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

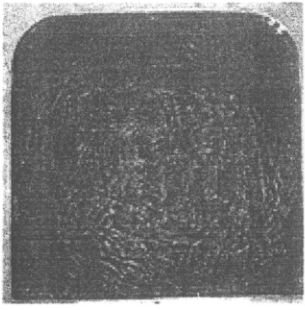


a.



b.

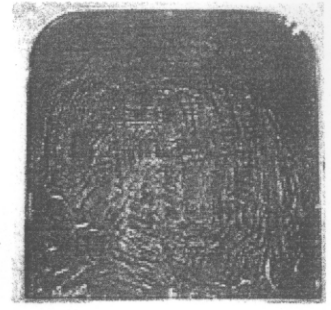
ภาพประกอบ 37 ภายในเครื่องอบแห้ง a. สำหรับระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ $42 \pm 2^{\circ}\text{C}$ b. ลักษณะ
หัวฉีดเหนือถาดอบ



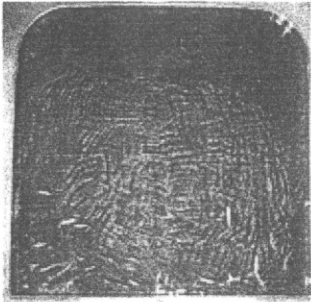
A



B



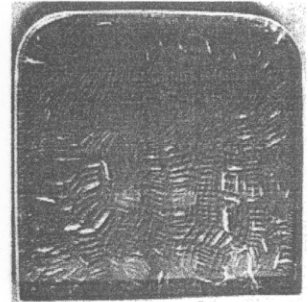
C



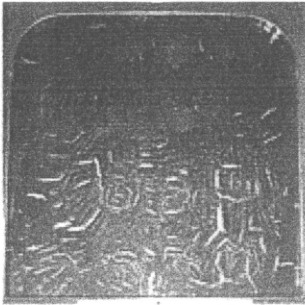
D



E



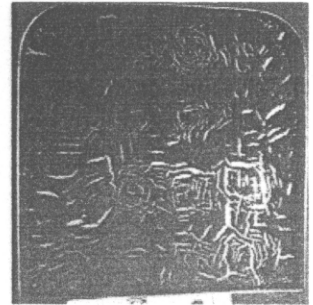
F



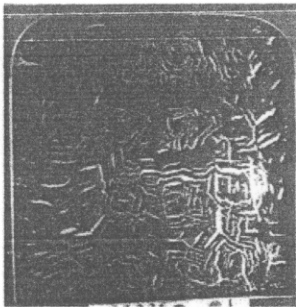
G



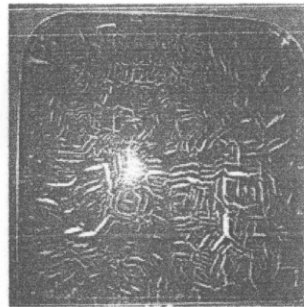
H



I

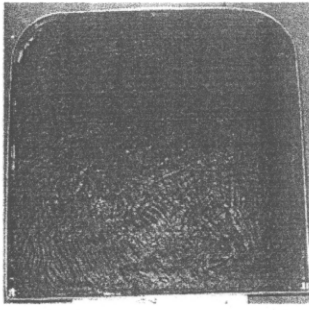


J

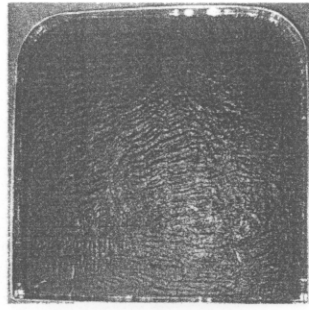


K

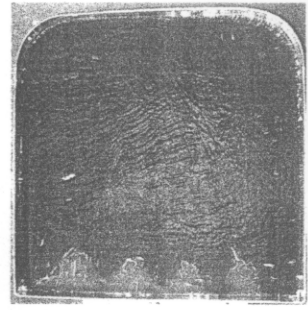
ภาพประกอบ 38 สำหรับเกลียวทองถาดที่ 2 ขณะอบแห้งที่อุณหภูมิ $42 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา A. 0 ชั่วโมง B. 1 ชั่วโมง C. 2 ชั่วโมง D. 3 ชั่วโมง E. 4 ชั่วโมง F. 5 ชั่วโมง G. 6 ชั่วโมง H. 7 ชั่วโมง I. 8 ชั่วโมง J. 9 ชั่วโมง K. 10 ชั่วโมง



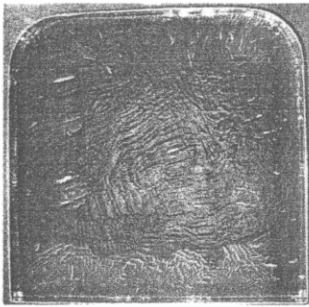
A



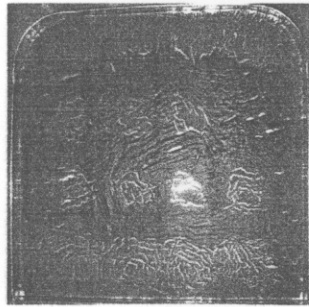
B



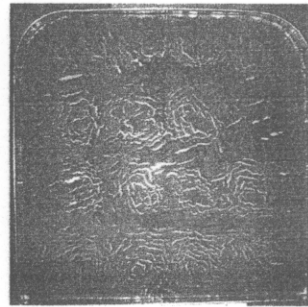
C



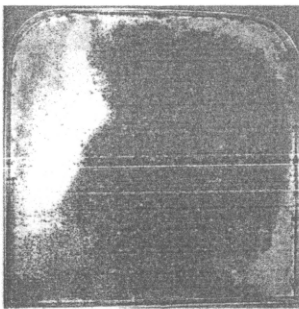
D



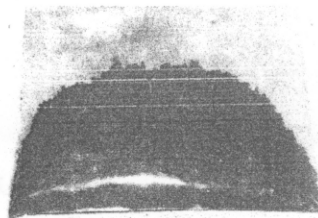
E



F

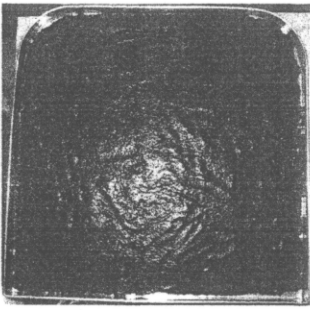


G

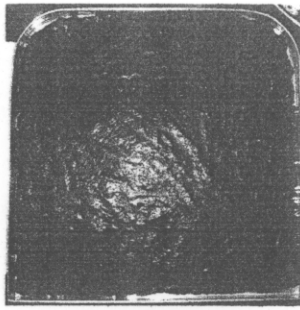


H

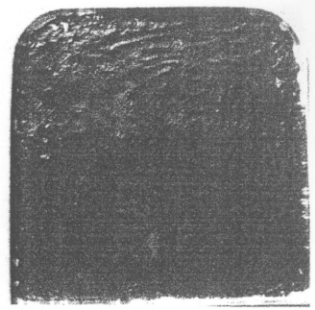
ภาพประกอบ 39 สำหรับเกลียวทองถาดที่ 2 ขณะอบแห้งที่อุณหภูมิ $57 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา A. 0 ชั่วโมง B. 1 ชั่วโมง C. 2 ชั่วโมง D. 3 ชั่วโมง E. 4 ชั่วโมง F. 5 ชั่วโมง G. สำหรับแห้งสุดท้าย H. สำหรับแห้งบรรจุในถุงซิปล็อก



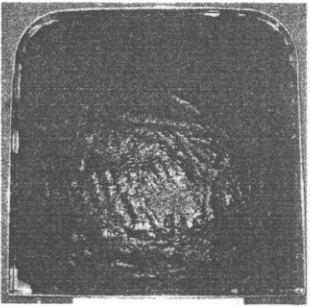
A



B



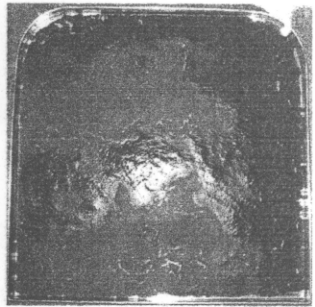
C



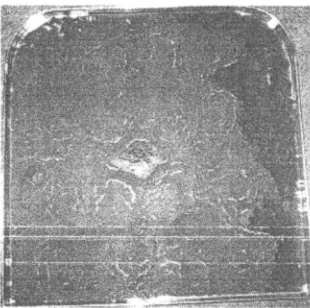
D



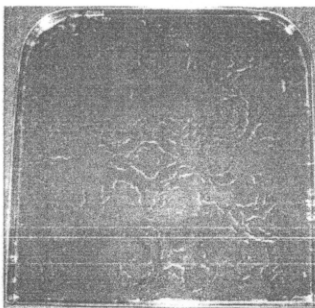
E



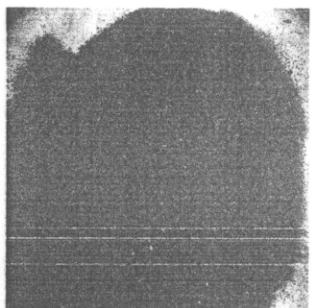
F



G

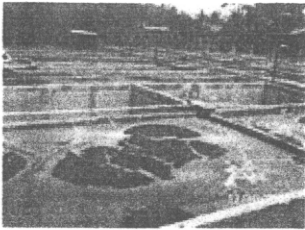


H



I

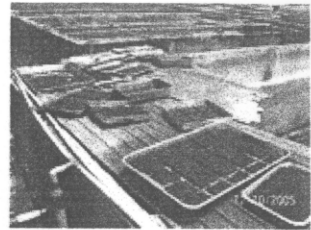
ภาพประกอบ 40 สำหรับเกลียวทองถาดที่ 2 ขณะอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C ที่เวลา A. 0 นาที B. 5 นาที C. 10 นาที D. 15 นาที จากนั้นอบที่ 60°C ที่เวลา E. 1 ชั่วโมง F. 2 ชั่วโมง G. 3 ชั่วโมง H. 4 ชั่วโมง I. สำหรับแห้งสุดท้าย



A



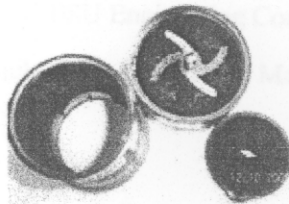
B



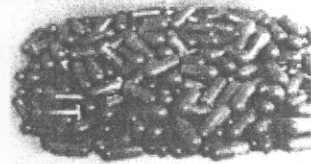
C



D



E



F

ภาพประกอบ 41 การผลิตสาหร่ายแห้ง โดยการตากแดด A สาหร่ายที่เลี้ยงไว้ในบ่อ B สาหร่ายหลังจากเก็บเกี่ยวและกรอง C ตากแห้งสาหร่ายเกลียวทอง D สาหร่ายหลังการตากแดด E ปั่นสาหร่ายแห้งเป็นสาหร่ายผง F สาหร่ายผงบรรจุแคปซูล

ภาคผนวก ข.

Oral Presentation on
PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment
And
The 5th PSU Engineering Conference
Phuket, Thailand; 10-10 May 2007

Air Impingement Drying of Spirulina

Oraporn Bualuang*, Ram Yamsaengsung

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
 Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

*Authors to correspondence should be addressed via email: s4812084@psu.ac.th

Abstract: *Spirulina* is a cyanobacteria with therapeutic and nutritional property. This experiment studied the drying of *Spirulina* in thin layer (2-4 mm) by direct forced convection (impingement). The objective was to study the influence of air temperature and velocity. Conditions investigated were air temperatures from 40-60°C and air velocity of 1 m/s. The preliminary results showed that higher temperature dried faster as expected, while the 4 mm layer film took only 50% longer than the 2 mm layer film. The drying time for 40, 50, and 60 °C being 12, 7, and 5 hours respectively. The preliminary drying test indicated that drying process with 60°C at air velocity 1 m/s for 5 hours reduced the moisture content of the *Spirulina* from 90% to 6% (wet basis). Then the pilot impingement dryer designed which is suitable for spirulina and the other crop. The effectiveness of the pilot dryer was investigated result is the average temperature inner the pilot dryer is 58.6°C with standard deviation is 5.7°C when air impingement drying is 60°C. However the final moisture content of spirulina not difference significant. This pilot dryer has the drying capacity about 2.7-2.8 kg per batch.

Keywords: Drying/ Impingement/ Impingement Drying/ Spirulina/ Forced Convection

1. INTRODUCTION

Spirulina is a cyanobacteria with therapeutic and nutritional property [6]. It contains 71% protein by weight which the highest amount of protein ever known to man is. The protein content in spirulina is three times that of soybean which contains only 37%, five times that of meat, and the protein quality is among the best with a good degree of aminogram [4]. In addition, *Spirulina* also contains a higher percentage of Gamma-Linolenic Acid (GLA) than any other plants. GLA has contributing properties of reducing blood cholesterol, blood pressure, joint-aches, menstrual cramps, skin inflammation, acne and pimples. Moreover, this unique seaweed also contains high amounts of vitamins and minerals, such as vitamin A (including Beta-Carotene), B6, B12, E, Niacin, and Potassium, Magnesium [2].

Typically, *Spirulina* is grown in ponds, harvested, and processed into capsules and Jelly drinks (see, Fig.1).

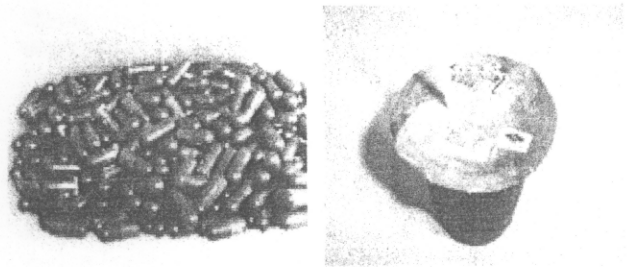


Figure 1 Spirulina products.

In a typical capsule production process, the *Spirulina* is drained of water, sun-dried, and dried in a convective oven. After most of the moisture content has been removed, the product is crushed and oven-dried again to remove the remaining moisture. The powdered *Spirulina* is then packed in capsule and sold as a diet supplementary containing high protein, vitamins, and minerals. Yet, the traditional drying oven is slow and energy consuming. A typical oven can take 18-24 hours to dry a 2 mm thick film of *Spirulina* at 40°C [2]. Therefore, this experiment investigated the effectiveness of drying *Spirulina* in thin layer (~ 2 mm) by direct forced convection (air-impingement). The impingement can be successfully employed in drying or dehydration of food by forced air convection, a most energy-intensive process, which is commonly used in food engineering to extend food shelf -life. Here, the unbound water normally present in a food is removed by applying heat under controlled conditions. In the other hand, drying may cause deterioration of both eating quality and nutritional value of the food [2]. There for, the design and operation of drying equipment aim to minimize these changes by selection of suitable conditions.

Dehydration involves a rather complex combination of application of heat and removal of moisture from a food medium [1]. In addition to air temperature and the rate of moisture removal is controlled by the air velocity. When hot air is locally blown over a moist food, water vapor diffuses through the boundary layer and is carried away shown in Figure 2.

Direct air-impingement not only provides a higher rate of heat transfer, but also minimizes the surface liquid film of evaporating water causing a higher rate of mass diffusion and convection.

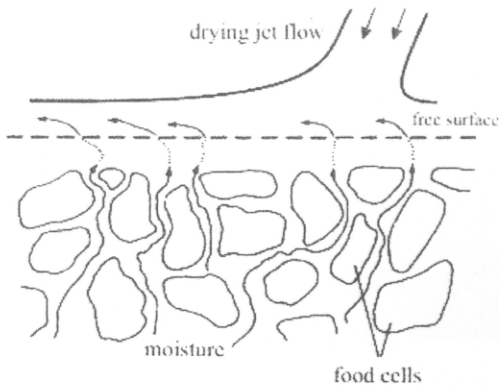


Figure 2. A drying air jet onto a food slab: flow of moisture during process [2].

2. EXPERIMENTAL METHOD

2.1 Materials

Fresh Spirulina is obtained from Herb Spirulina Co., Ltd. Songkhla, Thailand.

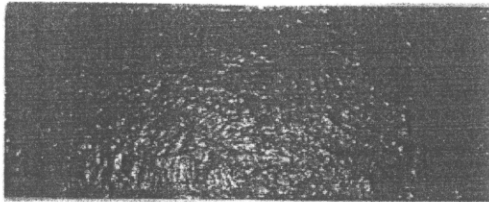


Figure 3 Fresh Spirulina in the drying tray.

The impingement dryer (laboratory scale) with tray size 37x79x2.5 cm and have one impinge pipe as shown in figure 4.

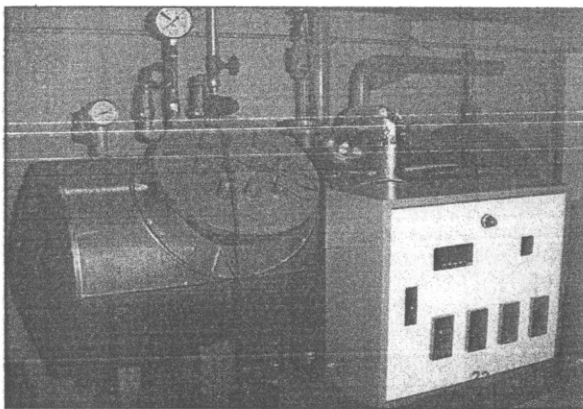


Figure 4 Air-impingement dryer used for the drying of Spirulina [5].

2.2 Impingement drying

Fresh Spirulina is filtered to drain the water entrained in the product. The initial moisture content can vary from 84-90% wet basis after filtration. The moisture content of product can compute from equation 1 and 2

$$X_w = \frac{(W-L_s)}{W} \quad (1) \quad 105$$

$$X_s = \frac{(W-L_s)}{L_s} \quad (2)$$

When X_w = moisture content in wet basis
 X_s = moisture content in dry basis
 W = total mass (g)
 L_s = bone dry solid (g)

500-600 g of the Spirulina is then dried in thin layer in an impingement dryer as shown in Figure 4. The air temperatures were 40, 50, and 60°C and the air velocity was fixed at 1 m/s. The thickness of the Spirulina film layer was 2 and 4 mm. The drying rate of the Spirulina was determined by weighing the sample every hour. A drying temperature above 60°C was not studied due to degradation of phycocyanin and the effect of Maillard Browning [2].

2.3 Design the impingement dryer

Design the pilot impingement dryer to drying a larger batch of product and test of the effective of it. For the design impingement dryer as shown in Figure 5.

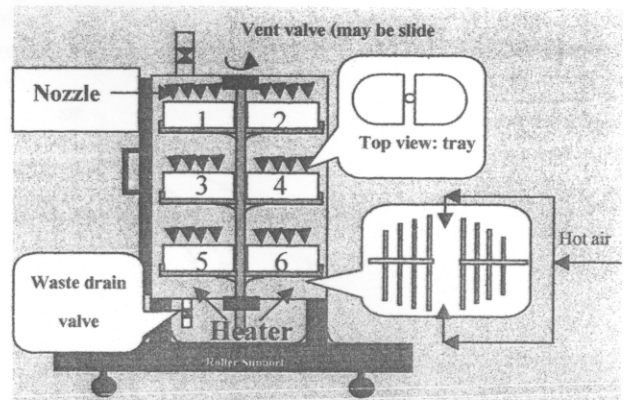


Figure 5 The model of air impingement dryer.

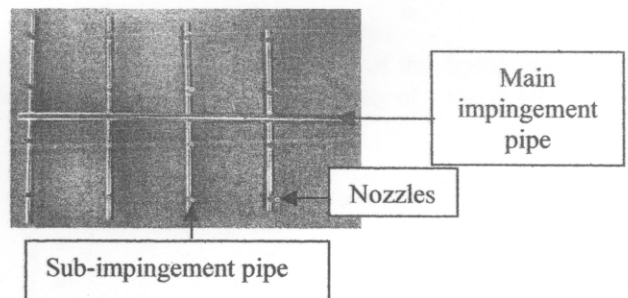


Figure 6 The impingement pipes in the impingement dryer.

This model contained 6 trays and 6 main impingement pipes were over the tray (see, Fig. 5). Each main pipe contains 4 sub-pipes and each sub-pipe contains 4 nozzles (see, Fig.7). Tray size 50x50 centimeters can dry 450-470 grams of the Spirulina per tray. Inner the pilot impingement dryer can see in Figure 7.

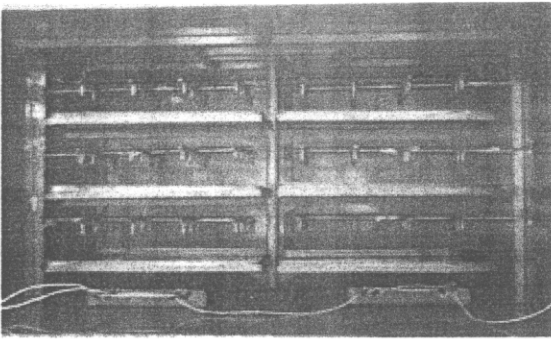


Figure 7 Inner the pilot impingement dryer.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In the industrial standards, the dried Spirulina should not have a moisture content more than 7% wet basis or 7.5% dry basis [2]. Therefore, the drying process was continued until the moisture content reached the required value. Figure 8 illustrates the effect of air temperature on the drying rate of Spirulina. The curves are similar in form. The maximal drying rate values are strongly dependant on the air temperature. As expected, the highest temperature resulted in the fastest drying time with the total time for a 2 mm film layer at 40, 50, and 60°C being 12, 7, and 5 hours respectively. Results are shown in Table 1. In Figure 9, the effect of Spirulina thickness is shown. Again, it took longer to dry the 4 mm thick layer. While the thicker film was twice as thick as the thinner film, its drying time was 50% longer (10 hours compared to 5 hours). Dry Spirulina can see in Figure 8.

Therefore, it may be reasonable to dry twice as much material in only 50% longer period of time. Finally, for all the drying conditions investigated, the final Spirulina product did not undergo significant color change. This is extremely important because it is more appealing to customers. Nonetheless, the nutritional values of the product will have to be examined in order to ensure the value of the drying process. More work will also have to be completed in drying a larger batch of product.

As the measurement of air temperature distribution which out of the impingement pipes can see in Figure 10.

The temperature distribution testing obtained by moisture content calculation and temperature measurement over the drying tray [Fig.5 and Fig.7.]. Figure 11 shown the temperature difference on each part were about 5-6 °C. Temperature of bottom tray higher than top and middle tray respectively [Fig.7] due to the bottom tray were near 2 heaters cause its obtained heat higher than the other tray. In the other hand, the top tray obtained the influence of the hot air from the impingement pipes more than the other tray. Average temperature in the dryer is 58.6°C with standard deviation is 5.7°C.

Moisture content of Spirulina in each tray illustrated in Figure 12 which indicated all the curve have same trends. The moisture content of bottom tray was faster decrease due to obtained higher heat but the moisture content differences were not significant.

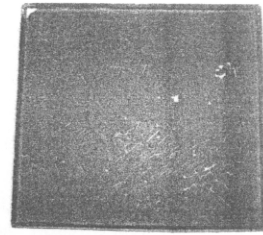


Figure 8 Dry Spirulina after drying process.

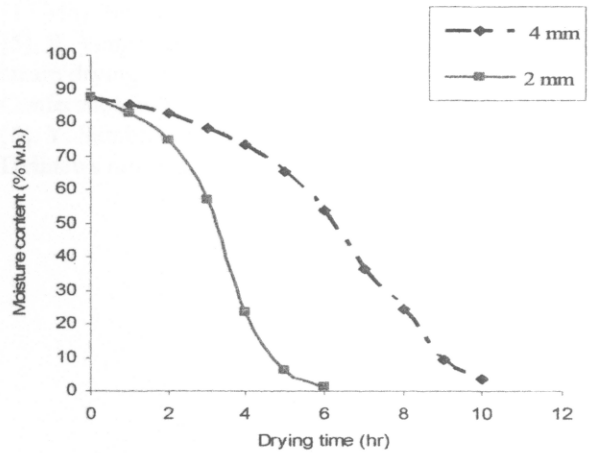


Figure 9 Effect of drying temperature on the drying rate of a 2 mm film layer of Spirulina using impinging air velocity of 1 m/s.

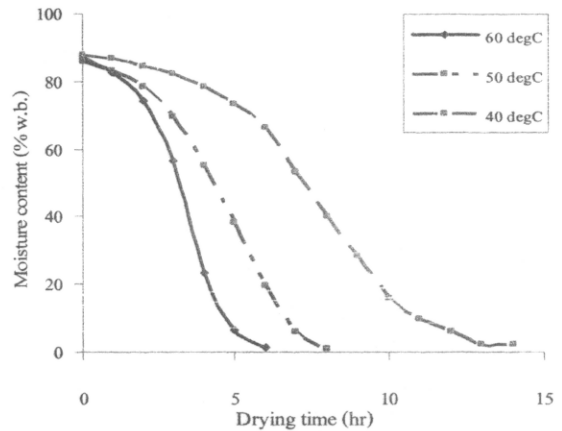


Figure 10 Effect of film thickness of the drying rate of Spirulina using impinging air velocity of 1 m/s at 60°C.

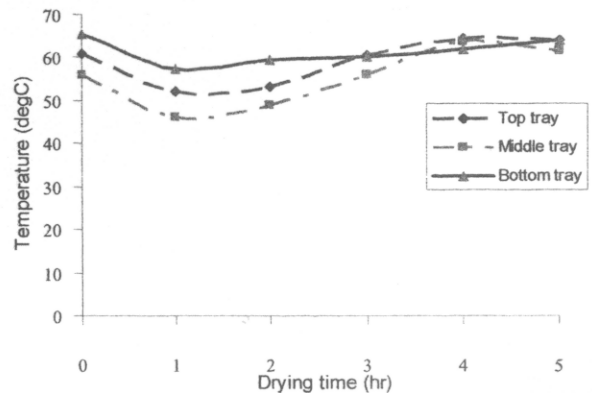


Figure 11 Temperature distribution in the impingement dryer at 60°C, 2.6 m/s.

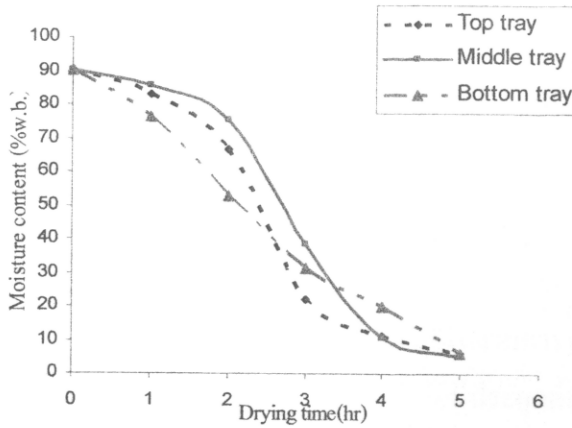


Figure 12 Drying rate in the impingement dryer each tray when dry at 60°C .

Table 1: Drying time for 2 mm film of Spirulina using impinging air velocity of 1 m/s.

Temperature (°C)	Initial Moisture Content (% w.b.)	Final Moisture Content (% w.b.)	Drying Time (hr)
40	87.80	6.09	12
50	86.21	6.04	7
60	87.42	6.42	5

This pilot dryer has the drying capacity about 2.7-2.8 kg per batch and obtained dry Spirulina is 280-290 grams. The initial and final weigh of fresh Spirulina and dry Spirulina shown in Table 2.

Table2: The initial and final weigh of fresh Spirulina and dry Spirulina.

Tray no.	Initial weigh (g)	Final weigh (g)	Final moisture content (%w.b.)
1	453.64	47.63	6.13
2	456.98	47.88	6.64
3	468.51	47.63	6.13
4	461.24	46.75	4.37
5	457.20	48.26	7.37
6	488.55	46.92	4.73
Total weigh	2786.12	285.07	

4. CONCLUSIONS

Air-impingement drying of Spirulina can decrease the overall drying time of the product while maintaining its natural coloration. Higher temperatures result in lower drying time, while a 4 mm film takes only 50% longer to dry than the 2 mm film. A temperature higher than 60°C is not recommended because of the influence of Maillard Browning.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Graduate School Prince of Songkla University for the financial support.

6. REFERENCES

[1]. P. J. Fellows, "Food processing technology. Boca Raton: CRC Press", 2000.
 [2]. H. Desmorieux, and N. Decaen, "Convective drying of spirulina in thin layer", Journal of Engineering., 2005, Vol. 66, 497-503.
 [3]. Matinant Jindataweepol. Manager, Herb Spirulina Co. Ltd. 2006. Interviewer, Nov 27, 2006.
 [4]. National Research Development Corporation. 2003. Spirulina algae [online]. Available: www.nrdcindia.com [17 May 2007].
 [5]. R. Yamsaengsung, and K. Buaphud, "Superheated steam drying of rubber", 2003. PSU-UNS International Conference 2003. Songkla, Dec, 11-12, 2003.
 [6]. Y. Samittivasn. "Spirulina usefull bacteria", 2000. Delinews newspaper. June 13, 2000.

ภาคผนวก ค.

นำเสนอในงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและ
เคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17
โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่, 29-30 ตุลาคม 2550

Hot Air Drying of Spirulina

การอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองด้วยอากาศร้อน

ราม แยมแสงสังข์¹, อรรถกรณ์ บัวหลวง*²

1),2) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 90112

1. บทนำ

สาหร่ายสไปรูลิน่าจัดอยู่ในจำพวกสาหร่ายสีน้ำเงิน-เขียว ที่นิยมเลี้ยงในประเทศไทยมักเป็น Species: platensis[1] มีประโยชน์ต่อร่างกายสูงเพราะมีปริมาณโปรตีนมากกว่า 60% เบตาแคโรทีน (Betacarotene) ธาตุเหล็ก วิตามินบี 12 และกรดไขมันจำเป็นที่หายากเช่น กรดแกมมาไลโนเลนิก (Gamma Linolenic) ที่พบเฉพาะในพืชบางชนิดเท่านั้น อีกทั้งยังมีวิตามิน เกลือแร่และสารอาหารอื่นที่จำเป็นต่อร่างกาย กระบวนการที่ต้องหลังการเก็บเกี่ยวมีความสำคัญมากต่อคุณภาพของสาหร่ายเกลียวทอง วิธีหนึ่งที่มีความจำเป็นสำหรับการผลิตคือการอบแห้ง ระหว่างการอบแห้งจะเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เป็นสาเหตุของการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อาหารประเภทอื่นพบว่า การศึกษาการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองค่อนข้างจำกัด ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบระบบการอบแห้งที่เหมาะสมต่อการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทอง

ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาทดลองการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองชั้นบางภายใต้สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ (อุณหภูมิ ความหนาของชั้นสาหร่ายและความเร็วลมของอากาศพุ่งชน) ต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและอัตราการอบแห้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องสร้างเครื่องอบแห้งแบบพุ่งชนด้วยอากาศและหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้จะมีประโยชน์โดยตรงต่อผู้ประกอบการขนาดเล็กและขนาดกลาง

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1. วัสดุ

2.1.1. สาหร่ายเกลียวทองสด จากบริษัท Herb Spirulina อำเภอบางกล่ำ จังหวัดสงขลา มีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 91±1 % มาตรฐานเปียก

2.2 อุปกรณ์

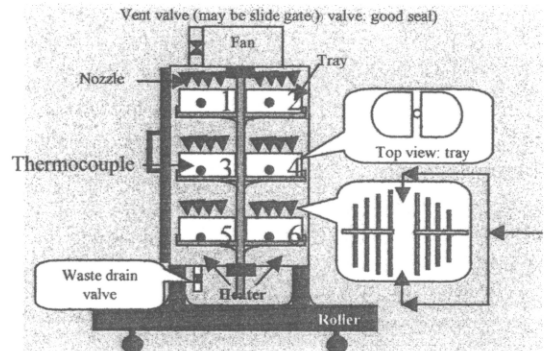
2.2.1. เครื่องอบแห้งแบบพุ่งชนด้วยอากาศ ประกอบด้วยห้องอบแห้งขนาด กว้าง 1.20 เมตร ยาว 1.0 เมตร สูง 1.2 เมตร ปกคลุมด้วยฉนวนใยแก้วหนา 1 นิ้ว ฉาอะลูมิเนียมหนา 1.2 มิลลิเมตร ขนาด กว้าง 50 cm ยาว 50 cm สูง 2 cm จำนวน 6 ถาด

2.2.2 พัดลม แบบแรงเหวี่ยงรัศมีขั้ว HASCON electric motor ความเร็ว 2840 รอบต่อนาที กระแสสลับ 220 V

2.2.3 Inverter รุ่น NSI -2-003 3 HP, 2.2 KW., 220 V 0.1-400 Hz สำหรับปรับปริมาณไฟฟ้าที่เข้าพัดลมเพื่อให้ได้ความเร็วลมที่ต้องการ

2.2.4. แท่งความร้อนรูปตัว I ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งก่อนเข้าสู่เครื่องอบแห้ง และแท่งความร้อนภายในห้องอบแห้ง

ทั้งหมด 4 ตัว สำหรับให้ความร้อนภายในห้องอบแห้งและรักษาอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง



รูป 1 เครื่องอบแห้งด้วยอากาศร้อน

2.3. วิธีการทดลอง

กรองและล้างสาหร่ายที่เลี้ยงไว้ในบ่อ ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 90±1 % มาตรฐานเปียก สำหรับการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักสาหร่ายที่เวลาต่าง ๆ ทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรแสดงดังตารางที่ 1

ตาราง 1 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการอบแห้ง

ความหนาของชั้นสาหร่าย	2 และ 4 mm
อุณหภูมิอากาศร้อน	40, 50 และ 60 °C
ความเร็วอากาศร้อน	1.3 และ 2.6 m/s

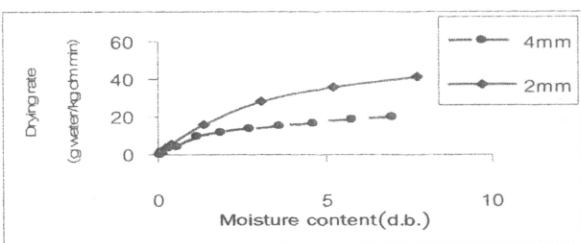
ก่อนดำเนินการทดลองเปิดเครื่องอบแห้งทิ้งไว้อย่างน้อยสองชั่วโมงเพื่อให้สภาวะการอบแห้งคงที่ จากนั้นเกลี่ยสาหร่ายเกลียวทอง 430 กรัมต่อถาดและใส่ในห้องอบแห้ง บนที่ก้นน้ำหนักตัวอย่างทุก ๆ 60 นาที จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 7 % มาตรฐานเปียกวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งจากค่าอัตราการระเหยความชื้นจำเพาะ

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

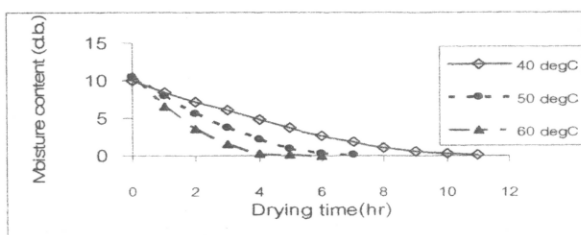
รูปที่ 2 แสดงผลของความหนาของสาหร่ายต่ออัตราการอบแห้งพบว่าเมื่อความหนาของชั้นสาหร่ายเพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งลดลงอย่างรวดเร็วเกิดจากเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นความต้านทานในการถ่ายโอนความร้อนและมวลจะสูงขึ้นและพบว่าที่ความหนาชั้นสาหร่ายลดลงปรากฏเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้นส่วนที่ความหนาเพิ่มขึ้นปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ด้วยซึ่งช่วงนี้เกิดการระเหยความชื้นเฉพาะที่ผิวหน้าวัสดุเมื่อความชื้นลดลงจะเกิดช่วงอัตราการอบแห้งลดลงจากทางด้านทานการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ รูป 3 แสดงผลของอุณหภูมิต่อ

ความชื้นของสาหร่ายเกลียวทองพบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้น ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและเวลาอบแห้งลดลง รูป 4 ที่อุณหภูมิอากาศต่ำ (40°C) อัตราการอบแห้งของสาหร่ายเกลียวทองปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคงที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Desmorieux และ Decaen (2005) ซึ่งกล่าวว่าอัตราการอบแห้งเกลียวทองแบบการพาที่อุณหภูมิอากาศต่ำ (อุณหภูมิ 40°C ความเร็วลมต่ำกว่า 2.5 m/s) มักปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งเกิดจากการระเหยของน้ำที่ผิววัสดุไปยังอากาศแวดล้อม สำหรับที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะปรากฏเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุไปยังผิวหน้า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงมี 2 ช่วง ช่วงแรกความชื้นสูงกว่า 2.0 มาตรฐานเปียก อัตราการอบแห้งลดลงนี้ชี้ให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพา ความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ช่วงที่ 2 ความชื้นสูงกว่า 2.0 เรียกความชื้นนี้ว่าจุดเปลี่ยน (inflection point) คือจุดที่เปลี่ยนจากความชื้นสูงไปยังความชื้นต่ำ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น รูป 5 แสดงผลของความเร็วมต่อปริมาณความชื้นของสาหร่ายพบว่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นการพาความร้อนและการพามวลดีขึ้น

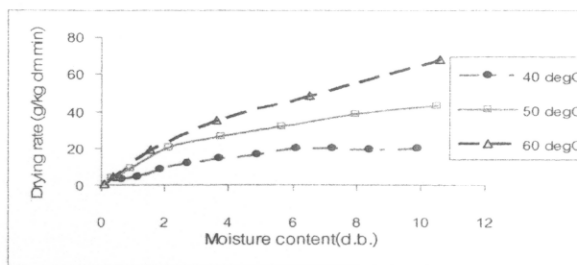
เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งจากค่าอัตราการระเหยความชื้นจำเพาะ หรือ SMER (Chua et al., 2002) พบว่าเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่า SMER เพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นใช้เวลานในการอบแห้งลดลงจึงสิ้นเปลืองพลังงานน้อย และพบว่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นค่า SMER เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากแม้จะใช้เวลานในการอบแห้งสั้นแต่ใช้พลังงานสูงในการเพิ่มความเร็วม ดังนั้นถ้าพิจารณาด้านความสิ้นเปลืองพลังงานเป็นหลักพบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองคือความหนาชั้นสาหร่าย 2 mm อุณหภูมิ 60°C ความเร็วม 2.6 m/s



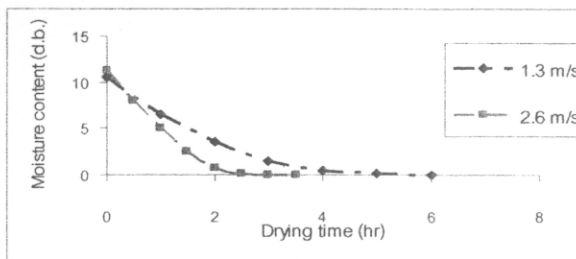
รูป 2 ผลของความหนาชั้นสาหร่ายต่ออัตราการอบแห้ง(อุณหภูมิอบแห้ง 60°C, ความเร็วม 1.3 m/s)



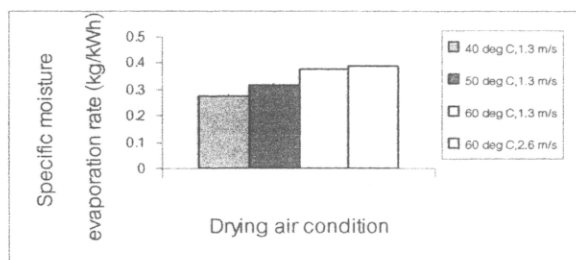
รูป 3 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณความชื้นของสาหร่าย



รูป 4 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการอบแห้งความเร็วม 1.3 m/s



รูป 5 ผลของความเร็วมต่อปริมาณความชื้นของสาหร่าย (อุณหภูมิอบแห้ง 60°C)



รูป 6 ผลของอุณหภูมิและความเร็วมต่ออัตราการระเหยความชื้นจำเพาะ

4. สรุปผลการทดลอง

1. ความหนาชั้นสาหร่าย อุณหภูมิและความเร็วมอากาศอบแห้ง มีผลต่ออัตราการอบแห้งอย่างมาก
2. ที่อุณหภูมิต่ำจะปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ที่ อุณหภูมิสูง (50 และ 60°C) ปรากฏเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น
3. เมื่อพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานเป็นหลักพบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองคือความหนาชั้นสาหร่าย 2 mm อุณหภูมิ 60°C ความเร็วม 1.3 m/s

5. เอกสารอ้างอิง

[1] สาหร่ายเกลียวทอง. 2547. โภชนาการเพื่อสุขภาพ. ว.สมาคมร้านขายยา, 22 (1) : 59-63.
 [2] Chua, K.J. Chou, S.K. Ho, J.C. and Hawlader, M.N.A. (2002), Heat pump drying: Recent developments and future trends, *Drying Tech* 20 (8) pp. 1579-1610.
 [3] Desmorieux, H. and Decaen, N. 2005. Convective drying of spirulina in thin layer. *Journal of Engineering*, 66 : 497-503.
 [4] Wang, J. and Sheng, K. (2007), Far-infrared and microwave drying of peach, *LWT - Food Science and Technology*, 39:3, pp. 247-255.