



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การลดพลังงานอบแห้งปลาหมึกกล้วยในสระเป่าแดดเบดโดยการควบคุมความเร็วอากาศ
ทางเข้าด้วยลิ้นปีกผีเสื้อ

โดย นายจิรเมธา สังข์เกษม

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

13 ธันวาคม 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์วิระ จันทน์วัฒนะ)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวนี นรัตถรักษา)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

การลดพลังงานอบแห้งปลาหมึกกล้วยในสระเป่าแดดแบบควบคุมความเร็วอากาศทางเข้าด้วย
ลีนูปีกผีเสื้อ

นายจิรเมธา สังข์เกษม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ISBN 974-19-0891-1
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายจิรเมธา สังข์เกษม
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การลดพลังงานอบแห้งปลาหมึกกล้วยในสะเปาเตี๊ยะเบดโดยการควบคุม
ความเร็วอากาศทางเข้าด้วยลิ้นปีกผีเสื้อ
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ วัชร จันทรวัดนะ
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องนี้นำเสนอแนวทางการอบแห้งปลาหมึกกล้วยแบบทั้งตัว และแบบเส้นฝอย โดยใช้สะเปาเตี๊ยะเบด (Spouted Bed) ที่มีการควบคุมความเร็วของอากาศ ณ ตำแหน่งทางเข้าเบดแบบไม่คงตัว เนื่องจากการไหลชนิดนี้มีผลให้ปลาหมึกกล้วยที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบน เกิดการจัดเรียงตัวใหม่จากการกระแทกขึ้น-ลงแล้วแตกกระจายตัวออกจากการพัน และการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนจึงเกิดการพาความร้อนสูงกว่าการควบคุมความเร็วของอากาศ ที่มีลิ้นปีกผีเสื้ออยู่นิ่ง ณ ตำแหน่งทางเข้าเบดของการไหลแบบคงตัวโดยมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ 1. ชุดฮีตเตอร์ 2. เบดอบแห้งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม 3. ชุดควบคุมความเร็วของอากาศแบบปรับความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อ โดยปลาหมึกทั้งตัวที่ใช้ทดลองจะมีลำตัวยาว 15 cm. และปลาหมึกเส้นฝอยที่ใช้ทดลองจะอยู่ในช่วงความยาวโดยเฉลี่ยในระหว่าง 3-5 cm. โดยมีความชื้นควบคุมเริ่มต้นที่ 68 % มาตรฐานเปียก (Moisture Content Wet-basis) ผลจากการทดลองการไหลแบบคงตัวที่ความเร็วอากาศ 7 m/s สามารถลดความชื้นตามมาตรฐานกักเก็บได้ที่ 24 % มาตรฐานเปียก ใช้เวลา 2 ชั่วโมง และ 1 ชั่วโมง 20 นาที เมื่อใช้อุณหภูมิถนอมอาหาร ที่ 70 °C และ 120 °C [3] ตามลำดับ ส่วนผลจากการทดลองการไหลแบบไม่คงตัว ของแนวคิดใหม่สามารถลดเวลาของการอบแห้งและพลังงานไฟฟ้าลงได้มากกว่า 50 % ที่ความชื้นมาตรฐานกักเก็บและอุณหภูมิเดียวกัน โดยความเร็วรอบที่ลิ้นปีกผีเสื้อที่สามารถลดความชื้นสำหรับกักเก็บได้เร็วที่สุดของ ปลาหมึกทั้งตัว และปลาหมึกเส้นฝอยอยู่ที่ 70 rpm และ 50 rpm ตามลำดับ

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 114 หน้า)

คำสำคัญ : สะเปาเตี๊ยะเบด, อัตราการอบแห้ง, ฟลูอิดไดเซชัน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Gerametha Sungkasem
Thesis Title : Energy Reduction of Squid Drying in Spuated bed by Controlling the Inlet
Air Velocity with Damper
Major Field : Mechanical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Associate Professor Veera Chanvattana
Academic Year : 2006

Abstract

This research presented the new method of squid and strip drying in spuated bed by controlling the inlet air velocity as transient flow. Since this type of flow could rearrange the squid-strips from their fluctuation in bed, heat convection is higher than the steady flow bed with stationary damper. The test rig was formed by 1. electrical heater 2. those in stainless steel bed and 3. damper motor. The squids are 15 cm. long and strips are of 3-5 cm. long with 68 % moisture content wet basis. From the early test results of steady 7 m/s air velocity the squid-strips moisture content was reduced to 24%wet-basis in 2 hrs. and squid in 1hr 20 min when food preserved temperatures are at 70 °C and 120 °C , respectively [3]. In the case of transient flow, the drying period and electrical energy can be reduced by over 50% at the same temperature and % moisture content. The effective speeds of the damper for squid and strips are 70 rpm. and 50 rpm., respectively.

(Total 114 Pages)

Keyword : Spouted Bed, Drying Rate, Fluidization

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของ รองศาสตราจารย์ วีระ จันทร์วิมณะ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆรวมทั้งแนวทางในการค้นคว้า ตลอดจนถึงการแก้ไขปัญหาต่างๆของงานวิจัย ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวนี นรัตถรักษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบ วิทยานิพนธ์ และได้กรุณาให้ข้อคิดเห็นต่างๆจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และที่ขาดไม่ได้คือ คุณฉวีวรรณ สังข์เกษม มารดาผู้ให้กำเนิด และคอยให้กำลังใจ และดูแลเป็นอย่างดีเสมอมา

จิรเมธา สังข์เกษม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวคิดของการวิจัย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ของการวิจัย	3
1.6 เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย	3
1.7 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างชุดทดลองสะเป้าเต็ดเบด	3
1.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 2 ทฤษฎีการออกแบบสะเป้าเต็ดเบด	5
2.1 บทนำ	5
2.2 การไหลภายในสะเป้าเต็ดเบด แบบ คงตัว	6
2.3 การคำนวณหาค่ากำลัง และขนาดของพัดลมอัดอากาศใน สะเป้าเต็ดเบด	8
2.4 การเลือกชนิดของพัดลมอัดอากาศที่เหมาะสมต่อการใช้งานในสะเป้าเต็ดเบด	10
2.5 การออกแบบตะแกรงกระจายอากาศ	12
2.6 การกำหนดขนาดท่ออัดอากาศ และมุมกรวยของ สะเป้าเต็ดเบด	15
2.7 การออกแบบขนาดของฮีตเตอร์	16
2.8 การวัดความเร็ว ณ ตำแหน่งทางเข้า สะเป้าเต็ดเบด	18
2.9 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและความชื้นสมดุล	18
บทที่ 3 การคำนวณขนาดของอุปกรณ์ สำหรับสะเป้าเต็ดเบด	23
3.1 การหาขนาดของอุปกรณ์ในลักษณะของการไหลแบบ คงตัว	23
3.2 การไหลแบบ ไม่คงตัว	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง	43
4.2 ขอบเขตของการทดลอง	44
4.3 องค์ประกอบของการทดลอง	44
4.4 วิธีการทดลอง	46
4.5 ผลการทดลอง	49
4.6 เปรียบเทียบผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง	60
4.7 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเร็วอากาศ ที่ควบคุมโดยลิ้นปีกผีเสื้อ	62
4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้า และจุดคุ้มทุนของการอบแห้งแต่ละวิธี	63
4.9 ผลสรุปที่ได้จากการทดลอง	65
บทที่ 5 สรุป และเสนอแนะ	67
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก ก	71
ตารางคุณสมบัติที่ใช้ออกแบบสะพานเด็คเบด	72
ภาคผนวก ข	75
ผลการทดลอง	76
ภาคผนวก ค	93
การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี	94
ภาคผนวก ง	99
การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเร็วอากาศที่แปรผันตามลิ้นปีกผีเสื้อ	100
ภาคผนวก จ	105
การวิเคราะห์พลังงาน และ จุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์	106
ภาคผนวก ฉ	111
ใบสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัด	112
ประวัติผู้วิจัย	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์เหนือกรดกำมะถันที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ	20
3-1 ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง และ ความหนาของปลาหมึก 100 ตัว	24
3-2 ค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิวปลาหมึกทั้งหมด	25
3-3 ปริมาตรของปลาหมึก	26
3-4 ผลของการจัดเรียงตัวของปลาหมึกแบบต่างๆ	28
3-5 ค่าตัวแปรเบื้องต้นที่ใช้คำนวณความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	29
3-6 ผลของวิธี Trial and Error เพื่อหาจำนวนรูเจาะของตะแกรงกระจายอากาศต่อพื้นที่	34
3-7 ค่าตัวแปรสำหรับหาขนาดของฮีตเตอร์	36
3-8 ค่าตัวแปรสำหรับหาขนาดความดันของขดลวดฮีตเตอร์	37
3-9 ผลสรุปของค่าที่ได้จากการคำนวณอุปกรณ์จากทฤษฎีของการไหลแบบคงตัว	38
4-1 สรุปผลการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าต่อประหว่างตู้อบแห้งกับวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	65
ก-1 ตารางคุณสมบัติของอากาศ	72
ก-2 คุณสมบัติ Specific Heat Values of Selected Foods	73
ข-1 ค่าเฉลี่ย อัตราส่วนความชื้นจากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีคงตัว ที่ 70 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย	76
ข-2 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานแห้ง จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีคงตัว ที่ 70 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย	77
ข-3 ค่าเฉลี่ย %ความชื้นมาตรฐานเปียก จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีคงตัว ที่ 70 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย	78
ข-4 ค่าเฉลี่ย อัตราส่วนความชื้น จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีไม่คงตัว ที่ 70 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย	79
ข-5 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานแห้ง จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีไม่คงตัว ที่ 70 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย	79
ข-6 ค่าเฉลี่ย %ความชื้นมาตรฐานเปียก จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีไม่คงตัว ที่ 70 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย	80
ข-7 ค่าเฉลี่ย อัตราส่วนความชื้น จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีไม่คงตัว ที่ 120 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย	80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-8 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานแห้งจากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีไม่คงตัว ที่ 120 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย	81
ข-9 ค่าเฉลี่ย %Wet-basis จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีไม่คงตัว ที่ 120 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย	81
ข-10 ตารางเปรียบเทียบ อัตราส่วนความชื้น ระหว่างวิธีคงตัว กับ วิธี ไม่คงตัว สำหรับ อบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C	82
ข-11 ตารางเปรียบเทียบ % ความชื้นมาตรฐานแห้ง ระหว่างวิธีคงตัว กับ วิธีไม่คงตัว สำหรับ อบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C	82
ข-12 ตารางเปรียบเทียบ %ความชื้นมาตรฐานเปียก ระหว่างวิธี คงตัว กับ วิธีไม่คงตัว สำหรับ อบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C	83
ข-13 ค่าเฉลี่ย อัตราส่วนความชื้น จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีคงตัว ที่ 70 °C ของปลาหมึกทั้งตัว	83
ข-14 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานแห้ง จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีคงตัว ที่ 70 °C ของปลาหมึกทั้งตัว	82
ข-15 ค่าเฉลี่ย %ความชื้นมาตรฐานเปียก จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีคงตัว ที่ 70 °C ของ ปลาหมึกทั้งตัว	85
ข-16 ค่าเฉลี่ย อัตราส่วนความชื้น จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีไม่คงตัว ที่ 70 °C ของปลาหมึกทั้งตัว	86
ข-17 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานแห้ง จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีไม่คงตัว ที่ 70 °C ของปลาหมึกทั้งตัว	87
ข-18 ค่าเฉลี่ย %ความชื้นมาตรฐานเปียก จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีไม่คงตัว ที่ 70 °C ของปลาหมึกทั้งตัว	87
ข-19 ค่าเฉลี่ย อัตราส่วนความชื้น จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีไม่คงตัว ที่ 120 °C ของปลาหมึกทั้งตัว	88
ข-20 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานแห้ง จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีไม่คงตัว ที่ 120 °C ของปลาหมึกทั้งตัว	88
ข-21 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานเปียกจากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีไม่คงตัว ที่ 120 °C ของปลาหมึกทั้งตัว	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-22 ตารางเปรียบเทียบ อัตราส่วนความชื้น ระหว่างวิธี คงตัว กับ วิธีไม่คงตัว สำหรับ อบแห้งปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C	89
ข-23 ตารางเปรียบเทียบ % ความชื้นมาตรฐานแห้ง ระหว่างวิธี คงตัว กับ วิธีไม่คงตัว สำหรับ อบแห้งปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C	90
ข-24 ตารางเปรียบเทียบ % ความชื้นมาตรฐานเปียกกระหว่างวิธี คงตัว กับ วิธีไม่คงตัว สำหรับ อบแห้งปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C	90
ข-25 ค่าเฉลี่ยของการวัดความเร็วของอากาศแบบปั่นป่วนในลักษณะของ Triple grid ที่ไหลผ่านลิ้นปีกผีเสื้อ ณ ตำแหน่งทางเข้าเบค	91
ข-26 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในพัดลมอัดอากาศต่อเวลาของวิธี คงตัวและกำลังไฟฟ้าที่แปรผันตามองศาของลิ้นปีกผีเสื้อด้วยวิธีไม่คงตัว	92
ค-1 ผลสรุปของค่าคงที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Newton และ Page ของปลาหมึกเส้นฝอย	95
ค-2 ผลสรุปของค่าคงที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Newton และ Page ของปลาหมึกทั้งตัว	96
ง-1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของ A_1 และ B_1	100
ง-2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของ a_n และ b_n ที่ความเร็วรอบ 70 rpm.	102
ง-3 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของ a_n และ b_n ที่ความเร็วรอบ 50 rpm.	103
จ-1 อัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแบบปกติ	106
จ-2 สรุปผลของการวิเคราะห์ค่าไฟฟ้าของการอบแห้งแต่ละวิธี	107
จ-3 สรุปผลของการวิเคราะห์จุดคืนทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งแต่ละวิธี	110
จ-4 ตารางดอกเบี้ย (Interest Tables) ที่อัตราดอกเบี้ย 7%	110

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 การเกิดปรากฏการณ์หมุนวนของสะเปาเต็ดเบด	6
2-2 การจัดเรียงตัวของเม็ดทรงกลมแบบต่างๆ	8
2-3 แสดงตำแหน่งความดันของสะเปาเต็ดเบด	9
2-4 ใบพัดแบบต่างๆ ที่นิยมใช้ในงานอบแห้ง	11
2-5 เปรียบเทียบกราฟสมรรถนะของพัดลมแบบอัดอากาศแบบโค้งหน้า และโค้งหลัง	11
2-6 แบบของการกระจายลักษณะต่างๆกัน	12
2-7 ค่าสัมประสิทธิ์ของตะแกรงกระจายอากาศ	15
2-8 สะเปาเต็ดเบด และตัวแปรที่สำคัญต่อการออกแบบ	18
2-9 ตำแหน่งการวัด Triple Grid	19
3-1 ลักษณะการวัดเส้นเส้นผ่านศูนย์กลางในสี่ ทิศทาง และความหนาเพื่อหาค่าเฉลี่ย	24
3-2 แสดงสัญลักษณ์ของพื้นที่ผิวของปลาหมึก	25
3-3 การวัดหาพื้นที่ผิวของปลาหมึกโดยใช้ Polar Planimeter	25
3-4 การหาอัตราส่วนช่องว่างของปลาหมึก	27
3-5 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของ ตะแกรงกระจายอากาศ	33
3-6 ชุดทดลองสะเปาเต็ดเบดที่ออกแบบด้วยการไหลแบบคงตัว	38
3-7 ลักษณะการพันและเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนของปลาหมึกในสะเปาเต็ดเบด	39
3-8 ลักษณะของลื่นปีกผีเสื้อสำหรับต่อกับชุดมอเตอร์ควบคุมความเร็วรอบ	40
3-9 ผลขององศาของลื่นปีกผีเสื้อต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงบิด	40
3-10 ภาพเปรียบเทียบชุดทดลองสะเปาเต็ดเบดที่ติดตั้งชุดควบคุมความเร็วรอบลื่นปีกผีเสื้อ	41
3-11 ผลจากลื่นปีกผีเสื้อที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วของคาบ	42
4-1 เครื่องมือวัดแบบลวดร้อน TSI รุ่น 8347-M-GB	45
4-2 เครื่องมือวัดความเร็วรอบมอเตอร์	46
4-3 ค่าความดันตกคร่อมเบดของปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว	49
4-4 ค่า อัตราส่วนความชื้นของปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว	49
4-5 ค่า% ความชื้นมาตรฐานแห้งของปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-6 ค่า % ความชื้นมาตรฐานเปียกของปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว	50
4-7 ค่าความดันตกคร่อมเบคของปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว	51
4-8 ค่า อัตราส่วนความชื้นของปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว	51
4-9 ค่า% ความชื้นมาตรฐานแห้งของปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว	51
4-10 ค่า % ความชื้นมาตรฐานเปียกของปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว	51
4-11 ค่าความดันตกคร่อมเบคของปลาหมึกฝอย ที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	52
4-12 ค่า อัตราส่วนความชื้นของปลาหมึกฝอย ที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	52
4-13 ค่า% ความชื้นมาตรฐานแห้งของปลาหมึกฝอย ที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	52
4-14 ค่า % ความชื้นมาตรฐานเปียกของปลาหมึกฝอย ที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	52
4-15 ค่าความดันตกคร่อมเบคของปลาหมึกฝอย ที่อุณหภูมิปลาหมึกสุก 120 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	54
4-16 ค่าอัตราส่วนความชื้นของปลาหมึกฝอย ที่อุณหภูมิปลาหมึกสุก 120 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	54
4-17 ค่า% ความชื้นมาตรฐานแห้งของปลาหมึกฝอย ที่อุณหภูมิปลาหมึกสุก 120 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	54
4-18 ค่า % ความชื้นมาตรฐานเปียกของปลาหมึกฝอย ที่อุณหภูมิปลาหมึกสุก 120 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	54
4-19 เปรียบเทียบค่า อัตราส่วนความชื้นของปลาหมึกฝอยด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว และ ไม่คงตัวที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-20 เปรียบเทียบค่า% ความชื้นมาตรฐานแห้งของปลาหมึกฝอยด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว และ ไม่คงตัวที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C	55
4-21 เปรียบเทียบค่า % ความชื้นมาตรฐานเปียกของปลาหมึกฝอยด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว และ ไม่คงตัวที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C	55
4-22 เปรียบเทียบผลที่ความชื้นกักเก็บของปลาหมึกฝอยด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว และ ไม่คงตัวที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C	55
4-23 ค่าความดันตกคร่อมเบดของปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	56
4-24 ค่าอัตราส่วนความชื้นของปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	56
4-25 ค่า% ความชื้นมาตรฐานแห้งของปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	56
4-26 ค่า % ความชื้นมาตรฐานเปียกของปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	56
4-27 ค่าความดันตกคร่อมเบดของปลาหมึกทั้งตัว ที่อุณหภูมิปลาหมึกสุก 120 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	57
4-28 ค่าอัตราส่วนความชื้นของปลาหมึกทั้งตัว ที่อุณหภูมิปลาหมึกสุก 120 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	57
4-29 ค่า% ความชื้นมาตรฐานแห้งของปลาหมึกทั้งตัว ที่อุณหภูมิปลาหมึกสุก 120 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	58
4-30 ค่า % ความชื้นมาตรฐานเปียกของปลาหมึกทั้งตัว ที่อุณหภูมิปลาหมึกสุก 120 °C ด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว	58
4-31 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งปลาหมึกทั้งตัวทุกวิธี	59
4-32 เปรียบเทียบค่า% ความชื้นมาตรฐานแห้งของการอบแห้งปลาหมึกทั้งตัวทุกวิธี	59
4-33 เปรียบเทียบค่าค่า % ความชื้นมาตรฐานเปียกของการอบแห้งปลาหมึกทั้งตัวทุกวิธี	59
4-34 เปรียบเทียบผลที่ความชื้นกักเก็บของการอบแห้งปลาหมึกทั้งตัวทุกวิธี	59
4-35 กำลังทางไฟฟ้าของวิธีการไหลแบบคงตัว และ ไม่คงตัว	60
4-36 ผลการทำนายที่อุณหภูมิ 70 °C	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-37 ผลการทำนายที่อุณหภูมิ 120°C	61
4-38 ผลการทำนายที่อุณหภูมิ 70°C	61
4-39 ผลการทำนายที่อุณหภูมิ 120°C	61
4-40 การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของทั้งสองวิธี ที่ความเร็วรอบ 70 rpm	63
4-41 ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การประมาณค่าฟูริเยร์ ที่ความเร็วรอบ 50 rpm	63
4-42 แสดงกำลังทางไฟฟ้ากับ ระยะเวลาอบแห้งด้วยวิธี และอุณหภูมิต่างๆ	64
ค-1 ตัวอย่างการหาค่าคงที่ k_1 ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Newton	95
ค-2 ตัวอย่างการหาค่าคงที่ k_2 และ n ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Page	95
ฉ-1 ใบสอบเทียบเครื่องมือวัดแบบลวดครีออน	112

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A_w	พื้นที่ผิวทั้งหมดของผนังเบด	m^2
A_t	พื้นที่หน้าตัดของเบด	m^2
B	แฟกเตอร์รูปร่าง	-
C_d	สัมประสิทธิ์ของแผ่นกระจายอากาศ	-
C_{pg}	ความร้อนจำเพาะของอากาศ	$kJ/(kg.K)$
C_{ps}	ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึก	$kJ/(kg.K)$
D_e	เส้นผ่านศูนย์กลางของของกรวยด้านที่ต่อกับเบด	m
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางของของกรวยด้านที่ต่อกับท่ออัดอากาศ	m
D_p	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของปลาหมึกเส้น	m
d	เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม	m
d_{or}	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะแผ่นกระจายอากาศ	m
d_t	เส้นผ่านศูนย์กลางของเบด	m
E	แรงเคลื่อนไฟฟ้า	Volt
g_c	อัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
H	ความสูงของเบด	m
h_w	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในเบด	$W/(m^2.K)$
I	กระแสที่ไหลผ่านขดลวดฮีตเตอร์	A
k_g	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ	$W/(m.K)$
k_1	ค่าคงที่ของการอบแห้งของ แบบจำลอง Newton	-
k_2	ค่าคงที่ของการอบแห้งของ แบบจำลอง Page	-
L_{mf}	ความสูงต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน	m
L_o	ความสูงของปลาหมึกที่ใส่ในเบด	m
M_{eq}	ปริมาณความชื้นที่สภาวะสมดุล	g
M_{in}	ปริมาณความชื้นเริ่มต้น	g
M_0	ปริมาณความชื้นเริ่มต้น	g
$\overline{M}_t$	ปริมาณความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใดๆ	g
m_d	มวลแห้ง	g

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
m_w	มวลเปียก	g
N_{or}	จำนวนรูกระจายอากาศต่อหน่วยพื้นที่	$holes / cm^2$
n	ค่าคงที่ของของการอบแห้งของ แบบจำลอง Page	-
P	กำลังทางไฟฟ้า	W
$P(t)$	ฟังก์ชันของกำลังทางไฟฟ้า	W
Pr	แฟรนคัลนัมเบอร์	-
P_1	ความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าของพัดลมอัดอากาศ	kPa
P_2	ความดัน ณ ตำแหน่งทางออกของพัดลมอัดอากาศ หรือ ความดันในท่ออัดอากาศ	kPa
P_3	ความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าเบด	kPa
P_4	ความดัน ณ ตำแหน่งทางออกของเบด	kPa
ΔP_b	ความดันตกคร่อมเบด	kPa
ΔP_d	ความดันตกคร่อมตะแกรงกระจายอากาศ	kPa
ΔP_f	ความดันตกคร่อมพัดลมอัดอากาศ	kPa
Q_2	อัตราการไหลของพัดลมอัดอากาศ	m^3 / s
R	ความต้านทานของขดลวดฮีตเตอร์	Ω
Re_b	เรย์โนลด์นัมเบอร์ของอากาศที่ไหลผ่านเบด	-
Re_p	เรย์โนลด์นัมเบอร์ของอากาศที่ไหลผ่านอนุภาค	-
T	แรงบิด	$N.m$
ΔT_b	ผลต่างอุณหภูมิในเบดกับอุณหภูมิบรรยากาศ	K
t	เวลา	s
U_{mf}	ความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	m / s
U_0	ความเร็วของอากาศในเบดว่างเปล่า	m / s
U_{or}	ความเร็วอากาศที่ผ่านตะแกรงกระจายอากาศ	m / s
$U_{periodic}$	คาบของความเร็ว Periodic	m / s
U_2	ความเร็วอากาศที่ทางออกของพัดลมอัดอากาศ	m / s
V_s	ปริมาตรของปลาหมึก	m^3

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
W_f	กำลังของพัดลมอัดอากาศ	Watt
สัญลักษณ์กรีก	ความหมาย	หน่วย
π	ค่าคงที่	-
ε	สัดส่วนช่องว่างเฉลี่ย	-
ε_{mf}	สัดส่วนช่องว่างต่ำสุด	-
ϕ_s	แฟคเตอร์รูปร่าง	-
ρ_s	ความหนาแน่นของปลาหมึก	kg / m^3
ρ_g	ความหนาแน่นของอากาศ	m / s
μ	ความหนืดของอากาศ	$N.s / m^2$
สัญลักษณ์กำกับล่าง		
b	เบด	
d	ตะแกรงกระจายอากาศ	
f	พัดลมอัดอากาศ	
g	อากาศ	
h	ฮีตเตอร์	
p	อนุภาค	
s	ปลาหมึก	
t	ผลรวม	
w	ผนังเบด	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวคิดของการวิจัย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมอบแห้งปลาหมึกกล้วยสำหรับบริโภคนิยมใช้ตู้อบแห้ง โดยใช้ลมร้อนจากพัดลมอัดอากาศในลักษณะถาวรเป็นชั้น มีข้อเสียคือปลาหมึกกล้วยแต่ละตัวไม่สามารถสัมผัสกับความร้อนได้อย่างทั่วถึง และเท่ากันทั้งหมดเนื่องจากตู้อบมีขนาดใหญ่ ปลาหมึกกล้วยที่ใช้ต้องนำมาวางแผ่บนตะแกรงในลักษณะที่อยู่นิ่งกับที่ ทำให้เปลือกพื้นที่และตู้อบจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่เป็นผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศร้อน ณ แต่ละจุดในตู้อบขนาดใหญ่แตกต่างกันมาก การพาความร้อนเกิดขึ้นได้มากเฉพาะด้านที่ติดของปลาหมึกกล้วยในตู้อบที่อยู่ใกล้กับพัดลมอัดอากาศ ส่วนปลาหมึกกล้วยที่อยู่ด้านที่ไกลออกไปเกิดการพาความร้อนน้อยกว่าด้านที่อยู่ใกล้ ทำให้ความชื้นที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ปลาหมึกกล้วยแต่ละตัวที่อบแห้งไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ทุกตัวที่ 24% มาตรฐานเปียก (Moisture Content Wet-basis) หรือต่ำกว่า ซึ่งเป็นมาตรฐานของความชื้นที่ใช้กักเก็บปลาหมึกกล้วย การควบคุมคุณภาพของตู้อบแห้งอาจทำได้โดยใช้แรงงานคนกลับด้านของถาดปลาหมึกกล้วย ทำให้มีความลำบากในการปฏิบัติงาน อันเป็นผลมาจากอุณหภูมิในตู้อบสูงถึง 100-120 องศาเซลเซียส เวลาในการอบแห้งนานถึง 5-6 ชั่วโมงขึ้นไป

จากปัญหาที่กล่าวมาทั้งหมด ทำให้เกิดแนวคิดของงานวิจัยที่ต้องการอบแห้งปลาหมึกกล้วยให้ปลาหมึกกล้วยเคลื่อนที่แบบกระจายตัวในเบดและมีการแลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่างอากาศกับปลาหมึกกล้วย ทำให้คุณภาพของปลาหมึกกล้วยอบแห้งมีความชื้นของแต่ละตัวที่ใกล้เคียงกัน โดยวิธีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้ง โดยทำให้ปลาหมึกกล้วยเคลื่อนที่มีสองวิธี คือ ฟลูอิดไดซ์เบดและสะเปาเต็ดเบด ควรใช้เลือกสะเปาเต็ดเบด เนื่องจากมีแรงยกตัว ความเร็วอากาศที่ไหลอยู่ภายในเบดสูงกว่าฟลูอิดไดซ์เบดและเหมาะสมกับรูปทรงของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ที่มีรูปร่างที่ค่อนข้างกลมอย่างเช่นเมล็ดข้าวเปลือกหรือข้าวโพด แต่การอบแห้งผลิตภัณฑ์แผ่นแบนของปลาหมึกกล้วยการไหลที่ทางเข้าของสะเปาเต็ดเบดต้องการให้เป็นการไหลแบบไม่คงตัว เนื่องจากปลาหมึกกล้วยที่อยู่ในเบดมีการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน โดยควบคุมความเร็วของลมเป่าที่ทางเข้าเบด ทำให้ปลาหมึกกล้วยที่อยู่ในเบดกระแทกตัวขึ้น-ลงและเกิดการจัดเรียงตัวใหม่แล้วแตกกระจายตัวออก จากการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน เพื่อให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งปลาหมึกกล้วยลดลงมีผลต่อค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้าที่ลดลงตามไปด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาแนวคิดใหม่เพื่อประหยัดพลังงานอบแห้งผลิตภัณฑ์ลักษณะที่เป็นแผ่นแบน คือ ปลาหมึกกล้วย สำหรับสะเปาแดดเบด

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบสะเปาแดดเบด

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการควบคุมความเร็วรอบของลีนปิกฟีลล์ ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งด้วยวิธีทดลอง

1.2.4 เพื่อศึกษาอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิอุณหภูมิอาหารและอุณหภูมิที่ปลาหมึกสุก คือ 70 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้ความเร็วรอบของลีนปิกฟีลล์ที่ความเร็วรอบระดับต่างๆ

1.2.5 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบต้นทุนค่าไฟฟ้าระหว่างสะเปาแดดเบด สำหรับอบแห้ง ปลาหมึกกล้วยด้วยการไหลแบบคงตัว กับ ไม่คงตัวโดยการควบคุมความเร็วรอบของลีนปิกฟีลล์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการอบแห้งปลาหมึก โดยใช้สะเปาแดดเบดแบบควบคุมความเร็วรอบของลีนปิกฟีลล์ เฉพาะวิธีการทดลอง

1.3.2 ปริมาณผลิตภัณฑ์ปลาหมึกที่ต้องการอบแห้ง ครั้งละ 1 kg

1.3.3 ปลาหมึกที่ทดลอง ใช้สายพันธุ์ของปลาหมึกกล้วยที่นิยมใช้ทำปลาหมึกแห้ง

1.3.4 เส้นผ่านศูนย์กลางของเบดที่ใช้ทดลองมีขนาด 0.25 m.

1.3.5 เบดและท่ออากาศอัดที่ทางเข้าเบด ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม

1.3.7 เบดที่ใช้ศึกษามีลักษณะวางในแนวตั้ง

1.3.6 การควบคุมการไหลของอากาศใช้ลีนปิกฟีลล์และควบคุมการหมุนด้วยมอเตอร์แบบปรับความเร็วรอบได้

1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ศึกษาถึงสมการที่ใช้ออกแบบชุดทดลองสะเปาแดดเบด

1.4.2 ศึกษาข้อมูลด้านราคาและขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในสะเปาแดดเบด

1.4.3 ศึกษาและออกแบบชุดฝึกฝอยปลาหมึกอบแห้ง

1.4.4 ศึกษาปัจจัย และอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการอบแห้งปลาหมึกฝอย

1.4.5 ศึกษาเครื่องมือวัดที่ใช้ในวัดค่าพื้นฐานสำหรับการอบแห้ง

1.4.6 ศึกษาวิธีการสร้างชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์

1.4.7 คำนวณขนาดและอุปกรณ์ของชุดทดลองสะเปาแดดเบด

1.4.8 สรุปผลการจำลองทั้งหมดที่ได้และวิเคราะห์ผลจากการทดลอง

1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

1.5.1 วิธีการใหม่ที่สามารถอบแห้งได้รวดเร็วและประหยัดพลังงานไฟฟ้ามากกว่า
สะเป้าเต็ดเบดที่มีการไหลแบบคงตัว

1.5.2 วิธีการใหม่ที่นำไปใช้ออบแห้งวัสดุที่มีรูปร่างแบบแผ่นแบน แทนวิธีการอบแห้งแบบ
ฟลูอิดไดซ์เบดที่สามารถอบแห้งวัสดุที่มีรูปร่างใกล้เคียงทรงกลม

1.5.3 สามารถนำวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ หรือ วัสดุอื่นที่มีรูปร่างและ
รูปทรงที่เป็นแผ่นแบนแบบอื่นได้โดยที่ปลาหมึกอบแห้งแต่ละตัวที่ผลิตได้ มีเปอร์เซ็นต์ความชื้น
ใกล้เคียงกัน

1.6 เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย

1.6.1 เครื่องวัดความเร็วอากาศแบบลวดร้อน (Hot-Wire) ยี่ห้อ TSI รุ่น 8347-M-GB สำหรับ
วัดความเร็วอากาศ

1.6.2 เครื่องมือวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ (Techo- Meter)

1.6.3 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลชนิด มีความละเอียด ทศนิยมสองตำแหน่ง

1.6.4 วัดคัมมิเตอร์ สำหรับวัดอัตราการใช้กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลมอัดอากาศ

1.7 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างชุดทดลองสะเป้าเต็ดเบด

1.7.1 พัดลมอัดอากาศ

1.7.2 ชุดท่ออากาศอัดภายในบรรจุฮีตเตอร์

1.7.3 ชุดท่อสำหรับควบคุมความเร็วอากาศภายในบรรจุตัวควบคุมแบบล้นปีกผีเสื้อ(Damper)

1.7.4 ชุดวงจรไฟฟ้าควบคุมความเร็วของล้นปีกผีเสื้อ

1.7.5 ชุดเบดทดลองสำหรับใส่ปลาหมึกอบแห้ง

1.7.6 เทอร์โมสตัท

1.7.7 เทอร์โมคัปเปิล

1.7.8 ตู้ควบคุมวงจรไฟฟ้า

1.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Maurico [1] กล่าวถึงการระเหยของน้ำที่อยู่ในเนื้อปลาหมึก โดยใช้ตู้อบแห้งเพื่อทดลอง
หาอัตราการอบแห้ง (Drying Rate) ของน้ำในปลาหมึกที่ระเหยออก โดยใช้พัดลมเป็นตัวพา
ความชื้นออกจากปลาหมึกทั้งตัวในระบบตู้อบแห้งแบบกึ่งปิด โดยสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อ
ใช้เปรียบเทียบกับผลจากการทดลองปรากฏว่าปลาหมึกใช้เวลาแห้งที่ความชื้นกักเก็บต่างกัน 3 %
และใช้เวลา 31 hrs.

Mayor [2] งานวิจัยเรื่องนี้กล่าวถึงวิธีการทดลองและสมการทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ (Diffusion) การอบแห้งอาหารผักผลไม้ชนิดต่างๆ รวมทั้งปลาหมึกของตู้อบแห้ง โดยที่สมการการแพร่ของปลาหมึก เทียบกับการทดลอง ต่างกัน 2.2%

จากงานวิจัยทั้ง 2 เรื่องนี้สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแพร่เพื่อใช้หาอัตรา การอบแห้งของปลาหมึกในตู้อบ โดยเปรียบเทียบเวลาที่ใช้อบแห้ง เทียบกับ วิธีสะเปาเตี๊ดเบด

ชริน [3] งานวิจัยเรื่องนี้กล่าวถึงวิธีการออกแบบสะเปาเตี๊ดเบดและวิธีการทดลอง เพื่อหา อัตราการอบแห้งของการอบแห้งปลาหมึกในลักษณะที่เป็นเส้นฝอย ด้วยการไหลของอากาศแบบ คงตัว โดยวิธีการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองอบแห้งปลาหมึกใช้เวลา 2 ชั่วโมงที่ ความชื้นกักเก็บ 24 % มาตรฐานเปียกและความเร็วอากาศ 7 เมตรต่อวินาที ทำให้ปลาหมึกแห้งตัวเร็วกว่าการใช้ตู้อบแห้ง แต่ปัญหาเกิดขึ้นคือปลาหมึกฝอยในสะเปาเตี๊ดเบดลอยแบบเกาะตัวและพันกันเป็นกลุ่มก้อน งานวิจัยเรื่องนี้สามารถใช้ข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การทดลองของวิธีการไหลแบบไม่คงตัว

บทที่ 2

ทฤษฎีการออกแบบสเป้าเต็ดเบด

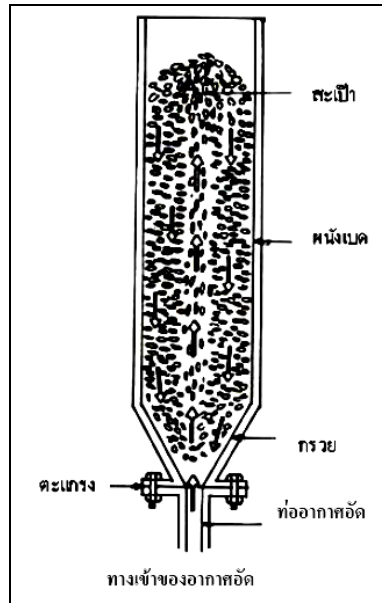
2.1 บทนำ

เบด (Bed) คือ อาณาเขตที่มีปริมาณเม็คของแข็งบรรจุอยู่และเม็คของแข็งอาจเคลื่อนที่หรือเคลื่อนไหวได้โดยของไหล ไหลผ่านตะแกรงกระจายอากาศในเบดโดยมีระดับตั้งแผ่นโลหะที่ทำหน้าเป็นตะแกรงรองรับ หรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุดคือผิวหน้าของเม็คของแข็งที่อยู่ในเบด

2.1.1 เบดนิ่ง (Fixed Bed) คือ ลักษณะของเม็คของแข็งที่ยังไม่ขยับตัวขณะที่อัดอากาศเข้าทางด้านล่างของเบดอย่างช้าๆและของไหลยังมีความเร็วต่ำ เม็คของแข็งจึงยังไม่มีการขยับตัว

2.1.2 ฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed) คือ ลักษณะของเบด ที่มีท่ออากาศอัด ณ ตำแหน่งทางเข้าเบดขนาดของท่ออัดอากาศจะมีขนาดเท่ากับขนาดของเบด โดยทำหน้าที่อัดอากาศและทำให้เม็คของแข็งขยับตัวแล้วมีคุณสมบัติคล้ายกับของไหล เรียกของเม็คของแข็งที่ไหลในสถานะนี้ว่า ฟลูอิดไดเซชัน เนื่องจากเม็คหรือชิ้นของแข็งดังกล่าว เริ่มแรกถูกวางบนตะแกรงในเบด หรือเบดที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก แล้วอากาศอัดที่ด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็คของแข็ง จากนั้นของไหลจะไหลผ่านชั้นของเม็คของแข็ง แล้วไหลออกทางส่วนบนของเบด เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลมากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดเม็คของแข็งจะขยับตัวและลอยขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้มีคุณสมบัติคล้ายของไหล กล่าวคือมีการหมุนเวียนของเม็คของแข็งภายในเบด เหมาะสำหรับเม็คของแข็งที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม

2.1.3 สเป้าเต็ดเบด (Spouted Bed) คือ ลักษณะของเบด ที่มีท่ออากาศอัด ณ ตำแหน่งทางเข้าของเบดมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด เพื่อต้องการให้อากาศเคลื่อนที่ในลักษณะของเจ็ต และมีความเร็วสูงกว่าฟลูอิดไดซ์เบด สเป้าเต็ดเบดจึงมีความเหมาะสมและใช้ได้กับวัตถุรูปร่างแปลกที่มีรูปทรงแตกต่างจากทรงกลม มากกว่าฟลูอิดไดซ์เบด เนื่องจาก สเป้าเต็ดเบด สามารถทำให้เม็ค หรือชิ้นของแข็งเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงด้วยการหมุนวนอย่างรุนแรงภายในเบด โดยอากาศที่มีความเร็วสูงในลักษณะของเจ็ตขึ้นมาในแนวตั้งมาชนกับของแข็ง ทำให้เม็คของแข็งขยับตัวและลอยไปตามกระแสของเจ็ตอย่างรวดเร็วและตกลงด้านข้างทั้งสองด้านของเบด ในลักษณะหมุนวนซึ่งเหมาะกับของแข็งที่มีรูปร่างที่ไม่ได้เป็นทรงกลม หรือมีรูปร่างที่แปลกกว่าทรงกลม มีลักษณะของปรากฏการณ์หมุนวนในเบด ดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 การเกิดปรากฏการณ์หมุนวนของ ตะเภาเต็ดเบด [4]

2.2 การไหลภายในตะเภาเต็ดเบด แบบ คงตัว

การไหลภายในตะเภาเต็ดเบด เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบตะเภาเต็ดเบดและการคำนวณขนาดของพัดลมอัดอากาศ ตัวแปรหลักที่มีความสำคัญต่อการออกแบบ คือ ความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน (U_{mf}) เนื่องจากตัวแปรดังกล่าว จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของพัดลมอัดอากาศ การเลือกใช้พัดลมอัดอากาศถ้ามีขนาดใหญ่มากเกินไปทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานมาก หรือถ้ามีขนาดเล็กเกินไปของแรงในเบดจะไม่เกิดการลอยตัวในลักษณะฟลูอิดไลเซชันและเกิดปรากฏการณ์หมุนวนในเบด ดังภาพที่ 2-1 การคำนวณหาความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน (U_{mf}) คำนวณได้จากสมการของ Ergun [4] เป็น สมการหลักที่ใช้สำหรับหาความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน (U_{mf}) สมการนี้สามารถใช้ได้กับทุกย่านของการไหลทั้งสองชนิดคือ การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนอีกทั้งยังสามารถใช้ได้กับช่วงค่าของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์คือในช่วงของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ($20 > Re_p > 1,000$) โดยมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left[\frac{D_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right]^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})(U_{mf} D_p \rho_g)}{\mu \varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2 \mu} = \frac{D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2-1)$$

ผลการคำนวณของสมการ(2.1) ควรมีการตรวจสอบความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชันอีกครั้ง โดยการคำนวณค่าของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของอากาศที่ไหลผ่านเม็ดของแข็งซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติที่วิเคราะห์มาจากเทอมของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดของแข็ง ความเร็วอากาศและความหนืดของอากาศดังนี้[4]

$$Re_p = \frac{\rho_g U_{mf} D_p}{\mu} \quad (2-2)$$

ผลการคำนวณค่าของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์จากสมการ(2-2) กรณีที่ช่วงของค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่คำนวณได้มีค่า $Re_p < 20$ และอนุภาคของแข็งมีขนาดเล็ก เทอมของความดันเทอมแรกจากสมการ (2-1) ทางด้านซ้ายมือจะถูกตัดออกเหลือเทอมที่สองจากทางด้านซ้ายมือและเทอมทางด้านขวามือ สมการความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน (U_{mf}) สามารถเขียนรูปแบบของสมการได้ใหม่ดังนี้[4]

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s D_p)^2 (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3}{150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (2-3)$$

และกรณีที่ช่วงของค่า เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ที่คำนวณได้มีค่า $Re_p > 1,000$ และอนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่ ต้องใช้ความเร็วของของไหลสูงมากจึงทำให้เมล็ดลอยเป็นอิสระ จากสมการ (2-1) เทอมของความดันทางด้านซ้ายมือจะเหลือเพียงเทอมแรกและเทอมทางด้านขวามือสำหรับความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน (U_{mf}) [4] โดยสามารถเขียนรูปแบบของสมการได้ใหม่ดังนี้

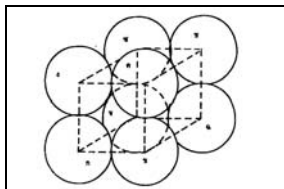
$$U_{mf} = \left[\frac{\phi_s D_p (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3}{1.75 \rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-4)$$

ผลของสมการ(2-3) หรือ (2-4) ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของผลจากการคำนวณของสมการ (2-1) ควรมีค่าใกล้เคียงกันและสัดส่วนของช่องว่างในเบด (ε_{mf}) คืออัตราส่วนของปริมาตรช่องว่างหารด้วยปริมาตรทั้งหมดที่พิจารณาเป็นแฟกเตอร์ ซึ่งมีผลต่อความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชันกล่าวคือถ้าเม็ดของแข็งมีค่าของสัดส่วนช่องว่างมาก จะทำให้อากาศไหลผ่านกองของเม็ดของแข็งที่อยู่ในเบดได้ง่าย จากสมการที่ (2-1) กรณีของเม็ดของแข็งที่เป็นทรงกลมมีขนาดสม่ำเสมอ สามารถคำนวณหาสัดส่วนช่องว่างในเบด (ε_{mf}) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\varepsilon_{mf} = \frac{\text{Volume of a particle}}{\text{Total volume of particle in the bed}} \quad (2-5)$$

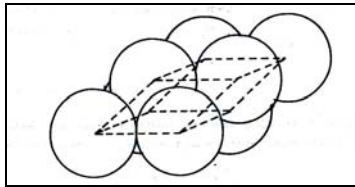
สัดส่วนของช่องว่างในเบด เกิดจากการจัดเรียงตัวของทรงกลมแบบต่างๆ โดยที่มีรูปแบบของ

การจัดเรียงตัว คือ 1. แบบ Cubic 2. แบบ Orthorombic และ 3. แบบ Romboedric มีลักษณะของการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง ที่มีค่าสัดส่วนช่องว่างของการจัดเรียงตัวแต่ละชนิดต่างกัน โดยแบบ Cubic จะมีค่าสัดส่วนช่องว่างมากที่สุด ดังภาพที่ 2-2



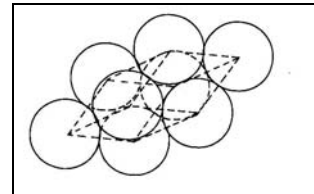
ค่า $\varepsilon = 0.477$

แบบ Cubic



ค่า $\varepsilon = 0.395$

แบบ Orthorombic



ค่า $\varepsilon = 0.295$

แบบ Romboedric

ภาพที่ 2-2 การจัดเรียงตัวของเม็ดทรงกลมแบบต่างๆ [4]

ส่วนแฟคเตอร์รูปร่าง ϕ_s คือ ตัวแปรตัวหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน U_{mf} โดยมีนิยามของแฟคเตอร์รูปร่าง คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวทรงกลมที่มีปริมาตรเท่าเม็ดของแข็งต่อพื้นที่ผิวของเม็ดของแข็งใดๆ

$$\phi_s = \frac{\text{Surface of sphere}}{\text{Surface of particle}} \quad (2-6)$$

โดยที่ ϕ_s เท่ากับ 1 กรณีที่เป็นทรงกลมและ ϕ_s น้อยกว่า 1 กรณีที่ไม่ได้เป็นทรงกลม

2.3 การคำนวณกำลังและขนาดของพัดลมอัดอากาศใน สะเป้าเตี๊ดเบด

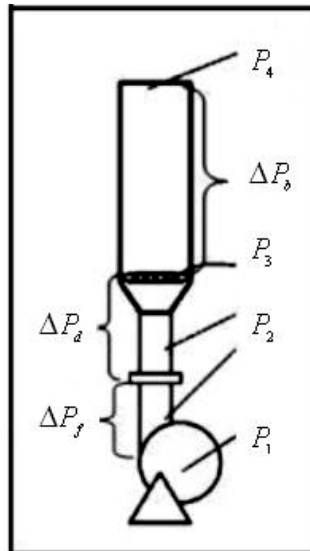
กำลังของพัดลมอัดอากาศมีความสำคัญต่อสะเป้าเตี๊ดเบด เนื่องจากเม็ดของแข็งที่อยู่ในเบดจะไม่สามารถลอยตัวในลักษณะ หรือสถานะของฟลูอิดไดเซชันได้ถ้ากำลังของพัดลมอัดอากาศมีขนาดกำลังน้อยกว่าความเร็วลมต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน กำลังของพัดลมอัดอากาศคำนวณได้จากความเร็วลมต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน จากหัวข้อ 2.2 และเทอมความดันลด (ΔP) ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆใน สะเป้าเตี๊ดเบด ดังแสดงในไว้ภาพที่ 2.3

แนวความคิดของสมการสำหรับหาความดันตกคร่อมเบด มาจากการวิเคราะห์เม็ดของแข็งที่ลอยตัวเป็นอิสระในเบด หรืออาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่าเม็ดของแข็งเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่กระทำต่อเม็ดของแข็ง โดยมาจากเทอมของแรงยกตัวของของไหลที่พยายามให้เม็ดของแข็งเคลื่อนที่ขึ้น และเทอมของน้ำหนักของเม็ดของแข็ง[4] ดังนี้

$$(\text{drag force by upward moving gas}) = (\text{weight of particles}) \quad (2-7)$$

เมื่อเปลี่ยนเทอมแรกทางด้านขวามือ เป็นความดันลดในพื้นที่ตัดขวางของเบดและเทอมที่สอง เป็นพื้นที่ตัดขวางของเบด ส่วนเทอมแรกทางด้านซ้ายมือ สามารถเปลี่ยนสมการเป็นเทอมของ ปริมาตร เทอมของตัวประกอบของเม็ดของแข็งและค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดของแข็งตามลำดับ ดังนี้[4]

$$(\text{pressure drop} * (\text{cross-sectional} = (\text{volume} * (\text{fraction} * (\text{specific} \quad (2-8) \\ \text{across bed}) \quad \text{area of tube}) \quad \text{of bed}) \quad \text{consisting} \quad \text{weight} \\ \text{of solids}) \quad \text{of solid})$$



ภาพที่ 2-3 แสดงตำแหน่งความดันของ สะเป้าเต็ดเบด

แทนค่าของตัวแปรของสัดส่วนช่องว่างต่ำสุด และค่าความหนาแน่นของของแข็ง และความหนาแน่นของอากาศในสมการ (2-8) [4] จะได้

$$\Delta P_b A_t = A_t L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) \left[(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \right] \quad (2-9)$$

สามารถตัดตัวแปรของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเบด (A_t) ออกจากสมการ(2.9) ทั้งสองข้าง เนื่องจากมีขนาดทางเข้าและทางออกเท่ากันจะได้ $\Delta P_b = L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) \left[(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \right]$ และเมื่อ พิจารณาความดัน P_3 และ P_4 ดังภาพที่ 2-3 จะได้

$$P_3 - P_4 = L_{mf}(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad \text{เมื่อ } g = g_c \quad (2-10)$$

เนื่องจากสมการที่ (2-10) เป็นสมการสำหรับใช้หาความดัน P_3 โดยมีความสูงที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน (L_{mf}) เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความดันที่ตำแหน่งทางเข้าเบด (P_3) คำนวณได้จาก

$$L_{mf} = \frac{(1 - \varepsilon)L_0}{(1 - \varepsilon_{mf})} \quad (2-11)$$

เมื่อคำนวณความดันที่ทางออกตะแกรงหรือทางเข้าของเบด ณ ตำแหน่ง (P_3) จากสมการ (2-10) สามารถหาความดันที่ตำแหน่งของท่ออากาศอัด (P_2) โดย AGARWAL และคณะ [4] ได้ให้ความเห็นว่าความดันที่ตกคร่อมตะแกรงกระจายอากาศ (ΔP_d) ที่ดีไม่ควรมีค่ามากเกินไปกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ของความดันทั้งหมดที่ตกคร่อมเบด (ΔP_b) [4] จึงเขียนสมการเพื่อหา (P_2) ได้ดังนี้

$$\Delta P_d = 0.1 \Delta P_b = P_2 - P_3 \quad (2-12)$$

ความดัน P_2 สามารถเขียนรูปใหม่ดังนี้

$$P_2 = 0.1 \Delta P_b + P_3 \quad (2-13)$$

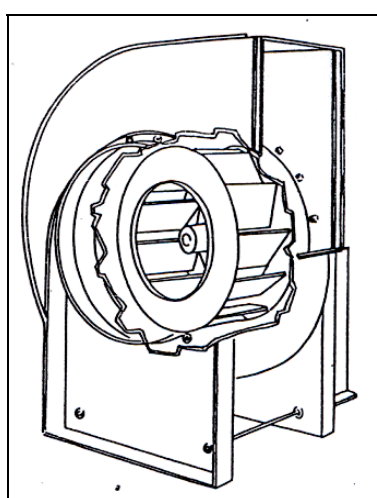
การหาลำดับสำหรับเลือกพัดลมอัดอากาศที่ใช้กับสระเป่าเต็ดเบด [10] ได้จากความดันตกคร่อมพัดลมอัดอากาศ $\Delta P_f = P_2 - P_1$ โดยที่ความดัน $P_1 = P_{atm}$ และอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าเบด $Q_2 = U_{mf} A_t$ จะได้

$$W_f = Q_2 \Delta P_f \quad (2-14)$$

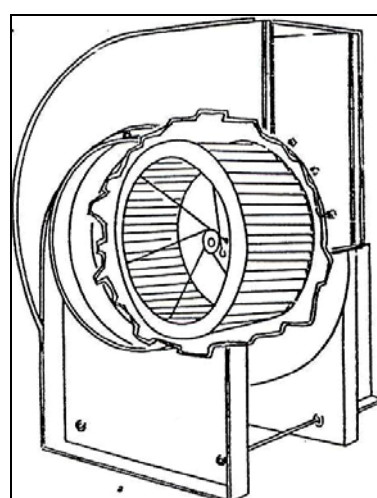
2.4 การเลือกชนิดของพัดลมอัดอากาศที่เหมาะสมต่อการใช้งานในสระเป่าเต็ดเบด

พัดลมอัดอากาศที่ทำให้อากาศไหลในระบบของงานด้านอบแห้งมี 2 ประเภท คือพัดลมอัดอากาศแบบไหลตามแกน (Axial Flow Fan) และพัดลมอัดอากาศแบบเหวี่ยง (Centrifugal Fan) แต่ข้อเสียของพัดลมแบบไหลตามแกน มีเสียงดังและมีการทำงานที่ไม่เสถียร จึงไม่สามารถใช้กับงานที่ต้องการความดันสูงสำหรับสระเป่าเต็ดเบดได้ จึงควรเลือกใช้พัดลมอัดอากาศแบบชนิดเหวี่ยง (Centrifugal Fan) ซึ่งเหมาะสมกับงานด้านอบแห้งที่ต้องการความดันสูงอย่างเช่น สระเป่าเต็ดเบด

หรือ ฟลูอิดไดซ์เบดโดย พัดลมอัดอากาศแบบเหวี่ยง (Centrifugal Fan) มีอยู่ 2 แบบคือ 1. พัดลมแบบโค้งหน้าและ 2. พัดลมแบบโค้งหลัง พัดลมอัดอากาศชนิดโค้งหน้าเป็นที่นิยมมากที่สุด เพราะงานด้านอบแห้งต้องการความดันและประสิทธิภาพของพัดลมอัดอากาศสูง โดยที่พัดลมอัดอากาศชนิดโค้งหน้าสูงสุดถึง 55-75 เปอร์เซ็นต์ เพื่ออัดอากาศในเบดให้เม็ดของแข็งยกตัวลอยขึ้นได้ดีกว่าชนิดอื่นและที่สำคัญ คือพัดลมอัดอากาศชนิดนี้ มีการเปลี่ยนแปลงภาระของกำลังในมอเตอร์น้อย เมื่อภาระโหลดมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จากแรงดันเนื่องจากลิ้นปีกผีเสื้อที่หมุนเปลี่ยนแปลงที่ทางเข้า หรือทางออกของพัดลมอัดอากาศ

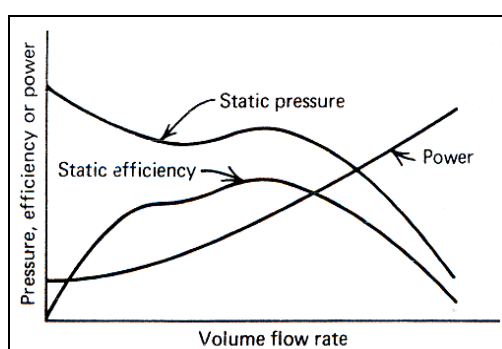


แบบโค้งหลัง

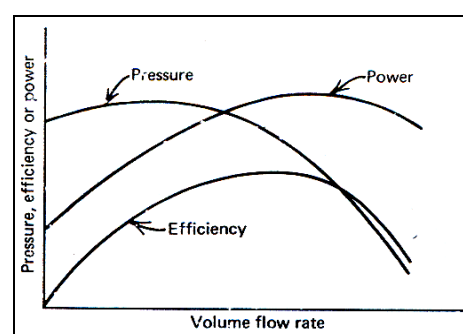


แบบโค้งหน้า

ภาพที่ 2-4 ใบพัดแบบต่างๆ ที่นิยมใช้ในงานอบแห้ง[5]



แบบโค้งหน้า



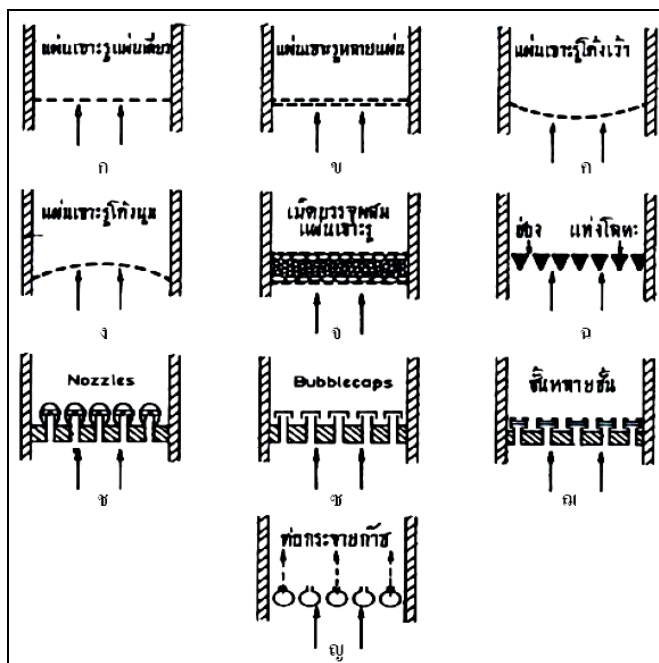
แบบโค้งหลัง

ภาพที่ 2-5 เปรียบเทียบกราฟสมรรถนะของพัดลมแบบอัดอากาศ แบบโค้งหน้า และโค้งหลัง[10]

จากกราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของพัดลมอัดอากาศ แบบโค้งหน้าและโค้งหลังพบว่าแบบโค้งหน้ามีความดันและประสิทธิภาพในช่วงต่างๆ ที่ลิ้นปีกผีเสื้อเปิดโดยเฉลี่ยสูงกว่า แบบโค้งหลังในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบโค้งหน้า

2.5 การออกแบบตะแกรงกระจายอากาศ

ตะแกรงกระจายอากาศมีผลต่อ ความเร็ว และความดันตกคร่อมในเบดแตกต่างกันไปตามชนิดของตะแกรงกระจายอากาศและจำนวนชั้นของแผ่นตะแกรงยิ่งมาก ทำให้ความเร็วอากาศไหลผ่านตะแกรงกระจายอากาศจะช้าลง แต่ความดันตกคร่อมในเบดเพิ่มสูงขึ้น ส่วนรูเจาะของตะแกรงถ้ามีจำนวนรูเจาะต่อความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านจะสูงขึ้นด้วย AGARWAL และคณะ[4] ได้ให้ความเห็นว่าความดันตกคร่อมตะแกรงกระจายอากาศไม่ควรเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ [4] ชนิดของตะแกรงกระจายอากาศที่นิยมใช้มีดังนี้



ภาพที่ 2-6 แบบของการกระจายลักษณะต่างๆกัน[4]

ตะแกรงกระจายอากาศดังภาพที่ 2-6 มีชื่อเรียกตามรูปร่างลักษณะของการวางแผ่นตะแกรงดังนี้ แบบ (ก) ใช้แผ่นเจาะรูแผ่นเดียว แบบ (ข) ใช้แผ่นเจาะรู 2 แผ่นซ้อนกัน แบบ (ค) ใช้เม็ดโลหะวางอยู่บนแผ่นเจาะรู แบบ (ง) ให้แผ่นโลหะเคลือบวางเรียงกันจะมีช่องว่างเป็นช่องยาว แบบ (จ) ใช้เป็น หลายอัน แบบ (ฉ) ใช้เป็นเหมือนในหอกลับ การเลือกแผ่นตะแกรงที่ใช้ใน สะเป้าเต็ดเบด ควรเลือกแบบของแผ่นกระจาย (ก) ใช้รูเจาะแบบแผ่นเดียว เนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานใน สะเป้าเต็ดเบด โดยความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านออกจากตะแกรงสูงและมีความดันตกคร่อมน้อยกว่าตะแกรงกระจายอากาศแบบอื่น

2.5.1 จำนวนรูเจาะของตะแกรงกระจายอากาศ เป็นสมการที่วิเคราะห์จากสัดส่วนของฟองก๊าซที่ไหลผ่านตะแกรงกระจายอากาศซึ่งมีผลต่อความเร็ว ณ ตำแหน่งทางออกของตะแกรง และความดันตกคร่อมที่ตัวตะแกรง ถ้ารูเจาะของตะแกรงมีจำนวนมากความเร็วของอากาศจะไหลผ่านตะแกรง

ได้เร็วและมีความดันตกคร่อมตัวตะแกรงน้อย โดยจำนวนของรูเจาะที่เหมาะสมต่อการออกแบบสามารถคำนวณได้จาก

$$U_0 = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 U_{or} N_{or} \quad (2-15)$$

สามารถจัดรูปของ (2-15) เพื่อหาจำนวนรูเจาะของตะแกรงต่อพื้นที่ได้ดังนี้

$$N_{or} = \frac{4U_0}{\pi d_{or}^2 U_{or}} \quad (2-16)$$

ความเร็วของเบดว่างเปล่า (U_0) กับ ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านตะแกรง U_{or} สามารถหาได้จากหัวข้อ 2.5.2 และ 2.5.3 จากสมการ(2-16) ยังมีตัวแปรไม่ทราบค่าถึงสองตัวแปรคือ N_{or} และ d_{or} สามารถหาค่าได้จากวิธีการ Trial and Error

2.5.2 การหาความเร็วของเบดว่างเปล่า(U_0) [4] เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับหา สัดส่วนของรูเจาะตะแกรงต่อพื้นที่ เนื่องจากมีผลต่อการเลือกจำนวนรูเจาะต่อพื้นที่ของตะแกรงกระจายอากาศ โดยสมการสามารถใช้ได้ทุกย่านของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ดังนี้

$$\frac{\Delta P_b}{H} g_c = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})^2 \mu U_0}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s \cdot D_p)^2} + \frac{1.75(1-\varepsilon_{mf}) \rho_g U_0^2}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s \cdot D_p)} \quad (2-17)$$

โดยที่ความสูงของเบด (H) ของสมการ(2-17) ควรมีความสูงเป็นสองเท่าของความสูงที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน $H \geq 2L_{mf}$ ถ้าขนาดความสูงของเบดถ้ามีความสูงน้อยกว่าสองเท่าจะทำให้ปลาหมึกกระเด็นออกจากเบดเมื่อน้ำหนักของปลาหมึกลดลงตามเวลาของการอบแห้ง ส่วนการตรวจสอบผลการคำนวณความเร็วของเบดว่างเปล่าที่ โดยใช้ค่าของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของอากาศที่ไหลผ่านเบด ดังนี้[4]

$$Re_b = \frac{d_t \rho_g U_0}{\mu} \quad (2-18)$$

ผลการคำนวณค่าของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สมการ(2.18) กรณีที่ช่วงของการไหลความเร็วต่ำ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่คำนวณได้มีค่า $Re_b < 20$ และอนุภาคของแข็งมีขนาดเล็ก เทอมของความดันเทอมแรกจากสมการ(2-1) ทางด้านขวามือ จะถูกตัดออกเหลือเทอมที่สองจากทางด้านขวามือเท่านั้น และ สามารถเขียนรูปแบบของสมการ[4]ได้ดังนี้

$$\frac{\Delta P_b}{H} g_c = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})^2 \mu U_0}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s \cdot D_p)^2} \quad (2-19)$$

สามารถจัดรูปของ (2-18) เพื่อหาความเร็วในเบคว่างเปล่า (U_0) ดังนี้

$$U_0 = \frac{\Delta P_b g_c \varepsilon_{mf}^3 (\phi_s D_p)^2}{150 H \mu (1 - \varepsilon_{mf})^2} \quad (2-20)$$

ผลการคำนวณค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ถ้าค่าที่คำนวณได้ $Re_b > 1,000$ จะเป็นกรณีที่ช่วงของการไหลความเร็วสูง การสูญเสียพลังงานจลน์จะมีค่ามากกว่าผลของแรงเสียดทาน จาก (2-17) สมการจะลดรูปเหลือเพียงเทอมที่สองจากทางด้านขวามือ ดังนี้

$$\frac{\Delta P_b}{H} g_c = \frac{1.75(1 - \varepsilon_{mf}) \rho_g U_0^2}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s D_p)} \quad (2-21)$$

สามารถจัดรูปของ (2-21) เพื่อหาความเร็วในเบคว่างเปล่าได้ใหม่ ดังนี้

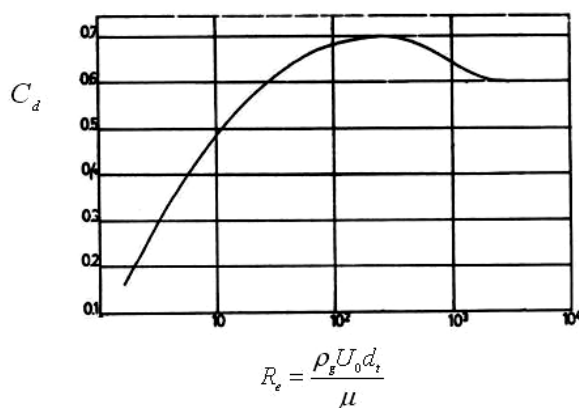
$$U_0 = \left[\frac{\Delta P_b g_c \varepsilon_{mf}^3 (\phi_s D_p)}{1.75 H \rho_g (1 - \varepsilon_{mf})} \right]^{1/2} \quad (2-22)$$

การเลือกใช้สมการ (2-20) หรือสมการ (2-22) เพื่อใช้ตรวจสอบการคำนวณความเร็วของเบคว่างเปล่า (U_0) จากสมการ (2-17) ขึ้นอยู่กับค่า Re_b ตามที่ได้กล่าวมาแล้วโดยผลลัพธ์ที่ได้ควรมีค่าใกล้เคียงกัน และค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์วิกฤติของการไหลในท่อของสมการ (2-18) จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเมื่อค่า $Re_b > 2,100$

2.5.3 ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านตะแกรงกระจายอากาศ (U_{or}) เป็นสมการที่คำนวณได้จากสัมประสิทธิ์ของตะแกรงกระจายอากาศ หรือ ออร์ฟิช (C_d) เพื่อแทนในสมการ (2-16) ดังนี้

$$U_{or} = C_{d,or} \left(2g_c \frac{\Delta P_d}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (2-23)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของ ตะแกรงกระจายอากาศ (C_d) หาได้จากภาพที่ 2-7 โดยค่าสัมประสิทธิ์ของตะแกรงจะมีค่าแปรผันในช่วงการไหลที่มีค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำในช่วง $0 < Re_b < 10^3$ และ จะมีค่าคงที่เท่ากับ 0.6 เมื่ออยู่ในช่วงความเร็วของการไหลสูงกว่า $Re_b > 10^3$ ขึ้นไป ดังนี้



ภาพที่ 2-7 ค่าสัมประสิทธิ์ของตะแกรงกระจายอากาศ[4]

เมื่อคำนวณความเร็วที่ไหลผ่านตะแกรงกระจายอากาศแล้ว สามารถหาเปอร์เซ็นต์ของ สัดส่วนพื้นที่รูเจาะต่อพื้นที่ทั้งหมดของตะแกรงกระจายอากาศ ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ที่บ่งบอกถึง อัตราส่วนพื้นที่รูเจาะต่อพื้นที่ของตะแกรงกระจายอากาศทั้งหมด เนื่องจากถ้ามีเปอร์เซ็นต์สูงจะมี พื้นที่ของรูเจาะมากกว่าเปอร์เซ็นต์ต่ำ โดยสมการได้จากการประยุกต์ใช้สมการ (2-15) ซึ่งเป็น อัตราส่วนความเร็วของเบดว่างเปล่า กับความเร็วอากาศที่ไหลผ่านตะแกรงกระจายอากาศ โดย เปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนรูเจาะต่อพื้นที่ทั้งหมด [4] ดังนี้

$$\% \text{สัดส่วนของพื้นที่รูเจาะต่อพื้นที่ทั้งหมด} = \frac{U_o}{U_{or}} \quad (2-24)$$

2.5.4 ความเร็วหลุดลอย (U_t) เป็นความเร็วที่ใช้สำหรับ สะเป้าเต็ดเบด โดยทั่วไปต้องไม่ เกินความเร็วที่มีของแข็งหลุดลอยออกจากเบด เป็นอีกตัวแปรที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ ความเร็วของอากาศต้องไม่มากกว่าความเร็วที่หลุดลอยออกจากเบด สมการของความเร็วหลุดลอยมี ความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของ ตะแกรงกระจายอากาศจากภาพที่ 2-7 ดังนี้

$$U_t = \left[\frac{4D_p g(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g c_d} \right]^{1/2} \quad (2-25)$$

2.6 การกำหนดขนาดท่ออัดอากาศและมุมกรวยของ สะเป้าเต็ดเบด

ความเร็วของของไหลที่ทำให้เกิดการหมุนวนใน สะเป้าเต็ดเบดได้นั้นต้องมีค่าสูงมาก ขนาด ของความเร็วขึ้นอยู่กับ ปัจจัยต่างๆคือ ขนาดของท่ออัดอากาศ (D_t) รูปร่างของกรวยและความสูง ของเบด จะต้องมีความสัมพันธ์กัน โดยจะกล่าวถึงการกำหนดขนาดดังนี้

2.6.1 ขนาดของท่ออัดอากาศ เป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันและแปรผันตามความสูงของเบด ความเร็วของอากาศในท่ออัดอากาศจะมีค่าน้อยลงเมื่อนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดโตขึ้น สามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศอัดในสระเป่าเตี๊ยะเบด ได้จากสมการของ Mathur และ Gishler [4] ซึ่งกล่าวถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆกับความเร็วต่ำสุดของสระเป่าเตี๊ยะเบด เพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออัดอากาศ (D_i) จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด (D_e) ไว้ดังนี้

$$U_{mf} = \left(\frac{D_p}{D_e} \right) \left(\frac{D_i}{D_e} \right)^{113} \sqrt{\frac{2g_c H(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (2-26)$$

สามารถจัดรูปของ (2-26) เพื่อหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออัดอากาศ (D_i) ดังนี้

$$D_i = \left\{ \frac{U_{mf} D_e^{114} \rho_g^{1/2}}{D_p [2g_c H(\rho_s - \rho_g)]^{1/2}} \right\}^{1/113} \quad (2-27)$$

2.6.2 มุมเอียงของกรวย สามารถหาได้จากความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันโดยคำนวณตัวแปรค่า $1/n$ เพื่อใช้เลือกเลือกมุมเอียงของกรวยตามเงื่อนไขได้จากสมการ

$$U_{mf} = \left(\frac{D_p}{D_e} \right) \left(\frac{D_i}{D_e} \right) \left[\frac{2g_c H(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{1/n} \quad (2-28)$$

เงื่อนไขของการเลือกมุมเอียงของกรวยค่า n จะแปรแปรตามขนาดของท่ออากาศอัด และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเบดดังนี้

$1/n = 0.23$ เมื่อ D_i มีขนาด 5-10 ซม. มุมกรวยเท่ากับ 45 องศา

$1/n = 0.13$ เมื่อ D_i มีขนาด 5-10 ซม. มุมกรวยเท่ากับ 65 องศา

$1/n = 0.33$ เมื่อ D_e มีขนาด 5-10 ซม. มุมกรวยเท่ากับ 45-85 องศา

ถ้า D_e มีขนาด 60 ซม. ขึ้นไป ค่าของ n ไม่แปรเปลี่ยนไปตามมุม

2.7 การออกแบบขนาดของฮีตเตอร์

เมื่อเม็ดยางแข็งเคลื่อนที่ไปมาอย่างปั่นป่วนอยู่ภายในเบด ทำให้ความร้อนกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในเบด การถ่ายเทความร้อนภายในเบด เป็นแบบการพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) ดังนั้นการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยคำนวณหา ปริมาณ

ความร้อนได้จากสมการของ Van Heerden และคณะ[4] ดังนี้

$$\left(\frac{h_w D_p}{k_g} \right) = 0.58 \left(\frac{C_{pg} \mu_g}{k_g} \right)^{0.5} \left(B \frac{D_p G}{\mu_g} \right)^{0.45} \left(\frac{\rho_s (1 - \varepsilon_{mf})}{\rho_g} \right)^{0.18} \left(\frac{C_s}{C_p} \right)^{0.36} \quad (2-29)$$

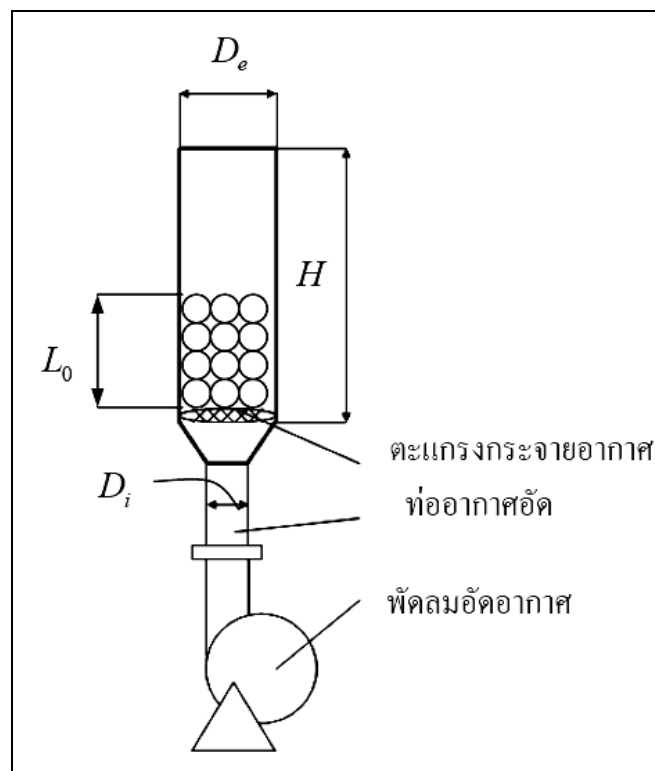
สามารถจัดรูปของ (2-30) และแทนค่า $G = U_0 \rho_g$ เพื่อหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_w) โดยมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$h_w = 0.58 \frac{k_g}{D_p} \left(\frac{C_{pg} \mu_g}{k_g} \right)^{0.5} \left(\phi_s \frac{D_p U_0 \rho_g}{\mu_g} \right)^{0.45} \left(\frac{\rho_s (1 - \varepsilon_{mf})}{\rho_g} \right)^{0.18} \left(\frac{C_s}{C_p} \right)^{0.36} \quad (2-30)$$

ขนาดของฮีตเตอร์สามารถคำนวณได้จากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนดังนี้

$$Q = h_w A_w \Delta T_b \quad (2-31)$$

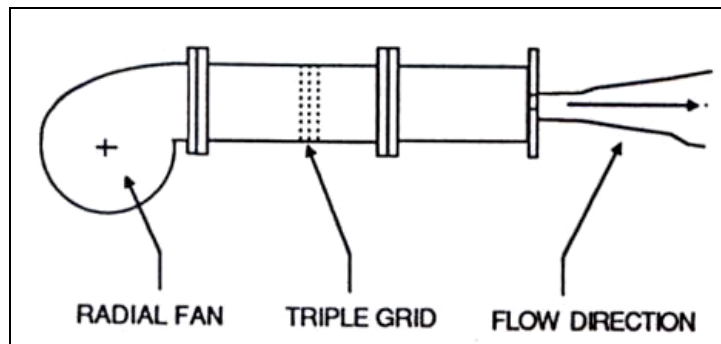
ผลจากการออกแบบจากหัวข้อของ 2.2 -2.6 การออกแบบสเปป้าเต็คเบด ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว สามารถออกแบบเบดได้ตามลักษณะดังภาพที่ 2-8 ดังนี้



ภาพที่ 2-8 สเปป้าเต็คเบดและตัวแปรที่สำคัญต่อการออกแบบ

2.8 การวัดความเร็ว ณ ตำแหน่งทางเข้า สะเปาเต็ดเบด

การไหลของอากาศ ณ ตำแหน่งทางเข้าของสะเปาเต็ดเบด โดยมากจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้ความเร็วของอากาศของแต่ละจุดที่ไหลในท่อไม่เท่ากันและมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วอากาศตลอดเวลา โดยวิธีการวัดได้ประยุกต์ใช้จากงานวิจัยของ P.Diodati และคณะ [11] โดยการใช้การทดลองและออกแบบวิธีการวัดการไหลแบบปั่นป่วนในท่ออากาศอัดที่ต่อเข้ากับพัดลมอัดอากาศ โดยเจาะรูเล็กๆ รอบท่อทั้งหมด 3 แถว (Triple Grid) เพื่อศึกษาความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ จากรัศมีของท่อและความเร็วของอากาศในแนวแกน โดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วแบบ Hot-Wire วัดความเร็วในลักษณะของ Triple Grid ดังภาพ



ภาพที่ 2-9 ตำแหน่งการวัด Triple grid [11]

2.9 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและความชื้นสมดุล

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือวัสดุแห้ง ความชื้นในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้น

2.9.1 ชนิดของความชื้นในวัสดุ มีสองชนิดคือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Moisture Content Wet-basis) และความชื้นมาตรฐานแห้ง (Moisture Content Dry-basis) สามารถแสดงได้ 2 แบบคือ

$$\text{ความชื้นมาตรฐานเปียก} \quad M_w = \frac{m_w - m_d}{m_w} \cdot 100 \quad (2-32)$$

$$\text{ความชื้นมาตรฐานแห้ง} \quad M_d = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad (2-33)$$

ความชื้นมาตรฐานเปียก นิยมใช้ในวงการค้าโดยทั่วไป นิยมให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ ($100m_w$) ส่วนความชื้นมาตรฐานแห้ง นิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้นเป็นเพราะมวลวัสดุแห้งมีค่าคงที่ หรือเกือบคงที่ในระหว่างการ

อบแห้งความหมายของคำว่าคงที่ในที่นี้หมายถึง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมีการหายใจเผาผลาญอาหารทำให้มวลแห้งลดลง โดยส่วนใหญ่มวลแห้งจะลดลงเพียงเล็กน้อย

2.9.2 การหาความชื้นเริ่มต้นในอาหารหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง[5] นิยมใช้ตู้อบเนื่องจากได้ผลที่แม่นยำสูงสามารถใช้อ้างอิงได้ กรณีแรกนำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการหาความชื้นมาคั่วให้ละเอียดใส่ตู้อบที่อุณหภูมิ 130 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง กรณีที่สองนำผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้บดใส่ตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 72-96 ชั่วโมง กรณีที่ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูงมากต้องแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ ใส่ตัวอย่างเมล็ดพืชในตู้อบแห้งเพื่อลดความชื้นลงช่วงหนึ่งก่อนจากนั้นนำไปบดให้ละเอียดและอบแห้งต่อไป ความชื้นของผลิตภัณฑ์สามารถคำนวณได้จากมวลของน้ำที่หายไป

2.9.3 ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์(M_e) ความชื้นสมดุลมีความสำคัญต่อการศึกษากระบวนการอบแห้ง เมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่(อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆหนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุจะมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆเครื่องอบแห้งเรียกว่า ความชื้นสมดุล ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งเส้น Isotherm การหาความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์โดยการปล่อยให้ผลิตภัณฑ์สัมผัสกับอากาศแวดล้อมที่สภาวะคงที่ถ้าอากาศไม่มีการเคลื่อนไหว เรียกว่าวิธีเชิงสถิต แต่ถ้าอากาศมีการเคลื่อนไหว เรียกว่าวิธีเชิงจลน์ วิธีการหลังนี้มีข้อดีคือวัสดุและอากาศแวดล้อมจะเข้าสู่สมดุลเร็วกว่าวิธีแรกเหมาะกับวัสดุที่มีความชื้นสูง ถ้าปล่อยไว้นานเกินไปวัสดุอาจเสียหายโดยเชื้อรา ทำให้ค่าที่วัดได้ผิดพลาดไป โดยการทดลองจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมให้คงที่ ส่วนการควบคุมอุณหภูมิทำได้โดยใช้ตู้อบไฟฟ้าที่มีเทอร์โมสตัทเป็นตัวควบคุมการทำงานของขดลวดไฟฟ้า ความชื้นของอากาศแวดล้อมอาจควบคุมได้โดยใช้กรดที่ความเข้มข้นต่างๆกันหรือสารละลายอิ่มตัวของเกลือต่างๆดังในตารางที่ 2-1 โดยทั่วไปจะบรรจุกรดหรือสารละลายอิ่มตัวของเกลือลงในขวดแก้วขนาดเล็ก แล้ววางวัสดุลงบนตะแกรงซึ่งแขวนไว้เหนือกรดหรือสารละลายเกลืออิ่มตัว ปิดฝาขวดให้แน่น เพื่อป้องกันการถ่ายเทมวลระหว่างอากาศภายใน และภายนอกขวดจากนั้นจึงนำไปเข้าสู่ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิ

ตารางที่ 2-1 เปอร์เซนต์ความชื้นสัมพัทธ์เหนือกรดกำมะถันที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ[5]

อุณหภูมิ	ความเข้มข้นของกรดโดยน้ำหนัก(%)			
	20	40	60	80
-17.8	87.3	55.7	15.0	3.14
10	87.4	56.6	15.8	3.88
20	87.4	56.7	16.3	4.76

ตารางที่ 2-1 (ต่อ)

อุณหภูมิ	ความเข้มข้นของกรดโดยน้ำหนัก(%)			
	20	40	60	80
30	87.4	56.6	17.0	5.75
40	87.4	57.5	17.8	6.88
44.4	88.8	58.3	18.8	8.20

เมื่อได้ความชื้นสัมพัทธ์ของผลิตภัณฑ์ ที่ต้องการอบแห้งจากการทดลองสามารถเขียนสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อธิบายการระเหยของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้งโดยมีวิธีการ ต่างๆดังที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.9.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การอบแห้งโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงการอบแห้งลดลง จากลักษณะปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวได้มีการนำแบบจำลองในทางคณิตศาสตร์มาอธิบายการแพร่ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ

2.9.4.1 กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุอบแห้ง ได้มีผู้นำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Luikov[5] ได้เสนอกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุอบแห้ง ซึ่งเกิดขึ้นในแบบต่างๆดังต่อไปนี้

ก) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว เนื่องมาจากการไหลในรูเล็ก (Capillary flow) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface Force)

ข) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Liquid Diffusion)

ค) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว เนื่องจากการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็กๆ (Surface Diffusion)

ง) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอ เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion)

จ) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปไอน้ำ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal- Diffusion)

ฉ) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวและไอน้ำ เนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม (Hydrodynamic Flow)

จากกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุดังกล่าว Luikov ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุและความดันรวม แต่เนื่องจากแบบจำลอง

ของ Luikov มีความยุ่งยากมาก เพราะมีตัวแปรและค่าพารามิเตอร์หลายตัว ดังนั้นจึงยังไม่มีกรนำแบบจำลองนี้ไปใช้ การทดลองจึงใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งดังกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.9.4.2 สมการอบแห้งทางทฤษฎี โดยการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ในระบบแกนโพлярสำหรับหนึ่งมิติสำหรับการแพร่ความชื้นในวัสดุจะได้ว่า

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (2-34)$$

โดยที่ $c=0$ สำหรับการแพร่ความชื้นในวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก
 $c=1$ สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกระบอกยาวมาก
 $c=2$ สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลม
 เมื่อ M คือ ปริมาณความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
 t คือ ระยะเวลา, วินาที
 r คือ รัศมีทรงกลม, เมตร
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, เมตร²/วินาที

โดยเงื่อนไขที่สถานะเริ่มต้นและขอบเขตสามารถเขียนได้ว่า

$$M(r,0) = M_{in} \quad (2-35)$$

$$M(r_0,t) = M_{eq} \quad (2-36)$$

เมื่อ M_{in} คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
 M_{eq} คือ ปริมาณความชื้นที่สถานะสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

คำตอบของสมการ (2-34) ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขสถานะเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตตามสมการ (2-35) และ (2-36) สำหรับวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมากสามารถเขียนได้ว่า

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} X^2 \right] \quad (2-37)$$

2.9.4.3 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งทางทฤษฎีทำได้ยากกว่าและผลลัพธ์ที่ได้อาจไม่ถูกต้อง เมื่อเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกึ่งทฤษฎีที่ได้จากการทดลองที่สามารถสร้างได้ง่ายกว่า โดยการตั้งสมมติฐานว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของปริมาณความชื้นของเมล็ดพืช และปริมาณความชื้นสมดุล ข้อสมมติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของ Newton [5] สมการเขียนได้ดังนี้

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = k(\bar{M} - M_{eq}) \quad (2-38)$$

โดยใช้เงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นของการอบแห้ง $M_0 = M_{in}$ คำตอบของสมการ (2-34) คือ

$$MR = \exp(-k_1 t) \quad (2-39)$$

โดยที่

$$MR = \frac{\bar{M}_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (2-40)$$

เมื่อสมการ (2-39) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton เพื่อใช้หาอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) เมื่อ k_1 คือค่าคงที่ของการอบแห้งโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton [5] ได้ปรับปรุงโดย Page และสามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$MR = \exp(-k_2 t^n) \quad (2-41)$$

โดยที่สมการ (2-41) คือสมการ Modified Logarithmic Model หรือแบบจำลองของ Page เพื่อใช้หาอัตราส่วนความชื้นเมื่อ k_2 และ n คือค่าคงที่ของการอบแห้งของ Page

บทที่ 3

การคำนวณขนาดของอุปกรณ์ สำหรับสะเป้าเต็ดเบด

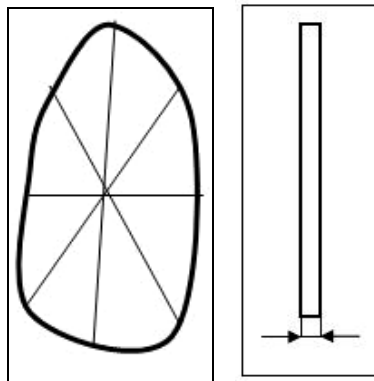
ในบทที่ 3 นี้เป็นการคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์หลัก ในแต่ละส่วนของสะเป้าเต็ดเบด เพื่อใช้อบแห้งปลาหมึก โดยใช้สายพันธุ์ปลาหมึกกล้วยมาเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบ เนื่องจากนิยมนำมาทำให้สุกเพื่อบริโภค หรือทำปลาหมึกเส้นฝอยก่อนนำไปฉีกฝอยจะต้องดึงส่วนหัวของปลาหมึกออกก่อนและนำไปผ่านการกระบวนการทำให้สุกที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และที่ความชื้น 24 % มาตรฐานเปียกหรือต่ำกว่า ตามมาตรฐานของการกักเก็บเสียก่อน เมื่อปลาหมึกมีความแห้งจะสามารถนำไปฉีกฝอยได้ง่ายขึ้น การคำนวณหาขนาดชิ้นส่วนของอุปกรณ์หลักจะใช้ทฤษฎี จากบทที่ 2 บางตามลำดับขั้นตอนได้ใช้วิธีหาตัวแปรจากการทดลอง ดังนี้

3.1 การหาขนาดของอุปกรณ์ในลักษณะของการไหลแบบ คงตัว

การคำนวณการไหลกรณีที่เป็นแบบคงตัวมีวัตถุประสงค์ เพื่อคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับ สะเป้าเต็ดเบดในตำแหน่งที่ลิ้นปีกผีเสื้อเปิดเต็มที่ โดยมีวิธีการคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์ดังนี้

3.1.1 การคำนวณหาความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน(U_{mf}) โดยมีการหาตัวแปรต่างๆจากการทดลอง และการคำนวณจากสมการออกแบบที่ได้กล่าวไว้ในบทที่2 ผลจากการคำนวณ สามารถใช้หาอัตราการไหลเชิงปริมาตร(Q_2) และขนาดของพัดลมอัดอากาศ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 3.1.2.3

3.1.1.1 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ของปลาหมึก (D_p) การออกแบบ สะเป้าเต็ดเบด เพื่อใช้ในการอบแห้งปลาหมึก นั้น รูปทรงของปลาหมึกกล้วยไม่ได้เป็นทรงกลม ตามทฤษฎี จึง ทำการทดลองเพื่อหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของปลาหมึกโดยคัดเลือกปลาหมึกกล้วย จำนวน 100 ตัว นำมาวัดลงในกระดวยเพื่อหาพื้นที่จากรูปทรงของปลาหมึก และวัดขนาดของปลาหมึกในแนวเส้นทะแยงมุม สี่ ทิศทาง แล้วนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยดังนี้



ภาพที่ 3-1 ลักษณะการวัดเส้นเส้นผ่านศูนย์กลาง ใน สี่ ทิศทางและ ความหนาเพื่อหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 3-1 ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของปลาหมึก 100 ตัว

ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของปลาหมึก(D_p)	0.063 m

3.1.1.2 การคำนวณค่าของแฟคเตอร์รูปร่าง(ϕ_s) คือตัวแปรเบื้องต้นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน สำหรับการออกแบบสระเป่าเต็ดเบด จากทฤษฎีของการออกแบบในบทที่ 2 แฟคเตอร์รูปร่าง สำหรับกรณีที่เกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้งมีรูปร่างเป็นทรงกลม ($\phi_s = 1$) แต่กรณีที่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้งไม่ได้มีรูปร่างเป็นทรงกลม ($\phi_s < 1$) เนื่องจากพื้นที่ผิวของปลาหมึกกล้วย ไม่ได้เป็นรูปทรงทางเรขาคณิต การคำนวณแฟคเตอร์รูปร่างของปลาหมึกสามารถหาได้จากนิยามของสมการ (2-6) ดังนี้

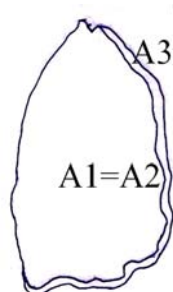
$$\phi_s = \frac{\text{Surface of sphere}}{\text{Surface of particle}} \quad (2-6)$$

เขียนรูปของสมการ(2-6) จากพื้นที่ผิวของทรงกลมได้ใหม่นี้

$$\phi_s = \frac{\pi d^2}{\text{Surface of particle}} \quad (3-1)$$

เนื่องจากพื้นที่ผิวของปลาหมึก (Surface of Particle) มีรูปร่างที่ไม่เป็นไปตามรูปทรงทางเรขาคณิตการหาพื้นที่ผิวของปลาหมึก ได้ใช้เครื่องมือวัดพื้นที่ (Polar Planimeter) วัดหาขนาดพื้นที่ผิวของปลาหมึกเฉพาะด้านหน้า ส่วนด้านหลังของปลาหมึกจะมีค่าเท่ากับด้านหน้า ($A_1=A_2$) ทำการวัดทั้งหมด 100 ตัวและนำมาเฉลี่ย ดังภาพที่ 3-3 ส่วนพื้นที่ด้านข้างหาได้จากเส้นรอบรูปของ

ปลาหมึกถูกวัดด้วยความหนา โดยใช้เพลทโค้งตัดเข้าตามรูปร่างของตัวปลาหมึก แล้วใช้เวอร์เนียร์วัดความหนาเป็นพื้นที่ A3 ดังรูป



ภาพที่ 3-2 แสดงสัญลักษณ์ของพื้นที่ผิวของปลาหมึก



ภาพที่ 3-3 การวัดหาพื้นที่ผิวของปลาหมึกโดยใช้ Polar Planimeter

ผลของค่าเฉลี่ยที่ได้จากการเครื่องมือวัด Polar Planimeter จากปลาหมึกจำนวน 100 ตัวดังนี้

ตารางที่ 3-2 ค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิวปลาหมึกทั้งหมด

พื้นที่ผิวด้านหน้า;A1 (m^2)	พื้นที่ผิวด้านหลัง;A2 (m^2)	พื้นที่ผิวด้านข้าง;A3 (m^2)
2.964×10^{-3}	2.964×10^{-3}	6.09×10^{-4}
		ผลรวม 6.0×10^{-3}

การหาพื้นที่ผิวทรงกลมที่มีปริมาตรเทียบเท่ากับปลาหมึก (Surface of Sphere) การหาพื้นที่ผิวของทรงกลมปริมาตรเทียบเท่า ของปลาหมึกหาได้จากผลของค่าเฉลี่ยพื้นที่ผิวปลาหมึกดัง

ตารางที่ 3-3 และหาปริมาตรของปลาหมึกที่ทำการทดลอง โดยใช้ค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิวด้านหน้าคูณด้วยความหนาดังนี้

ตารางที่ 3-3 ปริมาตรของปลาหมึก (V_s)

พื้นที่ผิวด้านหน้า; A_1 (m^2)	ความหนา (m)	ปริมาตรเฉลี่ย (m^3)
2.964×10^{-3}	2.3×10^{-3}	6.8172×10^{-6}

การคำนวณต้องหาเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม d จากปริมาตรเฉลี่ยของปลาหมึกที่คำนวณได้ เพื่อใช้หาค่าพื้นที่ผิวทรงกลมปริมาตรเทียบเท่าปลาหมึก (Surface of Sphere) ได้จาก

$d = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$ แล้วหาเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม d ดังนี้

$$d = \sqrt[3]{\frac{6(6.8172 \cdot 10^{-6})}{\pi}}$$

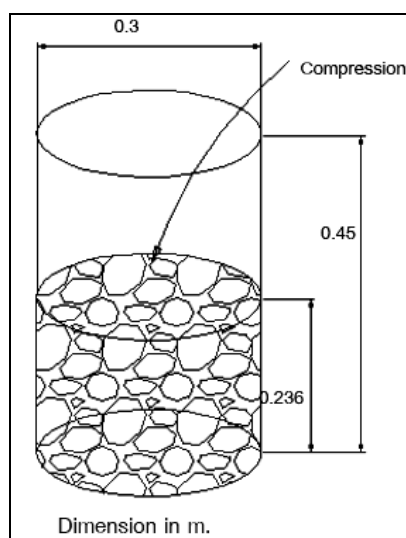
$$= 0.0235 \quad m$$

นำค่า d แทนค่าในสมการ (3-1) ดังนี้

$$\phi_s = \frac{0.0235^2 \pi}{6 \cdot 10^{-3}}$$

$$= 0.2892$$

3.1.13 การคำนวณหาสัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของปลาหมึก (ε_{mf}) รูปทรงของปลาหมึกที่ต้องการอบแห้งไม่เป็นรูปทรงทางเรขาคณิตและมีขนาดของปลาหมึกแต่ละตัวจากที่คัดเลือกมีขนาดความยาวใกล้เคียงกัน แต่มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน การเขียนสมการสัดส่วนช่องว่างต่ำสุด (ε_{mf}) วิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ทำได้ยากและผลลัพธ์ที่ได้อาจไม่ถูกต้องนัก จึงเลือกใช้วิธีการทดลอง โดยใช้ กระบอกสเตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 m แล้วใส่ปลาหมึกให้เต็ม จากนั้นใช้หัวกดไฮดรอลิกกดปลาหมึกให้ตัวยุบลงจนสุดแล้ว วัดส่วนที่ถูกกดลงไปและใช้ผลจากค่าเฉลี่ย 10 ครั้ง ดังรูป



ภาพที่ 3-4 การหาอัตราส่วนช่องว่างของปลาหมึก

$$\text{Volume of Particles} = \text{Total of a particles in the bed} - \text{Volume of a compression} \quad (3-2)$$

$$= \frac{\pi}{4} \cdot 0.3^2 [0.45 - 0.236]$$

ดังนั้นปริมาตรของช่องว่างในปลาหมึก เท่ากับ 0.01513 m^3

นำค่าผลลัพธ์ที่ได้จากสมการ(3-2) แทนค่าในสมการ(2-5) ดังนี้

$$\begin{aligned} \varepsilon_{mf} &= \frac{\text{Volume of a particle}}{\text{Total volume of particle in the bed}} \\ &= \frac{0.01513}{\frac{\pi}{4} \cdot 0.3^2} \\ &= 0.474 \end{aligned} \quad (2-5)$$

ค่าของสัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของปลาหมึก (ε_{mf}) = 0.474

3.1.1.4 สัดส่วนช่องว่างเฉลี่ย (ε) ช่องว่างเฉลี่ยคิดจากการจัดเรียงตัวของปลาหมึกแบบต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 คือ 1. แบบ Cubic 2. แบบ Orthorombic และ 3. แบบ Romboedric การวิเคราะห์การจัดเรียงตัวชนิดต่างๆ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์อาจได้ผลที่ไม่แม่นยำนัก เนื่องจากรูปร่างของปลาหมึกแต่ละมีขนาดแตกต่างกัน การออกแบบโดยการทดลองจึงเหมาะสมกว่า โดยหลักการแทนที่ของปริมาตรในของเหลว นำปลาหมึกไปเคลือบแลคเกอร์กันน้ำเพื่อไม่ให้น้ำสามารถซึมผ่านผิวของปลาหมึกได้แล้วจัดให้ปลาหมึกเรียงตัวทั้ง 3 แบบ เพื่อหาค่า

ปริมาตรช่องว่าง จากนั้นนำไปแทนค่าใน (2-11) เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่แม่นยำขึ้น ทำการทดลอง อย่างละ 10 ครั้ง โดยมีผลสรุปดังนี้

ตารางที่ 3-4 ผลของการจัดเรียงตัวของปลาหมึกแบบต่างๆ

ชนิดของการจัดเรียงตัว	ค่าสัดส่วนช่องว่าง(ε)
1. แบบ Cubic	0.634
2. แบบ Orthorombic	0.467
3. แบบ Romboedric	0.384
	ค่าเฉลี่ย 0.495

3.1.1.5 ความหนาแน่นของปลาหมึก ρ_s คืออีกปัจจัยที่มีความสำคัญและมีผลต่อการคำนวณ ความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิด ฟลูอิดไดเซชัน โดยที่ความหนาแน่นหาได้จากการนับจำนวนตัวของปลาหมึกน้ำหนัก 1 kg. แล้วคิดค่าเฉลี่ยของปลาหมึกจำนวน 1 ตัว เพื่อหาความหนาแน่นของปลาหมึก จากปริมาตรเฉลี่ย V ดังตารางที่ 3-3 จากการทดลองนับจำนวนของปลาหมึกต่อน้ำหนัก 1 kg. ได้ 120 ตัว ดังนั้นน้ำหนักของปลาหมึกเฉลี่ย m_s เท่ากับ $8.33 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$. แทนค่าในสมการหาความหนาแน่นดังนี้

$$\begin{aligned}\rho_s &= \frac{m_s}{V} \\ &= \frac{8.33 \cdot 10^{-3}}{6.8172 \cdot 10^{-6}} \\ &= 1221.91 \text{ kg/m}^3\end{aligned}\quad (3-4)$$

ดังนั้นปลาหมึกมีความหนาแน่น เท่ากับ 1221.91 kg/m^3

3.1.1.6 ความสูงที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน L_{mf} คือ การคำนวณหาความสูงที่ปลาหมึกลอยในเบดที่เป็นฟลูอิดไดเซชันเพื่อกำหนดความสูงของเบด H ต้องมีค่ามากกว่าความสูงที่เกิดฟลูอิดไดเซชันสองเท่าเป็นอย่างน้อย เพื่อป้องกันไม่ให้ปลาหมึกกระเด็นออกจากเบด การคำนวณขั้นต้นได้มีการหาตัวแปรของความสูงที่ต้องการใส่ปลาหมึก L_0 เสียก่อน โดยกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด $d_t = 0.25 \text{ m}$ แล้วคำนวณหาความสูงของปลาหมึก จากปริมาตรของเบดได้จากความหนาแน่น $L_0 = 0.3 \text{ m}$

$$\begin{aligned}L_{mf} &= \frac{(1 - \varepsilon)L_0}{(1 - \varepsilon_{mf})} \\ &= \frac{(1 - 0.495)0.3}{(1 - 0.474)} \\ &= 0.51 \text{ m}\end{aligned}\quad (2-11)$$

ผลการคำนวณ ความสูงต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันเบดเท่ากับ $0.51\text{ m} > 0.3\text{ m}$. การเกิดฟลูอิดไดเซชันในสระเป่าเต็ดเบด จะเกิดที่ความสูง 0.51 m . ในขณะที่เริ่มต้นอบแห้งและออกแบบให้ความสูงของเบด เป็นสองเท่า $H = 1\text{ m}$ เพื่อป้องกันปลาหมึกกระเด็นออกจากเบดขณะอบแห้งเนื่องจากปลาหมึกจะลอยตัวสูงขึ้นเมื่อมวลของปลาหมึกลดลงในขณะอบแห้ง

3.1.1.7 ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน (U_{mf}) ค่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน มีผลต่อขนาดของพัดลมอัดอากาศ ความดันและความเร็วของอากาศ ณ ตำแหน่งต่างๆในเบด การคำนวณใช้ค่าตัวแปรต่างๆที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.1.1.1-3.1.1.6 สรุปผลการคำนวณได้ดังนี้

ตารางที่ 3-5 ค่าตัวเบื้องต้นที่ใช้คำนวณความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน U_{mf}

ตัวแปร	ผลลัพธ์	หน่วย
1. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ของปลาหมึก (D_p)	0.063	m
2. แฟกเตอร์รูปร่าง (ϕ_s)	0.289	-
3. สัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของปลาหมึก (ε_{mf})	0.474	-
4. สัดส่วนช่องว่างเฉลี่ย (ε)	0.495	-
5. ความหนาแน่นของปลาหมึก (ρ_s) ที่ 27°C	1221.91	kg/m^3
6. ความสูงที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน (L_{mf})	0.51	m
7. ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_g) ที่ 27°C	1.1614	kg/m^3
8. ความหนืดของอากาศ (μ) ที่ 27°C	1.846×10^{-5}	$N.s/m^2$

นำค่าของตัวแปรต่างๆจากตารางที่ 3-5 แทนค่าในสมการของ Ergun [4] ดังนี้

$$\frac{1.75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \frac{(D_p U_{mf} \rho_g)^2}{\mu} + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}} \frac{(D_p U_{mf} \rho_g)}{\mu} = \frac{D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g_c}{\mu^2} \quad (2-1)$$

$$\frac{1.75}{0.289(0.474)^3} \frac{(0.063 \cdot U_{mf} \cdot 1.1614)^2}{1.846 \times 10^{-5}} + \frac{150(1 - 0.474)}{(0.289)^2 \cdot 0.474} \frac{(0.063 \cdot U_{mf} \cdot 1.1614)}{1.846 \times 10^{-5}}$$

$$= \frac{(0.063)^3 \cdot 1.1614 \cdot (1221.91 - 1.1614) \cdot 9.81}{(1.846 \times 10^{-5})^2}$$

$$386,154,751.3 U_{mf}^2 + 5,778,095.062 U_{mf} = 1.609 \times 10^{10}$$

จัดสมการใหม่ให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของสมการกำลังสอง เพื่อหาค่าของตัวแปร U_{mf} จากการแยกตัวประกอบของ U_{mf} โดยจัดสมการให้อยู่ในรูปของ $ax^2 + bx + c = 0$ ดังนี้

$$U_{mf}^2 + 0.01519U_{mf} - 41.667 = 0$$

$$U_{mf} = 6.447, -6.46 \text{ m/s}$$

ผลจากการแยกแฟกเตอร์ $U_{mf} = 6.447, -6.46 \text{ m/s}$ ดังนั้นจึงเลือกค่าที่เป็นบวกเพื่อนำไปใช้คำนวณ คือ 6.447 m/s

สามารถค่าตรวจสอบค่า U_{mf} ที่คำนวณได้จากเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ เลือกเพื่อใช้สมการที่(2-3) หรือ (2-4) สามารถหาจากสมการในเทอมของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของปลาหมึก ความเร็วของอากาศ และความหนืดของอากาศ จากตารางที่ 3-5 ค่าตัวแปรเบื้องต้น ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Re}_p &= \frac{\rho_g U_{mf} D_p}{\mu} \\ \text{Re}_p &= \frac{(1.1614)(6.447)(0.063)}{184.6 \cdot 10^{-7}} \\ &= 25,553.379 > 1,000 \end{aligned} \quad (2-2)$$

เนื่องจากค่าของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่คำนวณได้เท่ากับ $25,553 > 1,000$ และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการรอบแห้งเป็นปลาหมึกมีขนาดใหญ่ จึงเลือกใช้สมการ (2-4) ดังนี้

$$\begin{aligned} U_{mf} &= \left[\frac{\phi_s D_p (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3}{1.75 \rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[\frac{(0.213)(0.063)(1926 - 1.1614)(9.81)(0.694)^3}{1.75(1.1614)} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= 6.45 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (2-4)$$

ผลลัพธ์ถูกต้องเนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกัน

3.1.2 การคำนวณหาความดันตกคร่อมและความดัน ณ ตำแหน่งต่างๆในสระเป่าเต็ดเบด

ความดันตกคร่อมและความดัน ณ ตำแหน่งต่างๆในสระเป่าเต็ดเบด ดังภาพที่ 2-3 มีผลต่อการหาลำกำลังของพัดลมอัดอากาศ เนื่องจากกำลังของพัดลมอัดอากาศ หาได้จาก $Power = Q_2 \Delta P_f$ โดยคำนวณความดันตกคร่อมและ ความดัน ณ จุดต่างๆ ได้ดังนี้

3.1.2.1 ความดันตกคร่อมเบด (ΔP_b) ความดันตกคร่อมเบดมีผลต่อการหาความดัน P_2 ซึ่งมีอิทธิพลต่อการออกแบบสัปดาห์ของตะแกรงกระจายอากาศ คำนวณจากสมการ(2-10) ดังนี้

$$\Delta P_b = P_3 - P_4 = L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (2-10)$$

จากสมการ(2.9) สามารถหาค่าของความดันที่ทางเข้าเบด (P_3) ได้จาก $P_3 = \Delta P_b + P_4$ เพื่อนำไปใช้คำนวณความดันที่ทางออกของตะแกรงและความดันที่ทางออกของเบด (P_4) มีความดันเท่ากับบรรยากาศ 101.325 kPa และหาความดันตกคร่อมเบดโดยนำค่าตัวแปรต่างๆ จากตารางที่ 3-5 แทนลงในสมการ (2-10) ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta P_b &= 0.51(1 - 0.474)(1,221.91 - 1.1614)l \\ &= 327.47 \cdot 9.81 = 3.21256 \text{ kPa} \\ P_3 &= 3.21256 + 101.325 \\ &= 104.53755 \text{ kPa} \end{aligned}$$

3.1.2.2 ความดันตกคร่อมตะแกรงกระจายอากาศ (ΔP_d) จากสมการ (2-12) สามารถใช้คำนวณความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าตะแกรงกระจายอากาศ (P_2) ซึ่งไม่ควรเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของความดันตกคร่อมเบด ดังนี้

$$\Delta P_d = 0.1 \Delta P_b = P_2 - P_3 \quad (2-12)$$

สามารถหาความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าตะแกรงกระจายอากาศ (P_2) จากสมการ(2-12) โดย $P_2 = 0.1 \Delta P_b + P_3$ แทนค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_2 &= 0.1(3.21256) + 104.53755 \\ P_2 &= 104.858.815 \text{ kPa} \end{aligned}$$

3.1.2.3 ความดันตกคร่อมพัดลมอัดอากาศ (ΔP_f) เป็นผลต่างของความดันที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของพัดลมอัดอากาศ P_1 และ P_2 ตามลำดับ หาได้จาก $\Delta P_f = P_2 - P_1$ โดยที่ $P_1 = 101.325 \text{ kPa}$ คำนวณค่าของ $\Delta P_f = 3.53385 \text{ kPa}$

3.1.2.4 ขนาดของพัดลมอัดอากาศ ขนาดของพัดลมอัดอากาศที่ใช้สำหรับสะเป้าเต็ดเบด หาได้จาก $Power = Q_2 \Delta P_f$ โดยอัตราการไหลของอากาศ ณ ตำแหน่งทางเข้าของตะแกรง ซึ่ง

เป็นอัตราการไหล ณ ตำแหน่งทางออกพัดลมอัดอากาศ Q_2 คำนวณได้จากสมการ(2-14) โดยที่
เส้นผ่านศูนย์กลางของเบด $d_t=0.25$ m จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} Q_2 &= U_{mf} A_t \\ &= 6.447 \cdot \frac{\pi}{4} 0.25^2 \cdot \left(\frac{104.53755}{104.858815} \right) \\ &= 0.3155 \text{ m}^3 / \text{s} \end{aligned}$$

คำนวณกำลังงานของพัดลมอัดอากาศดังนี้

$$\begin{aligned} W_f &= Q_2 \Delta P_f \quad (2-14) \\ &= 0.3155 \cdot 3533.85 \\ &= 1120.23 \text{ Watt หรือ } 1.50 \text{ Hp} \end{aligned}$$

ควรเลือกขนาดของพัดลมอัดอากาศให้มีขนาดใหญ่กว่า ที่คำนวณได้ ถ้าเลือกขนาดเล็กกว่า อาจทำให้ปลาทูมิกที่อยู่ในเบดไม่สามารถยกตัวขึ้นและไม่เกิดปรากฏการณ์ของฟลูอิดไลเซชัน ดังนั้น ขนาดของพัดลมอัดอากาศที่ใกล้เคียงที่สุดคือ 2 Hp

3.1.3 การออกแบบตะแกรงกระจายอากาศ การคำนวณตะแกรงกระจายอากาศ เพื่อต้องการหาสัดส่วนของรูเจาะต่อพื้นที่ของตะแกรงทั้งหมด สำหรับเลือกตะแกรงกระจายอากาศ เพื่อให้ สะเป้าเต็ดเบด ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าเลือกตะแกรงกระจายอากาศ ที่มีจำนวนรูเจำน้อยเกินไป จะทำให้เกิด Pressure Drop ในสะเป้าเต็ดเบดสูง ความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าเบด จะมีความเร็วลดลงมากทำให้ปลาทูมิกไม่สามารถยกตัวลอยขึ้นได้ ในการคำนวณมีลำดับขั้นตอนดังนี้

3.1.3.1 คำนวณหาค่าความเร็วอากาศในเบดว่างเปล่า U_0 ใช้หาค่าของความเร็วอากาศในเบดขณะที่ไม่มีปลาทูมิก เพื่อนำไปใช้คำนวณหาสัดส่วนพื้นที่รูเจาะต่อตะแกรงของสมการ (2-24) โดยที่ความเร็วอากาศในเบดว่างเปล่า U_0 หาได้จากสมการ (2-17) ดังนี้

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} g_c = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})^2 \mu U_0}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s \cdot D_p)^2} + \frac{1.75(1 - \varepsilon_{mf}) \rho_g U_0^2}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s \cdot D_p)} \quad (2-17)$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆจากตารางที่ 3-5 และความสูงที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน $L_{mf} = 0.51m$ เพื่อหาความเร็วของเบดว่างเปล่า U_0 ดังนี้

$$\frac{(300.39)(9.81)}{0.51} = \frac{150(1-0.474)^2(184.6 \times 10^{-7})U_0}{(0.474)^3(0.213 \times 0.063)^2} + \frac{1.75(1-0.474)(1.1614)U_0^2}{(0.474)^3(0.213 \times 0.063)}$$

$$9822.753 = 39.950U_0 + 748U_0^2$$

$$U_0 = 3.623 \quad m/s.$$

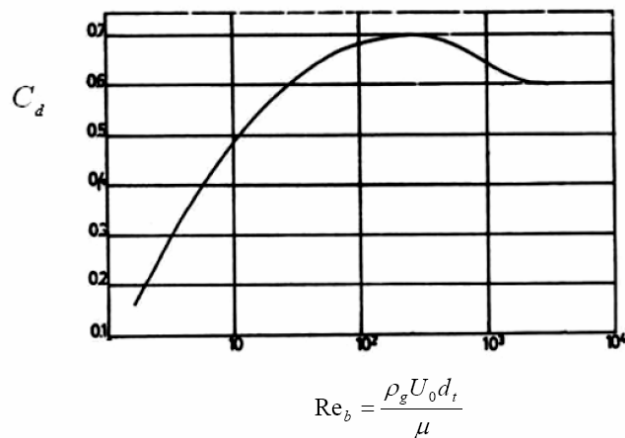
นำค่าของ U_0 เพื่อตรวจสอบ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ จากสมการที่ (2-19) โดยกำหนดขนาดของเบด $d_t = 0.25m$ แล้วแทนค่าตัวแปรดังนี้

$$Re_b = \frac{D_e \rho_g U_0}{\mu} \quad (2-18)$$

$$Re_b = \frac{0.25 \cdot 1.1614 \cdot 3.623}{1.846 \cdot 10^{-5}}$$

$$= 56,984.726$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของ ตะแกรงกระจายอากาศ (Orifice Coefficient ; C_d) สามารถหาได้จากภาพที่ 2-8 โดยใช้ค่าของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์จาก(2-19) ดังนี้



ภาพที่ 3-5 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของ ตะแกรงกระจายอากาศ (Orifice Coefficient ; C_d) [4]

ค่าที่ได้จากภาพที่ 3-5 $C_d = 0.6$ ใช้แทนค่าในสมการที่ (2-23) เพื่อหาความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านตะแกรง U_{or} ดังนี้

$$U_{or} = C_{d,or} \left(2g_c \frac{\Delta P_d}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (2-23)$$

$$= 0.6 \left[\frac{2(9.81)(30.039)}{1.1614} \right]^{1/2}$$

$$= 13.516 \quad m/s.$$

นำค่าของความเร็วอากาศในเบคว่างเปล่า U_0 และความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านตะแกรง U_{or} แล้วแทนค่าในสมการ (2-16) ดังนี้

$$N_{or} = \frac{4U_0}{\pi d_{or}^2 U_{or}} \quad (2-16)$$

$$N_{or} = \frac{4(3.623)}{\pi d_{or}^2 (13.516)}$$

เนื่องจากมีตัวแปรไม่ทราบค่าถึงสองตัวแปรจึงใช้วิธี Trial and Error โดยสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3-6 ผลของวิธี Trial and Error เพื่อหาจำนวนรูเจาะของตะแกรงกระจายอากาศต่อพื้นที่

$d_{or} (cm)$	$N_{or} (holes/cm^2)$
0.065	0.8082
0.07	0.6968
0.075	0.6070

จากการใช้วิธี Trial and Error ค่าของ $d_{or} = 0.07 \text{ cm}$ และ $N_{or} = 0.6968 \text{ holes/cm}^2$ เพื่อนำมาใช้หาจำนวนรูเจาะของตะแกรงกระจายอากาศ ที่ใช้ในสระเป่าเตี๊ยะเบด ได้จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด $d_t = 0.25 \text{ m}$ ดังนั้นจำนวนรูเจาะตะแกรงในเบดทั้งหมดหาได้จาก $0.6968 \cdot 0.25 \cdot 10^2 = 17.42$ รูเจาะและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเท่ากับ 0.007 m และสัดส่วนรูเจาะต่อพื้นที่ตะแกรงกระจายอากาศ $\frac{U_0}{U_{or}} = \frac{3.623}{13.516} \times 100 = 26.8\%$

3.1.4 การหาขนาดท่ออัดอากาศ D_i ท่ออัดอากาศสามารถคำนวณได้จากความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ในในสระเป่าเตี๊ยะเบด จากสมการของ Mathur และ Gishler[4] เพื่อหาค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออัดอากาศ D_i จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด D_c ดังนี้

$$D_i = \left\{ \frac{U_{mf} D_c^{114} \rho_g^{1/2}}{D_p [2g_c H(\rho_s - \rho_g)]^{1/2}} \right\}^{1/113} \quad (2-27)$$

แทนค่าในสมการ(2-27) เพื่อหาขนาดท่ออัดอากาศ ดังนี้

$$D_i = \left\{ \frac{6.447 \cdot 0.25^{114} \cdot 1.1614^{1/2}}{0.063 [2g_c H(1221.91 - 1.1614)]^{1/2}} \right\}^{1/113}$$

$$= 0.23m$$

3.1.5 การหามุมเอียงของกรวยในสระเป่าเตี๊ยะเบด มุมเอียงของกรวยมีผลต่อระยะความยาวของกรวยและความเหมาะสมจากการไหลของอากาศให้มีการกระจายออกในลักษณะของสระเป่าติ่ง (Spouting) ที่ตำแหน่งทางเข้าสระเป่าเตี๊ยะเบด โดยคำนวณหาค่า $1/n$ ซึ่งเป็นรากของสมการที่ (2-2) เพื่อเลือกมุมกรวยตามเงื่อนไขของสมการ (2-28) ดังนี้

$$U_{mf} = \left(\frac{D_p}{D_e} \right) \left(\frac{D_i}{D_e} \right) \left[\frac{2g_c H(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{1/n} \quad (2-28)$$

$$\frac{1}{n} = \frac{\ln \left(\frac{U_{mf} D_e^2}{D_p D_i} \right)}{\ln \left[\frac{2g_c H(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} \right]} \quad (3-5)$$

$$\frac{1}{n} = \frac{\ln \left(\frac{6.447 \cdot 0.25^2}{0.063 \cdot 0.25} \right)}{\ln \left[\frac{2 \cdot 9.81 \cdot 1(1221.91 - 1.1614)}{1.1614} \right]}$$

$$\frac{1}{n} = 0.3334 \quad \text{สามารถเลือกใช้มุมกรวย ตั้งแต่ 45-85 องศา}$$

3.1.5 การขนาดของฮีตเตอร์ มีผลต่อการพาความร้อนแบบบังคับในเบด ดังนั้นควรเลือกขนาดของฮีตเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสระเป่าเตี๊ยะเบดโดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

3.1.5.1 การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_w โดยคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากเบดและผนังของเบดจากตัวแปรต่างๆที่ได้ทดลองและคำนวณ คือ สัดส่วนช่องว่างต่ำสุด เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความหนาแน่นของปลาหมึก โดยใช้คุณสมบัติของอากาศแวดล้อมที่ 27°C เพื่อแทนค่าในสมการของ Heerden et al. [4] โดยสมการนี้ได้ดัดแปลงมาจากสมการของการพาความร้อนแบบบังคับในท่อซึ่งมีการไหลแบบปั่นป่วนโดยมีรูปแบบของสมการการพาความร้อนดังนี้

$$h_w = 0.58 \frac{k_g}{D_p} \left(\frac{C_{pg} \mu_g}{k_g} \right)^{0.5} \left(\phi_s \frac{D_p U_0 \rho_g}{\mu_g} \right)^{0.45} \left(\frac{\rho_s (1 - \varepsilon_{mf})}{\rho_g} \right)^{0.18} \left(\frac{C_s}{C_p} \right)^{0.36} \quad (2-30)$$

ค่าของตัวแปรต่างๆที่ใช้แทนค่าในสมการ(2-30) ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3-7 ดังนี้

ตารางที่ 3-7 ค่าตัวแปรสำหรับหาขนาดของฮีตเตอร์

ตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบ	ค่าที่ใช้ออกแบบ
1. อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการอบแห้ง	120°C
2. อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ถนอมอาหาร	70°C
3. อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม	27°C
4. ความหนืดของอากาศ μ_g	184.6x10 ⁻⁷ N.s / m ²
5. ความหนาแน่นของอากาศ ρ_g	1.1614 kg / m ³
6. แปรนตล นัมเบอร์ P_r	0.707
7. แฟคเตอร์รูปร่าง ϕ_s	0.213
8. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของปลาหมึก D_p	0.063 m
9. สัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของปลาหมึก ε_{mf}	0.694
10. ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ C_{pg}	1.007 kJ / (kg.K)
11. ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึก C_{ps}	3.53 kJ / (kg.K)
12. ความเร็วของเบดว่างเปล่า U_0	3.623 m / s
13. สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ k_g	26.3 · 10 ⁻³ W / (m.K)
14. ความหนาแน่นของปลาหมึก ρ_s	1221.91 kg / m ³

$$\frac{h_w(0.063)}{26.3 \times 10^{-3}} = 0.58(0.707)^{0.5} \left(0.213 \cdot \frac{0.063 \cdot 3.523 \cdot 1.1614}{184.6 \times 10^{-7}} \right)^{0.45} \left[\frac{1221.91(1-0.694)}{1.1614} \right]^{0.18} \left(\frac{3.623}{1.007} \right)^{0.36}$$

$$h_w = 36.602 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$$

3.1.5.2 การหาขนาดความต้านทานของขดลวดฮีตเตอร์ R ปริมาณความร้อนที่ได้จากขดลวดฮีตเตอร์ จะมีค่าเทียบเท่ากับกำลังทางไฟฟ้า $P = I^2 R$ เมื่อทราบความต้านทานในขดลวดสามารถพินขดลวดฮีตเตอร์ได้ง่าย ด้วยการวัดความต้านทานของฮีตเตอร์ที่ต้องการพินจากโอห์มมิเตอร์และหน้าตัดของขดลวดฮีตเตอร์ควรมีขนาดที่เล็กสุดเพื่อให้ขบวนการไหลในท่อน้อยที่สุด โดยความต้านทานสามารถคำนวณได้จากสมมูลของพลังงานดังนี้

$$P = I^2 R = h_w A_w \Delta T_b \quad (3-6)$$

เนื่องจากไม่ทราบค่าของกระแสที่ไหลผ่านขดลวด แต่ทราบตัวแปรของแรงเคลื่อนไฟฟ้า $E = 220V$ แทนค่า $I = E / R$ และจัดรูปสมการเพื่อหาค่าของ R ดังนี้

$$R = \frac{E^2}{h_w A_w \Delta T_b} \quad (3-7)$$

ตารางที่ 3-8 ค่าตัวแปรสำหรับหาขนาดความต้านของขดลวดฮีตเตอร์

ตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบ	ค่าที่ใช้ออกแบบ
1. อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการอบแห้ง	120°C
2. อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม	27°C
3. สัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_w	36.602 W/(m ² .K)
4. พื้นที่ผิวของผนังเบด A_w ($\pi d_t H$)	0.78 m ²
5. แรงเคลื่อนไฟฟ้า E	220Volt

แทนค่า

$$R = \frac{220^2}{36.602 \cdot 0.78(120 - 27)}$$

$$= 18.22 \ \Omega$$

โดยที่ปริมาณความร้อนของฮีตเตอร์ที่ต้องการเพื่อให้เบดมีอุณหภูมิ 120°C $Q = h_w A_w \Delta T_b$ เท่ากับ 2.655 kW ส่วนกระแสที่ไหลผ่านขดลวดหาได้จาก $I = E / R$ โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ 220Volt มีค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดเท่ากับ 12.1A

3.1.6 ผลที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี คงตัว การคำนวณดังหัวข้อ 3.1.1-3.1.6 ได้ผลสรุปเพื่อใช้สร้างชุดทดลองสะเป้าเต็ดเบดสำหรับอบปลาหมึกแห้งกล้วยดังนี้

ตารางที่ 3-9 ผลสรุปของค่าที่ได้จากการคำนวณอุปกรณ์จากทฤษฎีของการไหลแบบ คงตัว

ชนิดของอุปกรณ์ที่คำนวณหาขนาด	ผลการคำนวณ	ค่าที่เลือกใช้
1. พัดลมอัดอากาศ	1.5 Hp	2 Hp
2. ความสูงของเบด	1 m	1 m
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเบด	0.25 m	0.25 m
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออัดอากาศ	0.23 m	0.20 m
5. มุมกรวย	45-85 องศา	65 องศา
6. ถัดส่วนรูเจาะต่อพื้นที่ตะแกรงกระจายอากาศ	28.7 %	รูเจาะขนาด 0.007 m จำนวน 18 รูเจาะ
7. ความต้านของฮีตเตอร์	18.22 Ω	20 Ω

ค่าจากตารางที่ 3-9 ใช้สร้างชุดทดลองสะพานเต็ดเบดเพื่ออบแห้งปลาหมึกกล้วยได้ดังนี้



ภาพที่ 3-6 ชุดทดลองสะพานเต็ดเบดที่ออกแบบด้วยการไหลแบบคงตัว[3]



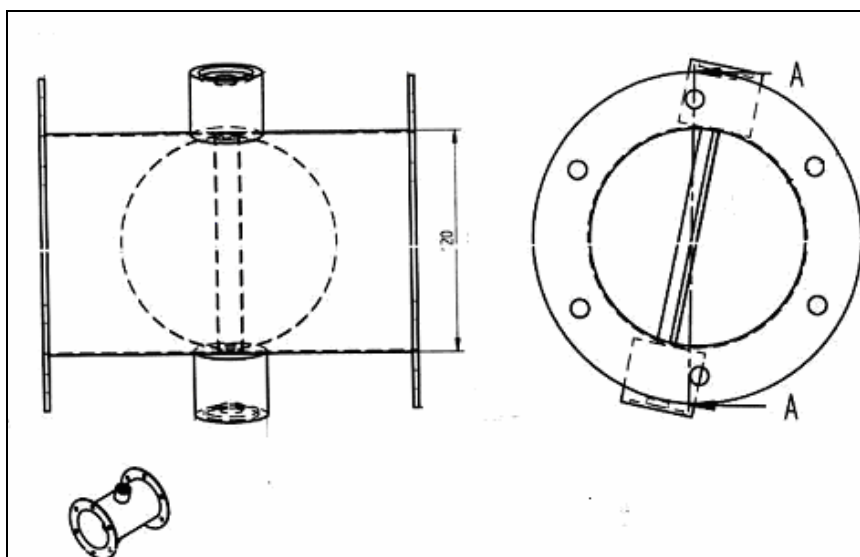
ภาพที่ 3-7 ลักษณะการพันและเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนของปลาหมึกในสะพานเต็ดเบด [3]

จากการทดลองอบแห้งปัญหาที่เกิดจากการไหลแบบคงตัว ดังภาพที่ 3-8 ปลาหมึกสามารถลอยตัวได้ในเบดแต่เกิดการพันกันเป็นกลุ่มก้อน โดยไม่กระจายตัวออกจากกันในลักษณะของฟลูอิดไดเซชัน วิธีการแก้ปัญหาจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.2 การไหลแบบไม่คงตัว

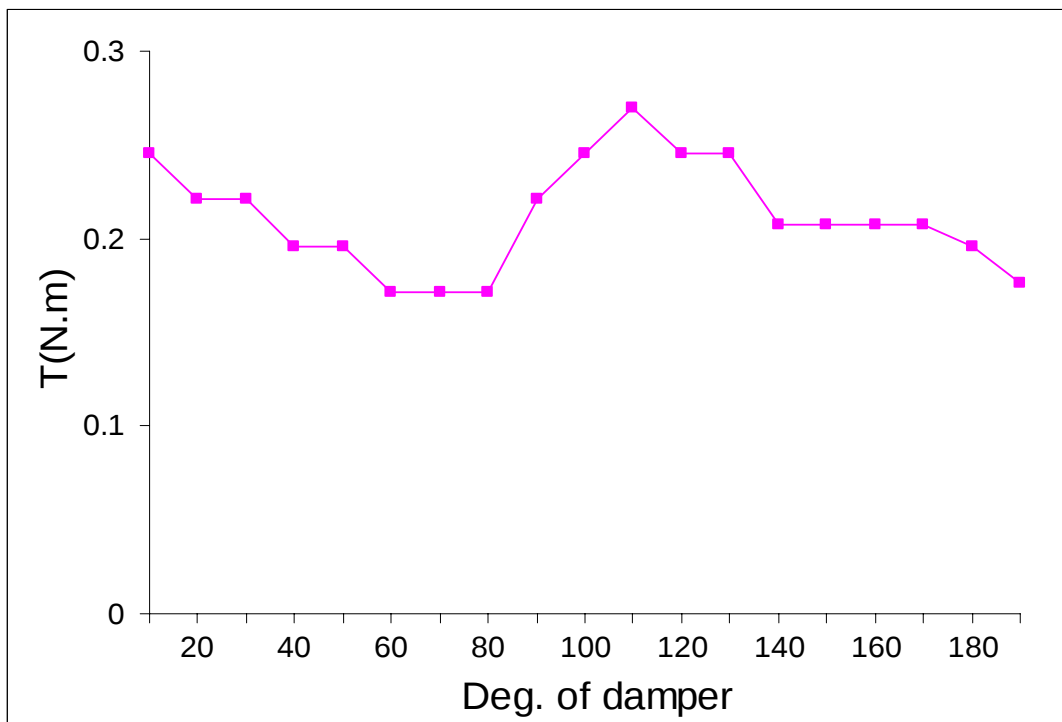
จากปัญหาของการไหลแบบคงตัวที่ทำให้ปลาหมึกเกิดการพันและเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนได้ใช้การไหลแบบไม่คงตัวโดยใช้ลึนปิกฟีเสื้อ โดยมีชุดมอเตอร์ควบคุมความเร็วรอบที่ติดตั้งในท่อ ณ ตำแหน่งทางเข้าเบดมีผลให้ปลาหมึกกระแทกตัวขึ้น-ลง แล้วกระจายตัวออกจากกันการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันทำให้น้ำในปลาหมึกกระเหยออกได้เร็วขึ้น ดังภาพที่ 3-8 สำหรับปัญหานี้ได้ใช้วิธีการทดลองและการคำนวณ ดังนี้

3.2.1 ขนาดมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนลึนปิกฟีเสื้อ กำลังของมอเตอร์ขับเคลื่อนลึนปิกฟีเสื้อต้องมีขนาดที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมจังหวะของการไหลแบบ ไม่คงตัวของอากาศที่ไหลในท่ออากาศอัด ซึ่งอากาศที่ไหลในท่ออัดอากาศเป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยมีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ $Re_b = 56,984.72$ และการไหลแบบ ไม่คงตัว จะเกิดขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านลึนปิกฟีเสื้อแบบปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ ที่มีลักษณะของลึนปิกฟีเสื้อดังนี้



ภาพที่ 3-8 ลักษณะของลึนปิกฟีเสื้อสำหรับต่อกับชุดมอเตอร์ควบคุมความเร็วรอบ

ขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนลึนปิกฟีเสื้อให้หมุน หาได้จากแรงบิดที่กระทำต่อปลายของลึนปิกฟีเสื้อคูณกับระยะแขนโดยใช้การทดลอง โดยต่อแขนยาวเท่ากับปลายของลึนปิกฟีเสื้อแล้วใช้ตาชั่งสปริงวัดแรงที่กระทำต่อปลายปิกของลึนปิกฟีเสื้อในแนวตั้งฉาก โดยบิดลึนปิกฟีเสื้อเพิ่มครั้งละ 10 องศา ได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 3-9 ผลขององศาของลื่นปีกผีเสื้อต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงบิด

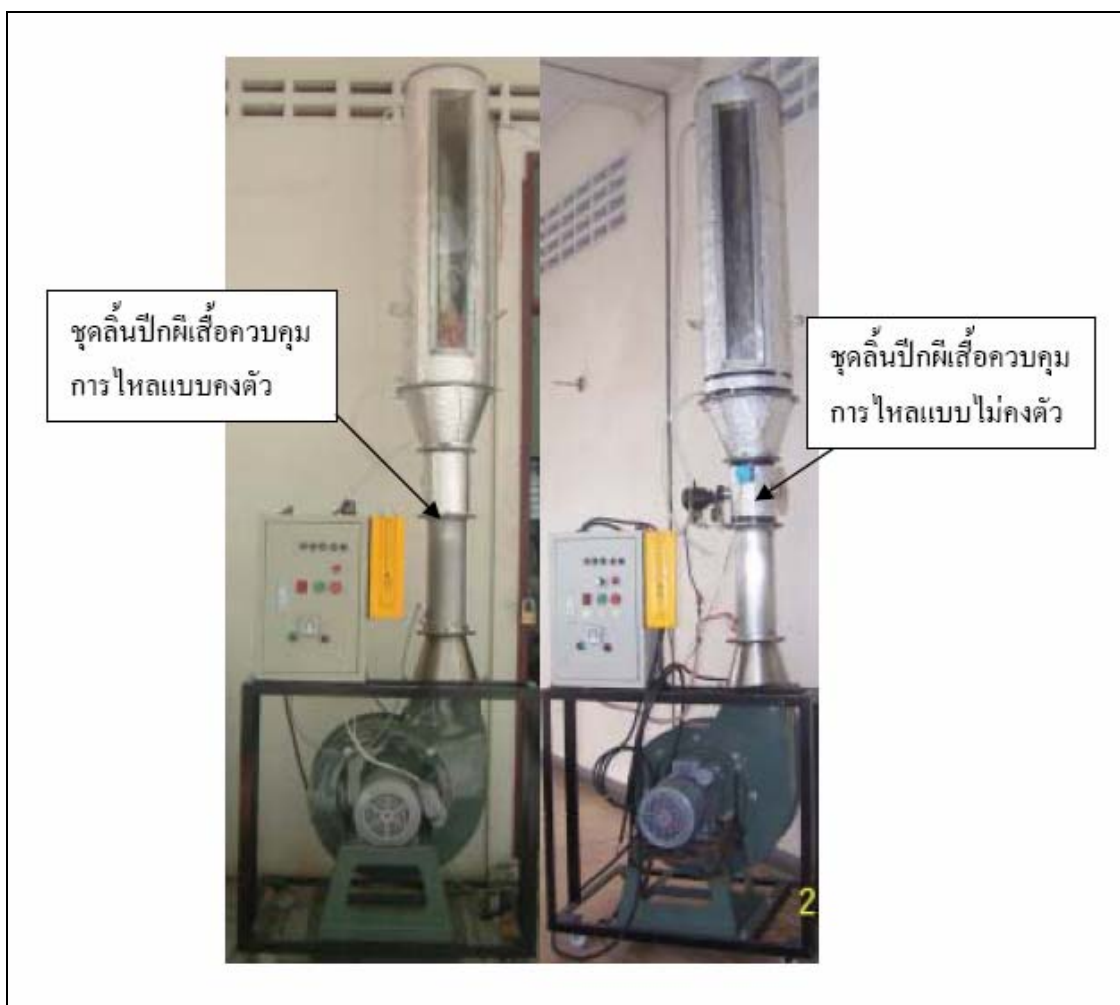
ค่าของแรงบิดสูงสุด $T = 0.27 \text{ N.m}$ นำไปใช้หาคำกำลังของมอเตอร์ โดยหาได้จาก

$$P = \frac{2\pi TN}{60}$$

เมื่อ N คือ ความเร็วรอบโดยทั่วไปของมอเตอร์แบบเฟสเดียวนิยมใช้เท่ากับ 1450 rpm ขนาดกำลังของมอเตอร์ที่คำนวณได้ เท่ากับ 40.96 W โดยเลือกใช้มอเตอร์ขนาดเล็กที่ใกล้เคียง คือ 50 W และเพิ่มในชุดทดลองสะเปาเต็ดเบด เพื่อขับให้ลื่นปีกผีเสื้อหมุนในทิศทางเดียว ดังภาพที่ 3-10

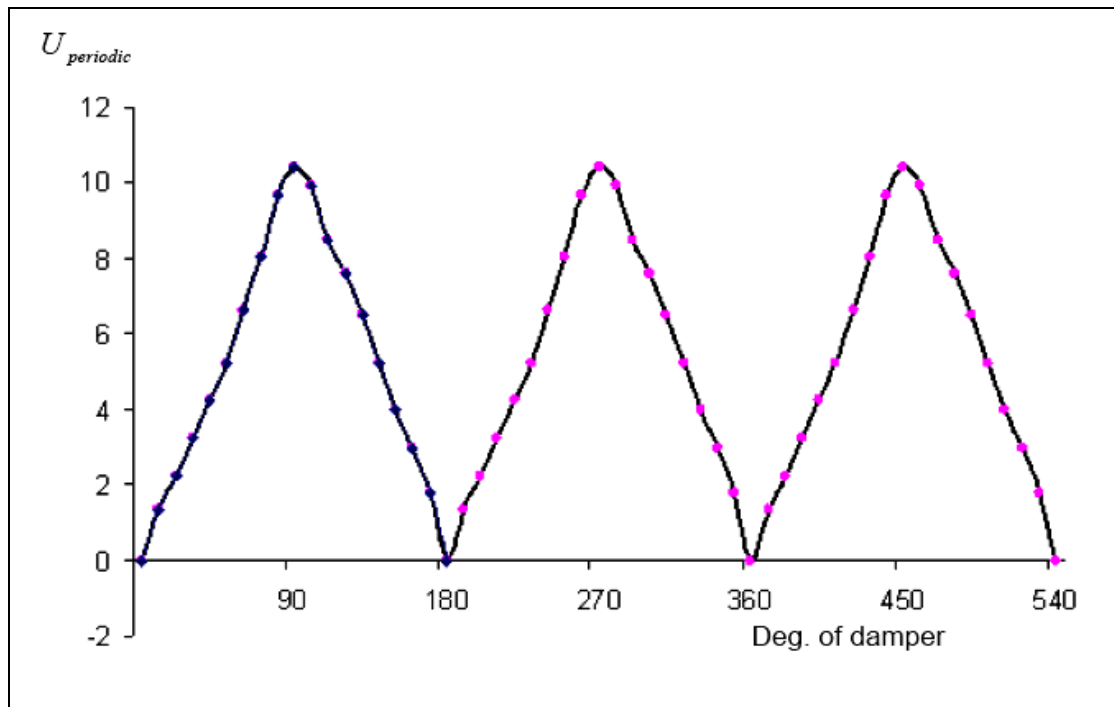
3.2.2 การไหลแบบปั่นป่วนในลักษณะของคาบ (Periodic)

3.2.2.1 การวัดความเร็วของอากาศเมื่อไหลผ่านลื่นปีกผีเสื้อ เนื่องจากการไหลของอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าเบดเป็นแบบปั่นป่วน โดยมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าเบด $Re = 56,984.72$ โดยการวัดความเร็วของอากาศที่ไหลแบบปั่นป่วนจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหล ณ ตำแหน่งทางเข้าเบดตลอดเวลา สามารถวัดโดยใช้วิธี Triple Grid [11] ซึ่งเป็นการวัดค่าเฉลี่ยของความเร็วจากการไหลแบบปั่นป่วนที่ตำแหน่งทางเข้าเบด ดังภาพที่ 2-10 โดยทำการเจาะรูที่ตำแหน่งทางเข้าเบดโดยรอบจำนวน 3 แถว แถวละ 6 รูเจาะที่มีระยะห่างเท่ากันโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ 5 mm โดยรอบและใช้เครื่องมือวัดความเร็วอากาศแบบลวดร้อนวัดที่ความลึกในท่อ 3 ช่วง ช่วงละ 0.04 m โดยผลที่ได้จากการวัดจะเป็นค่าเฉลี่ยของมุมลื่นปีกผีเสื้อที่บิดไปทำการวัดครั้งละ 10 องศาและทำซ้ำอย่างละ 3 ครั้ง บันทึกผลไว้ในตาราง ข-25 จะได้ความเร็วของอากาศที่เกิดขึ้นในลักษณะของคาบ ดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-10 ภาพเปรียบเทียบชุดทดลองสะเป้าเต็ดเบดที่ติดตั้งชุดควบคุมความเร็วรอบลื่นปีกผีเสื้อ

3.2.2.2 การเกิดคาบจากการหาขนาดของมอเตอร์ขับเคลื่อนปีกผีเสื้อ ได้เลือกใช้นาฬามอเตอร์ที่ 50 W ดังภาพที่ 3-10 โดยนำมาประกอบกับชุดเฟืองทดขนาดเล็ก และสายพานเพื่อควบคุมให้ลื่นปีกผีเสื้อหมุนในลักษณะทิศทางเดียวดังภาพ 3-10 ด้านขวามือ เมื่อเปิดสวิทช์ให้ชุดทดลองทำงานมอเตอร์จะขับเคลื่อนปีกผีเสื้อหมุนในทิศทางเดียวตามความเร็วรอบที่ใช้ควบคุมความเร็วของอากาศที่แปรผันตามองศาและการเปิด-ปิดของลื่นปีกผีเสื้อ โดยความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าเบดจะเป็นศูนย์เมื่อลื่นปีกผีเสื้ออยู่ในตำแหน่งปิดและความเร็วอากาศจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อลื่นปีกผีเสื้อบิดไปจนกระทั่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 11 m/s เมื่อลื่นปีกผีเสื้ออยู่ในตำแหน่งเปิดสุดที่ 90 องศา ดังภาพที่ 3-8 เมื่อลื่นปีกผีเสื้อบิดเกิน 180 องศาความเร็วอากาศจะลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าเป็นศูนย์เมื่อลื่นปีกผีเสื้ออยู่ในตำแหน่งปิดที่ 180 องศา ความเร็วของอากาศที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เป็นคาบโดยคาบที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะของ Half Sine ดังภาพที่ 3-11 ได้แสดงการซ้ำกันของคาบจำนวน 3 คาบ โดยคาบต่อไปที่เกิดขึ้นจะซ้ำกับคาบแรกจนถึงอนันต์ ดังนี้



ภาพที่ 3-11 ผลจากลื่นปีกผีเสื้อที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วของคาบ

การคำนวณทั้งหมดในบทที่ 3 ได้คำนวณหาชิ้นส่วนอุปกรณ์และสร้างชุดทดลองอบแห้ง
 ปลาหมึกกล้วยโดยใช้ตะป้าเต็ดเบด ทั้งวิธีการไหลแบบคงตัวและไม่คงตัวตามที่ได้กล่าวมา
 ข้างต้น ส่วนผลของการทดลองอบแห้งด้วยการไหลแบบคงตัว เปรียบเทียบกับการไหลแบบไม่คงตัว
 และ ผลเปรียบเทียบทางด้านพลังงานของทั้งสองวิธีจะกล่าวถึงในบท ถัดไป

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีการไหลแบบคงตัวและวิธีการไหลแบบไม่คงตัว ดังนี้

4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง

ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองและมีผลต่อระยะเวลาของการอบแห้งปลาหมึกในสเป้าเต๋เคเบด

4.1.1 การควบคุมความชื้นเริ่มต้นของปลาหมึก โดยใช้ปลาหมึกสดที่เตรียมสำหรับอบแห้ง โดยเป็นกลุ่มตัวอย่างเดียวกันและผ่านการคัดเลือกให้มีขนาดใกล้เคียงกันคือมีลำตัวยาว 15 cm โดยไม่รวมส่วนหัว จำนวน 100 kg. และตากแดดจัดพร้อมกัน 3 วันและคัดเลือกปลาหมึกที่ผ่านการตากแห้งที่มีขนาดลำตัวยาวเท่ากันมาเก็บไว้ในถุงพลาสติกและชั่งน้ำหนักถุงละ 100 g เป็นการเตรียมปลาหมึกตากแห้งก่อนทำการทดลองที่มีความชื้นเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด

4.1.2 การหาความชื้นเริ่มต้น ความชื้นเริ่มต้นก่อนอบแห้ง มี 2 ชนิด คือ ความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้ง โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

4.1.2.1 ความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้น หาได้จากมวลแห้ง m_d โดยการสุ่มตัวอย่างของปลาหมึกที่มีน้ำหนัก 1000 g จากกลุ่มตัวอย่างในหัวข้อ 4.1.1 มาบดให้เป็นผงและใส่ตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 130 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำปลาหมึกที่ผ่านการบดและอบแห้งมาชั่งบนตาชั่งดิจิทัลชนิด 2 ตำแหน่ง เพื่อสังเกตน้ำหนักของปลาหมึกที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความชื้นที่แพร่มาจากอากาศภายนอกจนกระทั่งน้ำหนักของปลาหมึกคงที่ เป็นมวลแห้งที่ผ่านการชดเชยความชื้นที่สถานะสมดุล $m_d = 320.02$ g จากนั้นสามารถหาความชื้นมาตรฐานเปียกจากสมการ (2-32) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความชื้นมาตรฐานเปียก} \quad M_w &= \frac{m_w - m_d}{m_w} & (2-32) \\ &= \frac{1000 - 320.02}{1000} \\ &= 68 \% \text{ มาตรฐานเปียก} \end{aligned}$$

4.1.2.2 ความชื้นมาตรฐานแห้งเริ่มต้น (Moisture Content Dry-basis) สามารถหาความชื้นมาตรฐานแห้งเริ่มต้น ได้จากสมการ (2-34) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ความชื้นมาตรฐานแห้ง} \quad M_d &= \frac{m_w - m_d}{m_d} & (2-33) \\
 &= \frac{1000 - 320.02}{320.02} \\
 &= 212.48 \text{ \% มาตรฐานแห้ง}
 \end{aligned}$$

4.1.3 การหามวลสุดท้ายสำหรับการอบแห้ง การหามวลสุดท้ายเพื่อให้ทราบน้ำหนักสุดท้ายของปลาหมึก โดยความชื้นสุดท้ายมีผลต่อการกักเก็บที่ 24 % มาตรฐานเปียก เป็นความชื้นที่สามารถกักเก็บปลาหมึกอบแห้งได้โดยไม่ขึ้นเราสามารถคำนวณได้จากสมการ(2-33) จะได้ 410 g

4.1.4 อุณหภูมิอบแห้ง อุณหภูมิที่ใช้สำหรับอบแห้งมี สองค่า คือ อุณหภูมิถนอมอาหาร คือ 70 °C และอุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้ปลาหมึกสุก คือ 120 °C สามารถควบคุมได้จากเทอร์โมสตัท โดยรับสัญญาณไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิลแบบ J โดยวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งทางเข้าเบด

4.1.5 การควบคุมความเร็วอากาศที่ทางเข้าเบด ความเร็วอากาศที่ทางเข้าเบดมีผลต่อการพาความร้อนจากฮีตเตอร์ให้ไหลเข้าเบดและมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งปลาหมึกโดยมีการควบคุมความเร็วอากาศดังนี้

4.1.5.1 การไหลแบบคงตัว สามารถควบคุมความเร็วอากาศที่ไหลได้โดยปรับการเปิดลิ้นปีกผีเสื้อในแต่ละช่วงของความเร็วให้อยู่เนื่งกับที่ โดยความเร็วอากาศจะแปรผันตามการเปิดของลิ้นปีกผีเสื้อ เนื่องจากความเร็วอากาศเป็นความเร็วเฉลี่ยในหน้าตัดท่อที่ได้จากวิธี Triple Grid [11] และทำการทดลองเพื่อหาความเร็วอากาศที่สามารถลดเวลาในการอบแห้งเหลือ น้อยสุด

4.1.5.2 การไหลแบบไม่คงตัว โดยควบคุมความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อให้หมุนโดยใช้ความเร็วรอบคงที่ระดับต่างๆ เนื่องจากการไหลชนิดนี้มีผลทำให้ปลาหมึกที่เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน กระแทกตัวขึ้น-ลงในเบดและความเร็วของอากาศที่แปรผันตามองศาของลิ้นปีกผีเสื้อ

4.2 ขอบเขตของการทดลอง

เพื่อเปรียบเทียบเวลาและต้นทุนของค่าไฟฟ้า จากผลการทดลองที่ใช้เวลาน้อยที่สุดในการอบแห้งปลาหมึกที่ผ่านการลิกฝอยและปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C และอุณหภูมิที่ทำให้ปลาหมึกสุก 120 °C ด้วยการไหลในเบดแบบ คงตัวและไม่คงตัวตามลำดับ

4.3 องค์ประกอบของการทดลอง

องค์ประกอบของการทดลองประกอบด้วยปัจจัยหลัก คือ การเตรียมปลาหมึกสำหรับทดลอง การเตรียมชุดทดลองและอุปกรณ์ในการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 การเตรียมปลาหมึกสำหรับทดลอง ปลาหมึกที่ใช้ในการทดลองมี 2 แบบ คือ ปลาหมึกฝักฝอยและปลาหมึกทั้งตัว โดยมีวิธีการเตรียมปลาหมึกดังนี้

4.3.1.1 ปลาหมึกฝอย โดยนำปลาหมึกที่ควบคุมความชื้นดังหัวข้อ 4.1.1 ด้วยการฝักฝอยให้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดปลาหมึกฝอยที่ขายตามท้องตลาด โดยมีความยาวเท่ากับ 3-5 cm และความกว้าง 1-1.5 cm

4.3.1.2 ปลาหมึกทั้งตัว ใช้ปลาหมึกที่ควบคุมความชื้นเริ่มต้น ดังหัวข้อ 4.1.1

4.3.2 การเตรียมชุดทดลอง โดยเปิดสวิตช์ชุดทดลองสะเปาเต็คเบคและชุดฮีตเตอร์ให้ทำงาน โดยให้อากาศไหลผ่าน ชุดทดลองให้ได้อุณหภูมิถนนอาหารที่ 70°C หรือ อุณหภูมิปลาหมึกสุกที่อุณหภูมิ 120°C โดยใช้เวลาให้ชุดทดลองทำงานประมาณ 20 นาที

4.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ได้ผ่านการสอบเทียบกับมาตรฐาน โดยมีเครื่องมือวัดดังนี้

4.3.3.1 เครื่องมือวัดแบบ ลวดร้อน(Hot-Wire) ยี่ห้อ TSI รุ่น 8347-M-GB มีคุณสมบัติที่สามารถวัดของไหลได้ คือ ความเร็วอากาศ อัตราการไหล และอุณหภูมิ สามารถบันทึกค่าได้แบบ Data Locker พร้อมทั้งไปสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัด



ภาพที่ 4-1 เครื่องมือวัดแบบลวดร้อน TSI รุ่น 8347-M-GB

4.3.3.2 เครื่องมือวัดความเร็วรอบ Techo -Meter สำหรับวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนปั๊มเสีย



ภาพที่ 4-2 เครื่องมือวัดความเร็วรอบมอเตอร์

4.3.3.3 ตาชั่งดิจิตอลแบบทศนิยมสองตำแหน่ง

4.3.3.4 วัดต์มิเตอร์ (Watt Meter) สำหรับวัดอัตราการใช้กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของพัดลมอัดอากาศ

4.3.3.5 มานอมิเตอร์ สำหรับวัดความดันตกคร่อมเบด เพื่อหาความเร็วของอากาศที่เกิดขึ้นสถานะของฟลูอิดไคเซชัน

4.4 วิธีการทดลอง

ได้แบ่งออกเป็นหัวข้อหลัก คือ การไหลแบบคงตัวและการไหลแบบไม่คงตัว ในส่วนของผลการทดลองทั้งหมดจะแสดงไว้ในหัวข้อ 4.5 ต่อไป

4.4.1 วิธีการทดลองของการไหลแบบคงตัว วิธีการนี้ใช้ล้นปีกผีเสื้อควบคุมความเร็วของการไหลอากาศในลักษณะที่อยู่นิ่งกับที่ ทำให้การไหลของอากาศที่ทางเข้าเบดต่อเนื่อง

4.4.1.1 การทดลองหาความดันตกคร่อมเบดและความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไคเซชัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดสถานะฟลูอิดไคเซชันของปลาหมึกเส้นฝอยและปลาหมึกทั้งตัว โดยมีลำดับขั้นตอนและวิธีการทดลองดังนี้

- ก) ติดตั้งชุดมานอมิเตอร์ ที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออก
- ข) ใส่ปลาหมึกฝอย ปริมาณ 1 kg ลงในเบด
- ค) เพิ่มความเร็วของอากาศ ครั้งละ 1 m/s
- ง) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
- จ) เขียนกราฟจากค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

4.4.1.2 การทดลองหาความเร็วอากาศ ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70°C โดยการทดลองนี้ต้องการหาเวลาในการอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยที่สามารถลดความชื้นให้เหลือ 24 % มาตรฐานเปียกที่ความเร็วของอากาศที่ทางเบระดับต่างๆ โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

- ก) ปรับการเปิดของลิ้นปีกผีเสื้อโดยเริ่มจากความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน
- ข) ปรับอุณหภูมิของชุดฮีตเตอร์ ที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70°C
- ค) นำวัดคัมมิเตอร์ต่อเข้ากับพัดลมอัดอากาศเพื่อวัดอัตราการใช้กำลังไฟฟ้า
- ง) ใส่ปลาหมึกเส้นฝอยปริมาณ 1 kg. ลงในเบค
- จ) ชั่งน้ำหนักของปลาหมึกทุกๆ 10 นาที
- ฉ) ทดลองอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักของปลาหมึกเหลือ 410 g.
- ช) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
- ซ) เขียนกราฟจากค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง
- ณ) เพิ่มความเร็วอากาศครั้งละ 1 m/s และทำการทดลองซ้ำ ข้อ ก-ซ

4.4.1.3 การทดลองหาความเร็วอากาศ ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอย ที่อุณหภูมิปลาหมึกสุก 120°C การทดลองนี้ต้องการหาเวลาในการอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอย ที่สามารถลดความชื้นให้เหลือ 24 % มาตรฐานเปียกที่ความเร็วของอากาศที่ทางเบระดับต่างๆ โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

- ก) ปรับการเปิดของลิ้นปีกผีเสื้อโดยเริ่มจากความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน
- ข) ปรับอุณหภูมิของชุดฮีตเตอร์ ที่ทำให้ปลาหมึกเส้นฝอยสุกคือ 120°C
- ค) ทำการทดลองซ้ำ ขั้นตอนที่ 3-9 ของหัวข้อการทดลอง 4.4.1.2

4.4.1.4 การทดลองหาความเร็วอากาศที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งปลาหมึกทั้งตัว ที่มีอุณหภูมิถนอมอาหาร 70°C โดยทำซ้ำวิธีการทดลองหัวข้อที่ 4.4.1.2 ตั้งแต่ข้อ ก -ณ แต่เปลี่ยนผลิตภัณฑ์อบแห้งเป็นปลาหมึกทั้งตัว

4.4.1.5 การทดลองหาความเร็วอากาศที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งปลาหมึกทั้งตัว ที่มีอุณหภูมิปลาหมึกสุก 120°C โดยทำซ้ำวิธีการทดลองหัวข้อที่ 4.4.1.3 ทั้งหมดแต่เปลี่ยนผลิตภัณฑ์อบแห้งเป็นปลาหมึกทั้งตัว

4.4.2 วิธีการทดลองของการไหลแบบไม่คงตัว สำหรับการทดลองนี้ได้การควบคุมการไหลของอากาศที่ทางเข้าเบค โดยใช้การหมุนของลิ้นปีกผีเสื้อให้เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวและลักษณะของอากาศที่ไหลเข้าเบคแบบไม่คงตัว โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

4.4.2.1 การทดลองหาความดันตกคร่อมเบด ที่แปรผันตามการเปิด-ปิดของลิ้นปีกผีเสื้อ โดยความดันตกคร่อมเบดและสถานะของฟลูอิดไคเซชันที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามการเปิด-ปิดของลิ้นปีกผีเสื้อ โดยแบ่งการทดลองออกเป็นดังนี้

4.4.2.1.1 การทดลองหาความดันตกคร่อมเบดที่แปรผันตามการเปิด-ปิดของลิ้นปีกผีเสื้อ ของปลาหมึกเส้นฝอย โดยมีวิธีการดังนี้

- ก) นำมานอมิเตอร์ ต่อเข้ากับเบด เพื่อวัดความดันที่ตกคร่อมเบด
- ข) นำวัดคัมมิเตอร์ต่อเข้ากับพัดลมอัดอากาศเพื่อวัดกำลังไฟฟ้า
- ค) ใส่ปลาหมึกเส้นฝอย 1 kg. ลงในเบด
- ง) บันทึกผลของความดันตกคร่อมเบด เมื่อปิดลิ้นปีกผีเสื้อ 10 องศา

4.4.2.1.2 การทดลองหาความดันตกคร่อมเบดที่แปรผันตามการเปิด-ปิด ของลิ้นปีกผีเสื้อของปลาหมึกทั้งตัว โดยทำซ้ำหัวข้อการทดลองที่ 4.4.2.1.1 แต่เปลี่ยนผลิตภัณฑ์อบแห้งเป็นปลาหมึกทั้งตัว

4.4.2.2 การทดลองหาความเร็วรอบลิ้นปีกผีเสื้อที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C การทดลองนี้ต้องการหาเวลาในการอบแห้งที่สามารถลดความชื้นในปลาหมึกให้เหลือ 24 % ความชื้นมาตรฐานเปียกที่ ความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อ ณ ตำแหน่งทางเบดที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ โดยแบ่งการทดลองออกเป็นดังนี้

4.4.2.2.1 การทดลองหาความเร็วรอบลิ้นปีกผีเสื้อที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

- ก) ปรับความเร็วรอบลิ้นปีกผีเสื้อคงที่ ที่ 30 rpm
- ข) ปรับอุณหภูมิของชุดฮีตเตอร์ ที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C
- ค) ทำการทดลองซ้ำ ขั้นตอนที่ 3-8 ของหัวข้อการทดลองที่ 4.4.1.2
- ง) เพิ่มความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อครั้งละ 10 rpm และทำซ้ำ ข้อ ก -ง

4.4.2.2.2 การทดลองหาความเร็วรอบลิ้นปีกผีเสื้อ ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C ของปลาหมึกทั้งตัว โดยทำซ้ำขั้นตอนการทดลองที่ 3-8 ของหัวข้อการทดลองที่ 4.4.1.2 แต่เปลี่ยนผลิตภัณฑ์อบแห้งเป็นปลาหมึกทั้งตัว

4.4.2.3 การทดลองหาความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อต่อที่มีผลอัตราการอบแห้งที่ อุณหภูมิที่ทำให้ปลาหมึกสุก 120 °C โดยการทดลองนี้ต้องการหาเวลาในการอบแห้งที่สามารถลดความชื้นในปลาหมึก ให้เหลือ 24 % ความชื้นมาตรฐานเปียกที่ความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อ ณ ตำแหน่งทางเข้าเบดที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ โดยแบ่งการทดลองออกเป็นดังนี้

4.4.2.3.1 การทดลองหาความเร็วรอบลิ้นปีกผีเสื้อที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ที่อุณหภูมิปลาหมึกสุก 120 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

ก) ปรับความเร็วรอบลั่นปีกผีเสื้อคงที่ ที่ 30 rpm

ข) ปรับ อุณหภูมิของชุดฮีตเตอร์ ที่ปลาหมึกสุก 120 °C

ค) ทำการทดลองซ้ำ ขั้นตอนที่ 3-8 ของหัวข้อการทดลอง 4.4.1.2

ง) เพิ่มความเร็วรอบของลั่นปีกผีเสื้อครั้งละ 10 rpm และทำซ้ำ ข้อ ก -ง

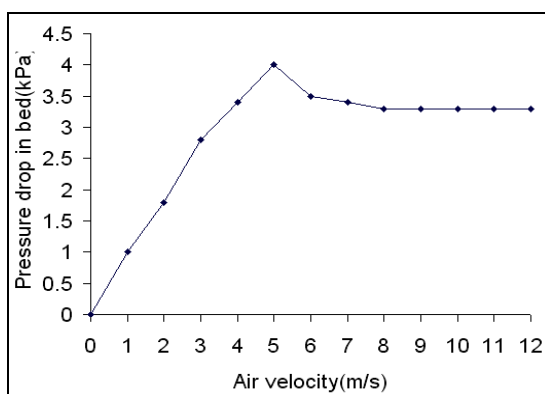
4.4.2.3.2 การทดลองหาความเร็วรอบของลั่นปีกผีเสื้อที่มีผลต่อ อัตราการอบแห้ง ที่อุณหภูมิปลาหมึกสุก 120 °C ของปลาหมึกทั้งตัว โดยทำซ้ำหัวข้อของการทดลองที่ 4.4.2.2.1 แต่เพิ่มอุณหภูมิมอบแห้งเป็น 120 °C พร้อมทั้งเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่ใช้อบแห้งเป็นปลาหมึกทั้งตัว

4.5 ผลการทดลอง

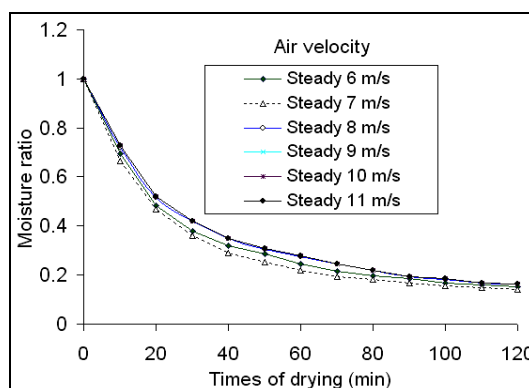
จากวิธีการทดลองของหัวข้อ 4.4 ที่แบ่งออกเป็นสองหัวข้อหลัก คือ การไหลแบบ คงตัว และไม่คงตัวของปลาหมึกเส้นฝอยกับปลาหมึกทั้งตัว ที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C และอุณหภูมิ ปลาหมึกสุกที่ 120 °C สามารถแสดงผลของการทดลองโดยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

4.5.1 ผลการทดลองอบแห้งปลาหมึก ด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว

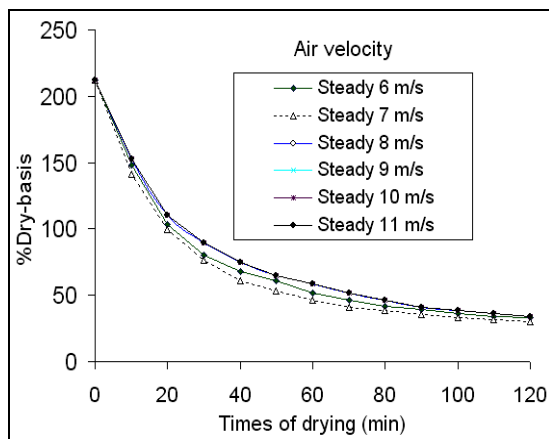
4.5.1.1 ผลการอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C โดยภาพที่ 4-3 เป็นผลของความดันที่ตกคร่อมเบด จากวิธีการทดลองในหัวข้อ 4.4.1.1 และภาพที่ 4-4 -4-6 เป็นผลของการทดลองหาอัตราการอบแห้งที่ความเร็วอากาศระดับต่างๆ จากหัวข้อการทดลองที่ 4.4.1.2 โดยเขียนกราฟของอัตราการอบแห้ง (Drying Rate) แบบต่างๆ คือ ภาพที่ 4-4 แสดงค่าอัตราส่วนความชื้น ภาพที่ 4-5 แสดงค่าของ % ความชื้นมาตรฐานแห้งและภาพที่ 4-6 ค่าของ % ความชื้นมาตรฐานเปียก ที่มีผลต่อเวลาในการอบแห้ง ณ ความเร็วระดับอากาศต่างๆ โดยเรียงตามลำดับดังนี้



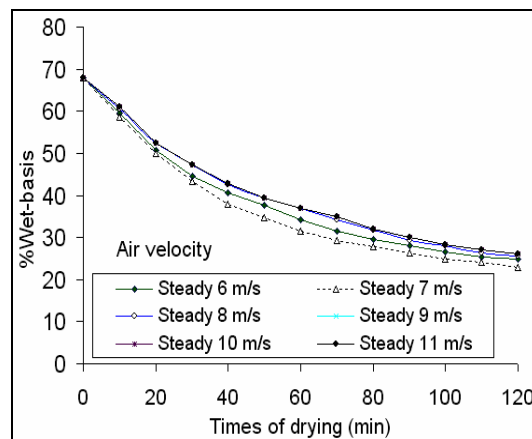
ภาพที่ 4-3 ค่าความดันตกคร่อมเบด



ภาพที่ 4-4 ค่า อัตราส่วนความชื้น



ภาพที่ 4-5 ค่า % ความชื้นมาตรฐานแห้ง



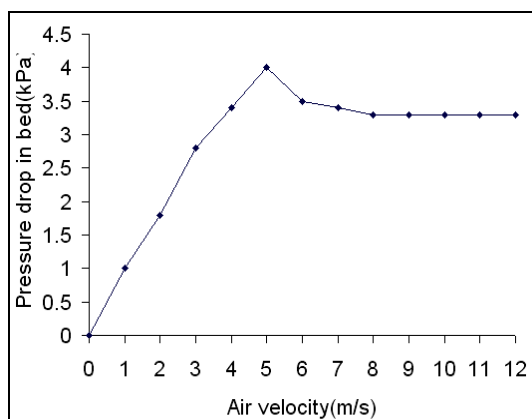
ภาพที่ 4-6 ค่า % ความชื้นมาตรฐานเปียก

การวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยภาพที่ 4-3 เป็นการทดลองหาความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันและได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วของอากาศในเบด ปรากฏว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศครั้งละ 1 m/s จะมีผลทำให้ความดันตกคร่อมเบดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศจนถึง 5 m/s ความดันตกคร่อมเบดจะมีค่าสูงสุดที่ 4 kPa โดยจะเริ่มลดลง และมีความดันคงที่เมื่อความเร็วของอากาศมากกว่า 6 m/s ขึ้นไปปลาหมึกทั้งหมดที่วางอยู่ในเบด จะเกิดการสั่นและเริ่มขยับตัวลอยเป็นกลุ่มก้อนในลักษณะของฟลูอิดไดเซชัน โดยมีอากาศบางส่วนรวมตัวเป็นฟองก๊าซ (Bubbling) แทรกตัวระหว่างช่องว่างของปลาหมึกเส้นฝอยเมื่อฟองก๊าซเหล่านี้ลอยตัวไปถึงส่วนบนของเบด ฟองก๊าซจะแตกตัวออกทำให้ปลาหมึกที่พันและเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนจะค่อยๆ ลดระดับความสูงลงมา

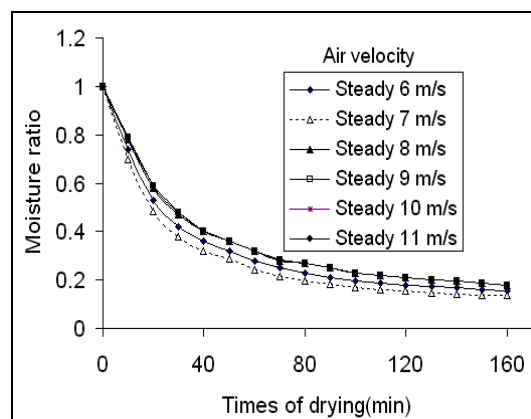
การทดลองหาอัตราการอบแห้ง ของภาพที่ 4-4 -4-6 โดยทดลองที่ความเร็วของอากาศระดับต่างๆ โดยเริ่มจาก ความเร็วอากาศที่เกิดฟลูอิดไดเซชันคือ 6 m/s และปรับให้ลิ้นปีกผีเสื้อเปิดมากขึ้น เพื่อเพิ่มความเร็วอากาศครั้งละ 1 m/s จนถึงตำแหน่งที่ลิ้นปีกผีเสื้อเปิดสุดที่ 11 m/s ปรากฏว่าความเร็วของอากาศที่ใช้เวลาในการอบแห้ง 120 นาที ที่ความชื้นกักเก็บ 24 % มาตรฐานเปียก คือ 7 m/s เป็นความเร็วของอากาศที่มีอิทธิพลต่อการพาความร้อนระหว่างปลาหมึกกับอากาศได้ดีที่สุด เนื่องจากเป็นจุดที่เกิดความสมดุลระหว่างการพาความร้อนและการถ่ายเทมวลของน้ำในตัวของปลาหมึก ที่ระเหยออกมาจากแกนกลางของปลาหมึกรวมถึงความเหมาะสมต่อการแพร่ของความชื้นออกมาจากผิวรูพรุนเล็กๆ ของปลาหมึกและการเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความชื้น ส่วนความเร็วอากาศตั้งแต่ 8 m/s จนถึง 11 m/s จะมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากมีความเหมาะสมต่อการพาความร้อน การถ่ายเทมวลและการแพร่ความชื้นน้อยกว่าความเร็วอากาศที่ 7 m/s

4.5.1.2 ผลการอบแห้งปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิอบอาหาร 70°C มีดังนี้ โดยภาพที่ 4-7 เป็นผลของความดันที่ตกคร่อมเบดจากวิธีการทดลองในหัวข้อ 4.4.1. และภาพที่ 4-8 -4-10 เป็นผลของการทดลองหาอัตราการอบแห้ง ที่ความเร็วอากาศระดับต่างๆ จากหัวข้อการทดลองที่

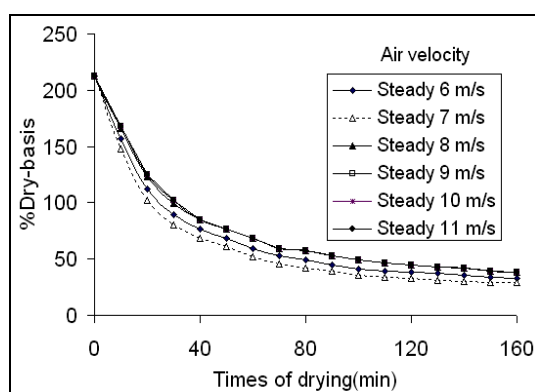
4.4.1.3 โดยเขียนกราฟของอัตราการอบแห้งแบบต่างๆ คือ ภาพที่ 4-8 แสดงค่าอัตราส่วนความชื้น ภาพที่ 4-8 แสดงค่าของ % ความชื้นมาตรฐานแห้งและภาพที่ 4-9 ค่าของ % ความชื้นมาตรฐานเปียก ที่มีผลต่อเวลาในการอบแห้ง ณ ความเร็วอากาศระดับต่างๆ ดังนี้



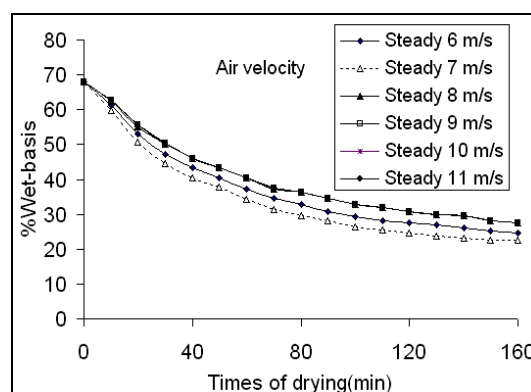
ภาพที่ 4-7 ค่าความดันตกคร่อมเบด



ภาพที่ 4-8 ค่า อัตราส่วนความชื้น



ภาพที่ 4-9 ค่า % ความชื้นมาตรฐานแห้ง



ภาพที่ 4-10 ค่า % ความชื้นมาตรฐานเปียก

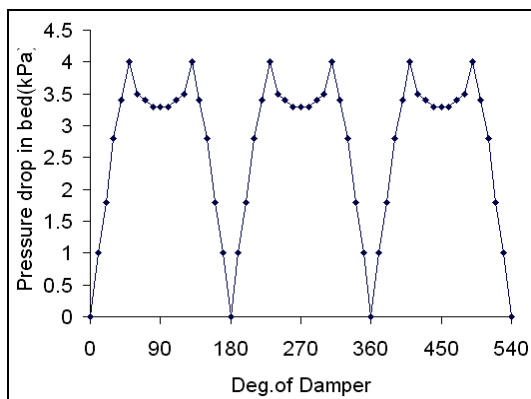
การวิเคราะห์ผลการทดลองจากภาพที่ 4-7 เป็นการทดลองหาความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยผลที่ได้จะใกล้เคียงกับ ภาพที่ 4-3 เนื่องจากปลาหมึกทั้งตัวจะลอยตัวเป็นกลุ่มก้อนเช่นเดียวกับปลาหมึกเส้นฝอย จึงใช้ความดันตกคร่อมเบดในการยกให้กลุ่มก้อนของลอยในสถานะของฟลูอิดไดเซชันใกล้เคียงกัน

การทดลองหาอัตราการอบแห้ง ของภาพที่ 4-8 -4-10 โดยทดลองที่ความเร็วของอากาศระดับต่างๆ เหมือนกับหัวข้อ 4.6.1.1 ปรากฏว่าความเร็วของอากาศ 7 m/s โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 150 นาที ที่ความชื้นกักเก็บ 24 % มาตรฐานเปียก คือ เป็นความเร็วของอากาศที่มีอิทธิพลต่อการพาความร้อนระหว่างปลาหมึกกับอากาศได้ดีที่สุด เนื่องจากปัจจัยของจุดสมดุลระหว่างการพาความร้อน การถ่ายเทมวลและการแพร่ความชื้นดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.5.1.1

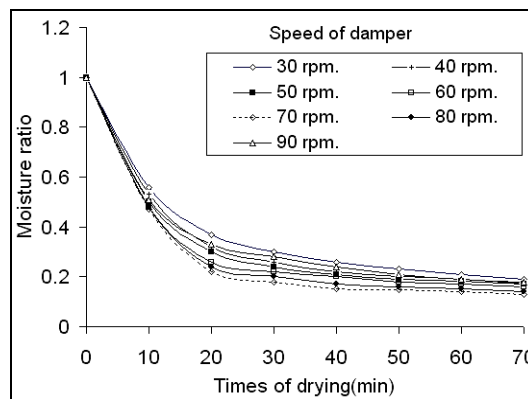
ส่วนความเร็วอากาศตั้งแต่ 8 m/s จนถึง 11 m/s จะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากผลของความเร็วอากาศในช่วงความเร็วนี้มีผลต่อการพาความร้อนและการถ่ายเทมวลน้อยกว่า ความเร็วของอากาศที่ 7 m/s ส่วนของเวลาที่ใช้จะมากกว่าปลาหมึกเส้นฝอย เนื่องจากปลาหมึกทั้งตัวมีพื้นที่มากกว่า ปลาหมึกเส้นฝอยจึงทำให้น้ำเคลื่อนตัวจากส่วนที่อยู่ภายในใช้เวลานานกว่า

4.5.2 ผลการทดลองอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว

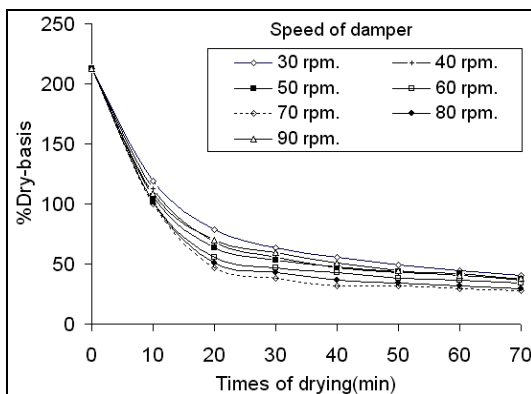
4.5.2.1 ผลการอบแห้งปลาหมึกฝอย ที่อุณหภูมิผิวนอกอาหาร 70 °C จากภาพที่ 4-11 เป็นความดันที่ตกคร่อมเบด ของวิธีการทดลองในหัวข้อ 4.4.2.1.1 ที่แปรผันตามองศาของลิ้นปีกผีเสื้อและผลการทดลองในภาพที่ 4-12 - 4.14 เป็นอัตราการอบแห้ง ของวิธีการทดลองในหัวข้อ 4.4.2.2.1 โดยเขียนกราฟแบบต่างๆ คือ ภาพที่ 4-12 แสดงค่า อัตราส่วนความชื้น ภาพที่ 4-13 แสดงค่าของ % ความชื้นมาตรฐานแห้งและภาพที่ 4-14 ค่าของ % ความชื้นมาตรฐานเปียก ที่มีผลต่อเวลาในการอบแห้ง ณ ความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ โดยมีผลการทดลองของอัตราการอบแห้งดังนี้



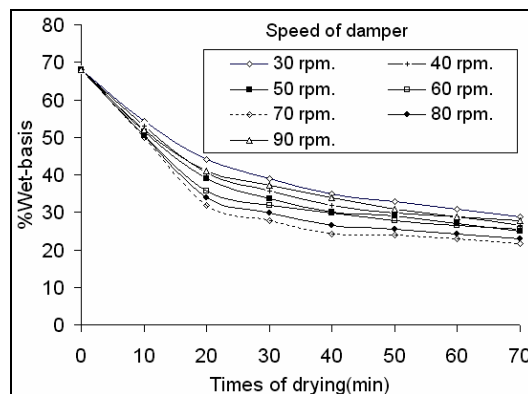
ภาพที่ 4-11 ค่าความดันตกคร่อมเบด



ภาพที่ 4-12 ค่า อัตราส่วนความชื้น



ภาพที่ 4-13 ค่า % ความชื้นมาตรฐานแห้ง



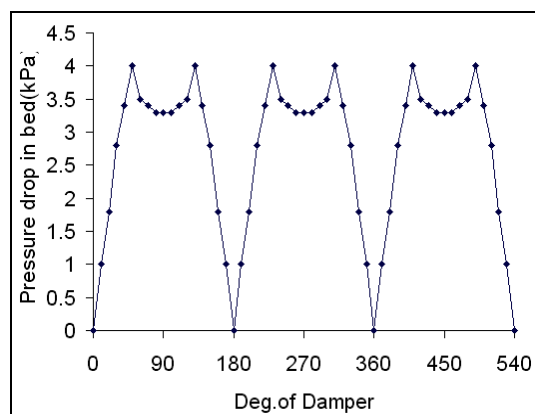
ภาพที่ 4-14 ค่า % ความชื้นมาตรฐานเปียก

การวิเคราะห์ผลการทดลองจากภาพที่ 4-11 คือ ผลของการทดลองหาความดันตกคร่อมเบดที่แปรผันตามองศาของลิ้นปีกผีเสื้อ โดยความดันตกคร่อมเบดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 4 kPa เมื่อลิ้นปีกผีเสื้อเปิด 50 องศา จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงและเกิดสถานะของฟลูอิดไดเซชันเมื่อลิ้นปีกผีเสื้อปิดไป 70 องศาโดยที่ปลาหมึกจะขยับและลอยตัวขึ้น จากนั้นเมื่อลิ้นปีกผีเสื้อเปิดสุดที่ตำแหน่ง 90 องศาความดันจะลดลงและความดันจะเพิ่มขึ้นสูงสุดอีกครั้งที่ตำแหน่ง 130 องศา จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อปิด 180 องศา ดังนั้นสภาวะของฟลูอิดไดเซชันจะเกิดในช่วง 70-130 องศาทำให้เกิดการกระแทกตัวขึ้น-ลงของปลาหมึกเส้นฝอยที่พันและลอยเกาะตัวกันในลักษณะของกลุ่มก้อน

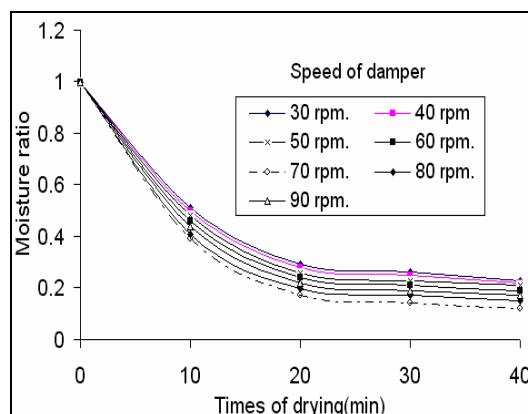
การทดลองหาอัตราการอบแห้ง ของภาพที่ 4-12 -4-14 โดยทดลองที่ความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อที่รอบคงที่ระดับต่างๆ เริ่มจาก 30 rpm และควบคุมให้ลิ้นปีกผีเสื้อเพิ่มความเร็วรอบครั้งละ 10 rpm จากการทดลองปรากฏว่าความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อที่ 70 rpm ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดคือ 60 นาที ที่ความชื้นกักเก็บ 24 % มาตรฐานเปียก โดยใช้เวลาน้อยกว่าวิธีการไหลแบบคงตัวของการอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิเดียวกันถึง 60 นาที เนื่องจากเป็นความเร็วรอบที่ทำให้ปลาหมึกเส้นฝอยกระจายตัวออกจากกัน จากการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนได้มากที่สุดจากการกระแทกขึ้น-ลงและการไหลของอากาศในลักษณะ Wake ที่ผ่านลิ้นปีกผีเสื้อที่มีความเร็วของอากาศแปรผันตลอดเวลาทำให้ปลาหมึกแต่ละตัวมีการหมุนวน ต่างจากการไหลแบบคงตัวที่มีการไหลแบบต่อเนื่องทำให้ปลาหมึกที่มีลักษณะแบนมีแรงยกตัวเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ลอยและเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน อีกทั้งความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อดังกล่าว สามารถลดความชื้นได้ดีกว่าความเร็วรอบอื่นๆ เนื่องจากการแทรกตัวของฟองอากาศที่สัมผัสกับปลาหมึกมาก จึงมีอิทธิพลต่อการพาความร้อน การถ่ายเทมวล ระหว่างปลาหมึก กับอากาศได้ดีที่สุด รวมทั้งความเหมาะสมต่อการแพร่ของความชื้นบนผิวรูพรุนเล็กๆ ของปลาหมึกและการเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความชื้นระหว่างปลาหมึกกับอากาศ ส่วนความเร็วรอบที่ 30-60 rpm จะใช้เวลาอบแห้งนานที่สุด เนื่องจากความเร็วจังหวะในการเปิดของลิ้นปีกผีเสื้อนานเกินไปและเกิดการกระแทกตัวของปลาหมึกที่เกาะตัวกันซ้ำจึงมีการกระจายตัวจากกันน้อยกว่า 70 rpm เนื่องจากที่ความเร็วรอบนี้เป็นความเร็วรอบที่เป็นจุดสมดุลต่อการพาความร้อน การถ่ายเทมวล และการแพร่ความชื้นออกจากรูพรุนเล็กๆ ของผิวปลาหมึก ส่วนของความเร็วรอบตั้งแต่ 80 rpm ขึ้นไปลิ้นปีกผีเสื้อจะหมุนเร็วเกินไปจึงทำให้แรงยกตัวที่เกิดการกระแทกขึ้น-ลงน้อยกว่าจึงมีการกระจายตัวน้อย จึงมีผลต่อปัจจัยดังกล่าวน้อยกว่าที่ 70 rpm

4.5.2.2 ผลการอบแห้งปลาหมึกฝอย ที่อุณหภูมิปลาหมึกสุก 120°C จากผลของการทดลองความดันที่ตกคร่อมเบดที่แปรผันตามความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อ โดยใช้วิธีการทดลองของหัวข้อ 4.4.2.1.1 ดังภาพที่ 4-15 และผลจากการทดลองดังภาพที่ 4-16 -4-18 คือผลของ

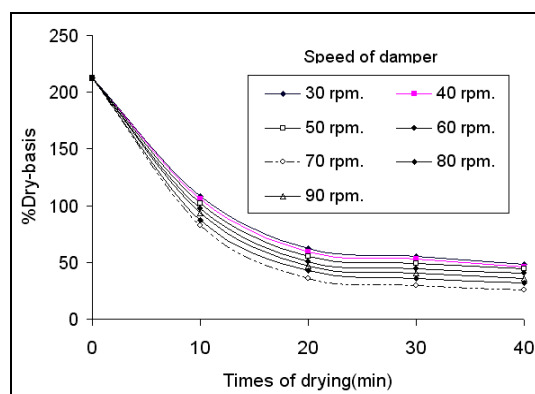
อัตรากรอบแห้ง โดยใช้วิธีการทดลองของหัวข้อ 4.4.2.3.1 โดยเขียนกราฟแบบต่างๆ คือ ภาพที่ 4-16 แสดงค่าของอัตราส่วนความชื้น ส่วนภาพที่ 4-17 แสดงค่าของ % ความชื้นมาตรฐานแห้งของปลาหมึกเส้นฝอยและภาพที่ 4-18 แสดงค่าของ % ความชื้นมาตรฐานเปียกที่มีผลต่อเวลาในการอบแห้ง ณ ความเร็วรอบของลินปิกฟีลล์ที่ระดับต่างๆ โดยเรียงตามลำดับดังนี้



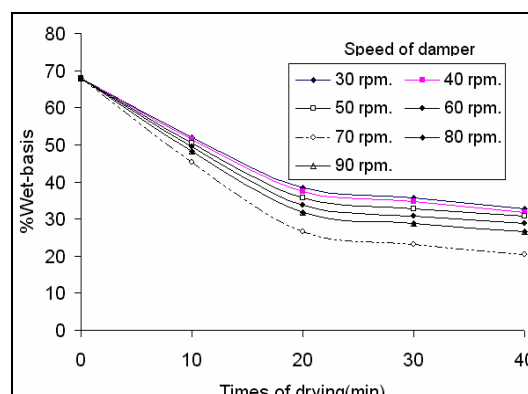
ภาพที่ 4-15 ค่าความดันตกคร่อมเบด



ภาพที่ 4-16 ค่า อัตราส่วนความชื้น



ภาพที่ 4-17 ค่า % Dry-basis



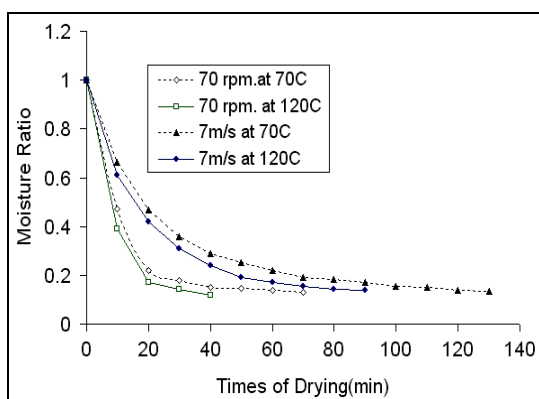
ภาพที่ 4-18 ค่า % Wet-basis

การวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยภาพที่ 4-15 ได้ใช้วิธีการทดลอง เหมือนกับหัวข้อ 4.5.2.1 ซึ่งมีผลของความดันตกคร่อมเบดเหมือนกัน เนื่องจากตัวแปรของการทดลองหาความดันตกคร่อมเบดไม่มีผลเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ

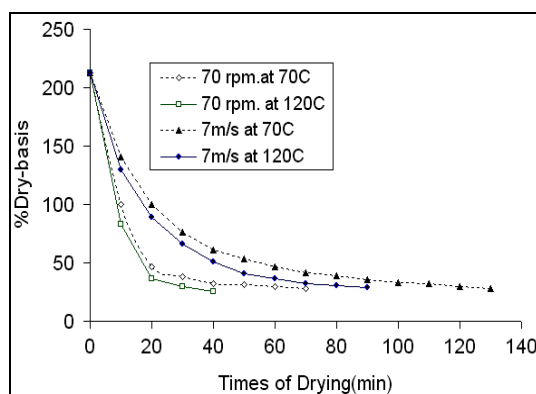
การทดลองหาอัตรากรอบแห้ง ของภาพที่ 4-16 -4-18 โดยทดลองที่ความเร็วรอบของ ลินปิกฟีลล์ที่รอบคงที่ระดับต่างๆ โดยเริ่มจาก 30 rpm.และควบคุมให้ลินปิกฟีลล์เพิ่มความเร็วยกครั้งละ 10 องศา เหมือนกับการทดลองในหัวข้อ 4.5.2.1 จากการทดลองปรากฏว่าได้ความเร็วรอบของลินปิกฟีลล์ที่ 70 rpm ใช้เวลาในการอบแห้ง 40 นาที จนเหลือความชื้นสำหรับกักเก็บ โดยได้ความเร็วรอบของลินปิกฟีลล์ที่ได้เท่ากับวิธีการไหลแบบไม่คงตัวที่อุณหภูมิ 70 °C เนื่องมาจากเป็นความเร็วรอบที่เหมาะสมต่อการพาความร้อนและการแผ่รังสีที่อธิบายในหัวข้อ 4.5.2.1 แต่เวลาใช้

ในการอบแห้งลดลง 20 นาทีอันเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะมีผลมากกว่าการพาความร้อน

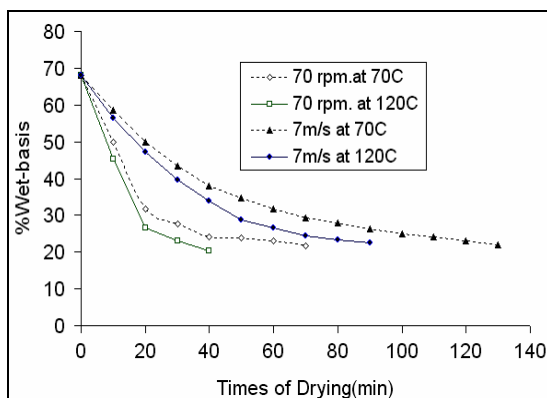
4.5.2.3 เปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งปลาหมึกฝอยด้วยวิธีการไหลของอากาศ แบบคงตัวและไม่คงตัวที่อุณหภูมิ 70 °C และ 120 °C ตามลำดับ จากภาพที่ 4-4 -4-6 ผลการทดลองด้วยวิธีการไหลแบบคงตัวความเร็วอากาศ 7 m/s เนื่องจากจุดสมดุลของการพาความร้อน การถ่ายเทมวล และการแพร่ความร้อน ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยใช้เวลาอบแห้งปลาหมึกฝอยน้อยที่สุดคือ 120 นาที ที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70 °C และที่อุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลาอบแห้ง 80 นาที โดยเปรียบเทียบกับวิธีอบแห้งปลาหมึกฝอยแบบไม่คงตัวที่อุณหภูมิ 70 °C และ 120 °C ตามลำดับ จากผลการทดลองที่สามารถลดเวลาอบแห้งปลาหมึกฝอยน้อยที่สุด ณ ความเร็วรอบของล้นปีกผีเสื้อ 70 rpm ที่อุณหภูมิ 70 °C โดยใช้เวลาอบแห้ง 60 นาที จากภาพที่ 4-12 - 4-14 และความเร็วรอบของล้นปีกผีเสื้อ 70 rpm ที่อุณหภูมิ 120 °C โดยใช้เวลาอบแห้ง 40 นาทีจากภาพที่ 4-16 – 4-18 โดยมีผลการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งดังภาพที่ 4-20 -4-22 ดังนี้



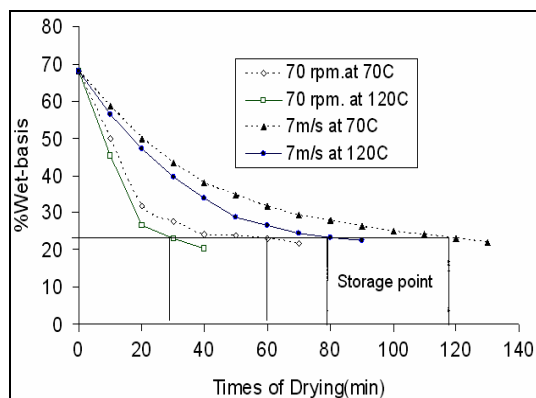
ภาพที่ 4-19 ค่าอัตราส่วนความชื้น



ภาพที่ 4-20 ค่า% ความชื้นมาตรฐานแห้ง



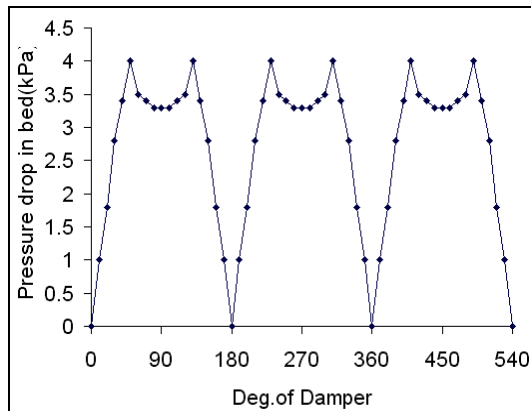
ภาพที่ 4-21 ค่า% ความชื้นมาตรฐานเปียก



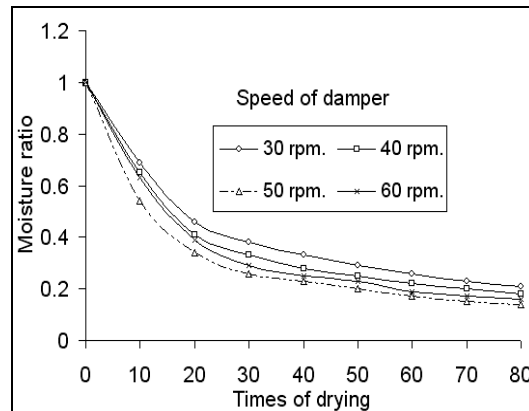
ภาพที่ 4-22 เปรียบเทียบผลที่ความชื้นกักเก็บ

4.5.3 ผลการทดลองอบแห้งปลาหมึกทั้งตัวด้วยวิธีการไหลแบบไม่คงตัว

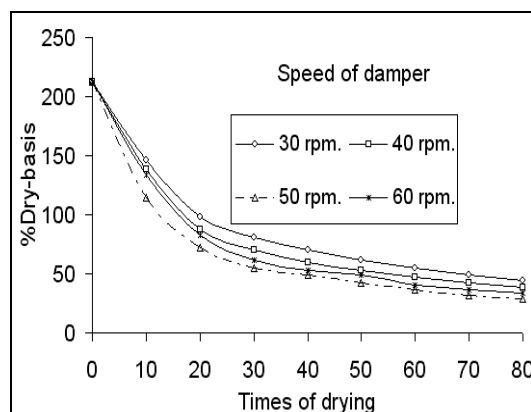
4.5.3.1 ผลการอบแห้งปลาหมึกทั้งตัว ที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70°C โดยภาพที่ 4-23 เป็นความดันที่ตกคร่อมเบดของวิธีการทดลองดังกล่าวข้อ 4.4.2.1.2 ที่แปรผันตามองศาการปิด-เปิดของลิ้นปีกผีเสื้อและผลการทดลองในภาพที่ 4-24 - 4-26 เป็นอัตราการอบแห้ง ของวิธีการทดลองในหัวข้อ 4.4.2.2.2 โดยเขียนกราฟแบบต่างๆ คือ ภาพที่ 4-24 แสดงค่าของ อัตราส่วนความชื้น ภาพที่ 4-25 แสดงค่าของ % ความชื้นมาตรฐานแห้ง และ ภาพที่ 4-26 ค่าของ % ความชื้นมาตรฐานเปียก ที่มีผลต่อเวลาในการอบแห้ง ณ ความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ โดยเรียงตามลำดับดังนี้



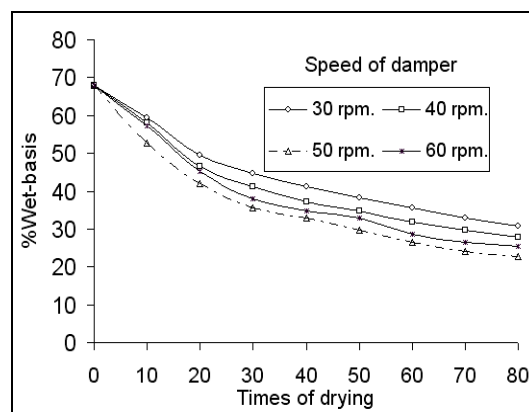
ภาพที่ 4-23 ค่าความดันตกคร่อมเบด



ภาพที่ 4-24 ค่าอัตราส่วนความชื้น



ภาพที่ 4-25 ค่า % ความชื้นมาตรฐานแห้ง

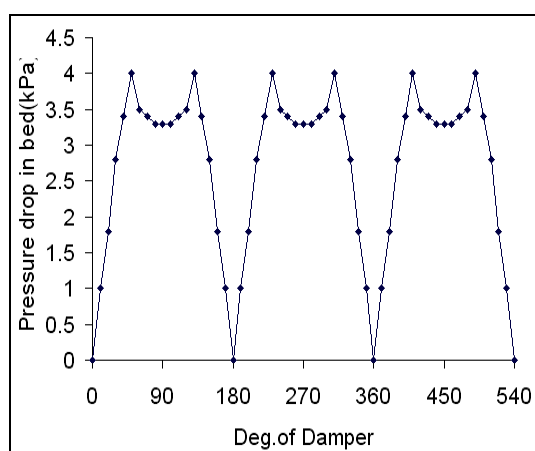


ภาพที่ 4-26 ค่า % ความชื้นมาตรฐานเปียก

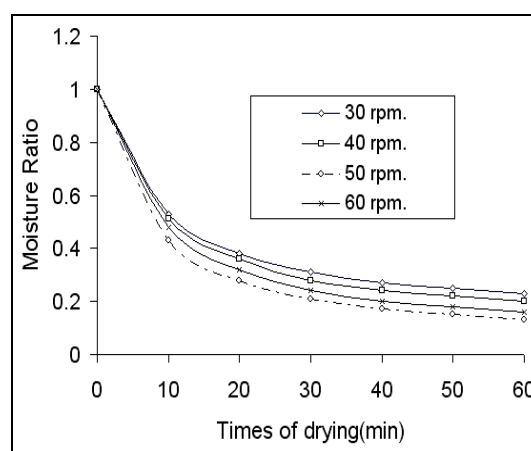
การวิเคราะห์ผลการทดลองจากภาพที่ 4-23 คือ ผลของการทดลองหาความดันตกคร่อมเบดที่แปรผันตามองศาของลิ้นปีกผีเสื้อ โดยผลการทดลองที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับหัวข้อ 4.5.2.1 เนื่องจากปลาหมึกทั้งตัวจะลอยเป็นกลุ่มก้อนเหมือนกับปลาหมึกเส้นฝอย จึงใช้ความดันในการยกตัวให้กลุ่มก้อนของปลาหมึกลอยขึ้นมีค่าเท่ากัน

การทดลองหาอัตราการอบแห้ง ของภาพที่ 4-24 -4-26 โดยทดลองที่ความเร็วรอบของ ลื่นปีกผีเสื้อที่รอบคงที่ระดับต่างๆ โดยเริ่มจาก 30 rpm และควบคุมให้ลื่นปีกผีเสื้อเพิ่มความเร็วรอบ ครั้งละ 10 rpm จากการทดลองปรากฏว่าความเร็วรอบของลื่นปีกผีเสื้อที่ 50 rpm ใช้เวลาในการ อบแห้ง 80 นาที ที่ความชื้นกักเก็บ โดยผลของการทดลองที่ความเร็วรอบนี้สามารถลดเวลาการ อบแห้งได้เร็วกว่าความเร็วรอบอื่น เนื่องจากปัจจัยของความเหมาะสมต่อการพาความร้อนที่ออกจาก ผิวของปลาหมึก การถ่ายเทมวลของน้ำโดยความเร็วอากาศและการแพร่ความชื้นที่ออกจากผิวรูพรุน เล็กๆของปลาหมึก แต่ผลจากการทดลองความเร็วรอบที่ได้จะน้อยกว่า การทดลองอบแห้งปลาหมึก เส้นฝอยที่อุณหภูมิและวิธีเดียวกัน อันเนื่องมาจากน้ำหนักของปลาหมึกทั้งตัวมีน้ำหนักมากกว่า ปลาหมึกเส้นฝอยใช้จังหวะของการกระแทก ขึ้น-ลงซ้ำกว่าในการกระจายตัวออกจากกัน ส่งผลให้ ความเร็วรอบของลื่นปีกผีเสื้อที่สามารถลดเวลาของการอบแห้งได้ดีที่สุด มีค่าน้อยกว่าปลาหมึกเส้น ฝอย ส่วนของเวลาในการอบแห้งปลาหมึกทั้งตัวใช้เวลานานกว่าปลาหมึกฝอยเนื่องจากมีขนาด ใหญ่กว่าจึงทำให้น้ำที่ระเหยออกจากแกนกลางของปลาหมึกและการแพร่ความชื้นของน้ำออกจากตัว ปลาหมึกใช้เวลานานกว่าปลาหมึกเส้นฝอย เนื่องมาจากพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่กว่า

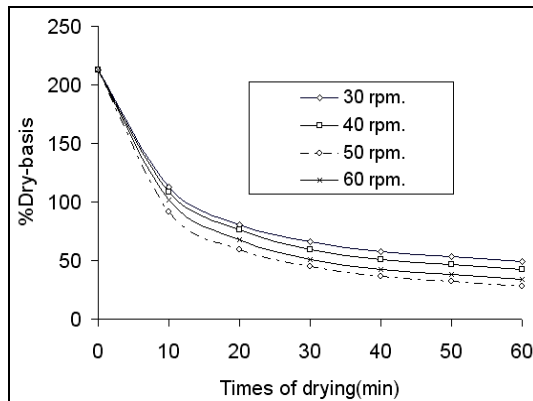
4.5.3.2 ผลการอบแห้งปลาหมึกทั้งตัว ที่อุณหภูมิปลาหมึกสุก 120°C จากผลของการ ทดลองความดันที่ตกคร่อมเบด ที่แปรผันตามความเร็วรอบของลื่นปีกผีเสื้อ โดยใช้วิธีการทดลองของ หัวข้อ 4.4.2.1.2 ดังภาพที่ 4-27 และผลจากการทดลองดังภาพที่ 4-28 —4-30 เป็นผลของอัตราการ อบแห้ง โดยใช้วิธีการทดลองของหัวข้อ 4.4.2.3.2 โดยเขียนกราฟแบบต่างๆ คือ ภาพที่ 4-28 แสดง ค่า อัตราส่วนความชื้น ภาพที่ 4.29 แสดงค่าของ% ความชื้นมาตรฐานแห้ง และภาพที่ 4-30 ค่าของ % ความชื้นมาตรฐานเปียก ที่มีผลต่อเวลาในการอบแห้ง ณ ความเร็วรอบของลื่นปีกผีเสื้อที่ระดับ ต่างๆ โดยเรียงตามลำดับดังนี้



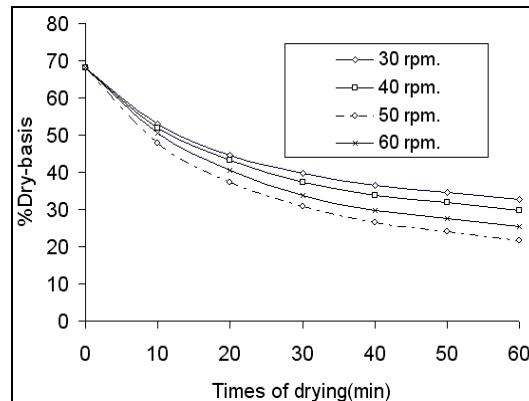
ภาพที่ 4-27 ค่าความดันตกคร่อมเบด



ภาพที่ 4-28 อัตราส่วนความชื้น



ภาพที่ 4-29 ค่า% ความชื้นมาตรฐานแห้ง

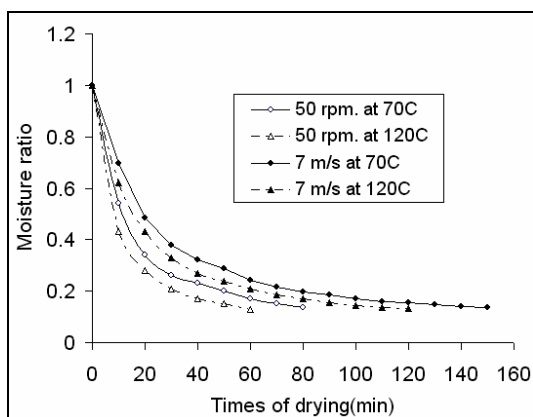


ภาพที่ 4-30 ค่า% ความชื้นมาตรฐานเปียก

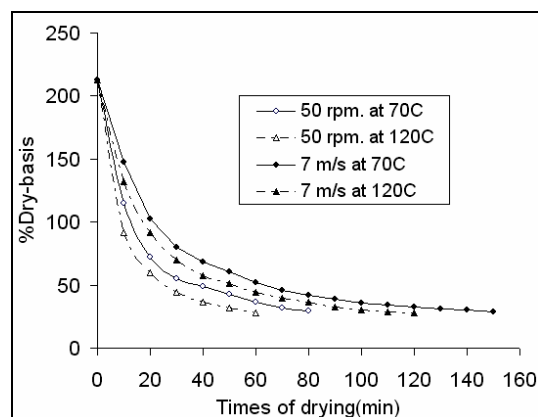
การวิเคราะห์ผลการทดลอง จากภาพที่ 4-27 โดยใช้วิธีการทดลองเหมือนกับหัวข้อ 4.4.2.1.2 ซึ่งมีผลของความดันตกคร่อมเบดเหมือนกับการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.5.3.1 เนื่องจากตัวแปรของการทดลองไม่มีผลเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ

การทดลองหาอัตราการอบแห้ง ของภาพที่ 4-28 -4-30 โดยทดลองที่ความเร็วรอบของ ลิ้นปีกผีเสื้อที่รอบคงที่ระดับต่างๆ โดยเริ่มจาก 30 rpm และควบคุมให้ลิ้นปีกผีเสื้อเพิ่มความเร็วรอบ ครั้งละ 10 rpm จากการทดลองปรากฏว่าได้ความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อที่ 50 rpm ใช้เวลาในการอบแห้ง 40 นาที จนเหลือความชื้นสำหรับกักเก็บ โดยความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อที่ได้เท่ากับวิธีการไหลแบบไม่คงตัวที่อุณหภูมิ 70°C เนื่องจากเป็นความเร็วรอบที่เหมาะสมต่อการพาความร้อน การถ่ายเทมวลและการแพร่ แต่เวลาใช้ในการอบแห้งลดลง 20 นาที อันเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของน้ำ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะมีผลมากกว่าการพาความร้อน

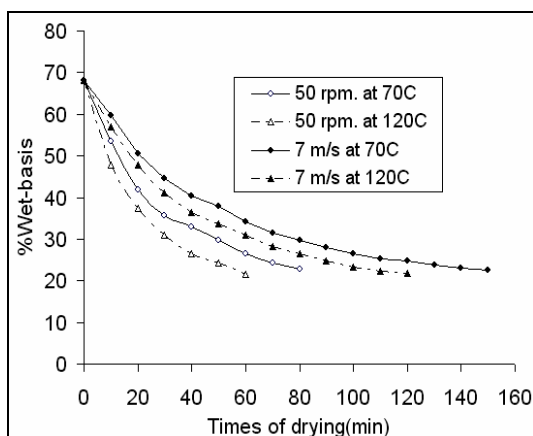
4.5.3.3 เปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งปลาหมึกทั้งตัวด้วยวิธีการไหลแบบคงตัว และไม่คงตัวที่อุณหภูมิ 70°C และ 120°C ตามลำดับ จากภาพที่ 4-8 -4-10 ผลการทดลองด้วยวิธีการไหลแบบคงตัวที่ความเร็วอากาศ 7 m/s ใช้เวลาอบแห้งปลาหมึกฝอยน้อยที่สุดคือ 150 นาที ที่อุณหภูมิถนอมอาหาร 70°C และที่อุณหภูมิ 120°C ใช้เวลาอบแห้ง 120 นาที โดยเปรียบเทียบกับวิธีอบแห้งปลาหมึกฝอยแบบการไหลไม่คงตัวที่อุณหภูมิ 70°C และ 120°C ตามลำดับ จากผลการทดลองที่สามารถลดเวลาอบแห้งปลาหมึกฝอยน้อยที่สุด ณ ความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อ 50 rpm ที่อุณหภูมิ 70°C โดยใช้เวลาอบแห้ง 80 นาที จากภาพที่ 4-16 – 4-18 และความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อ 70 rpm ที่อุณหภูมิ 120°C โดยใช้เวลาอบแห้ง 60 นาที จากภาพที่ 4-28 – 4-30 โดยมีผลการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้ง อัตราส่วนความชื้น %ความชื้นมาตรฐานแห้ง และ%ความชื้นมาตรฐานเปียกที่ความชื้นกักเก็บ โดยผลการทดลองที่ความเร็วอากาศและความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อดังภาพที่ 4-20 -4-22 โดยมีผลการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิต่างดังนี้



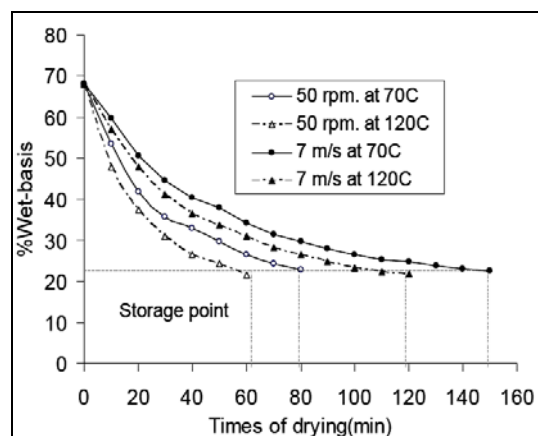
ภาพที่ 4-31 ค่าของอัตราส่วนความชื้น



ภาพที่ 4-32 ค่า% ความชื้นมาตรฐานแห้ง



ภาพที่ 4-33 ค่าของ% ความชื้นมาตรฐานเปียก



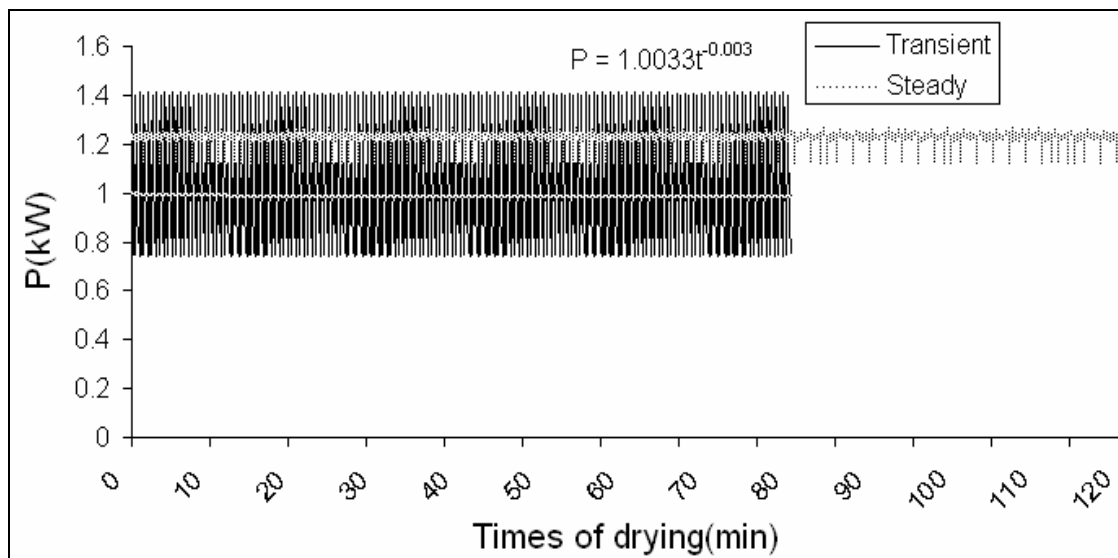
ภาพที่ 4-34 เปรียบเทียบผลที่ความชื้นกักเก็บ

4.5.4 ผลการวัดกำลังทางไฟฟ้าของพัดลมอัดอากาศด้วยวิธีการไหลแบบคงตัวและไม่คงตัว

เทียบกับเวลาอบแห้ง สำหรับการวัดด้วยวิธีวัดกำลังทางไฟฟ้าโดยวัดด้วยเครื่องมือจะประกอบด้วยสายต่อกับพัดลมอัดอากาศ 4 เส้น โดยคู่ที่เป็นโวลต์มิเตอร์ จะใช้วิธีการต่อแบบขนาน ส่วนคู่ที่เป็นแอมป์มิเตอร์ใช้วิธีการต่อแบบอนุกรม โดยที่วัดด้วยเครื่องมือจะวัดผลออกมาเป็นหน่วยของกำลังไฟฟ้าของพัดลมอัดอากาศที่เป็น kW โดยผลจากการวัดด้วยวิธีการไหลแบบคงตัวจะมีลักษณะของกำลังทางไฟฟ้าที่ค่อนข้างคงที่ ส่วนวิธีการไหลแบบไม่คงตัวลักษณะของกำลังทางไฟฟ้าจะมีการแกว่งตัวสูงกว่าดังภาพที่ 4-35 จากผลการทดลองสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้าในการอบแห้ง

ปลาหมึกกล้วยแต่ละครั้งโดยคิดจากจำนวนยูนิตของค่าไฟฟ้า $Unit_f = \int_0^t P(t)dt$ เทียบกับเวลาที่

อบแห้งแต่ละวิธี โดยฟังก์ชันของ $P(t)$ หาได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4-35 เพื่อนำผลของค่าไฟฟ้าของพัดลมอัดอากาศมารวมกับผลของค่าไฟฟ้าจากมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนปั๊มเกลือที่มีขนาด 50 W ดังนี้



ภาพที่ 4-35 กำลังทางไฟฟ้าของวิธีการไหลแบบคงตัวและไม่คงตัว

4.6 เปรียบเทียบผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี เพื่อเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page วิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของทั้งสองวิธีดูได้จาก ภาคผนวก ค โดยแบ่งประเภทแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศาสตร์ที่ใช้สำหรับทำนายอัตราส่วนความชื้นของ ปลาหมึกเส้นฝอย และปลาหมึกทั้งตัวดังนี้

4.6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอัตราส่วนความชื้นของปลาหมึกเส้นฝอยจากผลของ ภาคผนวก ค ซึ่งได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

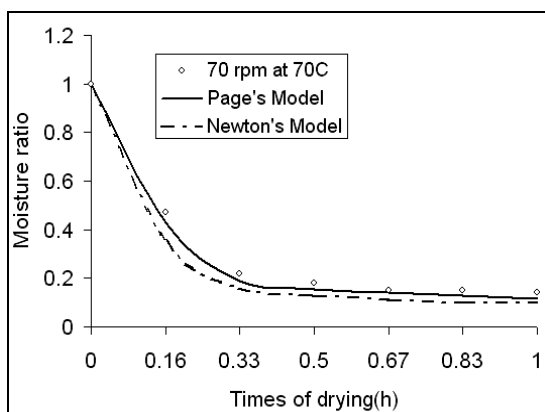
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton

$$MR = \exp[(-0.001195rpm - 0.00389T + 0.762788)t] \quad (\text{ก-6})$$

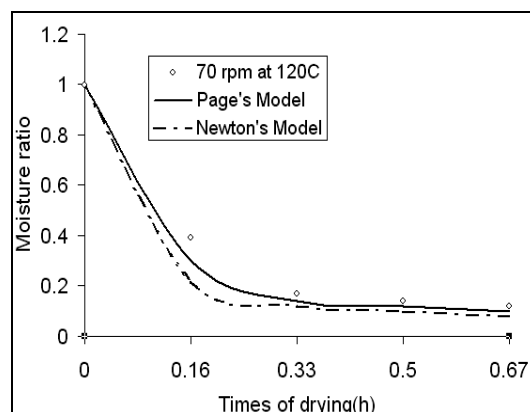
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page

$$MR = \exp[(0.002673rpm + 0.003065T - 0.762788)t^{(0.002167T - 0.0013rpm - 0.0191)}] \quad (\text{ก-7})$$

ทดสอบการทำนายผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยแทนค่าที่ความเร็วรอบ 70 rpm ของความเร็วรอบที่ใช้เวลาอบแห้งปลาหมึกฝอยน้อยที่สุดในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองวิธีที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C ได้ผลการแทนค่าดังนี้



ภาพที่ 4-36 ผลการทำนายที่อุณหภูมิ 70 °C



ภาพที่ 4-37 ผลการทำนายที่อุณหภูมิ 120 °C

4.6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับอัตราส่วนความชื้นของปลาหมึกทั้งตัวจากผลของภาคผนวก ก สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

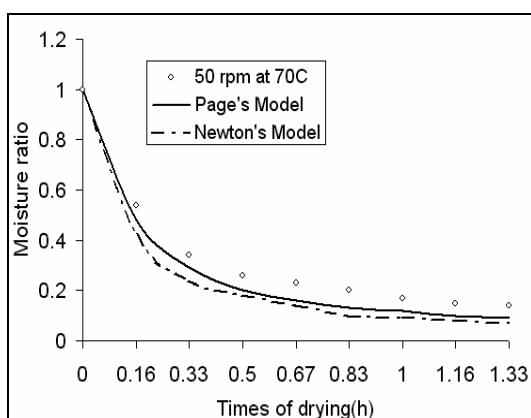
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton

$$MR = \exp[(-0.001842rpm - 0.00225T - 0.036467)t] \quad (\text{ค-11})$$

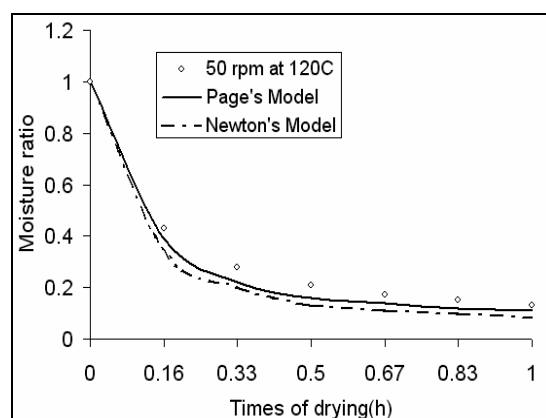
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page

$$MR = \exp[(-0.00424rpm - 0.002355T - 0.148563)t^{(4.95 \cdot 10^{-5}T + 3.05 \cdot 10^{-5}rpm + 0.154812)}] \quad (\text{ค-12})$$

ทดสอบการทำนายผลโดยแทนค่าที่ความเร็วรอบ 50 rpm ของความเร็วรอบที่ใช้เวลาอบแห้ง ปลาหมึกฝอยน้อยที่สุด ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองวิธีที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C ได้ผลการแทนค่าดังนี้



ภาพที่ 4-38 ผลการทำนายที่อุณหภูมิ 70 °C



ภาพที่ 4-39 ผลการทำนายที่อุณหภูมิ 120 °C

โดยผลสรุปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถทำนายการอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอย และปลาหมึกทั้งตัวได้แม่นยำกว่าแบบจำลองของ Newton ทุกเทคนิคการทดลอง

4.7 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเร็วอากาศที่ควบคุมโดยลื่นปีกผีเสื้อ

หัวข้อนี้กล่าวถึงการเปรียบเทียบผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการทดลองของความเร็วอากาศแบบปั่นป่วน ที่แปรผันตามลื่นปีกผีเสื้อ ซึ่งอยู่รูปของอนุกรมฟูรีเยร์โดยเปรียบเทียบวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของทั้งสองวิธีคือ วิธี การประมาณค่าฟูรีเยร์และวิธี Sinusoidal Functions โดยใช้ข้อมูลจากหัวข้อ 3.2.2.2 และภาพที่ 3-11 จากความเร็วของอากาศที่เกิดขึ้น โดยเปลี่ยนแปลงไปตามองศาของลื่นปีกผีเสื้อในลักษณะของคาบที่ซ้ำกันจนถึงอนันต์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจากการทำ Cruve Fitting จากวิธีการของ Sinusoidal Functions สามารถใช้ผลลัพธ์ได้เพียงหนึ่งคาบที่ตำแหน่ง $0 \leq \theta \leq \pi$ เท่านั้นเนื่องจากค่าของฟังก์ชัน Sine Wave ที่ตำแหน่ง $\pi \leq \theta \leq 2\pi$ จะมีค่าติดลบไม่สามารถนำมาใช้ได้ อีกทั้งผลลัพธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีนี้ เมื่อทดลองนำผลลัพธ์ที่ได้จากการนำกลับไปแทนค่าในกราฟเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำ ปรากฏว่ายังมีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก ในส่วนของการรวมคาบอื่นๆ ให้เป็นอนุกรมฟูรีเยร์ ต้องใช้วิธี Analytical ซึ่งมีความยุ่งยากมากกว่าวิธีของการประมาณค่าฟูรีเยร์ ที่มีความแม่นยำมากกว่าและสามารถรวมคาบของ Half Sine อื่นๆเข้าด้วยกันโดยไม่ต้องใช้การทำ Analytical โดยเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่รวมคาบของอนุกรมเข้าด้วยกันจนถึงอนันต์ ส่วนของวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อยู่ในภาคผนวก ง ดังนี้

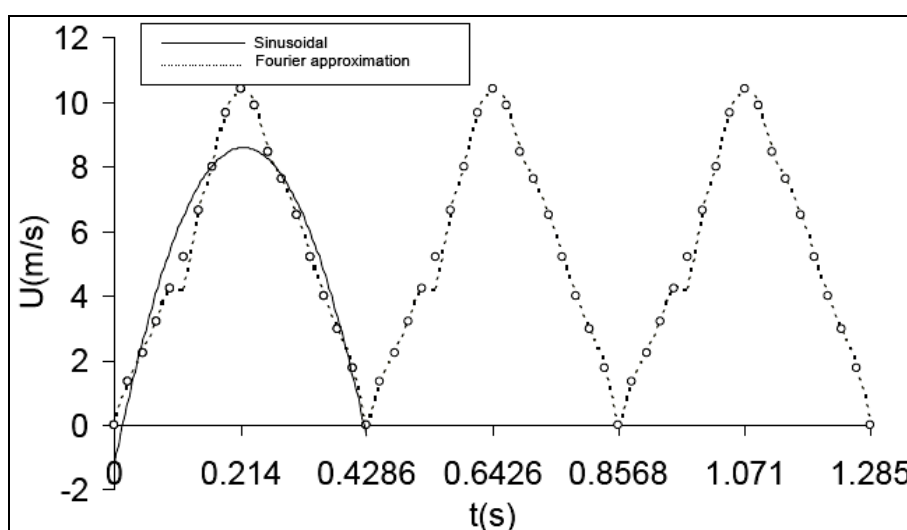
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของ Sinusoidal

$$U_{periodic} = -0.3857 \cos 7.32t + 8.70445 \sin 7.32t \quad (ง-4)$$

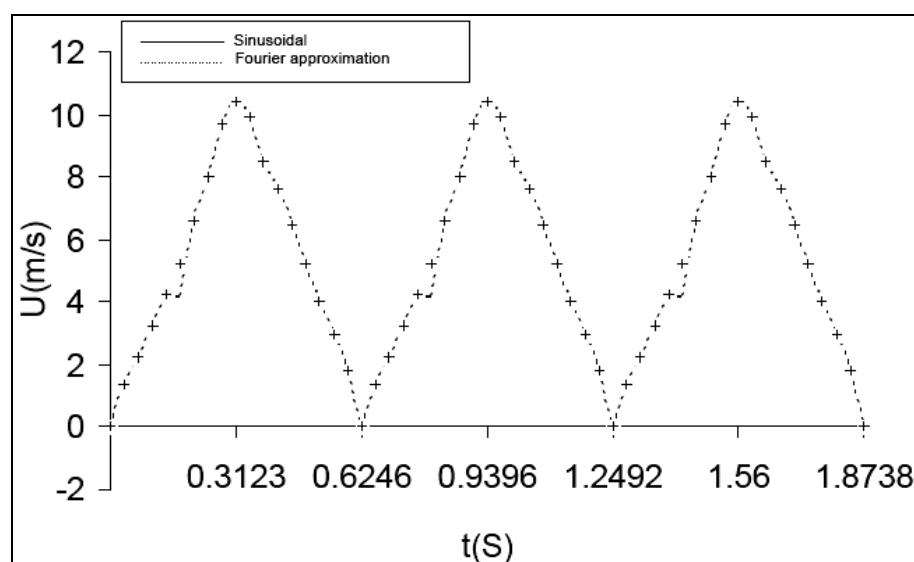
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของ การประมาณค่าฟูรีเยร์

$$U_{Periodic}(t) = \sum_{\theta=10}^{\infty} (10.64 \cos 14.66t + 0.6119 \sin 14.66t) \quad (ง-8)$$

จากนั้นแทนค่าเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของผลลัพธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองแบบ กับผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 4-40 การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของทั้งสองวิธี ที่ความเร็วรอบ 70 rpm

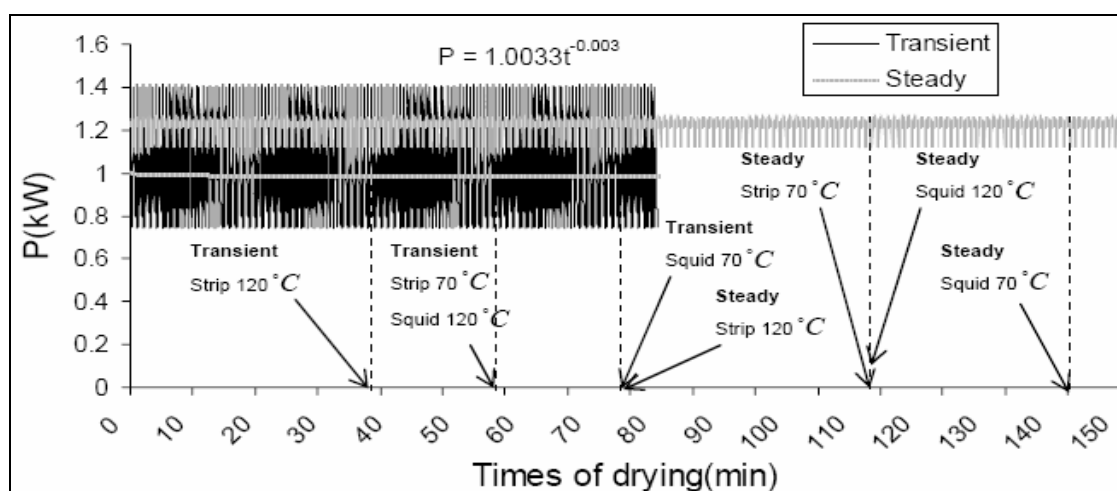


ภาพที่ 4-41 ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การประมาณค่าฟูริเยร์ ที่ความเร็วรอบ 50 rpm

4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าและจุดคืนทุนของการอบแห้งแต่ละวิธี

โดยเป็นปัจจัยหลักที่ได้ใช้ข้อมูลการทดลองทั้งหมด เพื่อนำมาวิเคราะห์การลดลงของพลังงานจากวิธีการอบแห้ง ด้วยการไหลแบบไม่คงตัว โดยเปรียบเทียบกับ การไหลแบบคงตัวสำหรับการอบแห้งแบบสะเป้าเตี๊ดเบด โดยมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.8.1 การวิเคราะห์ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้า หัวข้อนี้กล่าวถึงการเปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้าของการอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยและปลาหมึกทั้งตัว ของวิธีการไหลแบบคงตัวและไม่คงตัวที่อุณหภูมิถนอมอาหารและอุณหภูมิปลาหมึกสุก โดยใช้ผลจากการวัดกำลังทางไฟฟ้าจากภาพที่ 4-35 มาประยุกต์ใช้กับข้อมูลของระยะเวลาการอบแห้งจากผลการทดลองของหัวข้อ 4.5 โดยเขียนภาพใหม่เพื่อใช้วิเคราะห์ค่าไฟฟ้าได้ดังนี้



ภาพที่ 4-42 แสดงกำลังทางไฟฟ้ากับ เวลาอบแห้งด้วยวิธีและอุณหภูมิต่างๆ

วิธีการวิเคราะห์ค่าไฟฟ้าจากภาคผนวก จ โดยมีผลสรุปจาก ตารางที่ จ-2 ดังนี้

ตารางที่ 4-1 สรุปผลของการวิเคราะห์ค่าไฟฟ้าของการอบแห้งแต่ละวิธี

อุณหภูมิ	ค่าไฟฟ้า (บาท/ปี)					
	ปลาหมึกฝอย			ปลาหมึกทั้งตัว		
	แบบคงตัว	แบบไม่คงตัว	%ที่ลดลง	แบบคงตัว	แบบไม่คงตัว	%ที่ลดลง
70 °C	23,911.11	9,794.85	59.03	30,455.85	14,246	53.22
120 °C	15,138.04	6,457.91	57.33	23,911.11	9,794.85	59.04

ผลที่ได้จากการทดลองอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอย และปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิทั้งสองช่วงค่าของวิธีการไหลแบบไม่คงตัวสามารถค่าภาระของใช้จ่ายทางไฟฟ้าต่อปีได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับวิธีการไหลแบบคงตัวทุกเทคนิคของการทดลอง

4.8.2 การวิเคราะห์จุดคืนทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งแต่ละวิธี โดยที่จุดคืนทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้ง มีผลจากต้นทุนแปรผันเนื่องจากค่าไฟฟ้าที่ใช้อบแห้งในแต่ละวิธี หรือแต่ละเทคนิคการทดลองจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องมาจากผลต่างของระยะเวลาในการอบแห้งมีผลต่อต้นทุนค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้างวดที่ 4.5 เมื่อรวมกับต้นทุนของการสร้างเครื่องอบแห้งซึ่งเป็นต้นทุนคงที่ จะทำให้ต้นทุนในการอบแห้งปลาหมึกแต่ละครั้งโดยคิดจากจำนวนเงิน ต่อจำนวนกิโลกรัมของน้ำที่ระเหยเปลี่ยนแปลงและทำให้จุดคืนทุนของเครื่องอบแห้งเปลี่ยนตามไปด้วย โดยผลการคำนวณจุดคืนทุนจากภาคผนวก จ และผลสรุปของตารางที่ จ-3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4-2 สรุปผลของการวิเคราะห์จุดคืนทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งแต่ละวิธี

อุณหภูมิ	จุดคืนทุน (ปี)					
	ปลาหมึกฝอย			ปลาหมึกทั้งตัว		
	แบบคงตัว	แบบไม่คงตัว	%ที่ลดลง	แบบคงตัว	แบบไม่คงตัว	%ที่ลดลง
70 °C	1.227	0.873	28.85	1.46	0.97	33.56
120 °C	1.02	0.697	31.6	1.227	0.873	28.86

ผลที่ได้จากการทดลองอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอย และปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิทั้งสองช่วงค่าของวิธีการไหลแบบไม่คงตัวมีจุดคืนทุนเร็วกว่าตั้งแต่ 20 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปเมื่อเทียบกับวิธีการไหลแบบคงตัวทุกเทคนิคของการทดลอง

4.8.3 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดของเบดนิ่งกับสะเป้าเต็ดเบด จากลักษณะของผลการทดลองเบดนิ่ง โดยใช้การทดลองหาอัตราการระเหยของปลาหมึกในตู้อบแห้งขนาดเล็กที่มีพัดลมอัดอากาศเป่าลดปลาหมึกจำนวน 1 kg ที่วางซ้อนกัน โดยตู้อบแห้งระบุนขนาดของอัตรากำลังทางไฟฟ้ารวม 1.5 kW การทดลองได้ปรับอุณหภูมิของตู้อบแห้งที่ 120 °C เวลาที่ได้จากการทดลองอบแห้งปลาหมึกที่ความชื้นกักเก็บจากการทดลองใช้เวลา 4 ชั่วโมง ดังนั้นค่าไฟฟ้าสามารถคิดจากวิธีในภาคผนวก จ โดยการใช้อย่างทั่วไประบุนใช้กับการอบแห้งปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิ 120 °C ตามที่ได้คำนวณไว้ข้างต้นเปรียบเทียบกับวิธีการไหลแบบไม่คงตัวเนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถลดพลังงานได้มากที่สุดโดยมีผลสรุปดังนี้

ตารางที่ 4-3 สรุปผลการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าต่อปีระหว่างตู้อบแห้งกับวิธีการไหลแบบไม่คงตัว

ค่าไฟฟ้า (บาท/ปี)		
ปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิอบแห้ง 120 °C		
ตู้อบแห้ง	แบบไม่คงตัว	%ที่ลดลง
25,224.17	9,794.85	61.16

4.9 ผลสรุปที่ได้จากการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลทดลองวิธีการอบแห้งด้วยวิธีการไหลแบบคงตัวและไม่คงตัวโดยสรุปผลเป็นภาพรวมได้ดังนี้

4.9.1 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอย และปลาหมึกทั้งตัวด้วยวิธีการไหลของอากาศแบบไม่คงตัวลดลงมากกว่าวิธีการไหลแบบคงตัว 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ทำให้ค่าใช้จ่ายของต้นทุน

4.9.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง จากการแทนค่าและเปรียบเทียบผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton ปรากฏว่า

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของPage ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์Newtonทุกเทคนิคการทดลอง เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเทอมของอัตราการอบแห้งที่มีสมการของค่าคงที่ของการอบแห้งที่เป็นเทอมของกำลัง k จึงมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าของการทดลองมากกว่า โดยพลังงานไฟฟ้าลดลงได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ จ-2

4.9.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเร็วอากาศที่แปรผันตามล้นปีกผีเสื้อ โดยใช้วิธีการประมาณค่าฟูรีเยร์ สามารถทำนายผลของความเร็วอากาศที่แปรผันตามล้นปีกผีเสื้อได้แม่นยำกว่าวิธีของ Sinusoidal functions เมื่อเทียบกับผลจากการทดลอง ของทุกเทคนิคการทดลอง

4.9.4 จุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอย และปลาหมึกทั้งตัวโดยใช้ที่อุณหภูมิทั้งสองช่วงค่า ของวิธี การไหลแบบไม่คงตัว มีจุดคุ้มทุนเร็วกว่าตั้งแต่ 20 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป เมื่อเทียบกับวิธี การไหลแบบคงตัวทุกเทคนิคของการทดลอง

บทที่ 5

สรุป และเสนอแนะ

ความเร็วรอบของล้นปีกผีเสื้อที่เหมาะสม ของการไหลแบบไม่คงตัวสำหรับการอบแห้ง ปลาหมึกเส้นฝอย คือ 70 rpm และปลาหมึกทั้งตัวคือ 50 rpm และการไหลแบบชนิดนี้ เหมาะสมกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแบนเท่านั้น โดยอาจนำไปใช้ออบแห้งผลิตภัณฑ์อย่างอื่นได้เช่น ปลากรอบ ฯลฯ จากผลสรุปทางด้านพลังงานควรที่จะนำไปสร้างเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ เนื่องจากผลการทดลองสามารถลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์แต่แหล่งพลังงาน ความร้อนที่ใช้ควรเปลี่ยนจากฮีตเตอร์เป็นแหล่งพลังงานอื่นที่มีต้นทุนที่ถูกลง จะทำให้ประหยัดต้นทุนทางด้านพลังงานได้มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Maurico B.F. et.al. A Diffusion Model for Describing Water Transport in Round Squid Mantle During Drying with a Moisture-dependent Effective Diffusivity.
England : Journal of Food Engineering, 1998.
2. Mayor et.al. Modeling shrinkage during convective drying of food materials.
England : Journal of Food Engineering, 1998.
3. ชริน สังข์เกษม. การออกแบบและทดลองเพื่อหาคุณลักษณะของการอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยในสเปาเต็คเบค. ภูเก็ต : การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, 2548.
4. สมศักดิ์ ดำรงเลิศ. ฟลูอิดไดเซชัน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
5. สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. การอบแห้งเมล็ดพืช. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2537.
6. วันชัย ธิจิรวนิช. เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
7. Kunii, D. et al. Fluidization Engineering. 2nd ed. U.S.A : Butterworth Heinemann, c1991.
8. Cengel, Y. A. et al. Thermodynamics. U.S.A : McGraw-Hill Book Company, c1989.
7. Singiresu S. Mechanical Vibration. 3rd ed. U.S.A : Addison-Wesley Publishing Company, c1995.
10. Mc Quiston, FAYE, et al. HEATING, VENTILATING, AND AIR CONDITIONING.
U.S.A : John Wiley & Sons, c1984
11. P.Diodati, et al., "Comparison of Velocity Measurement by Laser-Dropper Velocimetry Hot-wire Anemometry and Particle Image Velocimetry in a Fully Developed Turbulent Jet." Turbulent Flows ASME. (Sept. 2002) : 102-108
12. Harrel, C. G Thermal Properties. Available online at
<http://food.oregonstate.edu>

ภาคผนวก ก

ตารางคุณสมบัติที่ใช้ขอออกแบบสะพานใต้เบด

ตารางที่ ก-1 ตารางคุณสมบัติของอากาศ

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^{-7}$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^{-7}$ (m ² /s)	$k \cdot 10^{-3}$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	Pr
Air							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.8	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^{-7}$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^{-7}$ (m ² /s)	$k \cdot 10^{-3}$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	Pr
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1359	1.665	818	589	222	960	0.613
2600	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

ที่มา [8]

ตารางที่ ก-2 คุณสมบัติ Specific Heat Values of Selected Foods

Seafood: Calamari (mantle)	fresh	81.59	3.35 kJ/kg.K	Rahman, M.S. 1993. Specific Heat of selected fresh seafood. Journal Food Science 58: 523.
Seafood: Calamari (wing)	fresh	84.18	3.78 kJ/kg.K	Rahman, M.S. 1993. Specific Heat of selected fresh seafood. Journal Food Science 58: 523.
Seafood: Calamari (wing)	fresh	83.38	3.79 kJ/kg.K	Rahman, M.S. 1993. Specific Heat of selected fresh seafood. Journal Food Science 58: 523.
Seafood: Cuttle (skin)	fresh	86.99	3.79 kJ/kg.K	Rahman, M.S. 1993. Specific Heat of selected fresh seafood. Journal Food Science 58: 523.
Seafood: Cuttle(mantle)	fresh	80.92	3.59 kJ/kg.K	Rahman, M.S. 1993. Specific Heat of selected fresh seafood. Journal Food Science 58: 523.

ตารางที่ ก-2 (ต่อ)

Seafood: King prawn(green)	fresh	75.63	3.45 kJ/kg.K	Rahman, M.S. 1993. Specific Heat of selected fresh seafood. Journal Food Science 58: 523.
Seafood: King prawn(tiger)	fresh	76.49	3.41 kJ/kg.K	Rahman, M.S. 1993. Specific Heat of selected fresh seafood. Journal Food Science 58: 523.
Seafood: Octopus(tentacle)	fresh	80.35	3.29 kJ/kg.K	Rahman, M.S. 1993. Specific Heat of selected fresh seafood. Journal Food Science 58: 523.
Seafood: Squid(tentacle)	fresh	82.63	3.58 kJ/kg.K	Rahman, M.S. 1993. Specific Heat of selected fresh seafood. Journal Food Science 58: 523.
Seafood: Squid (tentacle)	fresh	79.61	3.50 kJ/kg.K	Rahman, M.S. 1993. Specific Heat of selected fresh seafood. Journal Food Science 58: 523.
Seafood: Squid (tentacle)	fresh	83.02	3.53 kJ/kg.K	Rahman, M.S. 1993. Specific Heat of selected fresh seafood. Journal Food Science 58: 523.

ที่มา [12]

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีกึ่งตัวที่ 70 °C ของ
ปลาหมึกเส้นฝอย จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 55.7, 61.2 และ
59.7 % RH

เวลา (นาทึ)	ความเร็วอากาศ (m/s)					
	6	7	8	9	10	11
0	1	1	1	1	1	1
10	0.696	0.664	0.72	0.73	0.73	0.73
20	0.483	0.469	0.518	0.519	0.519	0.519
30	0.378	0.359	0.419	0.42	0.42	0.42
40	0.32	0.288	0.35	0.35	0.35	0.35
50	0.286	0.2513	0.306	0.307	0.307	0.307
60	0.244	0.218	0.276	0.277	0.277	0.277
70	0.216	0.193	0.245	0.246	0.246	0.246
80	0.198	0.182	0.218	0.219	0.219	0.219
90	0.184	0.169	0.193	0.193	0.193	0.193
100	0.169	0.156	0.183	0.184	0.184	0.184
110	0.16	0.1496	0.169	0.169	0.169	0.169
120	0.154	0.14	0.164	0.165	0.165	0.165
130	0.146	0.133	0.156	0.156	0.156	0.156
140	0.141	0.133	0.153	0.153	0.153	0.153
150	0.136	0.133	0.147	0.148	0.148	0.148
160	0.136	0.133	0.139	0.139	0.139	0.139
170	0.136	0.133	0.137	0.137	0.137	0.137
180	0.136	0.133	0.137	0.137	0.137	0.137

ตารางที่ ข-2 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานแห้ง จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีคงตัว ที่ 70°C ของ
ปลาหมึกเส้นฝอย จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 55.7, 61.2 และ
59.7 % RH

เวลา (min)	ความเร็วอากาศ (m/s)					
	6	7	8	9	10	11
0	212.48	212.48	212.48	212.48	212.48	212.48
10	148.3	141.1	153.1	153.1	153.1	153.1
20	103.1	99.8	110.2	110.2	110.2	110.2
30	80.5	76.3	89.2	89.2	89.2	89.2
40	68.2	61.2	74.5	74.5	74.5	74.5
50	60.7	53.4	65.2	65.1	65.2	65.2
60	52.1	46.3	58.6	58.6	58.6	58.6
70	46.2	41.2	52.4	52.3	52.1	52.4
80	42.1	38.7	46.5	46.5	46.5	46.5
90	39.3	35.6	41.2	41.2	41.2	41.2
100	36.2	33.2	38.9	38.9	38.9	38.9
110	34.2	31.8	36.3	36.1	36.2	36.5
120	33.1	29.8	34.2	34.2	34.2	34.2
130	31.4	28.2	33.2	33.2	33.2	33.2
140	30.1	28.2	32.6	32.6	32.6	32.6
150	29.2	28.2	31.2	31.2	31.2	31.2
160	29.2	28.2	29.7	29.7	29.7	29.7
170	29.2	28.2	29.3	29.3	29.3	29.3
180	29.2	28.2	29.3	29.3	29.3	29.3
190	29.2	28.2	29.3	29.3	29.3	29.3

ตารางที่ ข-3 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานเปียก จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี กงตัว ที่ 70 °C
ของปลาหมึกเส้นฝอย จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 55.7, 61.2 และ
59.7 % RH

เวลา (นาที)	ความเร็วอากาศ (m/s)					
	6	7	8	9	10	11
0	68	68	68	68	68	68
10	59.67	58.5	60.49	61	61	61
20	50.69	49.99	52.42	52.5	52.5	52.5
30	44.6	43.27	47.14	47.16	47.16	47.16
40	40.55	37.96	42.69	42.8	42.8	42.8
50	37.77	34.81	39.39	39.5	39.5	39.5
60	34.21	31.63	36.94	37.1	37.2	37.1
70	31.5	29.17	34.18	35.1	35.2	35.1
80	29.57	27.9	31.74	32.1	32.2	32.1
90	28.06	26.25	29.17	30.2	30.1	30.2
100	26.47	24.92	28	28.2	28.2	28.2
110	25.37	24.12	26.46	27.1	27.1	27.2
120	24.8	22.95	25.48	26.1	26.2	26.1
130	23.66	21.99	24.92	25.2	25.1	25.1
140	23.07	21.99	24.58	24.6	24.6	24.6
150	22.48	21.99	23.78	23.9	23.9	23.9
160	22.48	21.99	22.89	23.9	23.9	23.9
170	22.48	21.99	22.66	23.8	23.8	23.8
180	22.48	21.99	22.66	23.8	23.8	23.8
190	22.48	21.99	22.66	23.8	23.8	23.8

ตารางที่ ข-4 ค่าเฉลี่ย อัตราส่วนความชื้น จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี ไม่คงตัว ที่ 70 °C ของ
ปลาหมึกเส้นฝอย จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 58.2, 62.8 และ
58.6 % RH

เวลา (นาทึ)	ความเร็วรอบของลินปิกฝี่เลื้อ (rpm.)						
	30	40	50	60	70	80	90
0	1	1	1	1	1	1	1
10	0.56	0.53	0.5	0.48	0.47	0.48	0.51
20	0.37	0.32	0.3	0.26	0.22	0.24	0.33
30	0.3	0.26	0.24	0.22	0.18	0.2	0.28
40	0.26	0.22	0.21	0.2	0.151	0.17	0.24
50	0.23	0.2	0.19	0.18	0.148	0.16	0.21
60	0.21	0.19	0.183	0.17	0.14	0.15	0.19
70	0.19	0.17	0.17	0.16	0.13	0.14	0.18

ตารางที่ ข-5 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานแห้ง จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี ไม่คงตัว ที่ 70 °C
ของปลาหมึกเส้นฝอย จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 58.2, 62.8 และ
58.6 % RH

เวลา (นาทึ)	ความเร็วรอบของลินปิกฝี่เลื้อ (rpm.)						
	30	40	50	60	70	80	90
0	212.48	212.48	212.48	212.48	212.48	212.48	212.48
10	118.98	112.61	106.24	101.9	99.86	101.98	108.98
20	78.61	67.99	63.74	55.24	46.74	50.99	70.12
30	63.74	55.24	53.2	46.74	38.24	42.49	59.5
40	55.24	46.74	47.8	42.49	31.87	36.12	50.99
50	48.86	42.49	44	38.24	31.44	33.99	44.62
60	44.62	40.36	42.3	36.12	29.75	31.86	40.36
70	40.36	36.12	37.6	33.99	27.62	29.76	38.25

ตารางที่ ข-6 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานเปียกจากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี ไม่คงตัว ที่ 70 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 58.2, 62.8 และ 58.6 % RH

เวลา (นาทึ)	ความเร็วรอบของลินปึกฝึเสื่อ (rpm.)						
	30	40	50	60	70	80	90
0	68	68	68	68	68	68	68
10	54.33	52.96	51.51	50.49	49.96	50.5	52
20	44.01	40.47	38.93	35.58	31.85	33.77	41.12
30	38.92	35.58	33.6	31.85	27.66	29.82	37.3
40	34.78	31.85	30	29.82	24.17	26.53	33.77
50	32.82	29.82	29	27.66	23.92	25.37	30.85
60	30.85	28.76	27	26.53	22.93	24.16	28.75
70	28.75	26.53	25	25.37	21.64	22.93	27.66

ตารางที่ ข-7 ค่าเฉลี่ย อัตราส่วนความชื้น จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี ไม่คงตัว ที่ 120 °C ของ ปลาหมึกเส้นฝอย จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 58.2, 62.8 และ 58.6 % RH

เวลา (นาทึ)	ความเร็วรอบของลินปึกฝึเสื่อ (rpm.)						
	30	40	50	60	70	80	90
0	1	1	1	1	1	1	1
10	0.51	0.5	0.48	0.46	0.39	0.41	0.44
20	0.292	0.28	0.26	0.24	0.17	0.2	0.22
30	0.261	0.25	0.23	0.21	0.141	0.17	0.19
40	0.229	0.218	0.21	0.19	0.12	0.15	0.17

ตารางที่ ข-8 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานแห้งจากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี ไม่คงตัว ที่ 120 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 58.2, 62.8 และ 58.6 % RH

เวลา (นาท.)	ความเร็วรอบของลินปิกฝี่เสื่อ (rpm.)						
	30	40	50	60	70	80	90
0	212.48	212.48	212.48	212.48	212.48	212.48	212.48
10	108.36	106.24	101.99	97.74	82.86	87.11	93.49
20	62.04	59.49	55.24	50.99	36.12	42.49	46.74
30	55.45	53.12	48.87	44.62	29.95	36.12	40.37
40	48.65	46.32	44.62	40.39	25.49	31.87	36.12

ตารางที่ ข-9 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานเปียก จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี ไม่คงตัว ที่ 120 °C ของปลาหมึกเส้นฝอย จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 58.2, 62.8 และ 58.6 % RH

เวลา (นาท.)	ความเร็วรอบของลินปิกฝี่เสื่อ (rpm.)						
	30	40	50	60	70	80	90
0	212.48	212.48	212.48	212.48	212.48	212.48	212.48
10	108.36	106.24	101.99	97.74	82.86	87.11	93.49
20	62.04	59.49	55.24	50.99	36.12	42.49	46.74
30	55.45	53.12	48.87	44.62	29.95	36.12	40.37
40	48.65	46.32	44.62	40.39	25.49	31.87	36.12

ตารางที่ ข-10 ตารางเปรียบเทียบ อัตราส่วนความชื้น ระหว่างวิธี คงตัว กับ วิธี ไม่คงตัว สำหรับ
อบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C ตามลำดับ

เวลา (นาทึ)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)		เวลา (นาทึ)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)	
	70 rpm.		7m/s			70 rpm.		7m/s	
	70 °C	120 °C	70 °C	120 °C		70 °C	120 °C	70 °C	120 °C
0	1	1	1	1	70	0.13	-	0.193	0.153
10	0.47	0.39	0.664	0.61	80	-	-	0.182	0.143
20	0.22	0.17	0.469	0.42	90	-	-	0.169	0.137
30	0.18	0.141	0.359	0.31	100	-	-	0.156	-
40	0.151	0.12	0.288	0.24	110	-	-	0.1496	-
50	0.148	-	0.2513	0.19	120	-	-	0.14	-
60	0.14	-	0.218	0.17	130	-	-	0.133	-

ตารางที่ ข-11 ตารางเปรียบเทียบ % ความชื้นมาตรฐานแห้ง ระหว่างวิธี คงตัว กับ วิธี ไม่คงตัว
สำหรับอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C ตามลำดับ

เวลา (นาทึ)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)		เวลา (นาทึ)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)	
	70 rpm.		7m/s			70 rpm.		7m/s	
	70 °C	120 °C	70 °C	120 °C		70 °C	120 °C	70 °C	120 °C
0	212.48	212.48	212.48	212.48	70	27.62	-	41.2	32.51
10	99.86	82.87	141.1	129.61	80	-	-	38.7	30.38
20	46.74	36.12	99.8	89.24	90	-	-	35.6	29.11
30	38.24	29.96	76.3	65.86	100	-	-	33.2	-
40	31.87	25.5	61.2	50.99	110	-	-	31.8	-
50	31.44	-	53.4	40.37	120	-	-	29.8	-
60	29.75	-	46.3	36.12	130	-	-	28.2	-

ตารางที่ ข-12 ตารางเปรียบเทียบ % ความชื้นมาตรฐานเปียก ระหว่างวิธี คงตัว กับ วิธี ไม่คงตัว
สำหรับอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C ตามลำดับ

เวลา (นาทึ)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)		เวลา (นาทึ)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)	
	70 rpm.		7m/s			70 rpm.		7m/s	
	70 °C	120 °C	70 °C	120 °C		70 °C	120 °C	70 °C	120 °C
0	68	68	68	68	70	21.64	-	29.17	24.53
10	49.96	45.32	58.5	56.44	80	-	-	27.9	23.3
20	31.85	26.53	49.99	47.16	90	-	-	26.25	22.64
30	27.66	23.05	43.27	39.71	100	-	-	24.92	-
40	24.17	20.31	37.96	33.77	110	-	-	24.12	-
50	23.92	-	34.81	28.76	120	-	-	22.95	-
60	22.93	-	31.63	26.53	130	-	-	21.99	-

ตารางที่ ข-13 ค่าเฉลี่ย อัตราส่วนความชื้น จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี คงตัว ที่ 70 °C ของ
ปลาหมึกทั้งตัว จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 65.4, 60.7 และ
58.6 % RH

เวลา (นาทึ)	ความเร็วอากาศ (m/s)					
	6	7	8	9	10	11
0	1	1	1	1	1	1
10	0.74	0.696	0.78	0.79	0.79	0.79
20	0.53	0.483	0.58	0.59	0.59	0.59
30	0.42	0.378	0.47	0.48	0.48	0.48
40	0.36	0.32	0.4	0.4	0.4	0.4
50	0.32	0.286	0.36	0.362	0.362	0.362
60	0.28	0.244	0.32	0.32	0.32	0.32
70	0.25	0.216	0.28	0.281	0.281	0.281
80	0.227	0.19	0.26	0.263	0.267	0.264

ตารางที่ ข-13 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	ความเร็วอากาศ (m/s)					
	6	7	8	9	10	11
90	0.21	0.184	0.25	0.25	0.25	0.25
100	0.195	0.169	0.23	0.23	0.23	0.23
110	0.185	0.16	0.22	0.221	0.221	0.221
120	0.18	0.154	0.21	0.21	0.21	0.21
130	0.174	0.146	0.2	0.2	0.2	0.2
140	0.167	0.141	0.197	0.197	0.197	0.197
150	0.158	0.136	0.185	0.185	0.185	0.185
160	0.154	0.136	0.18	0.18	0.18	0.18

ตารางที่ ข-14 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานแห้ง จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี คงตัว ที่ 70 °C
ของปลาหมึกทั้งตัว จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 65.4, 60.7 และ
58.6 % RH

เวลา (นาทีก)	ความเร็วอากาศ (m/s)					
	6	7	8	9	10	11
0	212.48	212.48	212.48	212.48	212.48	212.48
10	157.23	147.88	165.73	167.85	167.85	167.85
20	112.61	102.62	123.23	125.36	125.36	125.36
30	89.24	80.31	99.86	101.99	101.98	101.99
40	76.49	67.99	84.99	84.99	84.99	84.99
50	67.99	60.76	76.49	76.91	76.91	76.91
60	59.49	51.84	67.99	67.99	67.99	67.99
70	53.12	45.89	59.49	59.70	59.70	59.70
80	48.87	42.07	57.36	57.36	57.36	57.36
90	44.62	39.09	53.12	53.12	53.12	53.12

ตารางที่ ข-14 (ต่อ)

เวลา (นาทึ)	ความเร็วอากาศ (m/s)					
	6	7	8	9	10	11
100	41.43	35.90	48.87	48.87	48.87	48.87
110	39.30	33.99	46.74	46.95	46.95	46.95
120	38.24	32.72	44.62	44.62	44.62	44.62
130	36.97	31.02	42.49	42.49	42.49	42.49
140	35.48	29.95	41.85	41.85	41.85	41.85
150	33.57	28.89	39.30	39.30	39.30	39.30
160	32.72	28.89	38.24	38.24	38.24	38.24

ตารางที่ ข-15 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานเปียก จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี คงตัว ที่ 70 °C
ของปลาหมึกทั้งตัว จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 65.4, 60.7 และ
58.6 % RH

เวลา (นาทึ)	ความเร็วอากาศ (m/s)					
	6	7	8	9	10	11
0	68	68	68	68	68	68
10	61.12	59.65	62.36	62.66	62.66	62.66
20	52.96	50.64	55.20	55.62	55.62	55.62
30	47.15	44.54	49.96	50.49	50.49	50.49
40	43.34	40.47	45.94	45.94	45.94	45.94
50	40.47	37.79	43.34	43.47	43.47	43.47
60	37.30	34.14	40.47	40.47	40.47	40.47
70	34.69	31.45	37.30	37.38	37.38	37.38
80	32.82	29.61	36.45	36.45	36.45	36.45
90	30.85	28.10	34.69	34.69	34.69	34.69
100	29.29	26.42	32.82	32.82	32.82	32.82

ตารางที่ ข-15 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	ความเร็วอากาศ (m/s)					
	6	7	8	9	10	11
110	28.21	25.37	31.85	31.95	31.95	31.95
120	27.66	24.65	30.85	30.85	30.85	30.85
130	26.99	23.67	29.82	29.82	29.82	29.82
140	26.19	23.05	29.50	29.50	29.50	29.50
150	25.13	22.41	28.21	28.21	28.21	28.21
160	24.65	22.41	27.66	27.66	27.66	27.66

ตารางที่ ข-16 ค่าเฉลี่ย อัตราส่วนความชื้นจากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี ไม่คงตัว ที่ 70 °C ของ
ปลาหมึกทั้งตัว จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 63.2, 60.4 และ
59.6 % RH

เวลา (นาทีก)	ความเร็วรอบลินปีกผีเสื้อ (rpm)			
	30	40	50	60
0	1	1	1	1
10	0.69	0.65	0.54	0.63
20	0.46	0.41	0.34	0.39
30	0.38	0.33	0.26	0.29
40	0.33	0.28	0.23	0.25
50	0.29	0.25	0.2	0.23
60	0.26	0.22	0.17	0.19
70	0.23	0.2	0.15	0.17
80	0.21	0.18	0.138	0.16

ตารางที่ ข-17 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานแห้ง จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี ไม่คงตัว ที่ 70 °C
ของปลาหมึกทั้งตัว จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 63.2, 60.4 และ
59.6 % RH

เวลา(นาทึ่)	ความเร็วรอบลึ่นปีกฝึลือ (rpm)			
	30	40	50	60
0	212.5	212.5	212.5	212.5
10	146.61	138.81	114.74	133.86
20	97.74	87.11	72.24	82.86
30	80.74	70.11	55.24	61.61
40	70.12	59.49	48.86	53.11
50	61.62	53.11	42.49	48.86
60	55.24	46.74	36.12	40.36
70	48.86	42.5	31.87	36.11
80	44.62	38.67	29.32	33.99

ตารางที่ ข-18 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานเป็ยจากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี ไม่คงตัว ที่ 70 °C
ของปลาหมึกทั้งตัว จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 63.2, 60.4 และ
59.6 % RH

เวลา(นาทึ่)	ความเร็วรอบลึ่นปีกฝึลือ (rpm)			
	30	40	50	60
0	68	68	68	68
10	59.45	58	52.81	57.24
20	49.43	46.56	41.94	45.31
30	44.67	41.22	35.59	38.12
40	41.23	37.3	32.83	34.69
50	38.13	34.69	29.82	32.82
60	35.58	31.85	26.54	28.76
70	32.79	29.82	24.17	26.53
80	30.85	27.88	22.67	25.37

ตารางที่ ข-19 ค่าเฉลี่ย อัตราส่วนความชื้น จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี ไม่คงตัว ที่ 120 °C ของ
ปลาหมึกทั้งตัว จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 59.7, 65.2 และ
61.3 % RH

เวลา (นาทึ)	ความเร็วรอบลินปีกผีเสื้อ (rpm)			
	30	40	50	60
0	1	1	1	1
10	0.53	0.51	0.43	0.48
20	0.38	0.36	0.28	0.32
30	0.31	0.28	0.21	0.24
40	0.27	0.24	0.17	0.2
50	0.25	0.22	0.15	0.18
60	0.23	0.2	0.13	0.16

ตารางที่ ข-20 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานแห้งจากการทดลองอบแห้งด้วยวิธี ไม่คงตัว ที่ 120 °C
ของปลาหมึกทั้งตัว จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 59.7, 65.2 และ
61.3 % RH

เวลา (นาทึ)	ความเร็วรอบลินปีกผีเสื้อ (rpm)			
	30	40	50	60
0	212.5	212.48	212.48	212.48
10	112.61	108.36	91.36	101.99
20	80.74	76.49	59.49	67.99
30	65.86	59.49	44.62	50.99
40	57.36	50.99	36.12	42.49
50	53.12	46.74	31.87	38.24
60	48.87	42.49	27.62	33.99

ตารางที่ ข-21 ค่าเฉลี่ย % ความชื้นมาตรฐานแยกจากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีไม่คงตัว ที่ 120 °C ของปลาหมึกทั้งตัว จำนวน 3 ครั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 59.7, 65.2 และ 61.3 % RH

เวลา(นาทึ่)	ความเร็วรอบลึ่นปีกผีเสื้อ (rpm)			
	30	40	50	60
0	68	68	68	68
10	52.96	52.00	47.74	50.49
20	44.67	43.34	37.30	40.47
30	39.71	37.30	30.85	33.77
40	36.45	33.77	26.53	29.82
50	34.69	31.85	24.168	27.66
60	32.82	29.82	21.64	25.37

ตารางที่ ข-22 ตารางเปรียบเทียบ อัตราส่วนความชื้น ระหว่างวิธี คงตัว กับ วิธี ไม่คงตัว สำหรับ อบแห้งปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C ตามลำดับ

เวลา (นาทึ่)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)		เวลา (นาทึ่)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)	
	70 rpm.		7m/s			70 rpm.		7m/s	
	70 °C	120 °C	70 °C	120 °C		70 °C	120 °C	70 °C	120 °C
0	1	1	1	1	80	0.138	-	0.198	0.17
10	0.54	0.43	0.696	0.62	90	-	-	0.184	0.155
20	0.34	0.28	0.483	0.43	100	-	-	0.169	0.143
30	0.26	0.21	0.378	0.33	110	-	-	0.16	0.135
40	0.23	0.17	0.32	0.27	120	-	-	0.154	0.132
50	0.2	0.15	0.286	0.24	130	-	-	0.146	-
60	0.17	0.13	0.244	0.21	140	-	-	0.141	-
70	0.15	-	0.216	0.185	150	-	-	0.136	-

ตารางที่ ข-23 ตารางเปรียบเทียบ % ความชื้นมาตรฐานแห้ง ระหว่างวิธี คงตัว กับ วิธี ไม่คงตัว
สำหรับอบแห้งปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C ตามลำดับ

เวลา (นาทีก)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)		เวลา (นาทีก)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)	
	70 rpm.		7m/s			70 rpm.		7m/s	
	70 °C	120 °C	70 °C	120 °C		70 °C	120 °C	70 °C	120 °C
0	212.5	212.5	212.48	212.48	80	29.32	-	42.07	36.12
10	114.47	91.36	147.88	131.73	90	-	-	39.09	32.93
20	72.24	59.49	102.62	91.36	100	-	-	35.90	30.38
30	55.24	44.61	80.31	70.11	110	-	-	33.99	28.68
40	48.86	36.11	67.99	57.36	120	-	-	32.72	28.04
50	42.49	31.87	60.76	50.99	130	-	-	31.02	-
60	36.12	27.62	51.84	44.62	140	-	-	29.95	-
70	31.87		45.89	39.30	150	-	-	28.89	-

ตารางที่ ข-24 ตารางเปรียบเทียบ % ความชื้นมาตรฐานเปียก ระหว่างวิธีคงตัว กับ วิธีไม่คงตัว
สำหรับอบแห้งปลาหมึกทั้งตัวที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C ตามลำดับ

เวลา (นาทีก)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)		เวลา (นาทีก)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)	
	70 rpm.		7m/s			70 rpm.		7m/s	
	70 °C	120 °C	70 °C	120 °C		70 °C	120 °C	70 °C	120 °C
0	68	68	68	68	60	26.53	21.64	34.14	30.85
10	53.43	47.74	59.65	56.84	70	24.16	-	31.45	28.21
20	41.94	37.30	50.64	47.74	80	22.67	-	29.61	26.53
30	35.58	30.85	44.54	41.21	90	-	-	28.10	24.77
40	32.82	26.53	40.47	36.45	100	-	-	26.42	23.30
50	29.82	24.16	37.79	33.77	110	-	-	25.37	22.29

ตารางที่ ข-24 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)		เวลา (นาทีก)	ความเร็วรอบ (rpm.)		ความเร็วอากาศ (m/s)	
	70 rpm.		7m/s			70 rpm.		7m/s	
	70 °C	120 °C	70 °C	120 °C		70 °C	120 °C	70 °C	120 °C
120	-	-	24.65	21.90	140	-	-	23.05	-
130	-	-	23.67	-	150	-	-	22.41	-

ตารางที่ ข-25 ค่าเฉลี่ยของการวัดความเร็วของอากาศแบบปั่นป่วนในลักษณะของ Triple grid ที่ไหลผ่านลิ้นปีกผีเสื้อ ณ ตำแหน่งทางเข้าเบด

องศา	ค่าเฉลี่ยของความเร็วอากาศจากการวัดจำนวน 3 ครั้ง แบบ Triple grid						
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	ค่าเฉลี่ย
10	1.032	0.671	0.587	0.723	2.076	3.098	1.364
20	2.225	1.055	0.884	1.523	3.568	4.118	2.228
30	3.145	2.258	1.173	2.359	5.093	5.322	3.225
40	4.668	2.987	1.726	2.77	6.26	6.975	4.231
50	5.931	3.97	2.488	3.268	8.06	7.955	5.278
60	9.67	4.835	3.024	3.832	8.969	9.45	6.63
70	1.258	5.753	3.519	4.589	9.811	11.86	8.02
80	15.918	6.976	4.023	4.92	10.223	15.98	3.673
90	17.48	7.511	3.056	5.784	10.76	17.87	11.01
100	15.84	7.32	7.831	6.41	8.421	13.07	9.921
110	8.645	6.004	7.918	11.565	7.82	8.923	8.48
120	6.08	5.102	10.211	12.022	6.041	6.237	7.615
130	5.037	4.233	11.377	8.022	5.262	5.015	6.491
140	4.526	3.117	8.425	5.985	4.647	4.593	5.215
150	3.817	2.529	6.545	4.612	3.913	3.361	4.01
160	2.319	2.232	5.197	3.281	2.506	2.212	2.958
170	1.758	1.231	2.379	2.146	1.554	1.642	1.785
180	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ข-26 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในพัฒมอค์อากาศต่อเวลาของวิธี
คงตัวและกำลังไฟฟ้า ที่แปรผันตามองศาของล้นปีกผีเสื้อด้วยวิธี ไม่คงตัว

วิธี คงตัว		วิธี ไม่คงตัว	
เวลา(นาทื)	กำลังไฟฟ้า(kW)	องศาของล้นปีกผีเสื้อ	กำลังไฟฟ้า(kW)
0	1.24	0	1.4
1	1.22	10	1.3
2	1.24	20	1.2
3	1.22	30	1
4	1.24	40	0.95
5	1.22	50	0.75
6	1.123	60	0.75
7	1.23	70	0.95
8	1.24	80	1.1
9	1.22	90	1.4
10	1.24	100	1.2
11	1.21	110	1.1
12	1.22	120	1.08
13	1.23	130	0.9
14	1.23	140	0.85
15	1.26	150	0.83
16	1.25	160	0.81
17	1.24	170	0.79
18	1.23	180	0.75

ภาคผนวก ก

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎีมีอยู่ 2 วิธี โดยใช้เปรียบเทียบการทำนายผล ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของ Newton และ Page Model โดยมีวิธีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

แบบจำลองของ Newton Model โดยมีรูปแบบดังนี้

$$MR = \exp(-k_1 t) \quad (2.42)$$

ใส่ $\ln$ ทั้งสองข้างเพื่อทำให้เป็นสมการแบบเชิงเส้น จะได้สมการดังนี้

$$\ln MR = -k_1 t \quad (\text{ค-1})$$

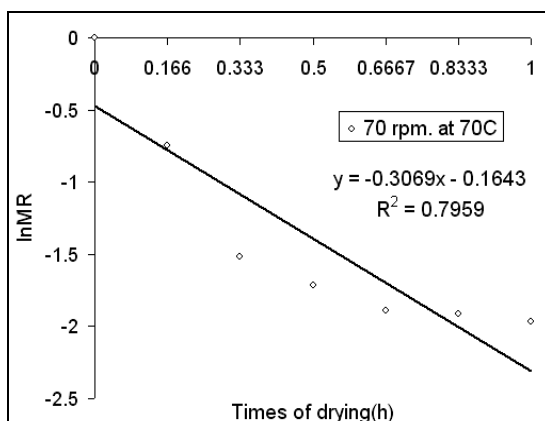
แบบจำลองของ Page Model โดยมีรูปแบบดังนี้

$$MR = \exp(-k_2 t^n) \quad (2.43)$$

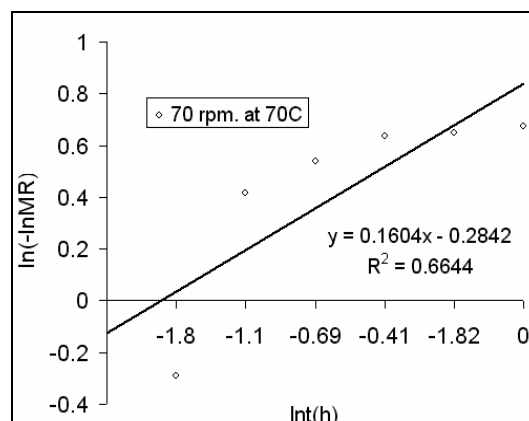
ใส่ $\ln$ สองครั้งเพื่อทำให้เป็นสมการแบบเชิงเส้น จะได้สมการดังนี้

$$\ln(-\ln MR) = \ln k_2 + n \ln t \quad (\text{ค-2})$$

การหาค่าคงที่ของการอบแห้ง เพื่อใช้แทนค่าในสมการเชิงเส้นที่ (ค.1) และ (ค.2) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Newton และ Page Model ค่าคงที่ ของ Newton และ Page เพื่อใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของปลาหมึกเส้นฝอย และ ปลาหมึกแบบทั้งตัว ของทั้งสองวิธีเพื่อเปรียบเทียบการทำนายผลการทดลอง โดยใช้ผลการทดลองอบแห้งหัวข้อที่ 4.5 มาทำการพล็อตค่าระหว่างอัตราส่วนความชื้น MR ที่อยู่ในรูปของลอการิทึม กับเวลา และหาค่าคงที่ของการอบแห้ง ปลาหมึกแบบเส้นฝอย และ ปลาหมึกทั้งตัว โดยใช้การทำ Curve fitting บนโปรแกรม Excel เพื่อหา k_1 ของแบบจำลอง Newton และ k_2 และ n ตามลำดับ จากสมการเส้นตรง โดยมีตัวอย่างดังนี้



ภาพที่ ค-1 ตัวอย่างการหาค่าคงที่ k_1 ของ
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Newton

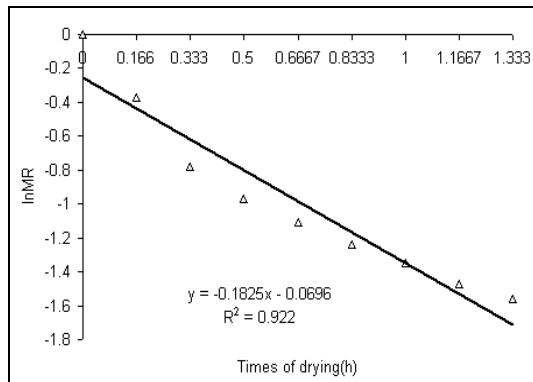


ภาพที่ ค-2 ตัวอย่างการหาค่าคงที่ k_2 และ n
ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Page

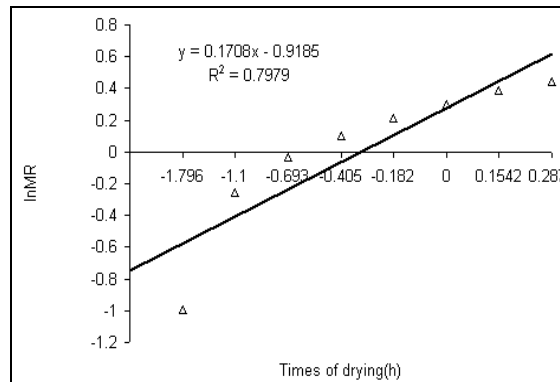
ตารางที่ ค-1 ผลสรุปของค่าคงที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Newton และ Page ของ
ปลาหมึกเส้นฝอย

เงื่อนไขของการทดลอง		แบบจำลองของ Newton		แบบจำลองของ page		
ความเร็วรอบของลิ้น ปิกพีเลื่อ (rpm.)	Temp. (°C)	k_1	R^2	k_2	n	R^2
30	70	0.2155	0.8756	1	0.1521	0.816
	120	0.3618	0.8802	1	0.2438	0.7905
40	70	0.2275	0.8394	1	0.1432	0.7605
	120	0.374	0.8803	1	0.2447	0.789
50	70	0.2029	0.7913	1	0.1183	0.7446
	120	0.3857	0.8631	1	0.235	0.7604
60	70	0.2288	0.7765	1	0.1221	0.6897
	120	0.4106	0.8657	1	0.237	0.764
70	70	0.2584	0.7626	1	0.129	0.6366
	120	0.5258	0.8829	1	0.2535	0.7821
80	70	0.2495	0.7825	1	0.1305	0.672
	120	0.4675	0.8706	1	0.2361	0.779
90	70	0.2197	0.8493	1	0.1363	0.8164
	120	0.4384	0.8691	1	0.24	0.7681

โดยที่การอบแห้งปลาหมึกทั้งตัวสามารถหาค่า คงที่ของการอบแห้งจากสมการกึ่งทฤษฎีโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเหมือนกับวิธีการหาค่าคงที่ของปลาหมึกเส้นฝอย โดยมีตัวอย่างดังนี้



ภาพที่ ค-1 ตัวอย่างการหาค่าคงที่ k_1 ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Newton



ภาพที่ ค-4 ตัวอย่างการหาค่าคงที่ k_2 และ n ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Page Model

ตารางที่ ค-2 ผลสรุปของค่าคงที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Newton และ Page ของปลาหมึกทั้งตัว

เงื่อนไขของการทดลอง		แบบจำลองของ Newton		แบบจำลองของ page		
ความเร็วรอบของลิ้นปี่กฟี่เสื่อ (rpm.)	Temp. (°C)	k_1	R^2	k_2	n	R^2
30	70	0.1825	0.922	1	0.1708	0.7979
	120	0.2233	0.8576	1	0.1539	0.8474
40	70	0.1986	0.9028	1	0.1624	0.7783
	120	0.247	0.8708	1	0.1615	0.8553
50	70	0.2236	0.8885	1	0.1418	0.8175
	120	0.3116	0.8823	1	0.1639	0.8761
60	70	0.2155	0.899	1	0.1636	0.7721
	120	0.2832	0.8824	1	0.1692	0.8567

จากสมการเชิงเส้น (ค-1) และ (ค-2) สามารถค่าคงที่ของ k_1 k_2 และ n ดังตารางที่ ค-1 และ ค-2 ของปลาหมึกเส้นฝอย และ ปลาหมึกทั้งตัวที่ความเร็วรอบของลิ้นปี่กฟี่เสื่อ และ อุณหภูมิที่

ทางเข้าเบคต่างกัน เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคของสมการถดถอยบนโปรแกรม Excel เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton และ Page เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของล้นปีกผีเสื้อ และอุณหภูมิที่ทางเข้าเบคต่างกัน สามารถเขียนรูปแบบของฟังก์ชัน k_1 k_2 และ n ของปลาหมึกเส้นฝอยได้ใหม่ดังนี้

$$k_1 = 0.001195(rpm) + 0.00389(T) - 0.11508 \quad (\text{ก-3})$$

$$k_2 = -0.002763(rpm) - 0.003065(T) + 0.762788 \quad (\text{ก-4})$$

$$n = -0.00013(rpm) + 0.002167(T) - 0.0191 \quad (\text{ก-5})$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton สำหรับปลาหมึกเส้นฝอยโดยนำค่าของ k_1 กลับไปแทนค่าในสมการ (2.42) ได้ดังนี้

$$MR = \exp[(-0.001195rpm - 0.00389T + 0.762788)t] \quad (\text{ก-6})$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สำหรับปลาหมึกเส้นฝอย เมื่อนำค่า k_2 และ n กลับไปแทนค่าใน (2.43) ได้ดังนี้

$$MR = \exp[(0.002673rpm + 0.003065T - 0.762788)t^{(0.002167T - 0.0013rpm - 0.0191)}] \quad (\text{ก-7})$$

สมการ (ก-6) และ (ก-7) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนาย อัตราส่วนความชื้น ของปลาหมึกเส้นฝอย ในช่วงของความเร็วรอบล้นปีกผีเสื้อ 30-90 rpm ที่ อุณหภูมิ 70 และ 120 °C

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton และ Page ของปลาหมึกทั้งตัวสามารถเขียนรูปแบบของฟังก์ชัน k_1 k_2 และ n ได้ใหม่ดังนี้

$$k_1 = 0.001842(rpm) + 0.00225(T) + 0.036467 \quad (\text{ก-8})$$

$$k_2 = 0.00424(rpm) + 0.002355(T) + 0.148563 \quad (\text{ก-9})$$

$$n = 3.05 \cdot 10^{-5}(rpm) + 4.95 \cdot 10^{-5}(T) + 0.154812 \quad (\text{ก-10})$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton สำหรับปลาหมึกทั้งตัว โดยนำค่าของ k_1 กลับไปแทนค่าในสมการ (2.42) ได้ดังนี้

$$MR = \exp[(-0.001842rpm - 0.00225T - 0.036467)t] \quad (\text{ค-11})$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สำหรับปลาหมึกทั้งตัว เมื่อนำค่า k_2 และ n กลับไปแทนค่าใน (2.43) ได้ดังนี้

$$MR = \exp[(-0.00424rpm - 0.002355T - 0.148563)t^{(4.95 \cdot 10^{-5}T + 3.05 \cdot 10^{-5}rpm + 0.154812)}] \quad (\text{ค-12})$$

ภาคผนวก ง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเร็วอากาศที่แปรผันตามล้นปีกผีเสื้อ

การทำ Curve fitting ด้วยวิธี Sinusoidal ซึ่งเป็นวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากผลการทดลองของฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของไซน์ ของความเร็วอากาศที่แปรผันตามลิ้นปีกผีเสื้อ โดยมีรูปแบบดังนี้

$$U_{periodic} = A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t \quad (ง-1)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 หาได้จาก

$$A_1 = \frac{2}{n} \sum U_{periodic} \cos \omega t \quad (ง-2)$$

$$B_1 = \frac{2}{n} \sum U_{periodic} \sin \omega t \quad (ง-3)$$

ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Sinusoidal ที่ความเร็วรอบลิ้นปีกผีเสื้อ 70 rpm ของปลาหมึกเส้นฝอยที่ใช้เวลาอบแห้งน้อยที่สุด

ความเร็วเชิงมุมของลิ้นปีกผีเสื้อหาได้จาก $\omega = \frac{70 \times 2\pi}{360} = 7.32 \text{ rad/s}$ จากนั้นหาคาบเวลาที่ลิ้นปีกผีเสื้อหมุนใช้หมุน 1 รอบ ได้จาก $\tau = \frac{60}{2\pi \times 70} = 0.428 \text{ s}$ นำเวลาที่ได้นี้มาเขียนตารางเพื่อแทนค่าในสมการ (ง-2) และ (ง-3) ดังนี้

ตารางที่ ง-1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของ A_1 และ B_1 ที่ความเร็วรอบ 70 rpm

Deg	$\theta = \left(\frac{\text{Deg} \times 2\pi}{360} \right)$	t(s)	U_i	$U_i \cos \omega t$	$U_i \sin \omega t$
0	0	0	0	0	0
10	0.174	0.02377	1.364	1.3434	0.2361
20	0.349	0.04754	2.228	2.09445	0.7967
30	0.523	0.07131	3.225	2.79552	1.608
40	0.698	0.09508	4.231	3.42696	2.77
50	0.873	0.11885	5.231	3.3731	4.0255
60	1.047	0.14262	6.630	3.3334	5.731
70	1.221	0.16639	8.019	2.7709	7.525
80	1.396	0.19016	9.673	1.7205	9.077
90	1.571	0.21393	10.41	0.0502	10.409

ตารางที่ ง-1 (ต่อ)

Deg	$\theta = \left(\frac{\text{Deg} \times 2\pi}{360} \right)$	t(s)	U_i	$U_i \cos \omega t$	$U_i \sin \omega t$
100	1.745	0.233770	9.921	-1.6703	9.779
110	1.920	0.26147	8.479	-2.8529	7.9846
120	2.094	0.28524	7.615	-3.7649	6.61916
130	2.269	0.30901	6.491	-4.14084	5.00
140	2.443	0.33278	5.215	-3.9696	3.382
150	2.618	0.35655	4.009	-3.4556	2.037
160	2.792	0.38032	2.957	-2.769	1.033
170	2.967	0.40409	1.785	-1.7568	0.325
180	0	0.42786	0	0	0
Σ			97.483	-3.47151	78.3401

หาค่าสัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 จากการแทนค่าในสมการ (ง-2) และ (ง-3) ตามลำดับดังนี้

$$A_1 = \frac{2}{18} \times (-3.47151) = -0.3857$$

$$B_1 = \frac{2}{18} \times (78.3401) = 8.70445$$

นำสัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 ที่คำนวณได้แทนลงในสมการ (ง-1) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของ Sinusoidal ดังนี้

$$U_{\text{periodic}} = -0.3857 \cos 7.32t + 8.70445 \sin 7.32t \quad (\text{ง-4})$$

การทำ Curve fitting ด้วยวิธี Fourier Approximation ซึ่งเป็นวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากผลการทดลองของฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ของความถี่อากาศที่แปรผันตามลิ้นปีกผีเสื้อ เนื่องจากวิธีการของ Sinusoidal สามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ ได้เพียงหนึ่งคาบที่ตำแหน่ง $0 \leq \theta \leq \pi$ โดยค่า Sine ที่ตำแหน่ง $\pi \leq \theta \leq 2\pi$ จะมีค่าลบไม่สามารถใช้วิเคราะห์ได้ อีกทั้งผลลัพธ์เมื่อทดลองแทนค่าและพลอตกราฟเพื่อเทียบความแม่นยำ ปรากฏว่ายังมีความคลาดเคลื่อนสูง อีกทั้งการรวมคาบให้เป็น อนุกรมฟูรีเยร์ ต้องใช้วิธี Analytical ซึ่งยุ่งยากกว่าวิธีของ Fourier Approximation ที่มีความแม่นยำมากกว่าและ สามารถรวมคาบของ Half sine คาบอื่นเข้าด้วยกัน โดย

ไม่ต้องใช้การทำ Analytical โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ดังรูปที่ 8 [9] ซึ่งมีรูปแบบของสมการดังนี้ โดยมีรูปแบบดังนี้

$$U_{periodic}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (ง-5)$$

โดยที่ a_n และ b_n หาได้จาก

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x_i \cos \frac{2n\pi t_i}{\tau} \quad (ง-6)$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sin \frac{2n\pi t_i}{\tau} \quad (ง-7)$$

ตารางที่ ง-2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของ a_n และ b_n ที่ความเร็วรอบ 70 rpm

Deg	t_i (s)	U_i	$U_i \cos \frac{2\pi t_i}{0.42786}$	$U_i \sin \frac{2\pi t_i}{0.42786}$
0	0	0	0	0
10	0.02377	1.364	1.3639	8.31×10^{-3}
20	0.04754	2.228	2.2278	0.027
30	0.07131	3.225	3.22446	0.059
40	0.09508	4.231	4.2997	0.1031
50	0.11885	5.231	4.229	0.159
60	0.14262	6.630	6.62557	0.242
70	0.16639	8.019	8.0117	0.342
80	0.19016	9.673	9.6616	0.471
90	0.21393	10.41	10.39	0.570
100	0.233770	9.921	9.9026	0.594
110	0.26147	8.479	8.45996	0.568
120	0.28524	7.615	7.5946	0.556
130	0.30901	6.491	6.47	0.513
140	0.33278	5.215	5.196	0.444

ตารางที่ ง-2 (ต่อ)

Deg	t(s)	U_i	$U_i \cos \frac{2\pi_i}{0.42786}$	$U_i \sin \frac{2\pi_i}{0.42786}$
150	0.35655	4.009	3.992223	0.366
160	0.38032	2.957	2.943	0.2879
170	0.40409	1.785	1.775	0.184
180	0.42786	0	0	0
Σ			88.766	4.93

ตารางที่ ง-3 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของ a_n และ b_n ที่ความเร็วรอบ 50 rpm

Deg	t_i (s)	U_i	$U_i \cos \frac{2\pi_i}{0.42786}$	$U_i \sin \frac{2\pi_i}{0.42786}$
0	0	0	0	0
10	0.02377	1.364	1.3639	8.31×10^{-3}
20	0.04754	2.228	2.2278	0.027
30	0.07131	3.225	3.22446	0.059
40	0.09508	4.231	4.2997	0.1031
50	0.11885	5.231	4.229	0.159
60	0.14262	6.630	6.62557	0.242
70	0.16639	8.019	8.0117	0.342
80	0.19016	9.673	9.6616	0.471
90	0.21393	10.41	10.39	0.570
100	0.233770	9.921	9.9026	0.594
110	0.26147	8.479	8.45996	0.568
120	0.28524	7.615	7.5946	0.556
130	0.30901	6.491	6.47	0.513
140	0.33278	5.215	5.196	0.444
150	0.35655	4.009	3.992223	0.366
160	0.38032	2.957	2.943	0.2879
170	0.40409	1.785	1.775	0.184
180	0.42786	0	0	0

$$a_n = \frac{2}{18} \times 88.766 = 10.64$$

$$b_n = \frac{2}{18} \times 4.93 = 0.6119$$

นำค่าสัมประสิทธิ์ a_n และ b_n ที่คำนวณได้แทนลงในสมการ (ง-5) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของ Fourier Approximation ดังนี้

$$U_{\text{Periodic}}(t) = \sum_{\theta=10}^{\infty} (10.64 \cos 14.66t + 0.6119 \sin 14.66t) \quad (\text{ง-8})$$

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์พลังงาน และ จุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ด้านพลังงานสามารถคำนวณได้จากการใช้กำลังทางไฟฟ้า เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับหาอัตราค่าไฟฟ้าโดยคิดจากตารางของการไฟฟ้านครหลวง เป็นอัตราค่าใช้ไฟฟ้าแบบปกติสำหรับกิจการขนาดเล็กรวมกับบ้านพักอาศัยโดยมีข้อมูลดังนี้

ตารางที่ จ-1 อัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแบบปกติ

อัตราค่าไฟฟ้า	ค่าไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	ค่าไฟฟ้าสูงสุด (บาท)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
150 หน่วย แรก (หน่วยที่ 0-150)	1.8047	270.71	40.9
250 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 151-400)	2.7781	694.5	40.9
เกิน 400 หน่วยขึ้นไป (หน่วยที่ 401 เป็นต้นไป)	2.978	-	40.9

ที่มา การไฟฟ้านครหลวง

ตัวอย่างการคำนวณต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าของวิธี Steady หาได้จากจำนวนหน่วยคูณด้วยอัตราของค่าไฟฟ้า และจำนวนหน่วยหาได้จากกำลังทางไฟฟ้าที่วัดได้จากวิธี Steady มีค่าค่อนข้างคงที่เท่ากับ 1.21 kW คูณด้วยจำนวนชั่วโมงที่ใช้ไฟฟ้า เนื่องจากลิ้นปิกผีเสื้ออยู่นิ่งกับที่ สามารถหาได้ดังนี้

การอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิ 70°C โดยใช้เวลาสำหรับอบแห้ง 2 ชั่วโมง จำนวนหน่วยของพัดลมอัดอากาศหาได้จาก $Unit_f = 1.21 \int_0^2 dt = 2.42 \text{ Unit}$ และขนาดของฮีตเตอร์ 2.6 kW จำนวนหน่วยของฮีตเตอร์หาได้จาก $Unit_h = 2.6 \times 2 = 5.2 \text{ Unit}$ จำนวนหน่วยรวมเท่ากับ 7.62 Unit ต่อการอบแห้งหนึ่งครั้งในหนึ่งวันเครื่องจักรทำงาน 8 ชั่วโมง เครื่องอบแห้งสามารถอบแห้งได้วันละ 4 ครั้ง สามารถคิดค่าไฟฟ้าได้ดังนี้

ค่าไฟฟ้าใน 1 เดือนหาได้จากจำนวนวันทำงานใน 1 เดือนมี 24 วัน

$$\text{จำนวนหน่วย/เดือน} = 7.62 \times 4 \times 24 \text{ วัน} = 731.52 \text{ หน่วย}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้า/เดือน} &= (1.8047 \times 150) + (2.7781 \times 250) + (2.978 \times 331.25) + 40.9 \\ &= 1,992.59 \text{ บาท/เดือน} \end{aligned}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้า/ปี} = 1,992.59 \times 12 = 23,911.11 \text{ บาท/ปี}$$

ตัวอย่างการคำนวณต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าของวิธี Transient วิธี Transient เป็นวิธีการที่ลิ้นปิกผีเสื้อหมุน กำลังทางไฟฟ้าที่มอเตอร์ของพัดลมอัดอากาศจึงเกิดการเหนี่ยวนำสูงในสภาวะที่

ล้นปีกผีเสื้อหมุนจึงทำให้กำลังทางไฟฟ้าที่วัดได้มีการแกว่งสูงกว่าวิธี Steady จึงใช้

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขหาสมการจากโปรแกรม Excel จะได้สมการ $P=1.0033t^{-0.003}$ โดยจำนวนยูนิตของค่าไฟฟ้าของวิธีการอบแห้งแบบต่างๆสามารถหาได้ดังนี้

การอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยที่อุณหภูมิ 70°C โดยใช้เวลาสำหรับอบแห้ง 1 ชั่วโมง จำนวนยูนิตของพัดลมอัดอากาศ หาได้จาก $Unit_f = 1.003 \int_0^1 t^{-0.003} dt = 1.003 \text{ Unit}$ ส่วนของจำนวนยูนิตของฮีตเตอร์ สามารถหาได้จาก $Unit_h = 2.6 \times 1 = 2.6 \text{ kW}$ และจำนวนยูนิตของมอเตอร์ขับเคลื่อนปีกผีเสื้อสามารถหาได้จาก $Unit_m = 0.005 \times 1 = 0.005 \text{ Unit}$ ดังนั้นจำนวนยูนิตรวมเท่ากับ 3.608 Unit ต่อการอบแห้งหนึ่งครั้ง เปรียบเทียบที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกันคือ จำนวนครั้งในการอบแห้ง 4 ครั้งต่อวันสามารถคิดค่าไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\text{จำนวนยูนิต/เดือน} = 3.608 \times 4 \times 24 \text{ วัน} = 346.37 \text{ ยูนิต}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้า/เดือน} &= (1.8047 \times 150) + (2.7781 \times 196.37) + 40.9 \\ &= 816.24 \text{ บาท/เดือน} \end{aligned}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้า/ปี} = 816.24 \times 12 = 9,794.85 \text{ บาท/ปี}$$

โดยสามารถเขียนตารางสรุปผลของการวิเคราะห์ค่าไฟฟ้าได้ดังนี้

ตารางที่ จ-2 สรุปผลของการวิเคราะห์ค่าไฟฟ้าของการอบแห้งแต่ละวิธี

อุณหภูมิ	ค่าไฟฟ้า (บาท/ปี)					
	ปลาหมึกฝอย			ปลาหมึกทั้งตัว		
	Steady	Transient	%ที่ลดลง	Steady	Transient	%ที่ลดลง
70°C	23,911.11	9,794.85	59.03	30,455.85	14,246	53.22
120°C	15,138.04	6,457.91	57.33	23,911.11	9,794.85	59.04

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งแต่ละวิธี

การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของงานวิจัยเรื่องนี้ เป็นการวิเคราะห์ต้นทุนของเครื่องอบแห้งแบบด้วยวิธีการอบแห้งแบบ Steady และ Transient ของการอบแห้งปลาหมึกแต่ละชนิดที่อุณหภูมิต่างกัน โดยใช้สมมุติฐานของการวิเคราะห์เพื่อหาต้นทุน คือ 1. กำลังการผลิต 1 กิโลกรัมต่อครั้ง 2. ราคาต้นทุนในการสร้างเครื่องอบแห้ง $P=36,808$ บาท 3. อายุการใช้งานของเครื่องอบแห้ง 5 ปี 4. ค่าบำรุงรักษาคิดเป็น 3 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนรวมของเครื่องอบแห้ง

- 5.มูลค่าซากคิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนการสร้างเครื่องอบแห้ง $F=3,680.8$ บาท
 6. ความสามารถในการระเหยน้ำ 0.59 กิโลกรัมของน้ำที่ระเหยต่อครั้ง 7. ดอกเบี้ยเงินกู้คิดที่ 7% ต่อปี
 และ 8. ในระยะเวลา 1 ปี เครื่อง อบแห้งอบแห้งทำงาน 1920 ครั้ง โดยแสดงตัวอย่างของการวิเคราะห์
 จุดคุ้มทุน ของการอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอย โดยวิธี Steady ที่ อุณหภูมิ 70°C ดังนี้

ดอกเบี้ยของเงินลงทุนสร้างเครื่องอบแห้งรายปี (A_1)

$$\begin{aligned} A_1 &= P(CRF \ i\%n) \\ &= 36808(CRF, 7\%5) = 36808(0.24389) = 8977 \text{ บาทต่อปี} \end{aligned}$$

ดอกเบี้ยของมูลค่าซากเครื่องอบแห้งรายปี (A_2)

$$\begin{aligned} A_2 &= F(SFF \ i\%n) \\ &= 3680.8(SFF, 7\%5) = 3680.8(0.17389) = 640 \text{ บาทต่อปี} \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้ารายปี (A_3)

$$A_3 = 23911.11 \text{ บาท/ปี}$$

ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษารายปี (A_4)

$$\begin{aligned} A_4 &= 36808 \times 0.03 \\ &= 1104 \text{ บาทต่อปี} \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมด (A_T)

$$\begin{aligned} A_T &= A_1 + A_3 + A_4 - A_2 \\ &= 8977 + 23911.11 + 1104 - 640 \\ &= 32178.660 \text{ บาทต่อปี} \end{aligned}$$

ดอกเบี้ยของค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย

$$\begin{aligned} &= \frac{(8977 - 640)}{(1920 \times 0.59)} \\ &= 8.514 \text{ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย} \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายของพลังงานไฟฟ้า

$$\begin{aligned} &= \frac{(23911.660 + 1104)}{(1920 \times 0.510)} \\ &= 24.348 \text{ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย} \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งปลาหมึกฝอย

$$= \frac{32178.660}{(1920 \times 0.510)}$$

$$= 32.862 \quad \text{บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย}$$

คิดอายุการใช้งานเครื่องอบแห้งเป็น 5 ปี จะได้ค่าใช้จ่ายดังนี้

เงินลงทุนสร้างเครื่องอบแห้งรายปี	= 36808	บาทต่อปี
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้ารายปี	= 23911.11	บาทต่อปี
ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษารายปี	= 1104	บาทต่อปี
มูลค่าซากเครื่องอบแห้งรายปี	= 640	บาทต่อปี
ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการอบแห้งปลาหมึก	= 32.862	บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย
ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง	= 8.514	บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย
ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานไฟฟ้า	= 24.348	บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย

คำนวณหาระยะเวลาคืนทุนดังนี้

เงินลงทุนสร้างเครื่องอบแห้ง	$P_1 = 36808$	บาท
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ	$A_1 = 22737.660$	บาทต่อปี
ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา	$A_2 = 1104$	บาทต่อปี
มูลค่าซาก	$P_2 = 3680.8(PWF \ i\%n)$	
	$= 3680.8(PWF \ 7\%5)$	
	$= 3680.8(0.7130) = 2624.41$	บาท

$$(A_1 + A_2) + (P_1 - P_2)(CRF \ i\%n) = 0$$

$$(22737.660 + 1104) + (36808 - 2624.41)(CRF \ 7\%n) = 0$$

$$(CRF \ 7\%n) = 0.697$$

นำค่า 0.697 ใช้เทียบกับค่าแฟกเตอร์ CRF ที่ดอกเบี้ย 7% จะได้ของตารางที่ จ-4 จะได้

n CRF

1 1.07000

2 0.55309

∴ จำนวนปีที่คืนทุน n = 1.227 ปี

ตารางที่ จ-3 สรุปผลของการวิเคราะห์จุดคืนทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งแต่ละวิธี

อุณหภูมิ	จุดคืนทุน (ปี)					
	ปลาหมึกฝอย			ปลาหมึกทั้งตัว		
	Steady	Transient	%ที่ลดลง	Steady	Transient	%ที่ลดลง
70 °C	1.227	0.873	28.85	1.46	0.97	33.56
120 °C	1.02	0.697	31.6	1.227	0.873	28.86

ตารางที่ จ-4 ตารางดอกเบี้ย (Interest tables) ที่อัตราดอกเบี้ย 7%

n	ระบบจ่ายที่เดียว		ระบบจ่ายเป็นอนุกรม				n
	CAF	PWF	SFF	CRF	SCAF	SPWF	
1	1.0700	0.9346	1.000	1.07000	1.000	0.935	1
2	1.1449	0.8734	0.48309	0.55309	2.070	1.808	2
3	1.2250	0.8163	0.31105	0.38105	3.2105	2.624	3
4	1.3108	0.7629	0.22523	0.29523	4.440	3.387	4
5	1.4026	0.7130	0.17389	0.24389	5.751	4.100	5
6	1.5007	0.6663	0.138980	0.20980	7.153	4.767	6
7	1.6058	0.6227	0.11555	0.18555	8.654	5.389	7
8	1.7182	0.5820	0.09747	0.16747	10.260	5.971	8
9	1.8385	0.5439	0.08349	0.15349	11.978	6.515	9
10	1.9672	0.5083	0.07238	0.14238	13.816	7.024	10

แหล่งที่มา [3]

ภาคผนวก จ

ใบสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัด

TSI CERTIFICATE OF CALIBRATION AND TESTING				
TSI Model <u>8347-M-GB</u>		Serial No. <u>54110225</u>		
Description <u>VELOCICALC PORTABLE AIR VELOCITY METER</u>				
Calibration Standard <u>WIND TUNNEL CALIBRATION SYSTEM, SERIAL NO. 109</u>				
CALIBRATION VERIFICATION RESULTS				
Calibration Standard	Instrument Output	Difference	Tolerance Limit-	Tolerance Limit+
0.000 m/s	0.000 m/s			
0.178 m/s	0.178 m/s	-0.3%		
0.332 m/s	0.335 m/s	0.8%		
0.507 m/s	0.510 m/s	0.5%		
0.815 m/s	0.812 m/s	-0.4%		
1.684 m/s	1.690 m/s	0.4%		
3.299 m/s	3.298 m/s	-0.0%		
5.083 m/s	5.071 m/s	-0.2%		
7.505 m/s	7.579 m/s	1.0%		
12.722 m/s	12.724 m/s	0.0%		
22.838 m/s	23.000 m/s	0.7%		
29.966 m/s	29.937 m/s	-0.1%		
0.0 °C	0.0 °C	0.0 °C		
60.0 °C	60.0 °C	0.0 °C		
29.8 %rh	29.6 %rh	-0.2 %rh		
70.7 %rh	70.7 %rh	0.0 %rh		
			Error Compared to Tolerance 	
			Tolerance Limits: Velocity: $\pm 3\%$ of reading or .015 m/s whichever is greater Temperature: $\pm 0.3^\circ\text{C}$ Humidity: $\pm 3.0\%\text{rh}$	
Velocity Calibration Conditions:		Ambient Temp: 20.7°C Barometric Pressure: 741.0 mmHg		
Velocity Corrected to Std Conditions of:		Ambient Temp: 21.1°C Barometric Pressure: 760.0 mmHg		
TSI does hereby certify that all materials, components, and workmanship used in the manufacture of this equipment are in strict accordance with the applicable specifications agreed upon by TSI and the customer and with all published specifications. All performance and acceptance tests required under this contract were successfully conducted according to required specifications. Furthermore, all test and calibration data supplied by TSI has been obtained using standards whose accuracies are traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST) or has been verified with respect to instrumentation whose accuracy is traceable to NIST, or is derived from accepted values of physical constants. Our Quality Management System complies with ISO 9001 requirements and calibration procedures for this instrument adhere to ISO 10012. The accuracy of the velocity calibration facilities is at least a ratio of 1:1 with respect to the accuracy specifications of the instrument being calibrated. The accuracy of the humidity calibration facilities is at least a ratio of 2:1 with respect to the accuracy specifications of the instrument being calibrated. The accuracy of the pressure calibration facilities is at least a ratio of 2.5:1 with respect to the accuracy specifications of the instrument being calibrated. The accuracy of the temperature calibration facilities is at least a ratio of 6:1 with respect to the accuracy specifications of the instrument being calibrated.				
Applicable Test Report	Report Number	Date Last Verified	Date Due	
DC voltage	E000048	07-22-04	07-22-05	
Barometric Pressure	E001329	05-04-04	05-04-05	
Temperature (0°C)	E000822	07-22-04	07-22-05	
Temperature (19-35°C)	E001807	07-22-04	07-22-05	
Temperature (60°C)	E001806	07-22-04	07-22-05	
Pressure	E001517	06-18-04	06-18-05	
Pressure	E000808	08-25-04	08-25-05	
Velocity	E002002	02-24-04	02-24-07	
Dewpoint	E001386	01-08-04	01-08-05	
Calibrated by		Nov 09, 2004 Calibration Date		
TSI Incorporated Environmental Measurements and Controls Division		☒ Final Function Check Mailing Address: P.O. Box 64394 St. Paul, MN 55164 USA Shipping Address: 500 Cardigan Road Shoreview, MN 55126 USA Phone: (800) 777-8356 or (651) 490-2711 Fax: (651) 490-2874		

ภาพที่ น-1 ใบสอบเทียบเครื่องมือวัดแบบลวดร้อน

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นาย จิรเมธา สังข์เกษม
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การลดพลังงานอบแห้งปลาหมึกกล้วยในสเปป้าเต็ดเบดโดยการควบคุม
 ความเร็วอากาศทางเข้าด้วยลิ้นปีกผีเสื้อ
 สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดวันที่ 18 สิงหาคม พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ที่อยู่ปัจจุบัน
 5/29 ซอย อมรพันธ์นคร 5 ถนน สวนสยาม ตำบลคันนายาว เขตคันนายาว กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา
 วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต พ.ศ. 2540

ประวัติการทำงาน โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน (JV.BCKT) ตำแหน่ง วิศวกร ตั้งแต่
 พ.ศ. 2540-2541 และ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต พ.ศ. 2541-ปัจจุบัน

ผลงานวิจัย โดยมีผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ก่อนเข้าศึกษามีดังนี้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 พ.ศ. 2547

1. การศึกษาฟลูอิดไดเซชันโดยใช้ความร้อนจากชุดคอนเดนเซอร์เพื่อใช้ในระบบการ
 อบแห้ง

2. เครื่องผลิตมะขามแก้วอัตโนมัติโดยควบคุมการตัดกระแสดของมอเตอร์เพื่อใช้
 ระบบการแปรรูปอาหาร

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 3

1. การลดความชื้นในสมุนไพรฟ้าทะลายโจรด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันโดยใช้ความร้อนจาก
 ชุดคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ

การประชุมวิชาการงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 13

1. การวิจัยเพื่อลดเวลาการผลิตของกระบวนการผลิตดอกเปลือกเมล็ดพริกไทยในอุตสาหกรรม
 การผลิตเมล็ดพริกไทยขาว ตอนที่ 1

2. การวิจัยเพื่อลดเวลาการผลิตของกระบวนการล้างเมล็ดพริกไทยในอุตสาหกรรมผลิตเมล็ด
 พริกไทยขาว ตอนที่ 2

3. การวิจัยเพื่อลดเวลาการผลิตของกระบวนการอบแห้งเมล็ดพริกไทยดำด้วยวิธี
 ฟลูอิดไดเซชันโดยใช้พลังงานความร้อนจากชุดคอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศ ตอนที่ 3

4. การวิจัยเพื่อลดแรงงานคนของกระบวนการผลิตทุเรียนกวนอัตโนมัติโดยใช้วงจรโอเวอร์โหลดควบคุมการตัดกระแสของมอเตอร์

พ.ศ. 2548

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19

1. การออกแบบ และทดลองเพื่อหาคุณลักษณะของการอบแห้งปลาหมึกเส้นฝอยในตะป้าเตี๊ยะเบด

การประชุมวิชาการงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 14

1. การออกแบบชิ้นส่วนและพลศาสตร์ของเครื่องจักรกลเพื่อลดต้นทุนค่าไฟฟ้าทางเศรษฐศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส กรณีศึกษา : เครื่องฉีกปลาหมึกฝอยขนาดเล็ก

2. การออกแบบเครื่องล้างจารบีลูกปืนล้อรถกระบะระบบอัตโนมัติเพื่อช่วยลดเวลาซ่อมบำรุง
กรณีทดสอบ : ศูนย์บริการ ISUZU