



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การอบแห้งเมล็ดพริกไทยแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีชุดสร้างการไหลหมุนควง
Drying of Pepper Corn in a Fluidized-Bed with Swirl Generators

ผู้วิจัย

ผศ.ดร. วรีสา ชูวัฒนกุล

Assist.Prof.Dr. Varesa Chuwattanakul

ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจาก **ทุนพัฒนานักวิจัยใหม่ กองทุนวิจัย**
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี 2559

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชื่อโครงการ การอบแห้งเมล็ดพริกไทยแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีชุดสร้างการไหลหมุนควง

แหล่งทุนวิจัย กองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 **จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน** 480,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปี **ตั้งแต่** 1 ธันวาคม 2559 **ถึง** 30 พฤศจิกายน 2561

หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร. วรีสา ชูวัฒนกุล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจลศาสตร์การอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์ชุดสร้างการไหลหมุนควง (fluidized-bed dryer equipped with fluidized-Bed with swirl generators : S-FBD) ทำการเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา (typical fluidized-bed dryer: FBD) การทดสอบใช้อุณหภูมิอากาศร้อนทางเข้าเครื่องอบแห้ง (T_{in}) ที่ 60, 70 และ 80°C และความเร็วจำเพาะของอากาศ (U^*) เท่ากับ 1.0-1.6 U_{mf} ใช้เวลา 120 นาที การทดสอบแต่ละครั้งใช้เมล็ดพริกไทย 400 กรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 450±50% มาตรฐานแห้ง ผลการทดลองพบว่าเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์ชุดสร้างการไหลหมุนควง อุณหภูมิอากาศร้อนทางเข้าเครื่องอบแห้งที่ 80°C มีความชื้นต่ำกว่าเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

คำหลัก: เมล็ดพริกไทย, การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด, แผ่นสร้างความปั่นป่วน, ชุดสร้างการไหลหมุนควง, สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเมล็ดพริกไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Research Title: Drying of Pepper Corn in a Fluidized-Bed with Swirl Generators

Researcher: Asst. Prof. Dr. Varesa Chuwattanakul

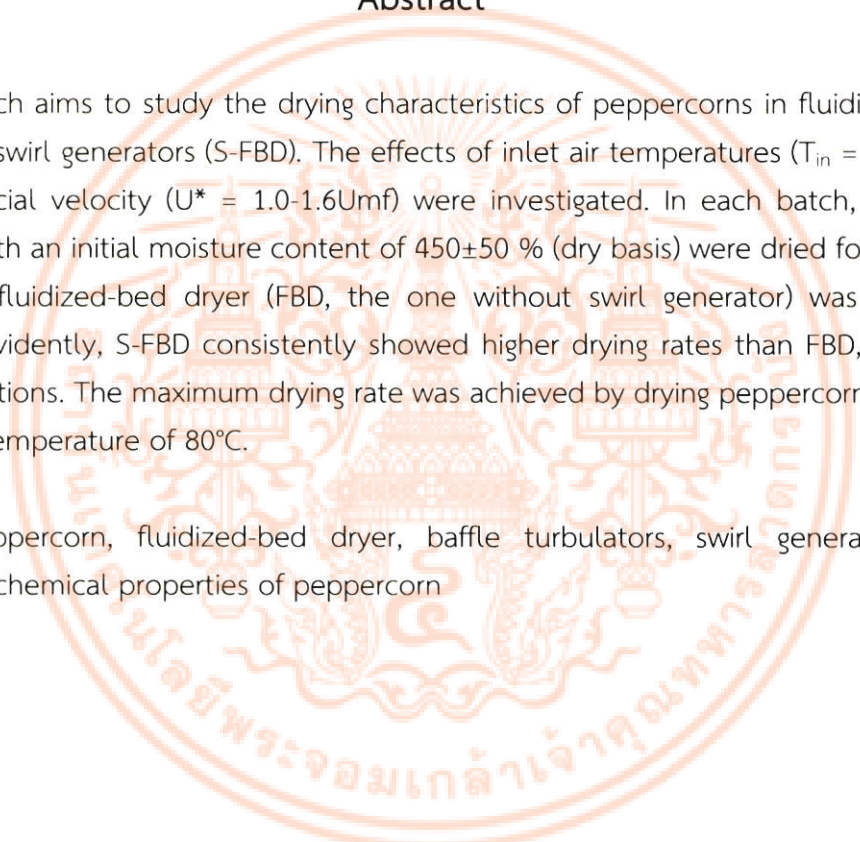
Faculty: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Department: Food engineering

Abstract

This research aims to study the drying characteristics of peppercorns in fluidized-bed dryer equipped with swirl generators (S-FBD). The effects of inlet air temperatures ($T_{in} = 60, 70$ and 80 °C) and superficial velocity ($U^* = 1.0-1.6U_{mf}$) were investigated. In each batch, 400 grams of peppercorns with an initial moisture content of 450 ± 50 % (dry basis) were dried for 120 minutes. The typical fluidized-bed dryer (FBD, the one without swirl generator) was also run, for comparison. Evidently, S-FBD consistently showed higher drying rates than FBD, under similar operating conditions. The maximum drying rate was achieved by drying peppercorns using hot air with the inlet temperature of 80 °C.

Keywords: peppercorn, fluidized-bed dryer, baffle turbulators, swirl generators, physical properties and chemical properties of peppercorn



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับเล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีเพราะได้รับทุนสนับสนุนการจัดตั้งชุดเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด วัสดุและอุปกรณ์ต่างๆในการทดลอง จาก ทุนพัฒนานักวิจัยใหม่ กองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังประจำปี 2559

ตลอดจนความกรุณาชี้แนะและช่วยเหลือจาก รศ. ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ และรศ. ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยเรื่อง การอบแห้งเมล็ดพริกไทยแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่มีชุดสร้างการไหลหมุนควง (Drying of Pepper Corn in a Fluidized-Bed with Swirl Generators) ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผศ.ดร.วรีสา ชูวัฒนกุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
สัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ว่าจะได้รับ	3
1.5 ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา	4
2.3 ทฤษฎีพริกไทย	8
2.4 ทฤษฎีอบแห้ง	11
2.5 ทฤษฎีฟลูอิดซ์เบด	13
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย	15
3.1 อุปกรณ์เทคนิคฟลูอิดซ์เบด	15
3.2 วิธีการทดลอง	16
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	17
3.4 ชุดหอบแห้ง	20
บทที่ 4 ผลการทดลอง	23
4.1 พฤติกรรมอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบด	23
4.2 พฤติกรรมการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้ง อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน	25
4.3 ลักษณะการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งแผ่นบิดเพื่อ สร้างการไหลแบบหมุนควง	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	41
5.1 พฤติกรรมอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบด	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
5.2 พฤติกรรมการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน	41
5.3 ลักษณะการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งแผ่นบิดเพื่อสร้างการไหลแบบหมุนควง	41
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย	42
6.1 วารสารวิชาการระดับนานาชาติ	42
6.2 งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ	42
6.3 รายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้	47
เอกสารอ้างอิง	87
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย	91
ประวัตินักวิจัย	93



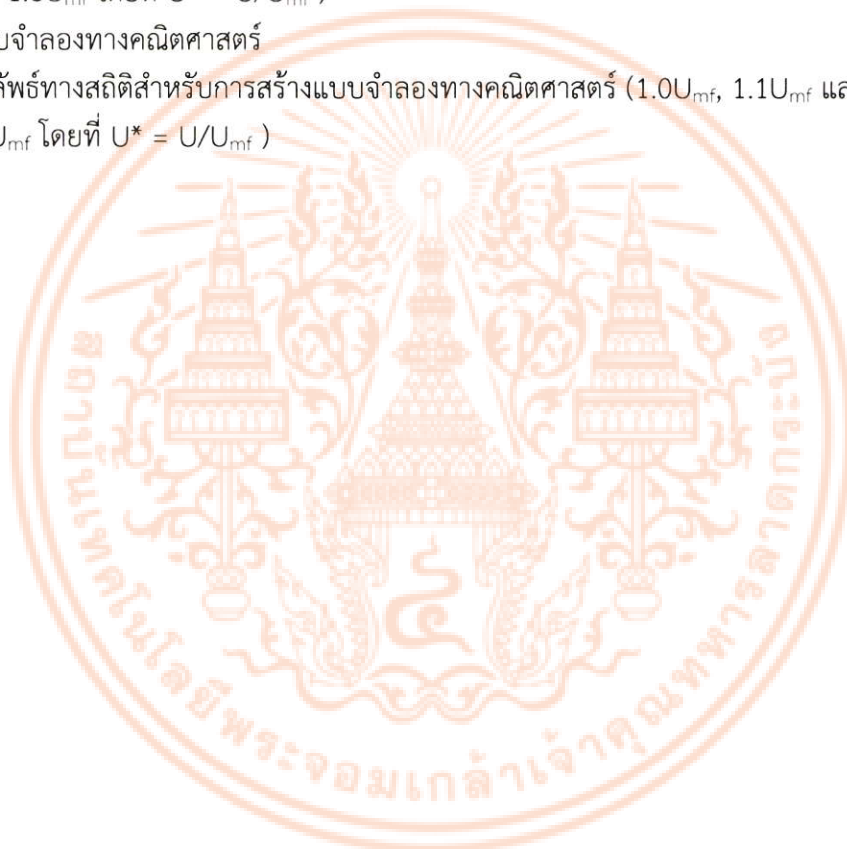
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สายพันธุ์พริกไทยที่นิยมปลูกในแต่ละประเทศ [24-25]	9
ตารางที่ 2.2 ตารางคุณสมบัติของสายพันธุ์พริกไทยที่นิยมปลูกในประเทศไทย [26]	10
ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของเมล็ดพริกไทยสด	17
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของพัดลมอัดอากาศ	18
ตารางที่ 4.1 แสดงผลลัพธ์ทางสถิติสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	24
ตารางที่ 4.2 แสดงผลลัพธ์ทางสถิติสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (1.2U _{mf} , 1.4U _{mf} และ 1.6U _{mf} โดยที่ $U^* = U/U_{mf}$)	29
ตารางที่ 4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	36
ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์ทางสถิติสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (1.0U _{mf} , 1.1U _{mf} และ 1.2U _{mf} โดยที่ $U^* = U/U_{mf}$)	37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และไม่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะของหอทดลองและลักษณะของแผ่นกระจายลมแบบเกลียว [3]	5
รูปที่ 2.2 เทคนิคที่ใช้แบบผิวของสี่เหลี่ยมทรงกระบอกที่มีผิวคลื่นอยู่ภายใน [14]	5
รูปที่ 2.3 แผนผังโครงสร้างชุดทดลองเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบด [12]	7
รูปที่ 2.4 ผลึกของพีเพอริน [21]	8
รูปที่ 2.5 สมการการสลายพันธะของพีเพอริน	9
รูปที่ 2.6 การอบแห้งในช่วงอบแห้งคงที่และลดลง [30]	12
รูปที่ 2.7 สมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหอบแห้งแบบเทคนิคฟลูอิดซ์เบด [31]	13
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การทดลอง	15
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความดันตกคร่อม	16
รูปที่ 3.3 พัดลมแรงดันสูง Greenco	17
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์วัดปรับค่าความเร็วมอเตอร์เครื่องอัดอากาศ ยี่ห้อ ABB	18
รูปที่ 3.5 ภาพติดตั้งชุด orifice	18
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์วัดความดันอากาศยี่ห้อ Dwyer	19
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์เพิ่มอุณหภูมิแบบขดลวด	19
รูปที่ 3.8 ชุดวัดอุณหภูมิ RTD	19
รูปที่ 3.9 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ยี่ห้อ TOHO TTM-i4N	20
รูปที่ 3.10 แผ่นกระจายลม	20
รูปที่ 3.11 หอบแห้งแบบทั่วไป	21
รูปที่ 3.12 ชุดแผ่นกันสร้างความปั่นป่วน	21
รูปที่ 3.13 ชุดแผ่นปิดสร้างการไหลแบบหมุนควง	22
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง	23
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้ง	23
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาการอบแห้งโดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ทำนายได้	24
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้ง	25
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความชื้นและเวลาในการอบแห้ง	26
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้ง	26
รูปที่ 4.7 ลักษณะการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน	27
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้น	27
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้น	28
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาการอบแห้งโดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ทำนายได้	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นจากผลการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลองต่างๆ	31
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาการอบแห้ง	32
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้ง	32
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้ง	33
รูปที่ 4.15 ลักษณะการไหลของอากาศในหอบแห้งของเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนควง (S-FBD)	34
รูปที่ 4.16 ลักษณะการไหลของอากาศในหอบแห้งของเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบด (ก) เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) และ (ข) เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนควง (S-FBD)	35
รูปที่ 4.17 พลังงานในหอบแห้งของเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบด (ก) เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) และ (ข) เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนควง (S-FBD)	36
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาการอบแห้งโดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ทำนายได้	38
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นจากผลการทดลองและความชื้นจากการทำนายด้วยแบบจำลองของ Newton, Page, Modified-Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic (ก) เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) (ข) เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนควง (S-FBD)	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สัญลักษณ์

w	คือ	มวลของวัสดุ (g)
d	คือ	มวลของวัสดุแห้งที่ไม่มีความชื้น (g dry product)
M_t	คือ	ความชื้นที่เวลาใดๆ (%db)
$M_{t+\Delta t}$	คือ	ความชื้นที่เวลาเปลี่ยนแปลง (%db)
M_i	คือ	ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (%db)
ΔP_f	คือ	ความดันตกคร่อมภายในหอบแห้ง (N/m^2)
ε	คือ	ความมีรูพรุนของอนุภาค
ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m^3)
ρ_f	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
U_{mf}	คือ	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน (m/s)
L_{mf}	คือ	ความสูงของอนุภาคที่จุดเริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชัน (m)
μ	คือ	ความหนืดของอากาศ (dynamic) (m/s)
d_p	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
g_c	คือ	ความเร่งโน้มถ่วง (m/s^2)
ϕ	คือ	ปริมาตรของอนุภาค (m^3)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แลxต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ สามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศจากการส่งออกปีละ 50-70 ล้านบาท และมีแนวโน้มของราคาสูงขึ้นเรื่อยๆ ด้วยกำลังการผลิตเฉลี่ย 3.5 ล้านกิโลกรัมต่อปี [1] พริกไทยสามารถใช้ในการประกอบอาหารได้หลากหลายประเภท ดังนั้นหลายๆประเทศทั่วโลกจึงใช้เมล็ดพริกไทยเป็นส่วนหนึ่งในการประกอบอาหาร และได้รับการยอมรับจากพ่อครัวระดับโลกคือ *Alton Brown* ให้คำนิยามกับพริกไทยว่าเป็น “King of Spices” (ราชาแห่งเครื่องเทศ) [2] เนื่องจากความโดดเด่นในเรื่องของกลิ่นที่หอม เมื่อใส่ลงไปในการอาหารแล้วทำให้อาหารมีรสชาติชวนรับประทาน เพราะในพริกไทยมีน้ำมันหอมระเหย (Volatile Oil) อยู่ 0.4-7 เปอร์เซ็นต์ [3] ซึ่งพริกไทยดำมีน้ำมันหอมระเหยสูงกว่าพริกไทยสดและพริกไทยขาว สารที่อยู่ในน้ำมันหอมระเหยยังมีส่วนช่วยในการถนอมอาหาร ทำให้อาหารที่ใช้พริกไทยปรุงนั้นเก็บไว้ได้นานขึ้น [4-5] นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทางด้านเภสัชวิทยา ใช้เป็นสารกระตุ้นการหลั่งกรดในกระเพาะอาหาร [6] ลดระดับน้ำตาลในเลือด บรรเทาอาการปวดกล้ามเนื้อและข้อต่อ [7] และยับยั้งการกระจายของเซลล์มะเร็ง [8] ดังนั้นจึงมีความประสงค์ที่ต้องการแปรรูปพริกไทยสดให้เป็นพริกไทยดำเพื่อเพิ่มปริมาณสารสำคัญคือฟิเพอรินให้มากขึ้น และทั้งนี้ยังช่วยยืดระยะเวลาการเก็บรักษาพริกไทยเนื่องด้วยพริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีการส่งออกและบริโภคตลอดทั้งปี จึงได้นำเทคนิคการอบแห้ง (Drying) มาประยุกต์ใช้ในการแปรรูปพริกไทยซึ่งเป็นวิธีลดความชื้นโดยการระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบ โดยที่อุณหภูมิในการระเหยนั้นอาจจะไม่ต้องระเหยที่จุดเดือดแต่ใช้อากาศพัดผ่านวัตถุดิบเพื่อดึงน้ำออกมา ทำให้ปริมาณน้ำในวัตถุดิบนั้นลดลง

สำหรับวิธีการทำแห้งเมล็ดพริกไทยแบบภูมิปัญญาชาวบ้าน ทำโดยการวางเมล็ดพริกไทยบนตาข่ายและตากแดด 4 แดด หรือใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง [9] ซึ่งใช้เวลานานและต้องอาศัยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ข้อจำกัดคือเมื่อถึงฤดูฝนและฤดูหนาว ก็ไม่สามารถใช้การทำแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยวิธีนี้ได้ ดังนั้นจึงนำเทคนิคอบแห้งที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว วิธีการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมมีอยู่ 2 วิธี คือ การอบแห้งที่ให้เมล็ดพืชอยู่กับที่ ตัวอย่างเช่น การอบแห้งแบบถาด (Tray Drying) และการอบแห้งที่เมล็ดพืชเคลื่อนที่ เช่น การอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed drying) ผลของการอบแห้งแบบถาดลักษณะเมล็ดพริกไทยที่ได้จะไม่มีรสสัมผัส เนื่องจากอัตราการอบแห้งไม่เท่ากันทั่วทั้งผิวสัมผัส จึงส่งผลต่อส่วนที่สัมผัสกับอากาศร้อนมากกว่าระเหยน้ำในส่วนนั้นได้มากกว่าและยุบตัวลงไป ส่วนการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำแห้งโดยใช้อากาศร้อนเป่าผ่านชั้นวัตถุดิบทำให้วัสดุลอยตัวอย่างเป็นอิสระ เกิดการผสมกับอากาศร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวสัมผัส ทำให้ลักษณะเมล็ดพริกไทยที่ได้มีความสม่ำเสมอ ภายใต้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสูง และอัตราการไหลของอากาศที่ต่ำ ทำให้ประหยัดพลังงานในการอบแห้ง สามารถลดความชื้นของวัตถุดิบได้อย่างรวดเร็ว จากงานวิจัยของ Mert Gur และ Mesut Gur [10] พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดสูงกว่าเครื่องอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แบบถาดประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มขึ้นนี้ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของวัตถุดิบทำให้เกิดการผสมกันระหว่างวัตถุดิบและอากาศร้อนได้เป็นอย่างดี

สำหรับงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed dryer) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งให้สูงขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดแบบทั่วไปโดยทำการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อสร้างความปั่นป่วนและเพิ่มการผสมระหว่างวัตถุดิบและอากาศร้อนให้ดีขึ้นทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลงเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดแบบทั่วไป โดยลักษณะการติดตั้งจะแบ่งออกเป็น 2 แบบหลักๆ คือ 1. ทำการติดตั้งภายนอกหอบแห้งซึ่งส่วนมากจะติดตั้งบริเวณทางเข้าหอบแห้ง และ 2. ติดตั้งภายในหอบแห้ง สำหรับการติดตั้งแบบที่ 1. มีการติดตั้งอุปกรณ์ใต้หอบแห้งหรือบริเวณทางเข้าหอบแห้งด้วยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น แผ่นกระจายแบบเกลียว (helical distributor plate) [11] ใบพัด (vane) [12] กรวยอยู่ตรงกลางและรอบๆเป็นใบพัด (annular spiral distributor) [13] เป็นต้น และแบบที่ 2. ติดตั้งภายในหอบแห้ง เช่น ผนังหอบแห้งเป็นคลื่นสามเหลี่ยม (triangular wavy walls) [14]

เมื่อทำการเปรียบเทียบการติดตั้งทั้งสองแบบพบว่าสามารถลดเวลาในการทำแห้งเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดแบบทั่วไปอยู่ในช่วง 30-43 เปอร์เซ็นต์ โดยแบบที่มีการติดตั้งผนังแบบคลื่นสามเหลี่ยมสูงที่สุด [14] สำหรับวิธีการติดตั้งภายในหอบแห้งมีข้อดีก็คือ ต้นทุนการทำชิ้นงานต่ำ ติดตั้งง่าย การใช้งานไม่ซับซ้อน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาออกแบบชุดแผ่นกันสร้างความปั่นป่วนที่ติดตั้งภายในหอบแห้ง โดยง่ายต่อการใช้งาน การทำความสะอาด และเกิดความดันตกคร่อม (Pressure drop) น้อยที่สุดเพื่อลดพลังงานในการขับเคลื่อนพัดลม (Blower) ในการจ่ายอากาศให้เพียงพอต่ออนุภาคเกิดฟลูอิดไรซ์ขึ้นอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ช่วยเพิ่มโดยการเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายความร้อน การถ่ายเทมวลและพลังงานภายในหอบแห้ง และยังใช้เป็นแนวทางในการขยายขนาดของเครื่องอบแห้งใช้สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วในการอบแห้งแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดที่ติดตั้งชุดแผ่นกันสร้างความปั่นป่วน
2. สร้างสมการทำนายผลการทดสอบในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เมล็ดพริกไทยที่ใช้ในการทดสอบปริมาณ 400 กรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 500% (มาตรฐานแห้ง) เป็นเวลา 120 นาที
2. อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยเท่ากับ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส
3. ความเร็วจำเพาะของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 1.0, 1.1, 1.2, 1.4 และ 1.6 ($U^* = U/U_{mf} = 1.0, 1.1, 1.2, 1.4$ และ 1.6)
4. ลักษณะหอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบด เป็นทรงกระบอกทำมาจากอะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 14 เซนติเมตร ความหนา 0.5 เซนติเมตร มีความสูงเท่ากับ 100 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.4 ประโยชน์ที่ว่าจะได้รับ

1. อุณหภูมิและความเร็วลมที่เหมาะสมในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนและแบบทั่วไป
2. เพื่อนำเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนไปประยุกต์กับการอบแห้งกับผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นและพัฒนาเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.5 ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1.5.1 วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

V. Chuwattanakula and S. Eiamsa-ardb, (2019) “Hydrodynamics investigation on pepper drying in swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators”, Case Studies in Thermal Engineering, 13(2019)100389. (Q1, Scopus)

1.5.2 งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

V. Chuwattanakul, K. Banthumporn, P. Promvong and S. Eiamsa-ard, “Drying behavior of fluidized bed dried peppercorns”, Proceedings of the 4th Annual International Conference on Materials Science and Environmental Engineering, De Gruyter Proceedings Materials in Environmental Engineering.

V. Chuwattanakul, K. Banthumporn, P. Promvong and S. Eiamsa-ard, Drying Peppercorn Characteristics in Fluidized Bed Dryer Equipped with Baffle Vortex Generators, (2017) “2017 6th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE 2017)”, IOP Conference Series: Earth and Environment al Science 136 (2018) 011001 (Scopus)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตและทฤษฎีพื้นฐาน โดยงานวิจัยในอดีตได้มีการศึกษาการออกแบบแผงฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อสร้างการไหลแบบปั่นป่วนโดยเป็นเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งได้ดีมากขึ้น

2.2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

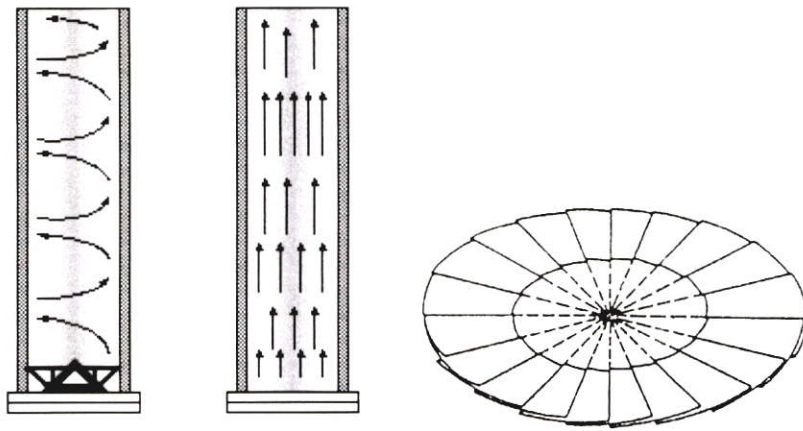
2.2.1 วิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยวิธีฟลูอิดไดซ์เบด

แก่งสันเทียะ [15] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งเมล็ดพริกไทยในหอฟลูอิดไดซ์เบดที่มีกริบรูปตัววี โดยได้ทำการทดลองในหอทดลองรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และ สูง 1 เมตร ในการทดลองใช้เมล็ดพริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 430%db เริ่มทดลองใช้อากาศแห้งทางเข้าในช่วงที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 90 °C และใช้ความเร็วของอากาศ ภายในหอทดลองที่ 2, 2.5, 3 และ 3.5 m/s โดยทดลองให้เหลือความชื้นที่ 12% จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิของอากาศทางเข้าหอบมีอิทธิพลโดยตรงต่ออัตราการอบแห้งทุกเทคนิคและความเร็วมีอิทธิพลน้อยมากต่อเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด และพบว่าเมื่อติดตั้งผิวกริบรูปตัววีเข้าไปในเครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดสามารถช่วยลดเวลาการอบแห้งได้ประมาณ 30%

Boonloi และ Promvongse [11] ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่มีแผ่นกระจายแบบเกลียว โดยทำการอบในหอทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.13 เมตร สูง 1 เมตร ด้านล่างของหอทดลองจะมีแผ่นกระจายเกลียวซึ่งจะเป็นตัวทำให้เกิดการหมุนควงของลมร้อนภายในหอ โดยในการทดลองแต่ละครั้งใช้เมล็ดพริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 80%wb (มาตรฐานเปียก) มวล 0.2 kg ทดลองที่อุณหภูมิ 80 °C และใช้ความเร็วของอากาศภายในหอทดลอง 1.3U_{mf} 1.6U_{mf} และ 2.0U_{mf} ใช้เวลาทดลองแต่ละกรณี 180 นาที และวัดความชื้นของเมล็ดพริกไทยทุกๆ 10 นาที จากผลการทดลองพบว่าในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดาความเร็วลมไม่มีผลต่อการอบแห้งของเมล็ดพริกไทย แต่ในการอบแห้งด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีแผ่นกระจายแบบเกลียวพบว่าความเร็วลมมีผลต่อการลดความชื้นของเมล็ดพริกไทย และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองแบบจะพบว่าการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีแผ่นกระจายแบบเกลียวให้ผลที่ดีกว่าแบบฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดา โดยสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ถึง 30%

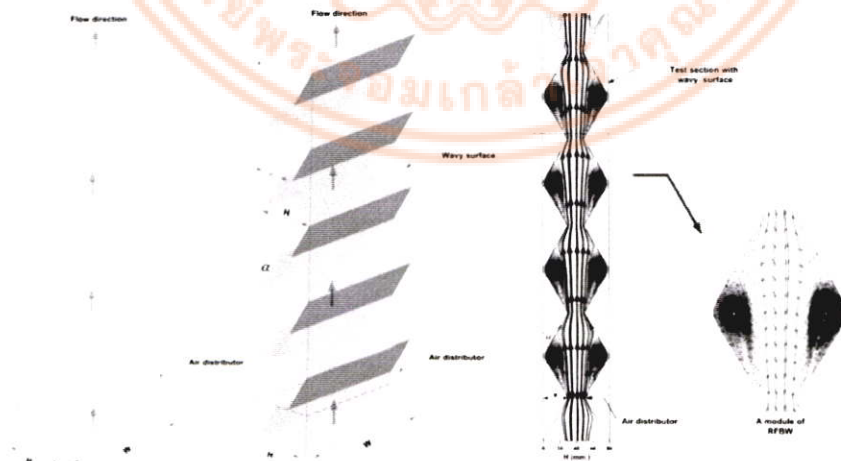
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 2.1 ลักษณะของหอทดลองและลักษณะของแผ่นกระจายลมแบบเกลียว [3]

Promvong และคณะ [14] ได้ทำการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดกับเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบหอยฉลุน ในการทดลองแต่ละครั้งได้ใช้เมล็ดพริกไทยปริมาณ 200 g ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 400 %db ทดลองที่อุณหภูมิ 80 °C โดยใช้ความเร็วของอากาศภายในหอทดลอง 1.7, 2.1 และ 2.6 m/s และใช้เวลาทดลองแต่ละกรณี 180 นาที วัดความชื้นที่ลดลงของ เมล็ดพริกไทยทุกๆ 10 นาที ซึ่งผลจากการทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์แบบดั้งเดิม การทดลองพบว่าในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดาความเร็วลมไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของเมล็ดพริกไทย แต่ในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบหอยฉลุนพบว่าความเร็วลมมีผลต่อการลดค่าความชื้นของเมล็ดพริกไทยโดยช่วยให้ความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดระเหยออกได้เร็วขึ้น เนื่องจากหอยฉลุนทำให้เมล็ดมีการเคลื่อนที่ลักษณะของไหลแบบปั่นป่วนเกิดการสั่นและกระจายตัวในหอทดลองเพิ่มมากขึ้นกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดา ทำให้เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ช่วยให้การอบแห้งใช้เวลาลดลง 43%



รูปที่ 2.2 เทคนิคที่ใช้แบบผิวของสี่เหลี่ยมทรงกระบอกที่มีผิวคลื่นอยู่ภายใน [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยวิธีฟลูอิดซ์เบดกับผลิตภัณฑ์อื่นๆ

วุฒิววัฒน์ชัย [16] ได้ทำการศึกษาแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิดซ์เบด โดยทำการทดลองถั่วเหลืองในเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบวงกลมที่อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง 110–140°C ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 24.7–33.3 %db ความสูงเบด 10–15 cm และความเร็วของอากาศอบแห้ง 2.4–4.1 m/s จากการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ และยิ่งพบว่า page's model มีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะใช้อธิบายผลการทดลองร้อยละของการร้าวและร้อยละของการแตกเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิมอบแห้ง

Thant และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีฟลูอิดซ์เบดแบบหอยโข่ง โดยเขาได้กำหนดค่าการเอียงของหอยเบตไว้สามค่าคือ 0° (เบตตั้งตรง), 15° และ 30° การทดลองได้ใช้ข้าวเปลือกมวล 0.5–2.5 kg ความเร็วอากาศเริ่มต้น 1.1 m/s และ 1.6 m/s อุณหภูมิมอบแห้งที่ 50, 60 และ 65°C การทดลองใช้หอยเบตปกติ (ไม่สอดใส่ชุดปั่นป่วน) และแบบสอดใส่ชุดปั่นป่วน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในแง่ของการใช้พลังงานและอัตราการขจัดความชื้นคือเบตเอียงที่มุม 15° ด้วยการสอดใส่ชุดปั่นป่วนแบบเกลียวภายในห้องเบต ทำให้เวลาการอบแห้งลดลงและทำให้การลดการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ

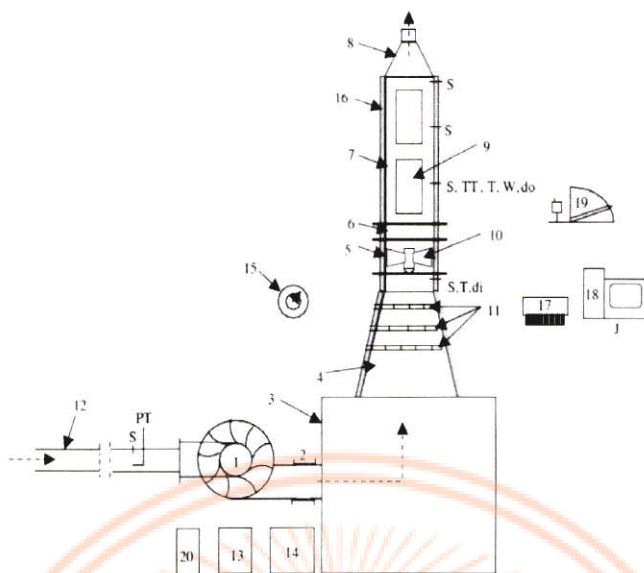
Ozahi และ Demir [18] ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการอบแห้งข้าวโพดและถั่วพิสตาเซียไม่มีเปลือกด้วยวิธีฟลูอิดซ์เบดแบบชุดเกี่ยวกับประสิทธิภาพทั้งของพลังงานและคุณค่าของพลังงาน โดยได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบชุดเพื่อใช้ตรวจสอบการประสิทธิภาพกระบวนการอบแห้ง โดยกำหนดมวลของผลิตภัณฑ์ 100–300 g ช่วงอุณหภูมิ 50–75 °C ความเร็วอากาศ 6.8–10.86 m/s และมีเลขเรย์โนลด์นัมเบอร์ในช่วง 47, 632–75, 296 เมื่อเพิ่มอนุภาคมวลทำให้ต้องเพิ่มเวลาการอบแห้งตามไปด้วย ในทางกลับกันถ้าเพิ่มอุณหภูมิอากาศและความเร็วอากาศจะทำให้เวลาการอบแห้งลดลง ผลการทดลองของพลังงานความร้อนและคุณค่าทางความร้อน เปรียบเทียบกับงานคนอื่นๆที่ผ่านมาทำให้ทราบว่ามีความสอดคล้องกันซึ่งผลการทดลองต่ำขึ้นอยู่กับอัตราการไหลอากาศ มวลของอนุภาค ความชื้นของอนุภาคและอุณหภูมิแวดล้อม

M. Ö Zbey, M.S. S Ö Ylemez [12] ได้ทำการศึกษาการอบแห้งแบบเป็นช่วง (Batch) สำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวสาลี (wheat grains) ด้วยวิธีฟลูอิดซ์เบดโดยให้การไหลของตัวกลางในการอบแห้งเป็นแบบหมุนควงซึ่งพบว่าอิทธิพลของการหมุนแบบหมุนควงสำหรับค่าสมรรถนะในการอบแห้งทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นโดยค่าในการหมุนควงอยู่ในช่วง 0.2–0.85 การดูดซับความชื้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น 5–25% ค่าสมรรถนะในการอบแห้งเพิ่มขึ้น 38 % เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการหมุนควงเข้ามาช่วยในการอบแห้ง ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.85 สำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่ใช้เทคนิคการหมุนควง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.3 แผนผังโครงสร้างชุดทดลองเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบด [12]

2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยวิธีอื่นๆ

แซ็คคว์ และคณะ [19] ได้สรุปกระบวนการอบแห้งเป็น 2 แบบ คือ แบบ 1 ขั้นตอน ด้วยการพาความร้อนของลมร้อน การแผ่รังสีได้แดง และกระบวนการอบแห้ง แบบ 2 ขั้นตอน ด้วยการแผ่รังสีของไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมร้อน และการอบแห้ง 2 ขั้นตอนด้วยไมโครเวฟและรังสีได้แดง โดยความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพริกไทยสดและความชื้นสุดท้ายของเมล็ดพริกไทยแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 300-400 ของมูลฐานแห้ง และร้อยละ 12-16 %db ตามลำดับ ผลทดลองพบว่า การอบแห้งพริกไทยเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยอุณหภูมิอบแห้งมีผลโดยตรงต่ออัตราการอบแห้งและระยะเวลาอบแห้ง นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแห้งสูงทุกแหล่งพลังงานความร้อนจะมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่ากรณีอบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแห้งต่ำ และที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน การอบแห้งด้วยรังสีได้แดงเพียงอย่างเดียวมีอัตราการอบแห้งและค่าสัมประสิทธิ์ การแพร่ยังผลสูงที่สุด ในกรณีการสร้างแบบจำลองทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น สรุปได้ว่าแบบจำลองของ Page สามารถทำนายผลจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทยด้วยรังสีได้แดงทั้งแบบขั้นตอนเดียว การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบขั้นตอนเดียวและการอบแห้งสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟและรังสีได้แดงได้ดี

หนูทอง และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทยแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160 °C โดยทำการอบแห้งพริกไทยจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 410 %db จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 17 %db และจากข้อมูลการทดลองใช้แบบจำลองการอบแห้งจำนวน 7 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลอง Newton, Page, Henderson and Pabis, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Logarithm, Two-term, Approximation of Diffusion, และแบบจำลอง Midilli et al. เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

จากงานวิจัยที่กล่าวมาเบื้องต้นแสดงให้เห็นได้ว่าการที่ติดตั้งชุดสร้างการไหลปั่นป่วนภายในหอบแห้งจะช่วยเสริมสร้างการพาความร้อนในหอบแห้งที่สูงขึ้นอันส่งผลต่อการอบแห้งที่ใช้เวลาน้อยลง ดังนั้นการที่มีการติดตั้งชุดสร้างการไหลแบบปั่นป่วนจึงยังคงต้องศึกษาถึงเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่าง อุณหภูมิ ความร้อน ความเร็ว และความเข้มข้นของกระแสการไหลการปั่นป่วน อันส่งผลต่ออัตราการอบแห้งและลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติภายในของผลิตภัณฑ์

2.3 ทฤษฎีพริกไทย

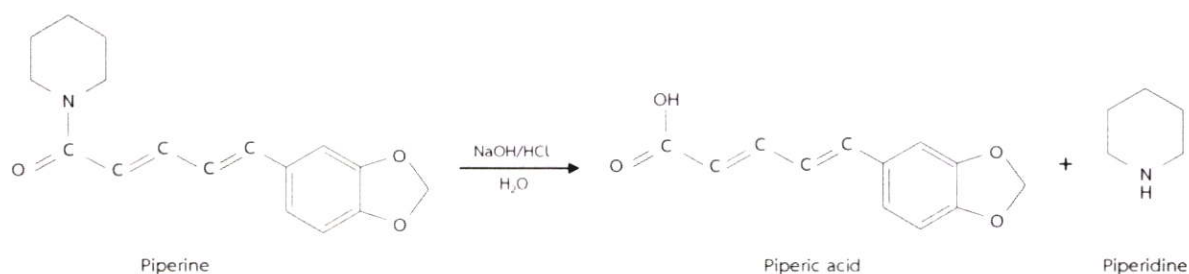
พริกไทยเป็นพืชไม้เลื้อยอายุยืนนานกว่า 15 ปี มีชื่อทางวิทยาศาสตร์: *Piper nigrum* ในทุกส่วนของพริกไทยสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งสิ้นได้แก่ ราก ลำต้น ก้าน โดยเฉพาะเมล็ดพริกไทยที่นิยมนำมาปรุงอาหารเนื่องจากความโดดเด่นในเรื่องกลิ่นที่หอมและรสชาติเผ็ดร้อน เนื่องจากในพริกไทยมีน้ำมันหอมระเหย (Volatile Oil) ประมาณ 0.4-7 เปอร์เซ็นต์ [3] โดยมีพิเพอริน (Piperine) เป็นส่วนประกอบหลักซึ่งพิเพอรินเป็นสารแอลคาลอยด์ (alkaloid) ที่ได้จากการสกัดพริกไทยโดยนักไฟฟ้าและเคมีศาสตร์ชื่อ *Hans Christian Ørsted* ในปี พ.ศ. 2362 เป็นสารประกอบผลึกสีเหลืองที่มีจุดหลอมเหลว 128 ถึง 130 °C ดังแสดงในรูปที่ 2.4 มีสูตรทางเคมี $C_{17}H_{19}NO_3$ ที่มีคุณสมบัติเป็นเบสอ่อน เมื่อทำการย่อยสลายพันธะด้วยเบสแก่หรือกรดแก่ในน้ำ (Alkali hydrolysis decomposes) จะได้สารผลิตภัณฑ์เป็นกรดพิเพอริก (Piperic acid) มีสูตรทางเคมีเป็น $C_{12}H_{10}O_4$ และพิเพอริดีน (Piperidine) ที่สามารถระเหยและให้กลิ่นหอมฉุน มีสูตรทางเคมี $C_5H_{11}N$ [21] เกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.5 ในพริกไทยมีพิเพอรินอยู่ 98 เปอร์เซ็นต์ของสารแอลคาลอยด์ทั้งหมด [22] ดังนั้นพิเพอรินเป็นสารสำคัญในการชี้วัดคุณภาพประโยชน์ของพริกไทยรวมถึงสรรพคุณทางยารักษาโรค [6] และสำหรับพริกไทยดำจะมีพิเพอรินมากกว่าพริกไทยขาวและพริกไทยอ่อนถึง 4 และ 9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ [8, 23]



รูปที่ 2.4 ผลึกของพิเพอริน [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 2.5 สมการการสลายพันธะของพีเพอริน

สายพันธุ์ของพริกไทยมีต้นกำเนิดมาจากทั่วโลก แต่พบมากที่สุดในทวีปเอเชียและในประเทศที่มีภูมิอากาศอยู่ในเขตร้อนชื้น เช่น อินเดีย อินโดนีเซีย ศรีลังกา มาเลเซีย บราซิลและประเทศไทย โดยในแต่ละประเทศมีสายพันธุ์ที่เฉพาะเหมาะสมสำหรับภูมิภาคทางการเกษตรที่แตกต่างกันเช่นเดียวกับการเติบโตภายใต้ระบบการเพาะปลูกพืช [24-25] สำหรับพันธุ์ที่ได้รับความนิยมในแต่ละประเทศมีดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สายพันธุ์พริกไทยที่นิยมปลูกในแต่ละประเทศ [24-25]

ประเทศ	สายพันธุ์
อินเดีย	Aimpiriyan, Arakkulam Munda, Blankotta, Cheriyananiyakadan, Jeerakamundi, Kerallakally, Kerallundi, Kudanadan, Karimkotta, Nambamundi, Nambamundi, Kuduvi, Kuduvi, Kudan, Kudan Kandi ปรับปรุงพันธุ์: Panniyur 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7, Sreekara, Subhakara, Panchami, Pournami และ PLD-2
Brazil	กูซิง (Singapura) และ ปันนิยูรี 1
มาเลเซีย	ซาราวัก และ กุซซิง
อินโดนีเซีย	Bangka, Banjarmasin, Belantung, Beng Kayang, Chunuk, Chunuk Kernuga (CK2), Djambi, Duantebei, Kerenci, Kernuga (CK1), Korintji, LDK (Lampung Daun Kocil), LDL (Lampung Daun Lebar), Palulauta, Petaling 1, Petaling 2, Merefim, Natar 1, Natar 2, LDLN1 (Lampung Daun Lebar Namang 1), LDLN2 (Lampung Daun Lebar Namang 2)
ศรีลังกา	ซีลอน
มาดากัสการ์	Sel.IV.1 และ Sel.IV.2
ไทย	โบราณ (ควายกระบองเพชร), บ้านเขา และ ปรางค์ถี่ (จันทบุรี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในประเทศไทยสำหรับการศึกษาดำเนินการเพาะปลูกพริกไทยได้ทำการนำเข้าเมล็ดพันธุ์จากประเทศมาเลเซียและศรีลังกาเนื่องจากมีคุณสมบัติต้นทนต่อแมลงและสภาพอากาศร้อนได้ดีกว่าพันธุ์ไทยดั้งเดิม จึงทำให้ในประเทศไทยมีการปลูกพริกไทย 3 สายพันธุ์หลักๆ [25] ได้แก่ 1. พันธุ์ซีลอนจากประเทศศรีลังกา 2. พันธุ์ซาราวัคหรือคนไทยเรียกพันธุ์มาเลเซียจากประเทศมาเลเซีย และ 3. พันธุ์ปรางค์ถึหรือพันธุ์จันทบุรี โดยในแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันดังตารางที่ 2.2 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ตารางคุณสมบัติของสายพันธุ์พริกไทยที่นิยมปลูกในประเทศไทย [26]

สายพันธุ์พริกไทย	พันธุ์ซีลอน	พันธุ์มาเลเซีย	พันธุ์จันทบุรี
นิยมจำหน่าย	พริกไทยอ่อน, ส่ง ทำพริกไทยดอง	พริกไทยดำ/ขาว	พริกไทยอ่อน/ พริกไทยดำ/ขาว
ขนาดเมล็ด	3	2	2
น้ำหนัก	3	2	2
ปริมาณความชื้นเริ่มต้น	3	2	1
รสชาติ(รสเผ็ดร้อน)	1	2	3
กลิ่นหอมฉุน	1	2	3
จำนวนเมล็ดต่อพวง	3 (ลักษณะพวง ยาว)	2 (ลักษณะพวง ยาว)	1 (ลักษณะพวงสั้น)
ระยะเวลาเก็บเกี่ยว	ตลอดทั้งปี หลังจากช่อกออกดอก 4-5 เดือน เก็บขายพริกไทยอ่อน หรือหลังจากช่อกออกดอก 6-7 เดือน ขายพริกไทยดำ/ขาว		

*หมายเหตุ ระดับคะแนน 1 คือ น้อยที่สุด, 2 คือเท่าๆกัน และ 3 คือมากที่สุด

จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าคุณสมบัติทางเภสัชวิทยาของพีเพอรินซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในน้ำมันหอมระเหยที่พบมากที่สุดในพริกไทยดำและคุณสมบัติทางการภาพของเมล็ดพริกไทยพันธุ์จันทบุรีไม่ว่าจะเป็นเรื่องรสชาติและกลิ่นที่มีความโดดเด่นกว่าทุกๆ สายพันธุ์ในประเทศไทย และเนื่องด้วยต้องการหาคุณสมบัติเฉพาะที่ประเทศอื่นๆไม่มี รวมไปถึงการอนุรักษ์พืชพันธุ์ไทยพื้นบ้านของไทยไว้ด้วย จึงเลือกนำพันธุ์จันทบุรีใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพริกไทยดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ทฤษฎีอบแห้ง

การทำแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นวัสดุ จนถึงระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ เพื่อให้วัสดุมีสภาพที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา ด้วยการถ่ายเทความร้อนและมวลสารไปพร้อมๆ กัน โดยทั่วไปแล้ว การทำแห้งมักจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลาง (Drying medium) ในการพาความชื้นออกไปจากวัสดุ ดังนั้นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่ออัตราการ ทำแห้งจึงได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของอากาศร้อน ด้วยเหตุนี้ปรากฏการณ์หลักที่เกิดขึ้นกับการทำแห้งด้วยลมร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างวัสดุและของไหล โดยอาศัยแรงขับเคลื่อนจากความต่างศักย์ของอุณหภูมิและความชื้น กล่าวคือ ความร้อนสัมผัสจากของไหลถูกถ่ายเทสู่วัสดุ ทำให้ความชื้นระเหยออกไปกับอากาศ

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยความชื้นในวัสดุและความร้อนที่ถ่ายเทไปยังวัสดุขึ้นเป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ [27]

2.3.1 การวิเคราะห์และทดสอบหาความชื้นของวัสดุอบแห้ง

ในการอบแห้งวัสดุหรือผลผลิตต่างๆ ปริมาณที่สำคัญที่สุดที่จะต้องคำนึงถึงคือความชื้นของวัสดุหลังผ่านการอบแห้งแล้วความชื้นของวัสดุอบแห้งเป็นตัวบอกลถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือวัสดุแห้ง การบอกค่าความชื้นในวัสดุ โดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก และความชื้นมาตรฐานแห้งความชื้น

ความชื้นในวัสดุ (Moisture content, M)

ความชื้นเป็นตัวบอกลปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลวัสดุขึ้นหรือมวลวัสดุแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบคือ ความชื้นมาตรฐานเปียก และความชื้นมาตรฐานแห้งความชื้น

ความชื้นมาตรฐานเปียก (M_w) นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์โดยทั่วๆ ไปจะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์ (%wb)

$$MC_w = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad (2.1)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (M_d) ความชื้นมาตรฐานแห้ง นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎีเพราะมวล แห้งจะมีค่าคงที่ตลอดการอบแห้ง (%db)

$$MC_d = \frac{w-d}{d} \times 100 \quad (2.1)$$

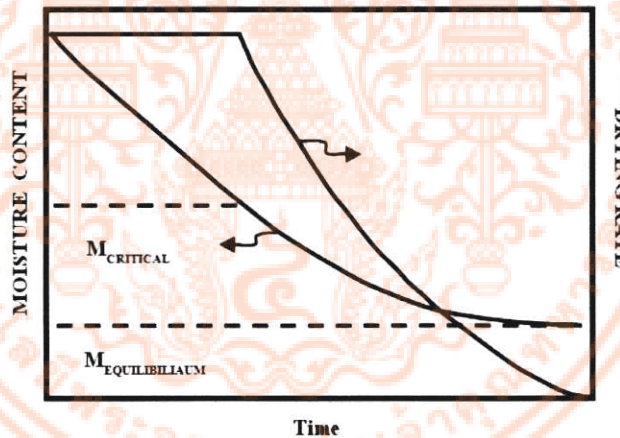
อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คือ อัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 [28-29]

$$MR = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_i - M_{eq})} \quad (2.3)$$

ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, M_{eq})

ความชื้นสมดุล คือ ความชื้นของวัสดุในขณะที่มีความดันไอน้ำภายในวัสดุสมดุลกับความดันไอน้ำของอากาศแวดล้อมวัสดุนั้น โดยความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมวัสดุ

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) หรือความเร็วในการอบแห้ง คือ ความชื้นที่ออกจากวัสดุต่อช่วงเวลาการอบแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การอบแห้งในช่วงอบแห้งคงที่และลดลง [30]

วัสดุที่มีความชื้นสูงๆ การอบแห้งในช่วงแรกจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ซึ่งเกิดจากวัสดุอบแห้งมีการถ่ายเทมวลของน้ำและความร้อนกับอากาศแวดล้อมที่ผิวของวัสดุเพียงอย่างเดียว ตัวแปรของอากาศแวดล้อมที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งคงที่นี้ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลม และความชื้นสัมพัทธ์ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นี้จะเกิดในช่วงสั้นๆ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เมื่อปริมาณความชื้นของวัสดุอยู่ระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงหรือเรียกว่า ความชื้นวิกฤต การถ่ายเทมวลของน้ำและความร้อนกับอากาศแวดล้อมไม่ได้เกิดที่ผิวของวัสดุเพียงอย่างเดียว แต่จะเกิดภายในผิวและเนื้อวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุมายังผิวจะช้ากว่าการพาความชื้นจากผิวไปยัง อากาศแวดล้อมทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ตัวแปรของอากาศแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งลดลง ได้แก่ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 [28-29]

$$DR = \frac{dM}{dt} = \frac{(M_{t+\Delta t} - M_t)}{dt} \tag{2.4}$$

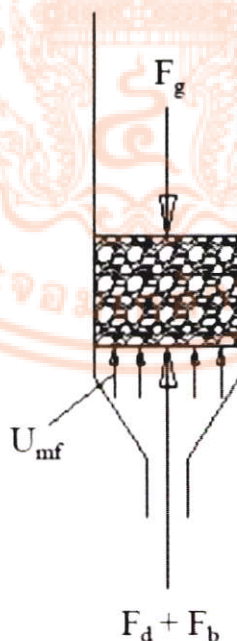
2.5 ทฤษฎีฟลูอิดไคเซชัน

ฟลูอิดไคเซชัน (Fluidized bed) เป็นหนึ่งในเทคนิคที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก นอกจากสามารถนำไปประยุกต์ได้หลากหลาย เช่น การทำแห้ง การผสม และกระบวนการเผาไหม้ เป็นต้น สำหรับกระบวนการทำแห้งจะใช้อากาศเป็นตัวพาความชื้นออกจากวัตถุดิบที่เป็นของแข็ง โดยเพิ่มความเร็วของอากาศมากขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้วัตถุดิบเกิดการขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมี

พฤติกรรมคล้ายของไหลเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การเกิดฟลูอิดไคเซชัน” (fluidization)

ความเร็วต่ำสุดของขณะเริ่มเกิดฟลูอิดไคเซชัน (Minimum velocity of fluidization, U_{mf})

ในขณะที่อนุภาคภายในหอบแห้งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้นอาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า อนุภาคของแข็งอยู่ในสภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่เกิดขึ้น คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคเองหรือแรงโน้มถ่วง (gravitational force, F_g) และแรงพยุงจากของไหลได้แก่ แรงต้าน (drag force, F_d) และแรงลอยตัว (buoyant force, F_b) [31] ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 สมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหอบแห้งแบบเทคนิคฟลูอิดไคเซชัน [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักของอนุภาค = แรงพยุงของของไหล (แรงต้าน + แรงลอยตัว)

$$F_g = F_d + F_b \quad (2.5)$$

การสร้างแบบจำลองเพื่อหาความดันตกคร่อมของท่อแหง (ΔP_f) และความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf}) ได้รับการพัฒนาโดย [32] ในสมการที่ 2.6 และ 2.7

$$\frac{\Delta P_f}{L_{mf}} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu U_{mf}}{\varepsilon d_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon) \rho_f U_{mf}^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.6)$$

$$U_{mf}^2 = \frac{\phi d_p (\rho_c - \rho_f)}{1.75 \rho_f} g_c \varepsilon^3 ; \text{Re} > 1000 \quad (2.7)$$

และจากนั้นนำคำนวณหา U_{mf} เพื่อไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

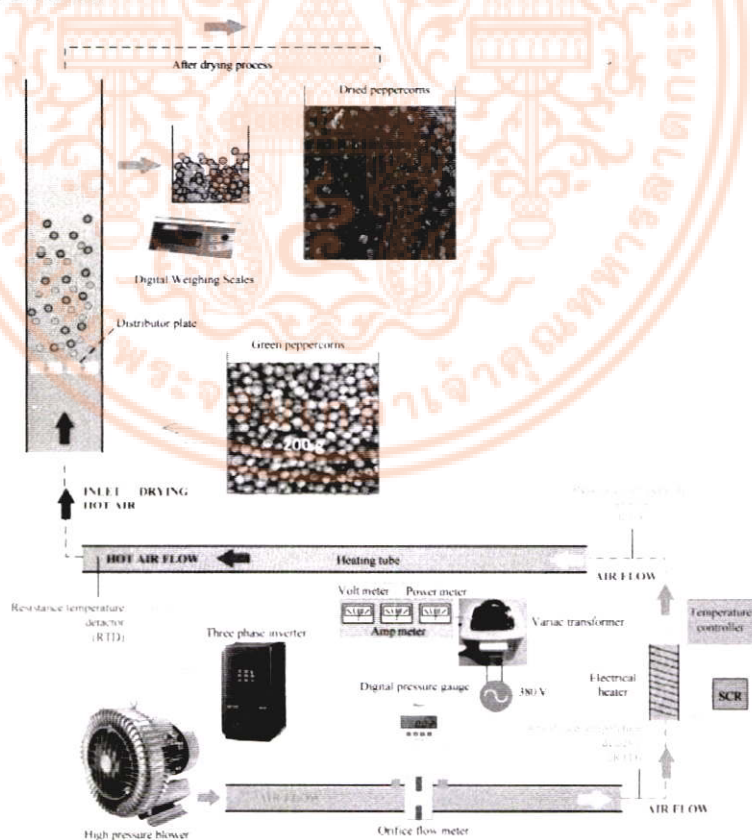
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงการสร้างชุดการทดลอง พร้อมรายละเอียดวัสดุ อุปกรณ์ และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนี้

3.1 อุปกรณ์เทคนิคฟลูอิดซ์เบดประกอบไปด้วย

1. High pressure blower
2. ชุดควบคุมความเร็วอากาศ (Inverter)
3. เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (orifice flow meter)
4. เครื่องวัดความแตกต่างของความดัน
5. เครื่องให้ความร้อน (Heater)
6. เครื่องวัดอุณหภูมิ (RTD)
7. ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
8. หออบแห้ง โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำมาจากอะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน เท่ากับ 17 เซนติเมตร ความหนา 0.5 เซนติเมตร มีความสูงเท่ากับ 100 เซนติเมตร
9. ชุดแผ่นสร้างความปั่นป่วน
10. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

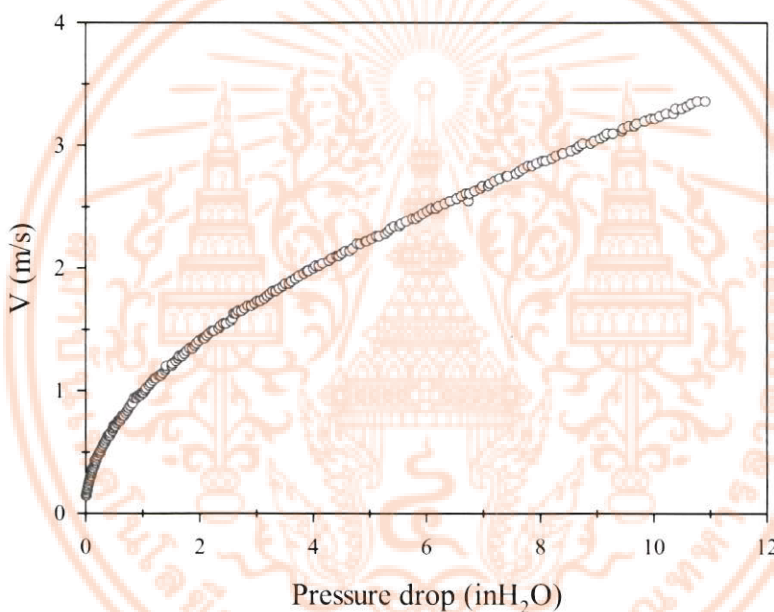
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การสอบเทียบออริฟิส

ทำการสอบเทียบออริฟิสโดยการวัดความแตกต่างของความดันระหว่างทางเข้าและทางออกของออริฟิสด้วยเครื่องวัดความดันตกคร่อมแบบดิจิตอล และเครื่องวัดความเร็วลมเพื่อวัดความเร็วของอากาศ เปิดโบลเวอร์พร้อมปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ครั้งละ 0.1 Hz จากนั้นสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อม(Pressure drop) กับความเร็ว (V) โดยใช้ฟังก์ชันสมการโพลิโนเมียลของดีกรี 6 ซึ่งเหมาะสมที่สุดในการทำนาย จากผลพบว่ามีค่า R² สูงที่สุดเท่ากับ 0.9995 ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$V \text{ (m/s)} = -3 \times 10^{-05} \Delta P^6 + 0.0011 \Delta P^5 - 0.0156 \Delta P^4 + 0.1099 \Delta P^3 - 0.4201 \Delta P^2 + 1.1125 \Delta P + 0.2054 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความดันตกคร่อม

3.2.2 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf})

ใส่เมล็ดพริกไทยน้ำหนัก 400 g ในหอบแห้ง เปิดโบลเวอร์พร้อมปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ไปที่ความเร็วรอบต่างๆ ด้วยอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้ความเร็วของอากาศที่จะเข้าสู่หอบแห้งต่ำที่สุด วัดความแตกต่างของความดันที่ตำแหน่งได้แผ่นกระจายลมและเหนือวัตถุในหอบแห้งด้วยเครื่องวัดความดันตกคร่อมแบบดิจิตอล เพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์ครั้งละ 0.1 Hz เพื่อให้ได้ค่าความเร็วของอากาศทางเข้าละเอียดที่สุด และนำผลมาวิเคราะห์ ระหว่างความแตกต่างของความดันและความเร็วของอากาศทางเข้าในหอบแห้ง

3.2.3 ขั้นตอนการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทย

สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเมล็ดพริกไทยสด ที่มีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1 ในการทดลองนั้นจะนำเมล็ดพริกไทยสดที่ติดกันเป็นพวง มาคัดแยกออกให้เหลือเฉพาะเมล็ดเท่านั้นจากนั้นก็นำมาทดลองหาค่าความชื้นเริ่มต้นก่อนทำการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของเมล็ดพริกไทยสด

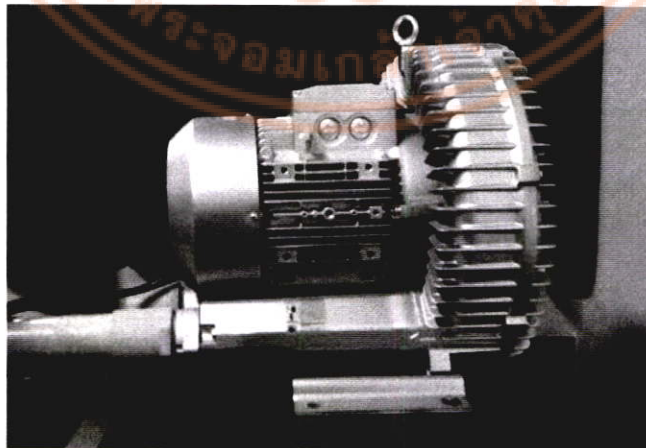
สายพันธ์	จันทบุรี
เส้นผ่านศูนย์กลาง (D_p)	4.5-5.5 mm
ความชื้นเริ่มต้น	500% dry basis

3.2.3 การทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทย

1. ทำการเปิดโบลเวอร์ให้อากาศไหลเข้าสู่ระบบ เปิดฮีตเตอร์และตั้งอุณหภูมิไว้ในช่วงการทดสอบ (ประมาณ 15 นาที)
2. ปรับความเร็วอากาศในหอบทดลองให้ได้ตามที่กำหนด โดยเทียบจากความดันตกคร่อมด้วยเครื่องวัดความดันตกคร่อมแบบดิจิตอล
3. ใส่เมล็ดพริกไทยลงในหอบแห้งโดยชั่งน้ำหนักก่อนการทดลองและสังเกตผลการทดลอง
4. นำหอบแห้งออกมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 120 นาที
5. ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงความเร็ว มุมและระยะการจัดเรียงของแผ่นกัน และทำการทดลองซ้ำอีก 3 ครั้ง

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 โบลเวอร์ เป็นพัดลมอัดอากาศความดันสูง (high pressure) ที่ให้กำลัง head สูง



รูปที่ 3.3 พัดลมแรงดันสูง Greenco,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของพัดลมอัดอากาศ

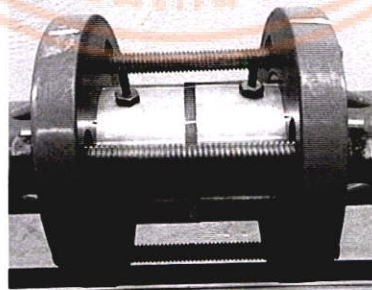
Model	2RB 810-7AH27
Output (KW)	7.5
Voltage at 50 Hz	345-415V/
Max. Air Flow (m ³ /h)	530
Max. Vacuum (mbar)	-320
Max. Pressure (mbar)	430
Inlet & Outlet Diameter (inches)	2.5

3.3.2 ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Inverter) เป็นเครื่องมือควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของพัดลมอัดอากาศ โดยมีความถี่ละเอียดอยู่ที่ 0.1 Hz.



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์วัดปรับค่าความเร็วมอเตอร์เครื่องอัดอากาศ ยี่ห้อ ABB

3.3.3 ชุดวัดอัตราการไหล (Orifice flow meter) วัดอัตราการไหลของอากาศโดยอาศัยความแตกต่างของความดันจากขาเข้าและขาออก โดยมีแผ่นเจาะรูตรงกลางที่มีขนาด 0.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ



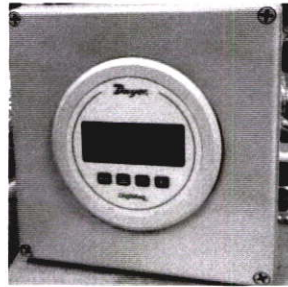
รูปที่ 3.5 ภาพติดตั้งชุด orifice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

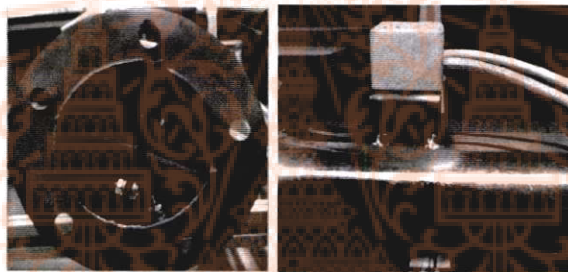
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.4 ชุดวัดความดันอากาศ (Pressure Differential) วัดความแตกต่างความดันจากจากชุดวัดอัตราการไหลที่มีความละเอียด 0.01 inH₂O สามารถวัดความแตกต่างความดันในช่วง 0.1-10.66 inH₂O



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์วัดความดันอากาศยี่ห้อ Dwyer

3.3.5 ชุดให้ความร้อน (Heater) ชนิดขดลวดที่มีขนาด 5 KW โดยแบ่งเป็น 2 ตัว ตัวละ 2.5 KW ติดตั้งอยู่บริเวณทางเข้าและทางออกของท่อ



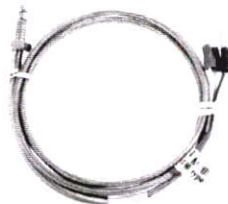
ก. ด้านหน้า

ข. ด้านข้าง

รูปที่ 3.7 อุปกรณ์เพิ่มอุณหภูมิแบบขดลวด

3.3.6 RTD (Resistance Temperature Detector)

RTD เป็นทรานสดิวเซอร์ (transducer) วัดอุณหภูมิ โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ การทำงานต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกป้อนให้กับวงจร โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุและอุณหภูมิแสดงความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานของโลหะจะมีค่าสูงขึ้นในการใช้งานควรเลือกใช้วัสดุที่ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานสูง เพราะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไปเพียงเล็กน้อยค่าความต้านทานของโลหะจะเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน



รูปที่ 3.8 ชุดวัดอุณหภูมิ RTD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

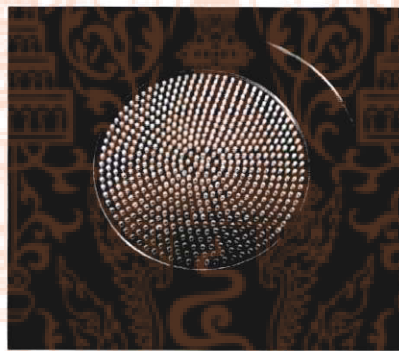
3.3.7 ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control) ทำการควบคุมการปิด-เปิดของชุดให้ความร้อน โดยมีหลักการทำงานคือ ทำการตั้งค่าอุณหภูมิของอากาศเข้าไว้ค่าหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิอากาศต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้แผนควบคุมจึงส่งสัญญาณไปยังชุดให้ความร้อนเพื่อเปิดการทำงาน และในทางกลับกันเมื่ออากาศมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ตั้งไว้แผนควบคุมก็จะส่งสัญญาณไปยังชุดให้ความร้อนอีกครั้งเพื่อสั่งปิดการทำงาน



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ยี่ห้อ TOHO TTM-i4N

3.3.8 แผ่นกระจายลม

ทำจากอะคริลิกหนา 0.5 มิลลิเมตร ที่เจาะรู มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.10 แผ่นกระจายลม

3.4 ชุดหอบแห้ง

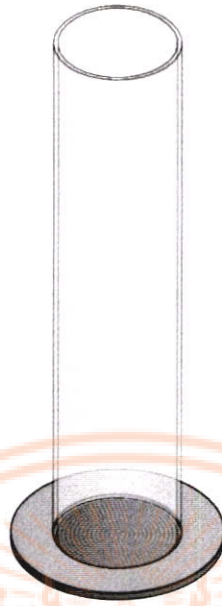
3.4.1 หอบแห้งแบบทั่วไป

มีลักษณะเป็นท่อเปล่าทรงกระบอกวัสดุทำจากอะคริลิกใส ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร และสูง 1000 มิลลิเมตร ภายใต้หอบแห้งมีแผ่นกระจายลม เพื่อกระจายทิศทางของอากาศให้เข้าสู่หอบแห้งได้อย่างสม่ำเสมอ ดังรูป 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

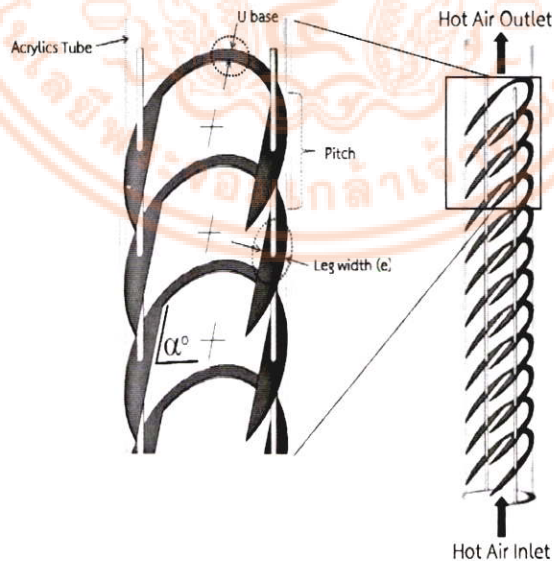
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.11 หอบแห้งแบบทั่วไป

3.4.2 หอบแห้งที่ติดตั้งแผ่นกันสร้างความปลอดภัย

การติดตั้งชุดอุปกรณ์สร้างความปลอดภัยแบบแผ่นกันจะถูกใส่ไว้ภายในหอบแห้งแบบธรรมดา โดยที่แผ่นกันแต่ละแผ่นนั้นจะทำมุม 45 องศา มีระยะห่างเท่ากับครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง วัสดุทำจากอลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นวงรี และมีช่องเปิดบริเวณตรงกลางและปลายด้านล่างของแผ่น ดังรูปที่ 3.12

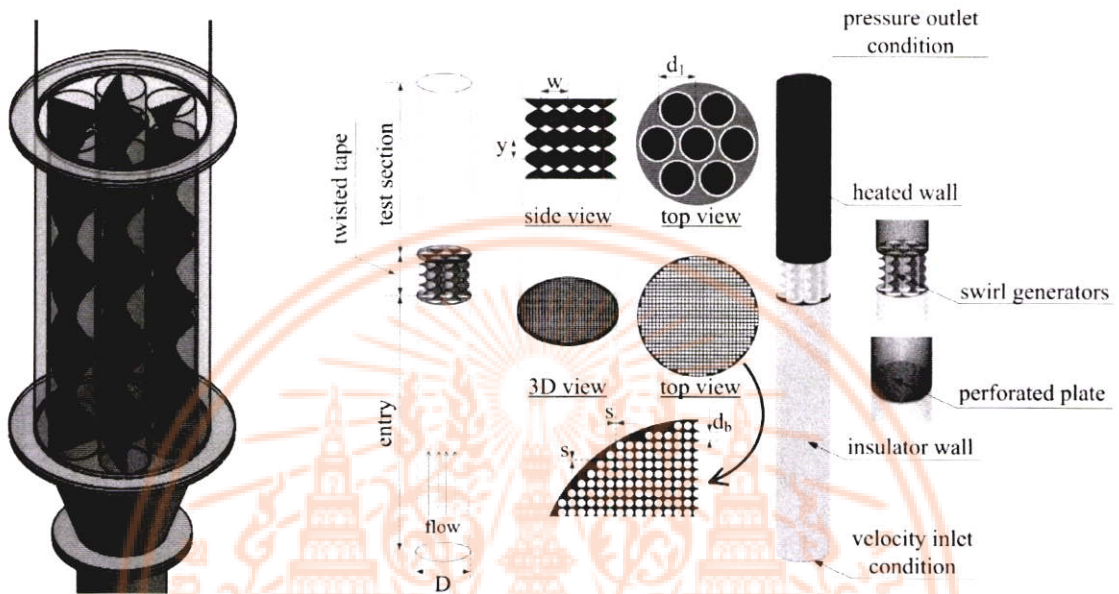


รูปที่ 3.12 ชุดแผ่นกันสร้างความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 หอบแห้งที่ติดตั้งแผ่นบิดสร้างการไหลแบบหมุนควง

แผ่นบิดสร้างการไหลแบบหมุนควงจะถูกติดตั้งไว้ด้านล่างของหอบแห้งแบบทั่วไป โดยอากาศจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นบิดเพื่อทำให้ลักษณะการไหลของอากาศเป็นการไหลแบบหมุนควงก่อนที่จะผ่านแผ่นกระจายลมและเข้าสู่หอบแห้ง ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ชุดแผ่นบิดสร้างการไหลแบบหมุนควง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

บทที่ 4 ผลการวิจัย

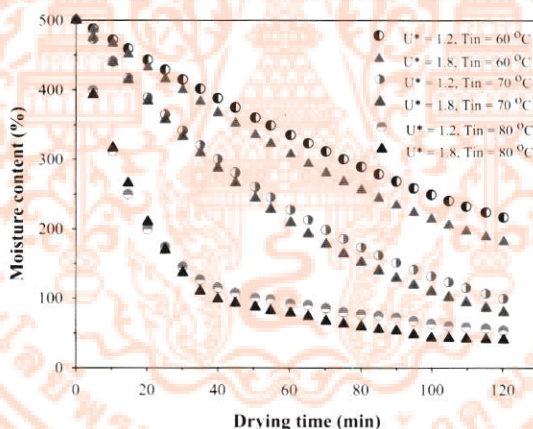
ผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับผลงานวิจัยไปเผยแพร่ตามงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ โดยมีการพัฒนาหอบแห้ง และปรับเปลี่ยนความเร็ว อุณหภูมิอากาศให้เหมาะสมกับการทดลอง

4.1 พฤติกรรมอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบด

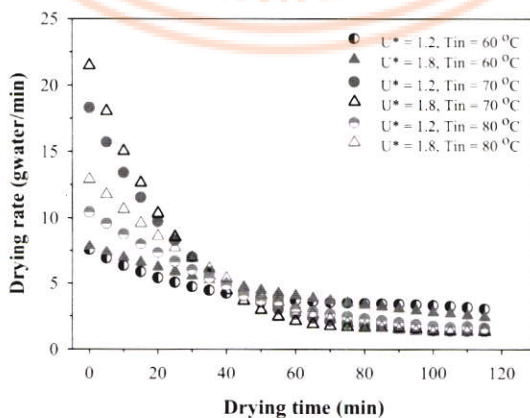
การศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด โดยใช้อุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 60 °C, 70 °C และ 80 °C ความเร็วจำเพาะของอากาศ (superficial air velocities, U^*) เท่ากับ 1.2 และ 1.8 ซึ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความชื้นของเมล็ดพริกไทยเป็นหลัก ภายใต้อิทธิพลของอุณหภูมิ และความเร็วของอากาศ

4.1.1 อิทธิของอุณหภูมิอากาศ

จากรูปที่ 4.1 สำหรับทุกๆ เหตุการณ์การทดลองความชื้นของเมล็ดพริกไทยจะลดลงเมื่อเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในระยะแรกเนื่องจากการระเหยของน้ำที่ผิวของเมล็ดพริกไทยได้มากกว่าจากนั้นกระบวนการอบแห้งจะช้าลงเมื่อความชื้นบนพื้นผิวทั้งหมดถูกระเหยออกไป ทำให้เซลล์ผิวของวัสดุเล็กลง น้ำที่อยู่ภายในวัสดุที่เคลื่อนที่ออกมาซึ่งผิวและระเหยออกได้ยาก สามารถแสดงได้จากค่าอัตราการอบแห้งดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.2 อิทธิพลของความเร็วลมของอากาศ

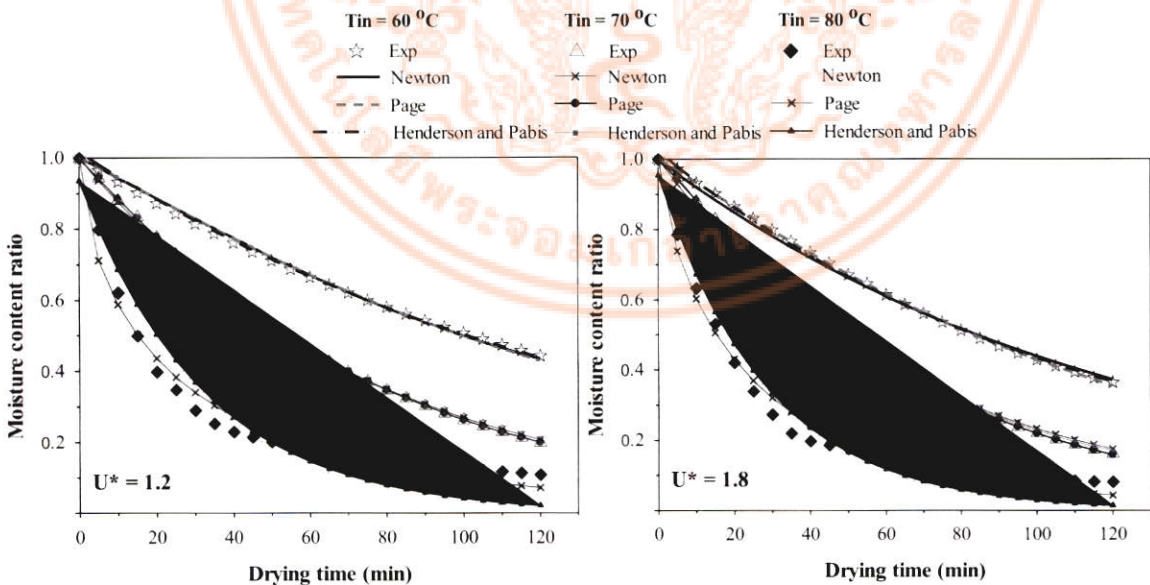
จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นความชื้นของเมล็ดพริกไทยลดลง แต่ส่งผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในช่วงแรกของการอบแห้ง หลังเวลาการอบแห้งผ่านไป 40 นาทีความเร็วจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น

4.1.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งพริกไทย โดยใช้แบบจำลอง 3 แบบได้แก่ Newton, Page และ Henderson and Pabis ซึ่งเป็นสามารเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) ที่มีความความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความชื้น (MR) และเวลาในการอบแห้ง (t) สมการที่พัฒนาแล้วจะมีค่าพารามิเตอร์ a, k และ n ที่มีฟังก์ชันเป็นสัมการพหุนาม (Polynomials) ที่มีอุณหภูมิ (T) และความเร็วจำเพาะของอากาศ (U*) อยู่ และสำหรับความแม่นยำของสมการถูกกำหนดด้วยผลของ RMSE ต่ำที่สุด และ R² สูงที่สุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 จากผลการทดลองพบว่าแบบจำลองของ Page ให้ค่า RMSE เท่ากับ 0.000017387 ที่น้อยที่สุด และ R² มากที่สุด เท่ากับ 0.993478

ตารางที่ 4.1 แสดงผลลัพธ์ทางสถิติสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Model	Model equation	Drying parameters	R ²	RMSE
Newton	$MR = \exp(-kt)$	$k = -0.09362 + 0.03646U^* + 0.0008266T$	0.977491	0.000046698
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = -0.4537 + 0.1712U^* + 0.003393T$ $n = 1.2671 + 0.7278U^* - 0.009694T$	0.993478	0.000017387
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$a = 1.4258 - 0.1280U^* - 0.003409T$ $k = -0.08155 + 0.03237U^* + 0.0007336T$	0.980257	0.000041321



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาการอบแห้งโดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ทำนายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

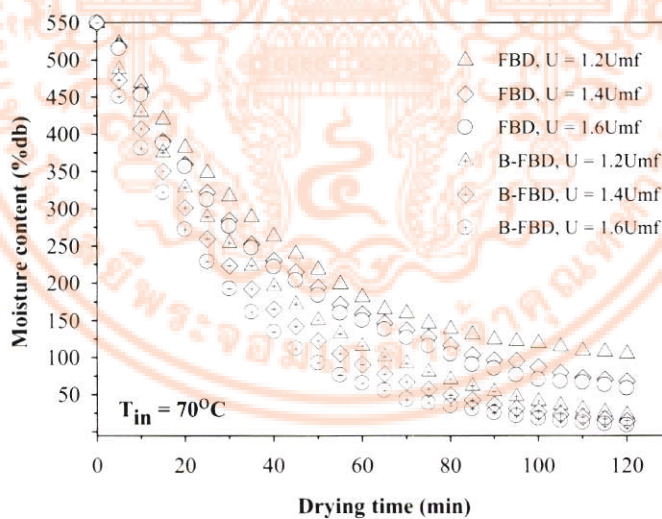
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2 พฤติกรรมการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน

การศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน โดยใช้อุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 70°C ความเร็วจำเพาะของอากาศ (superficial air velocities, U^*) เท่ากับ $1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$ และทำการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบทั่วไปกับฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน สามารถอธิบายผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ 1. อิทธิพลของความเร็วของอากาศ 2. อิทธิพลของชนิดเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด และ 3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.2.1 อิทธิพลของความเร็วของอากาศ

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะเห็นได้ชัดว่าปริมาณความชื้นของเมล็ดพริกไทยลดลงตามเวลาของการทำแห้งทั้งใน เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบทั่วไป (typical fluidized-bed dryer : FBD) กับฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators : B-FBD) ที่ความเร็วของอากาศต่างๆ และปริมาณความชื้นในช่วงเริ่มต้นจะลดลงทันที หลังจากนั้นปริมาณความชื้นจะค่อยๆ ลดลงในระหว่างกลไกการพาความร้อนจากอัตราการระเหยของความร้อนและการถ่ายเทมวลระหว่างเมล็ดพริกไทยและอากาศร้อน ในเวลาเดียวกัน อัตราการอบแห้งกับปริมาณความชื้นของเมล็ดพริกไทย มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น เพราะอากาศร้อนจะพาความชื้นออกจากเมล็ดพริกไทย โดยที่ความเร็วของอากาศในการพาสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการนำความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น และพบว่าอิทธิพลของความเร็วของอากาศต่อการอบแห้งเมล็ดพริกไทยแสดงดังรูปที่ 4.6 ในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน มีความสำคัญมากกว่าใน เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบทั่วไป

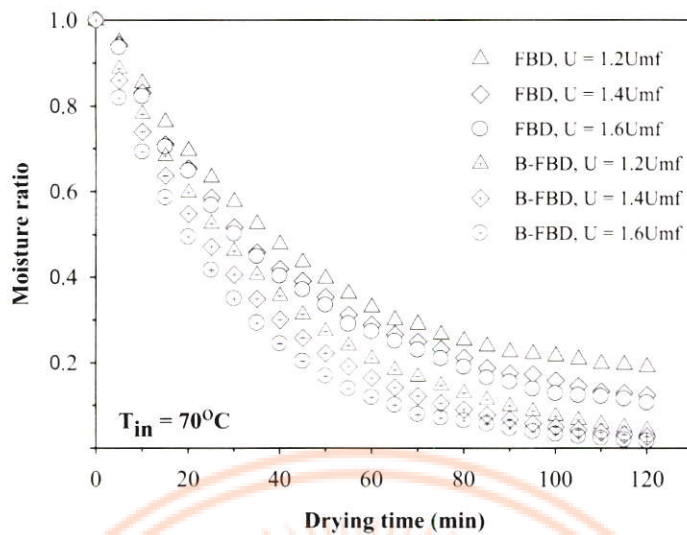


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้ง

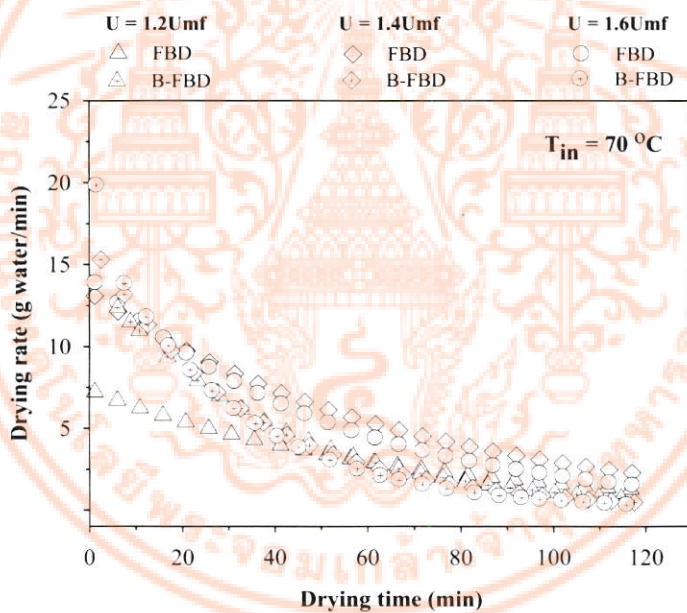
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความชื้นและเวลาในการอบแห้ง



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้ง

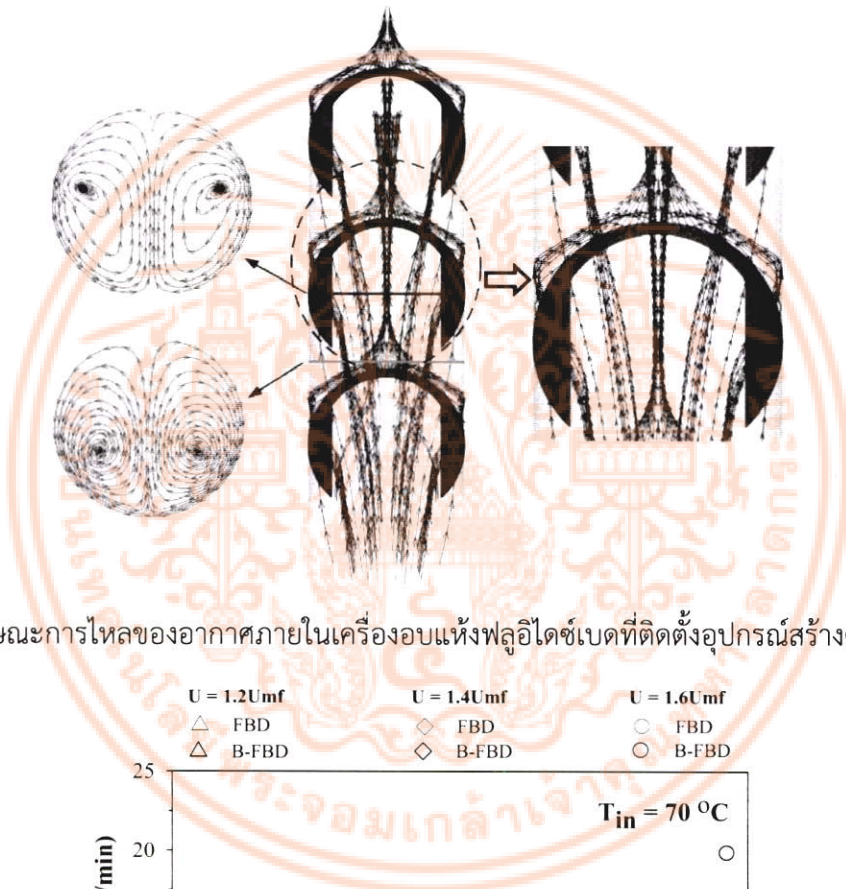
4.2.2 อิทธิพลของชนิดเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด

ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบทั่วไปกับฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน พบว่าอัตราการอบแห้งของฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนสูงกว่าเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบทั่วไปที่ความเร็วของอากาศมีค่าเท่ากัน และสูงที่สุดที่ความเร็วจำเพาะของอากาศเท่ากับ $1.6U_{mf}$ เนื่องจากอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนทำให้ลักษณะการไหลของอากาศเกิดขึ้นทั้งสองแนวคือตามแนวแกนและแนวสัมผัส (ดังรูป 4.7) ทำให้เมล็ดพริกไทยและอากาศร้อนเกิดการผสมกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

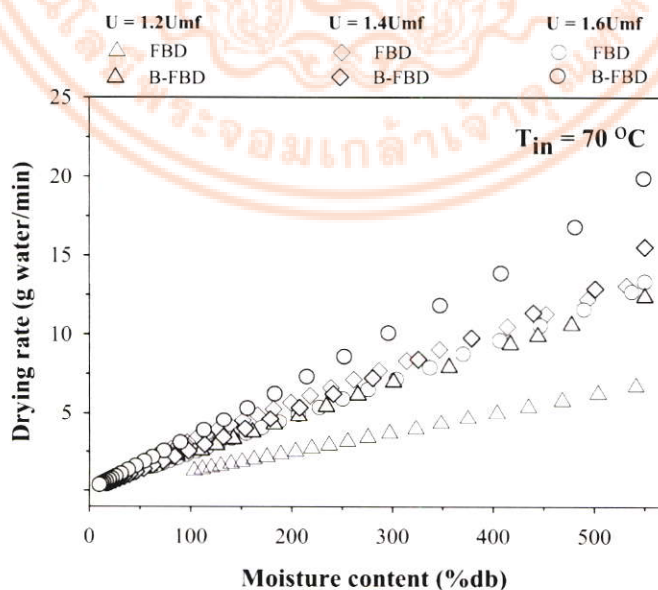
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

มวลและพลังงานเพิ่มมากขึ้น จากรูป 4.6 สำหรับอัตราการอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 ช่วง 1. ช่วงอัตราเริ่มต้น และ 2. ช่วงอัตราอบแห้งคงที่ ในช่วงแรกอัตราการอบแห้งจะสูงที่สุดอยู่ในช่วงเวลา 0 ถึง 25 นาทีแรก โดยมีค่าเฉลี่ยอัตราการทำให้แห้งของเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน กับฟลูอิดไรซ์เบดแบบทั่วไปประมาณ 57% และ 31% ตามลำดับประมาณ ที่ความเร็วจำเพาะ $1.6U_{mf}$ และจะเข้าสู่ช่วงอัตราการทำให้แห้งคงที่ จะเห็นได้ชัดว่า จากรูป 4.8 และ 4.9 อัตราการอบแห้งจะแปรผันเป็นเส้นตรงกับค่าความชื้นและอัตราส่วนความชื้นและพบว่าที่ความเร็วจำเพาะเดียวกันเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนมีค่าอัตราการทำให้แห้งสูงกว่าเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดแบบทั่วไป โดยมีค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยประมาณ 2.83, 1.91 และ 2.69 กรัม น้ำ / นาที ที่ $1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$ ตามลำดับในช่วงเวลาการอบแห้ง 0-25 นาที



รูปที่ 4.7 ลักษณะการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน

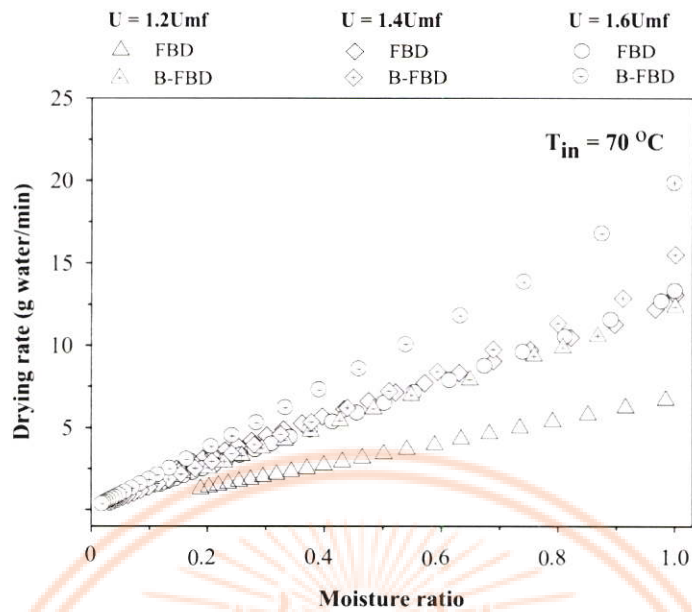


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้น

4.2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของเมล็ดพริกไทยกับเวลาในการทำแห้งที่มีความเร็วของอากาศต่างกัน ($1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$) การทดลองถูกทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 5 แบบ ได้แก่ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 4.10 ถึง 11 ซึ่งในการออกแบบการจำลองสมการจะแบ่งออกเป็นสมการสำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดแบบทั่วไป (FBD) และฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (B-FBD) โดยพิจารณาความแม่นยำของสมการจากค่า RMSE, chi-square (χ^2) ที่น้อยที่สุด และ R^2 มากที่สุด พบว่าในแบบจำลองของ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic มีค่า R^2 0.9693263 ถึง 0.9978796, RMSE 0.0105659 ถึง 0.3204202 และ χ^2 เท่ากับ 0.0001163 ถึง 0.106947 สำหรับ FBD และมีค่า R^2 0.9993927 ถึง 0.9995071, RMSE 0.0011063 ถึง 0.0034642 และ χ^2 เท่ากับ 0.00000819 ถึง 0.0000125 สำหรับ B-FBD ซึ่งแน่นอนว่าแบบจำลองของ Logarithmic ให้ค่าที่ดีที่สุด คือ R^2 สูงสุด 0.9995071 ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำสุด เท่ากับ 0.0011063 และ 0.00000819 ตามลำดับ นั้นหมายความว่าแบบจำลองของ Logarithmic เป็นแบบที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายความชื้นของเมล็ดพริกไทยในช่วงการอบแห้ง 120 นาที และที่ความเร็ว $1.2U_{mf}$ ถึง $1.6U_{mf}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

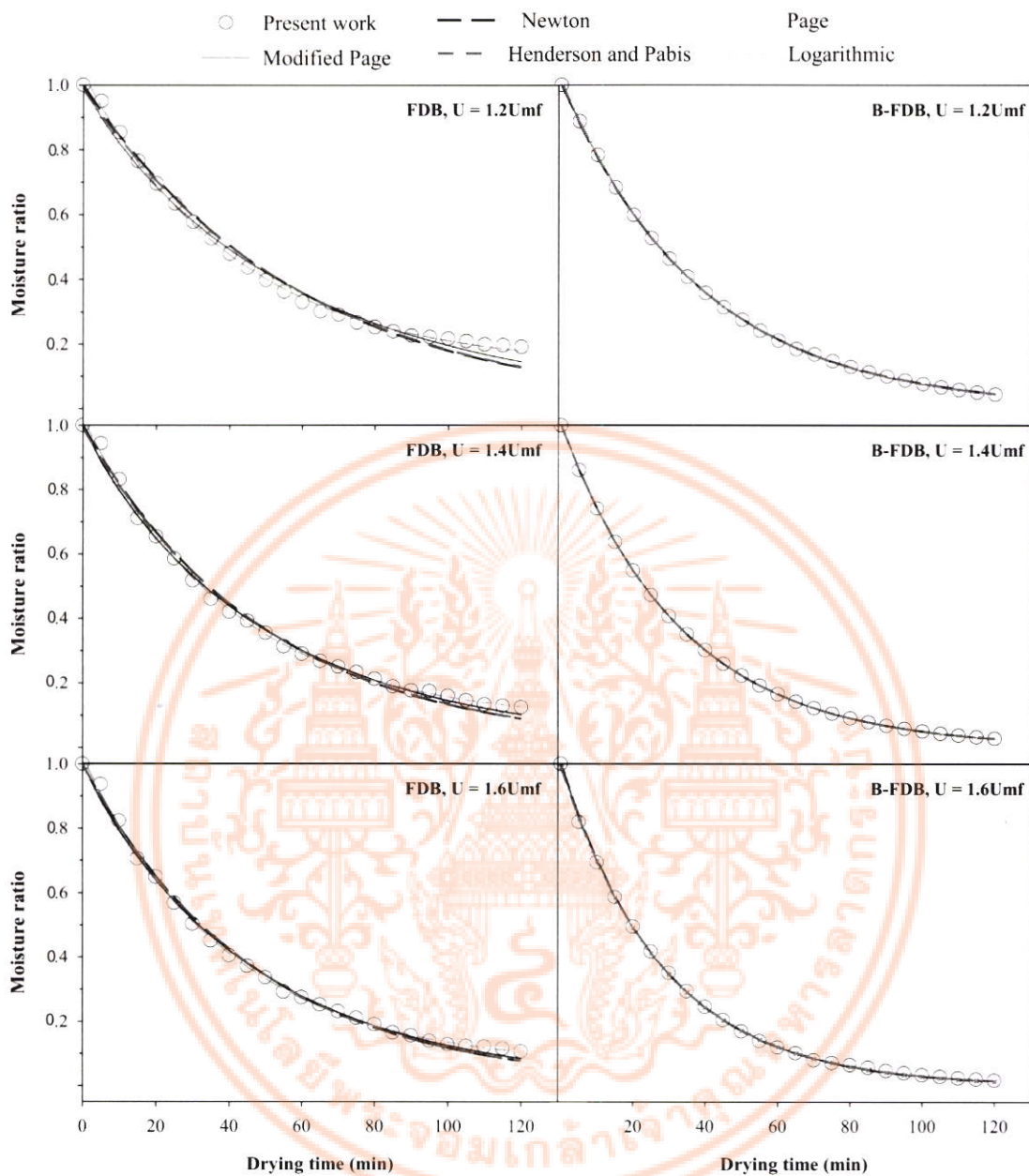
ตารางที่ 4.2 แสดงผลลัพธ์ทางสถิติสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ($1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$ โดยที่ $U^* = U/U_{mf}$)

	Model		R^2	RMSE	χ^2
FBD	Newton	$k = -0.038072 + 0.072488U^* - 0.022063U^{*2}$	0.9955892	0.023295	0.0011305
	Page	$k = -0.053355 + 0.113235U^* - 0.039825U^{*2}$ $n = 0.917577 - 0.105542U^* + 0.079512U^{*2}$	0.9941618	0.0195168	0.0007936
	Modified Page	$k = -0.041962 + 0.077948U^* + 0.079512U^{*2}$ $n = 0.917577 - 0.105542U^* + 0.05265U^{*2}$	0.9693263	0.3204202	0.106947
	Henderson and Pabis	$a = 1.052835 - 0.117995U^* + 0.05265U^{*2}$ $k = -0.036132 + 0.068818U^* - 0.020538U^{*2}$	0.995545	0.0230804	0.0028944
	Logarithmic	$a = 0.306802 + 0.761528U^* - 0.218738U^{*2}$ $k = 0.001462 + 0.030545U^* - 0.0098U^{*2}$ $c = 1.00201 - 1.142453U^* + 0.345338U^{*2}$	0.9978796	0.0105659	0.0001163
	B-FBD	Newton	$k = 0.021552 - 0.011955U^* + 0.01285U^{*2}$	0.9993927	0.0034642
Page		$k = 0.047047 - 0.0575U^* + 0.032375U^{*2}$ $n = 0.883947 + 0.242713U^* - 0.114163U^{*2}$	0.9994227	0.0028532	8.48E-06
Modified Page		$k = 0.023617 - 0.015425U^* + 0.014275U^{*2}$ $n = 0.883947 + 0.242713U^* - 0.114163U^{*2}$	0.99948	0.0029674	9.172E-06
Henderson and Pabis		$a = 0.958238 + 0.098688U^* - 0.049188U^{*2}$ $k = 0.018653 - 0.00656U^* + 0.010475U^{*2}$	0.9994917	0.0028033	8.727E-06
Logarithmic		$a = 0.942817 + 0.124683U^* - 0.059888U^{*2}$ $k = 0.024085 - 0.015252U^* + 0.013912U^{*2}$ $c = 0.039725 - 0.065283U^* + 0.026363U^{*2}$	0.9995071	0.0011063	8.19E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

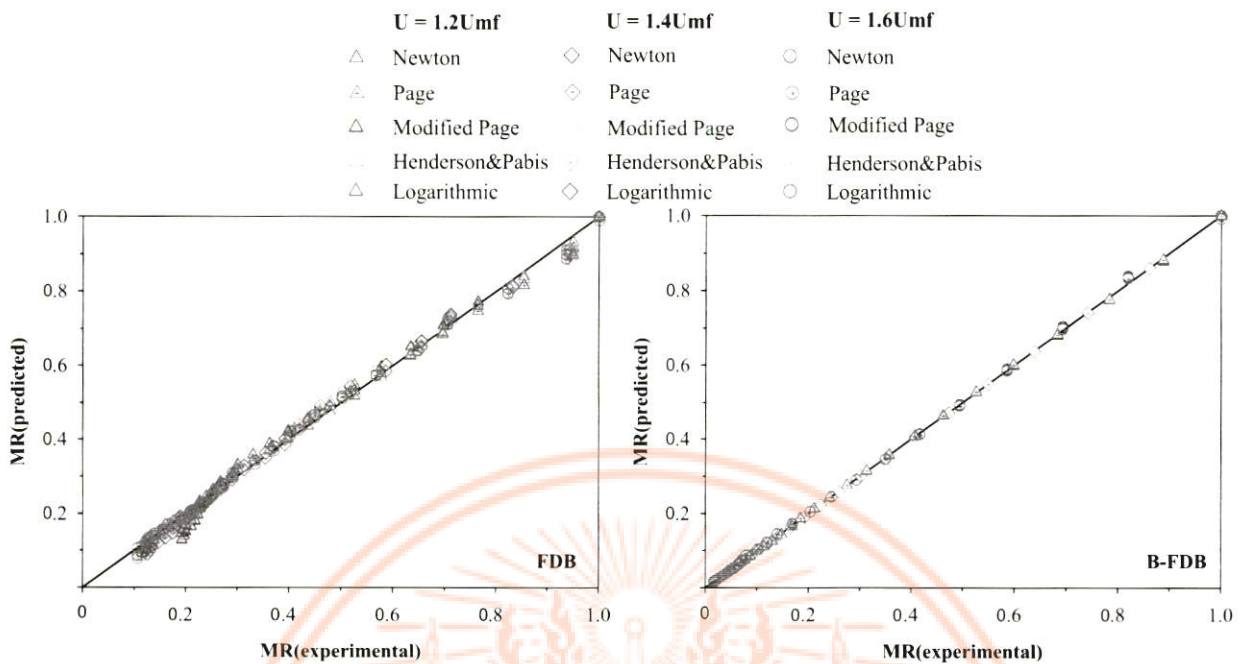


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาการอบแห้งโดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ทำนายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นจากผลการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลองต่างๆ

4.3 ลักษณะการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งแผ่นบิดเพื่อสร้างการไหลแบบหมุนควง

ศึกษาลักษณะการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งแผ่นบิดเพื่อสร้างการไหลแบบหมุนควง (swirling fluidized bed dryer : S-FBD) โดยชุดสร้างการไหลแบบหมุนควงจะติดตั้งที่ทางเข้าของหอบแห้ง ทำการทดลองเพื่อหาอิทธิพลของความเร็วจำเพาะของอากาศ ($U^* = U / U_{mf} = 1.0, 1.1$ และ 1.2) ที่ส่งผลต่อปริมาณความชื้น ศึกษาลักษณะการไหลของอากาศภายในหอบแห้ง และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.3.1 อิทธิพลของความเร็วของอากาศต่อปริมาณความชื้น

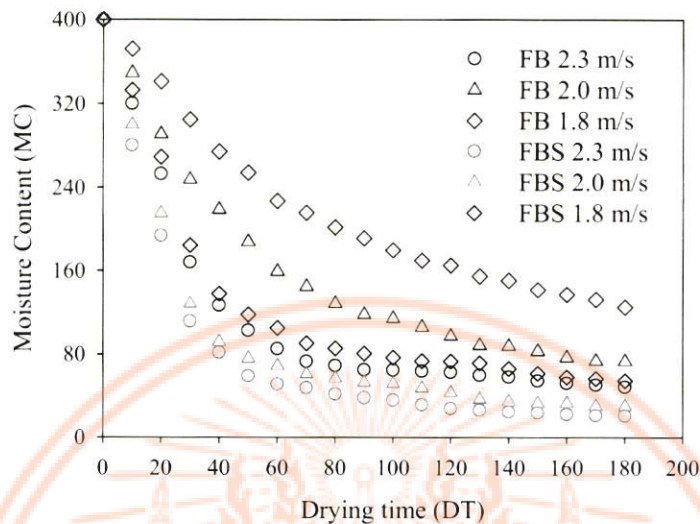
อิทธิพลของความเร็วของอากาศต่อผลการการอบแห้งที่แสดงในรูปแบบของความชื้น อัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.12-4.14 พบว่าโดยทั่วไปแล้วความชื้น และอัตราการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยจะลดลงทันทีในขั้นตอนแรกของการอบแห้ง (5-60 นาที) และหลังจากนั้นปริมาณความชื้นจะค่อยๆลดลง ในขณะที่เดียวกันเมื่อทำการเพิ่มความเร็วของอากาศจะทำให้ความชื้นลดลง โดยความเร็วจำเพาะของอากาศสูงสุดทำให้อัตราการแห้งดีที่สุด จาก 1.2, 1.1 และ 1.0 ลดลงตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของตัวพาความชื้น (อากาศ) ที่เพิ่มมากขึ้นสามารถนำความชื้นออกจากวัสดุได้มากกว่าในเวลาการอบแห้งเท่ากัน และที่ความเร็วจำเพาะเดียวกันสำหรับเครื่องอบแห้งสร้างการไหลแบบหมุนควง (S-FBD) จะให้อัตราการอบแห้งดีกว่าเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) เพราะเทคนิคการสร้างการไหลแบบหมุนควงเป็นวิธีการอบแห้งที่เพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้งโดยทำให้ภายในหอบแห้งเกิดความปั่นป่วนสูงขึ้น จากลักษณะการไหลของอากาศที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

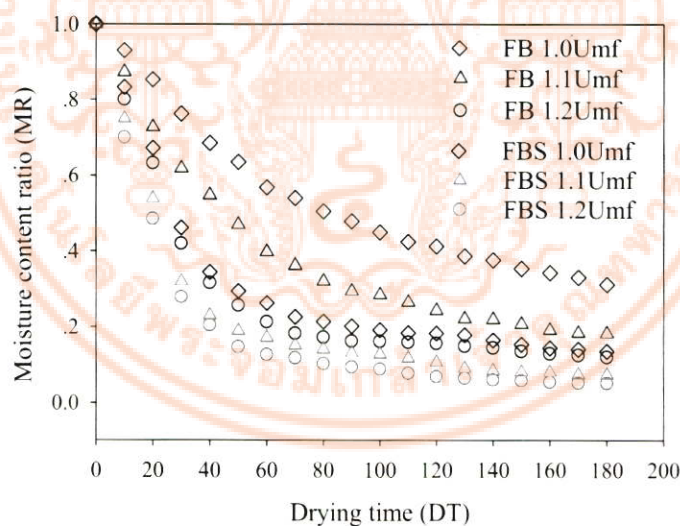
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หมูนควงก่อนเข้าสู่หอบแห้ง ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มการแลกเปลี่ยนมวลและพลังงานของเมล็ดพริกไทยกับอากาศร้อน ส่งผลให้ความสามารถในการระเหยน้ำออกจากเมล็ดพริกไทยมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาการอบแห้ง

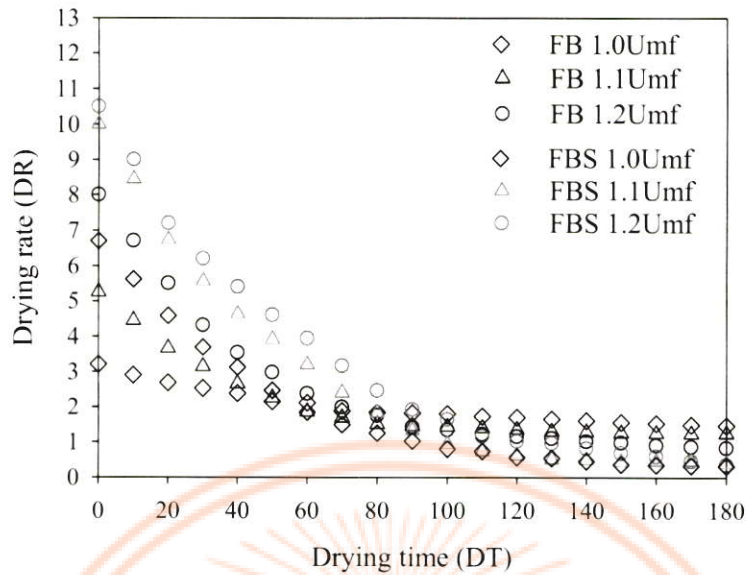


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้ง

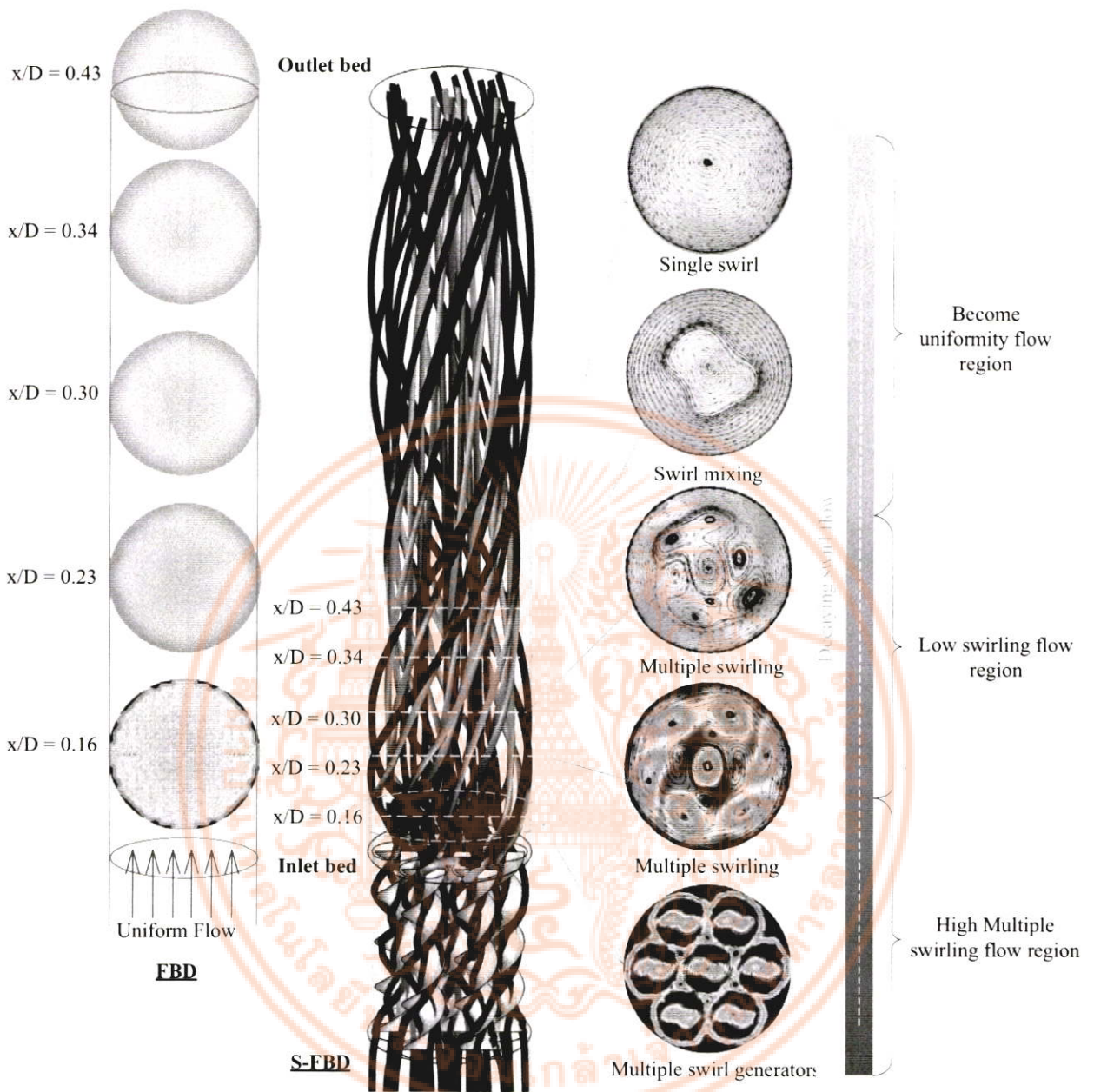
4.3.2 ลักษณะการไหลของอากาศภายในหอบแห้ง

สำหรับการเคลื่อนที่ของอากาศภายในหอบแห้งเกิดจากการทดลองและการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ที่ความเร็วจำเพาะของอากาศแตกต่างกัน ($U^* = U/U_{mf} = 1.0, 1.1$ และ 1.2) ดังแสดงในรูปที่ 4.15-4.17 ในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรส์เบดแบบทั่วไป (FBD) เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการไหลกับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไรส์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนควง (S-FBD) ที่ความเร็วจำเพาะเท่ากับ 1.0 ในรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ชัดว่าการเคลื่อนที่ของอากาศในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรส์เบดแบบทั่วไป (FBD) จะมีความสม่ำเสมอหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อความสูงภายในหอบแห้งเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนความสูงต่อพื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง ($x/D = 0.12, 0.23, 0.30, 0.34$ และ 0.43) แต่เครื่องอบแห้งฟลูอิดไรส์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนควง (S-FBD) จะมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดโดยมีลักษณะเป็นกระแสการหมุนควง ซึ่งจุดที่อยู่ใกล้แหล่งกำเนิดของการไหลจะมีความเข้มข้นของกระแสมากที่สุดทำให้เกิดความปั่นป่วน อย่างรุนแรงที่ระยะ x/D เท่ากับ 0.12 ที่เป็นตำแหน่งติดกับเมล็ดพริกไทยโดยตรงทำให้เกิดการผสมกันระหว่างเมล็ดพริกไทยกับอากาศร้อนได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้การระเหยน้ำออกจากเมล็ดพริกไทยเป็นไปอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่แบบหมุนควงนี้จะค่อยๆ สลายตัวไป โดยแสดงให้เห็นจากการลดความเร็วของอากาศ และการเพิ่มขึ้นของระยะหอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

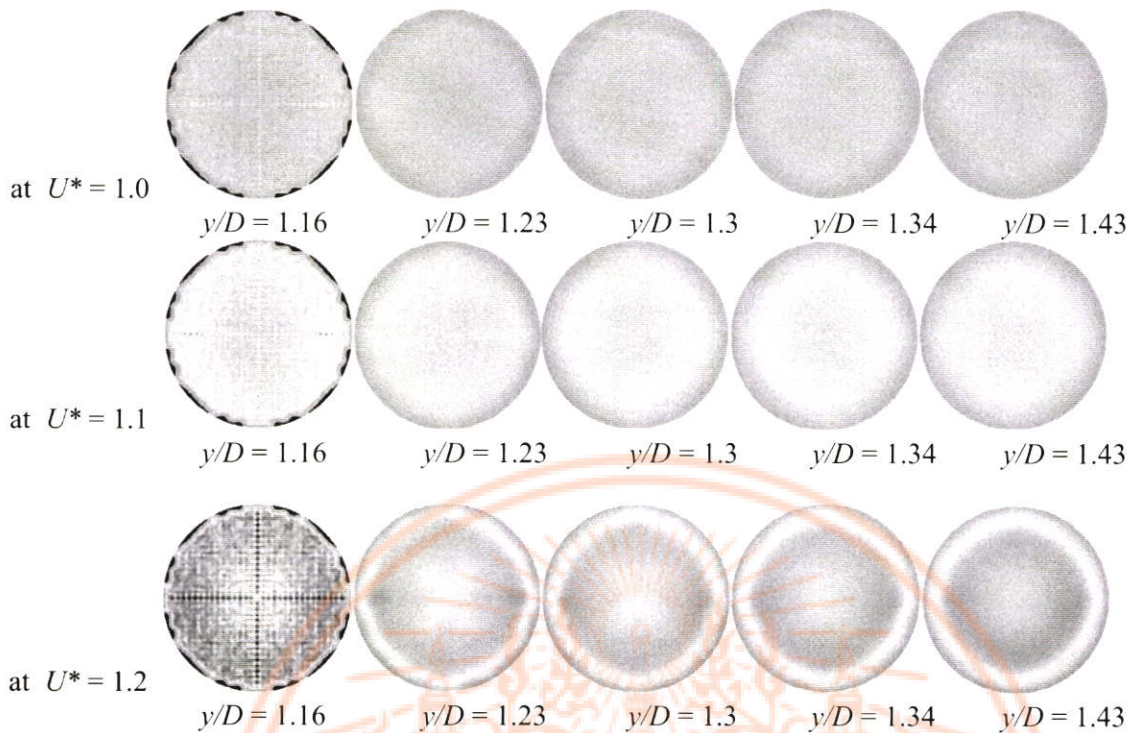


รูปที่ 4.15 ลักษณะการไหลของอากาศในหอบแห้งของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไรเซชันที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนควง (S-FBD)

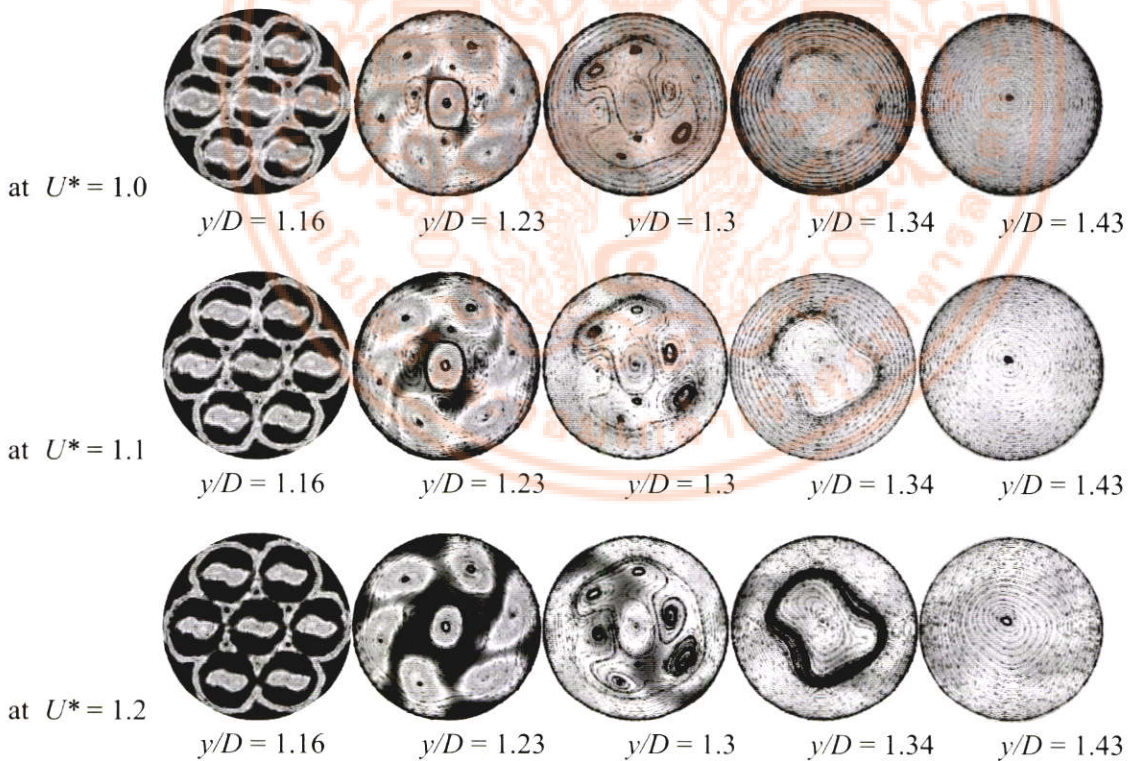
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก) FBD



(ข) S-FBD

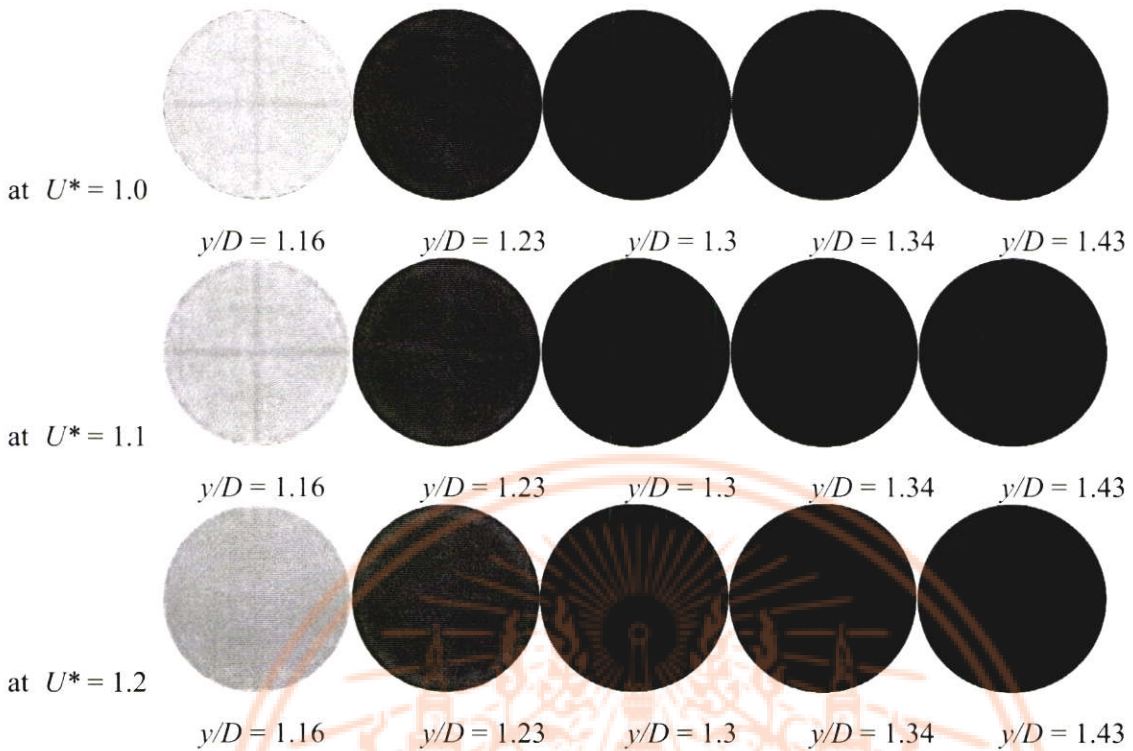
รูปที่ 4.16 ลักษณะการไหลของอากาศในท่อของเครื่องอบแห้งของเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบต (ก) เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบต

แบบทั่วไป (FBD) และ (ข) เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบตที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนควง (S-FBD)

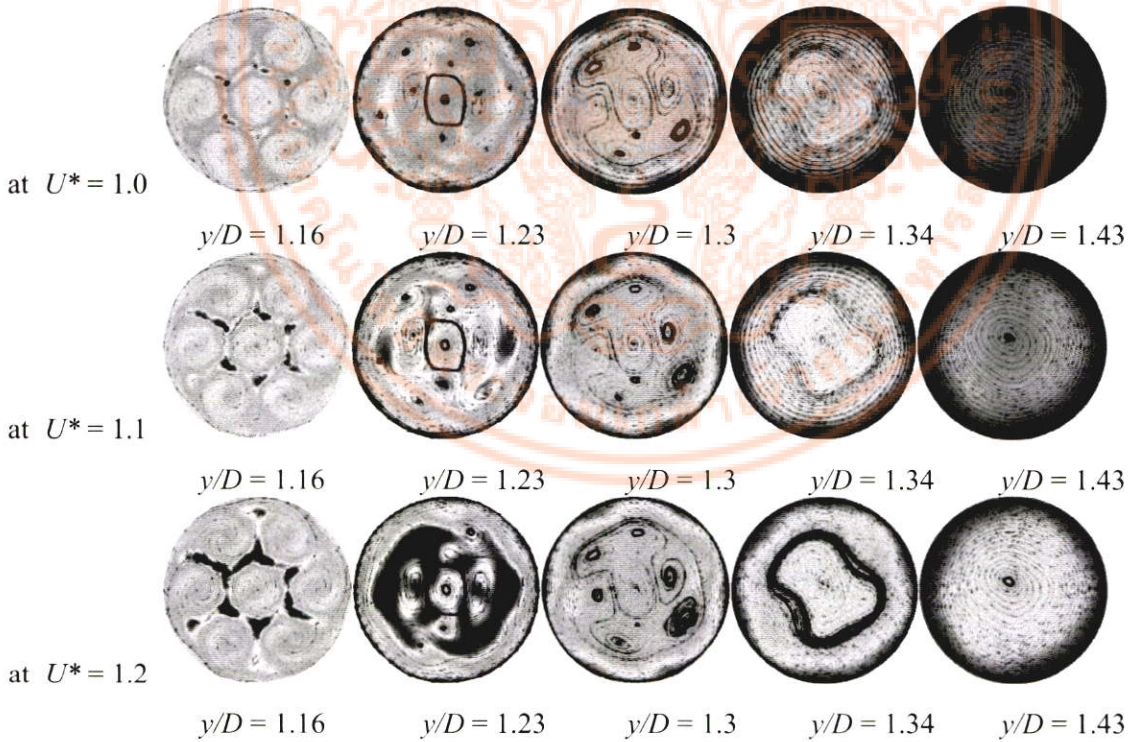
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก) FBD



(ข) S-FBD

รูปที่ 4.17 พลังงานในหอบแห้งของเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบต (ก) เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบตแบบทั่วไป (FBD)

และ (ข) เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบตที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนควง (S-FBD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของเมล็ดพริกไทยกับเวลาในการทำแห้งที่มีความเร็วของอากาศต่างกัน ($U^* = U/U_{mf} = 1.0, 1.1$ และ 1.2) การทดลองถูกทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 5 แบบ ได้แก่ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic ดังแสดงสมการในตารางที่ 3 และนำสมการมาพัฒนาเพื่อหาพารามิเตอร์การอบแห้ง (a, k และ n), RMSE และ R^2 ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 4.9 ถึง 10 ซึ่งในการออกแบบการจำลองสมการจะแบ่งออกเป็นสมการสำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) และฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนควง (S-FBD) โดยพิจารณาความเหมาะสมของสมการจากค่า RMSE, chi-square (χ^2) ที่น้อยที่สุด และ R^2 มากที่สุด และพบว่าแบบจำลองของ Logarithmic ให้ค่า RMSE, chi-square (χ^2) และ R^2 เท่ากับ 0.0105659, 0.0001163 และ 0.9978796 สำหรับ FBD และ 0.0011063, 8.19E-06 และ 0.9995071 สำหรับ S-FBD โดยสามารถใช้แบบจำลองของ Logarithmic ในการทำนายการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดทั้งสองแบบได้เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Model name	Model	References
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Doymaz and Pala [24]
Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Zhang and Litchfield [25]
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Ayensu [26]
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis [27]
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt)+c$	Kassem [28]

ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์ทางสถิติสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ($1.0U_{mf}$, $1.1U_{mf}$ และ $1.2U_{mf}$ โดยที่ $U^* = U/U_{mf}$)

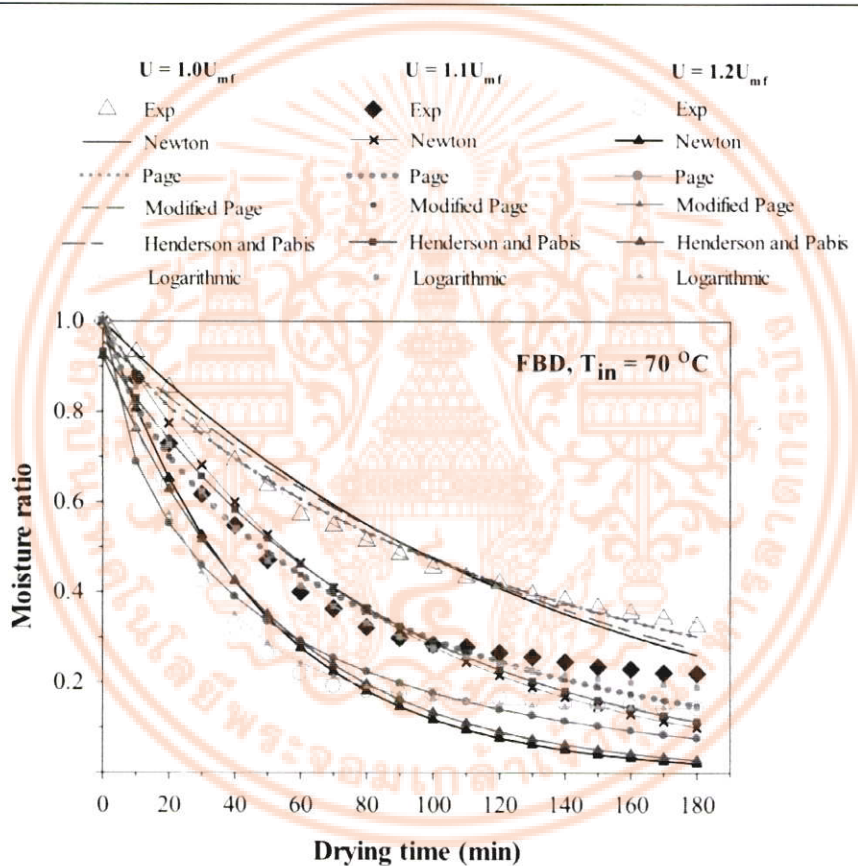
	Model		R^2	RMSE	χ^2
FBD	Newton	$k = -0.038072+0.072488U^*-0.022063U^{*2}$	0.9955892	0.023295	0.0011305
	Page	$k = -0.053355+0.113235U^*-0.039825U^{*2}$ $n = 0.917577-0.105542U^*+0.079512U^{*2}$	0.9941618	0.0195168	0.0007936
	Modified Page	$k = -0.041962+0.077948U^*+0.079512U^{*2}$ $n = 0.917577-0.105542U^*+0.05265U^{*2}$	0.9693263	0.3204202	0.106947
	Henderson and Pabis	$a = 1.052835-0.117995U^*-0.05265U^{*2}$ $k = -0.036132+0.068818U^*-0.020538U^{*2}$	0.9955545	0.0230804	0.0028944
	Logarithmic	$a = 0.306802+0.761528U^*-0.218738U^{*2}$ $k = 0.001462+0.030545U^*-0.0098U^{*2}$ $c = 1.00201-1.142453U^*+0.345338U^{*2}$	0.9978796	0.0105659	0.0001163

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Model			R ²	RMSE	χ ²
S-FBD	Newton Page	$k = 0.021552 - 0.011955U^* + 0.01285U^{*2}$	0.9993927	0.0034642	1.25E-05
		$k = 0.047047 - 0.0575U^* + 0.032375U^{*2}$	0.9994227	0.0028532	8.48E-06
		$n = 0.883947 + 0.242713U^* - 0.114163U^{*2}$			
	Modified Page	$k = 0.023617 - 0.015425U^* + 0.014275U^{*2}$	0.99948	0.0029674	9.172E-06
		$n = 0.883947 + 0.242713U^* - 0.114163U^{*2}$			
	Henderson and Pabis	$a = 0.958238 - 0.098688U^* - 0.049188U^{*2}$	0.9994917	0.0028033	8.727E-06
		$k = 0.018653 - 0.00656U^* + 0.010475U^{*2}$			
	Logarithmic	$a = 0.942817 + 0.124683U^* - 0.059888U^{*2}$	0.9995071	0.0011063	8.19E-06
		$k = 0.024085 - 0.015252U^* + 0.013912U^{*2}$			
		$c = 0.039725 - 0.065283U^* - 0.026363U^{*2}$			



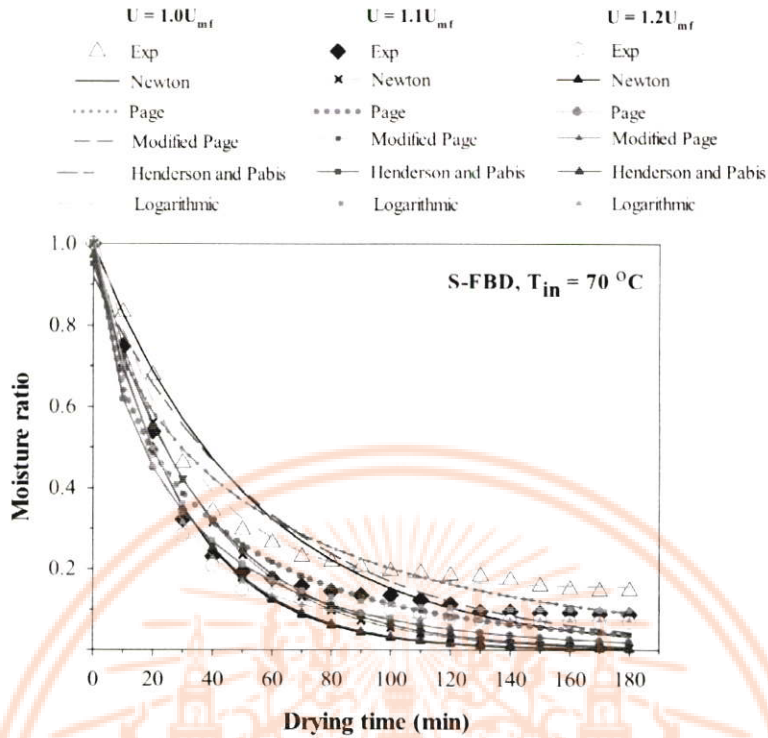
(ก) FBD

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาการอบแห้งโดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ทำนายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

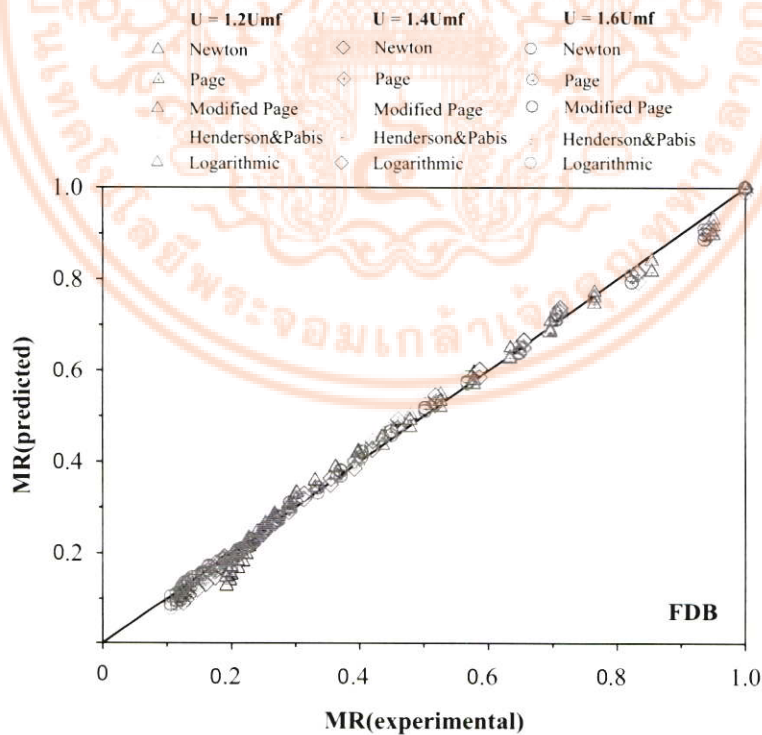
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ข) S-FBD

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาการอบแห้งโดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ทำนายได้

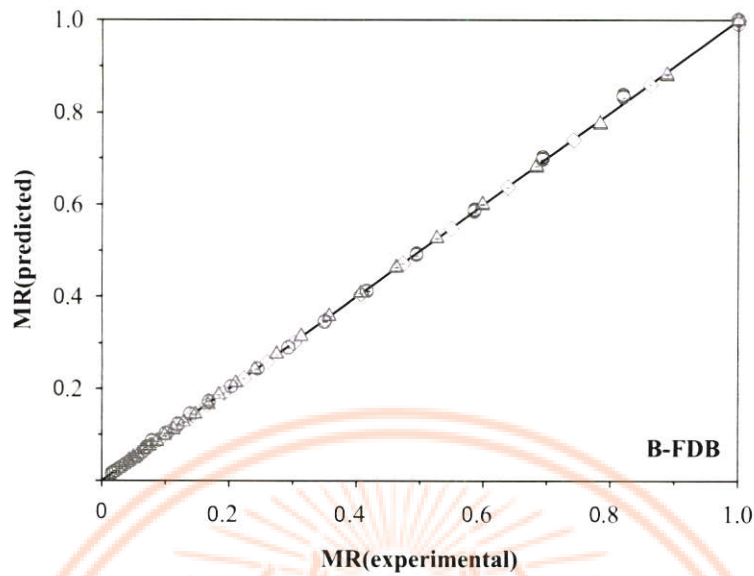


(ก) FBD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ข) B-FBD

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นจากผลการทดลองและความชื้นจากการทำนายด้วยแบบจำลองของ Newton, Page, Modified-Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic (a) เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) (b) เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนควง (S-FBD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดแบบต่างๆ ที่ทำการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำแห้งให้ดีที่สุด สามารถแบบออกได้ตามผลงานวิชาการ 3 ผลงานดังต่อไปนี้

5.1 พฤติกรรมอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด

การศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด โดยใช้อุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 60 °C, 70 °C และ 80 °C ความเร็วจำเพาะของอากาศ (superficial air velocities, U^*) เท่ากับ 1.2 และ 1.8 พบว่าอุณหภูมิและความเร็วจำเพาะของอากาศสูงให้อัตราการทำแห้งดีที่สุด การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าแบบจำลองของ Page เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการทำนายความชื้นของเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบด ที่มีค่า RMSE เท่ากับ 0.000017387 ที่น้อยที่สุด และ R^2 มากที่สุด เท่ากับ 0.993478 จึงเหมาะสม

5.2 พฤติกรรมการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน

การศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (B-FBD) โดยใช้อุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 70 °C ความเร็วจำเพาะของอากาศ (superficial air velocities, U^*) เท่ากับ $1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดแบบทั่วไป (B-FBD) พบว่าฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน ให้อัตราการทำแห้งสูงสุด และสูงสุดที่ความเร็วจำเพาะของอากาศเท่ากับ $1.6U_{mf}$ สำหรับสมการที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบด คือ แบบจำลองของ Logarithmic ที่ให้ค่า R^2 สูงสุด ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำที่สุด

5.3 ลักษณะการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งแผ่นบิดเพื่อสร้างการไหลแบบหมุนควง

การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ความเร็วลมจำเพาะของอากาศ ($U^* = U/U_{mf}$) เท่ากับ 1.0, 1.1 และ 1.2 m/s สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนควง (S-FBD) ให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดแบบทั่วไป (FBD) ที่ความเร็วจำเพาะเดียวกัน และสูงสุดที่ความเร็วจำเพาะเท่ากับ 1.2 และสมการของ Logarithmic เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายการเปลี่ยนของความชื้นเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ให้ค่า RMSE, chi-square (χ^2) และ R^2 เท่ากับ 0.0105659, 0.0001163 และ 0.9978796 สำหรับ FBD และ 0.0011063, 8.19E-06 และ 0.9995071 สำหรับ S-FBD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย

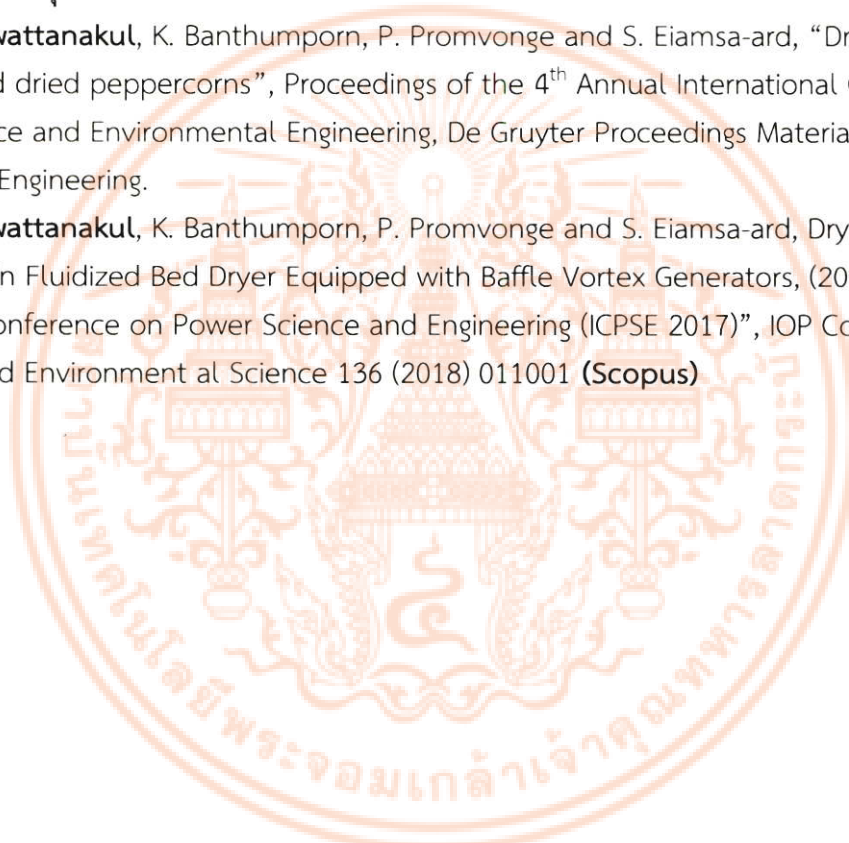
6.1 วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

V. Chuwattanakul and S. Eiamsa-ardb, (2019) “Hydrodynamics investigation on pepper drying in swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators”, Case Studies in Thermal Engineering, 13(2019)100389. (SJR Q1, Scopus)

6.2 งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

V. Chuwattanakul, K. Banthumporn, P. Promvonge and S. Eiamsa-ard, “Drying behavior of fluidized bed dried peppercorns”, Proceedings of the 4th Annual International Conference on Materials Science and Environmental Engineering, De Gruyter Proceedings Materials in Environmental Engineering.

V. Chuwattanakul, K. Banthumporn, P. Promvonge and S. Eiamsa-ard, Drying Peppercorn Characteristics in Fluidized Bed Dryer Equipped with Baffle Vortex Generators, (2017) “2017 6th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE 2017)”, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 136 (2018) 011001 (Scopus)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



แบบรายงานผลผลิตงานวิจัยสำหรับโครงการปี พ.ศ. 2559
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1. ชื่อแผนงานวิจัย/โครงการวิจัย

(ภาษาไทย) การอบแห้งเมล็ดพริกไทยแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีชุดสร้างการไหลหมุนควง
(ภาษาอังกฤษ) Drying of Pepper Corn in a Fluidized-Bed with Swirl Generators

2. ชื่อผู้อำนวยการแผน/หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) ผศ.ดร.วรีสา ชูวัฒนกุล
ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ)) Asst. Prof. Dr. Varesa Chuwattanakul
หน่วยงานต้นสังกัดสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail kcvaresa@kmitl.ac.th, varesa06@hotmail.com

3. ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 งบประมาณที่เสนอขอ 480,000 บาท

4. ด้านการวิจัยตามกลุ่มวิจัย สจล.

กลุ่มที่ 1 กลุ่มวิจัยมุ่งเป้าหมายสู่ความเป็นเลิศ

1. การวิจัยด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (ICT) และอิเล็กทรอนิกส์
 2. การวิจัยด้านพลังงาน 3. ด้านวัสดุศาสตร์
 4. การวิจัยด้านเกษตรและอาหาร

กลุ่มที่ 2 กลุ่มวิจัยเพื่อส่งเสริมและพัฒนาการวิจัย

1. การวิจัยด้านสิ่งแวดล้อม 2. การวิจัยเพื่อการเรียนการสอน
 3. การวิจัยเพื่อพัฒนาชุมชน-ท้องถิ่น 4. การวิจัยด้านพัฒนาองค์กร
 5. การวิจัยด้านการออกแบบและศิลปวัฒนธรรม 6. การวิจัยด้านโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ
 7. การวิจัยด้านพัฒนาเทคโนโลยี

5. ผลผลิตที่ได้จากโครงการวิจัย

5.1 การเผยแพร่ผลงาน (บทความ) ยังไม่มีการเผยแพร่ มีการเผยแพร่ (ระบุรายละเอียดพร้อมแนบหลักฐานอ้างอิง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชื่อบทความ	ชื่อเจ้าของ,ผู้ร่วมทั้งหมด หน่วยงานต้นสังกัด	รายละเอียด (ระบุชื่อวารสารฉบับที่ เล่มที่ ปี หน้า) /ชื่อการประชุมวิชาการ ช่วงเวลาที่จัด สถานที่ หรือที่เกี่ยวข้องและสอดคล้องกับ ผลงานที่ได้	ฐานข้อมูล
Hydrodynamics investigation on pepper drying in swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators	V. Chuwattanakul and S. Eiamsa-ardb	Case Studies in Thermal Engineering, 13(2019)100389	SJR Q1, Scopus
Drying behavior of fluidized bed dried peppercorns	V. Chuwattanakul, K. Banthumporn, P. Promvong and S. Eiamsa-ard	Proceedings of the 4 th Annual International Conference on Materials Science and Environmental Engineering, De Gruyter Proceedings Materials in Environmental Engineering	
Drying Peppercorn Characteristics in Fluidized Bed Dryer Equipped with Baffle Vortex Generators	V. Chuwattanakul, K. Banthumporn, P. Promvong and S. Eiamsa-ard	2017 6 th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE 2017), IOP Conference Series: Earth and Environment al Science 136 (2018) 011001	Scopus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.2 ทรัพย์สินทางปัญญาที่เป็นผลผลิตโดยตรงของการวิจัยและพัฒนา (ยื่นหรือขอจดทะเบียน)

ชื่อ สิทธิบัตร / อนุ สิทธิบัตร	ชื่อ เจ้าของ และ หน่วยงาน	หมายเลข ข/ เลขที่ คำขอ	วันที่ยื่น ขอจด ทะเบียน / วันที่ จด ทะเบียน	ประเภทการจด					
				มี					
				ไม่ มี	การ ประ ดิษฐ์	การ ออกแบ บ ผลิตภัณ ท์	อนุ สิทธิบ ัตร (petty paten t)	ลิขสิทธิ์ เช่น ซอฟต์แวร์ เริ่มต้น (Copyrig ht, e.g. Software etc.)	เครื่องหมาย การค้า (Trademar k)

5.3 ทรัพย์สินทางปัญญา ด้านศิลปะ

ไม่มี มี (กรอกรายละเอียดเพิ่มเติม)

ศิลปกรรม (เช่น จิตรกรรม ประติมากรรม ศิลปะประยุกต์) วรรณกรรม นาฏกรรม

ดนตรีกรรม สิ่งบันทึกเสียง สื่อทัศนวัสดุ ภาพยนตร์ งานแพร่เสียงแพร่ภาพ

ทรัพย์สินทางปัญญาอื่น ๆ

ชื่อทรัพย์สินทางปัญญา.....

วันที่.....(กรณกรอกวันที่ในรูปแบบ วัน/เดือน/ปี)

5.4 ชิ้นงาน/นวัตกรรม/สิ่งประดิษฐ์

ชื่อผลงาน	ชื่อเจ้าของและหน่วยงาน	การนำไปใช้ประโยชน์และ แหล่งตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.5 ต้นแบบ

ชื่อผลงาน	ชื่อเจ้าของและหน่วยงาน	การนำไปใช้ประโยชน์และแหล่งตรวจสอบ

5.5 การนำผลงานไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่นๆ

ชื่อผลงาน	ชื่อเจ้าของและหน่วยงาน	การนำไปใช้ประโยชน์และแหล่งตรวจสอบ

6. ผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

- ไม่มีผลกระทบ มีผลกระทบ (กรอกรายละเอียดเพิ่มเติม)
- แก้ปัญหาและพัฒนาประเทศตามยุทธศาสตร์ของชาติ/นโยบาย/ กลุ่มเรื่องเร่งด่วนของรัฐบาล
 - สร้างความร่วมมือทางการวิจัยให้เป็นระบบเครือข่ายระหว่าง ภาครัฐและเอกชน
 - สร้างองค์ความรู้ใหม่/นวัตกรรมที่ทันสมัย
 - พัฒนาภูมิปัญญาท้องถิ่น
 - สร้างนักวิจัยหน้าใหม่ (พัฒนานักวิจัย)
 - มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย
 - ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจ และคุณค่าเพิ่มทางสังคมและ วัฒนธรรม
 - อื่น ๆ รายละเอียดแต่ละผลกระทบ
-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

6.3 รายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้

6.2.1 Hydrodynamics investigation on pepper drying in swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators



SEARCH MENU

Case Studies in Thermal Engineering

Case Studies in Thermal Engineering

Editor-in-Chief: H. Qiu

View Editorial Board

Submit Your Paper

Open Access

View Articles

Guide for Authors

Abstracting/ Indexing

Case Studies in Thermal Engineering is an open access journal. If articles are accepted for publication, authors are requested to pay an Article Processing Fee. Following payment of this fee, the article is made freely available to all on www.sciencedirect.com.

Case Studies in Thermal Engineering provides

Read more

Most Downloaded Recent Articles Most Cited

A research on thermoelectric generator's electrical performance under temperature mismatch conditions for automotive waste heat recovery system



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Case Studies in Thermal Engineering

Country United Kingdom -  SJR Ranking of United Kingdom

16

Subject Area and Category Chemical Engineering
Fluid Flow and Transfer Processes

Engineering
Engineering (miscellaneous)

H Index

Publisher Elsevier BV

Publication type Journals

ISSN 2214157X

Coverage 2013-ongoing

 Join the conversation about this journal

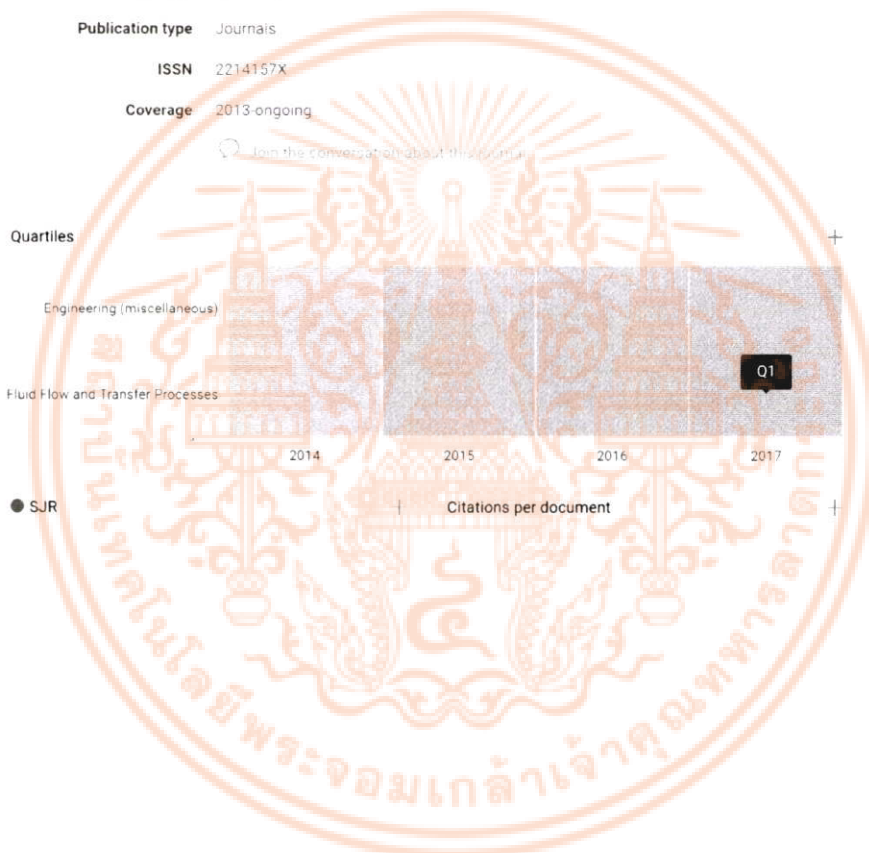
Quartiles

Engineering (miscellaneous)

Fluid Flow and Transfer Processes

● SJR

Citations per document



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



Contents lists available at ScienceDirect

Case Studies in Thermal Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/csite

Hydrodynamics investigation of pepper drying in a swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators

V. Chuwattanakul^{a,*}, S. Eiamsa-ard^b^a Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok 10530, Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:

Drying

Swirl flow

Conventional fluidized bed dryer (FBD)

Drying rate (DR)

Swirling fluidized bed dryer (S-FBD)

Pepper

ABSTRACT

The present work aims to investigate the behavior of drying peppers in a swirling fluidized bed dryer (S-FBD) fitted with multiple twisted tape swirl generators. A multiple-group twisted tape swirl generator was located at the air inlet at the bottom of the bed. The effects of the superficial air velocity ($U^* = U/U_{mf} = 1.0, 1.1$ and 1.2) on the moisture content (MC), moisture content ratio (MR) and drying rate (DR) were examined. The experimental results showed that the S-FBD can reduce the moisture content of peppers more rapidly than a conventional fluidized bed dryer (FBD). The S-FBD gave a higher DR and decreased drying time compared to that of a FBD. The results also indicated that operation at higher superficial air velocities resulted in a greater DR, especially at the beginning stage of the drying process. For the S-FBD, the reduced of MC, MR and DR at a high superficial air velocity ($U^* = U/U_{mf} = 1.2$) was better than at low superficial air velocities ($U^* = 1.0$ and 1.1). Furthermore, five different drying models were evaluated to predict the performance of the S-FBD.

1. Introduction

Fluidized bed (FBD) drying is important for agricultural product preservation and is commercially applied for drying processes and engineering applications [1–3]. Fluidized beds are currently used for drying processes in several industries and have been studied by many investigators. Parlak [4] examined the influence of hot inlet air temperatures on the drying characteristics of ginger slices. Eight-thin layer drying models were applied to fit the moisture loss data of ginger slices. Rattanamechaikul et al. [5] examined the drying behavior of purple rice in a fluidized bed at various air temperatures (100–150 °C). Their results showed that the drying air temperatures in the range studied did not affect the qualities of color, anthocyanin content, total phenolic content and antioxidant activity. Additionally, the quality of the products dried in the fluidized bed dryer were comparable to those of sun dried materials. It was recommended that raw materials with high moisture contents should be dried at 150 °C to attain a high drying rate and reasonable drying time. Khanali et al. [6] studied the effective moisture diffusivity within rough rice in a fluidized bed dryer at air temperatures of 50–70 °C and superficial velocities of 2.3–2.8 m/s. They reported that the minimum specific energy consumption, 29.9 MJ/kg, was found when the air temperature was 70 °C.

Recently, development of a modified fluidized bed dryer for enhancing the drying rate of peppers was reported [7–13] Yang et al. [7] conducted experiments to investigate the drying behaviors of the Wangqing oil shale particles in a fluidized bed dryer with a

* Corresponding author.

E-mail addresses: kevaresa@kmitl.ac.th (V. Chuwattanakul), smith@mut.ac.th (S. Eiamsa-ard).<https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.100389>

Received 6 October 2018; Accepted 31 December 2018

Available online 03 January 2019

2214-157X/ © 2019 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

novel asynchronous rotating air distributor. Their results showed that the particle distribution in fluidized bed could reduce drying time by decreasing the rotational speed of the embedded center disk and increasing the speed of the encircling disk. Nejadi et al. [8] used a hybrid fluidized bed-infrared dryer for drying bulk grain/corn. They found that their hybrid fluidized bed-infrared dryer reduced moisture content from 0.23 to 0.12 kg H₂O/kg dry solid. The use of the hybrid fluidized bed-infrared dryer resulted in the reduction of drying times by 45–87% compared to a conventional dryer. Lv et al. [9] used a microwave fluidized bed dryer for drying the ginger slices at various power levels and air temperatures. Cárdenas-Bailón et al. [10] investigated the drying characteristics of unblanched carrot cubes (0.9 × 0.9 cm²) in a spout-fluidized-bed dryer with and without the use of a draft tube at various temperatures. They observed no difference in the quality of the dried product using the draft tube. Venkiteswaran et al. [11] reported the influence of particle shape (cylindrical, spherical and ellipsoidal) on the bed pressure loss in a swirling fluidized bed dryer (SFB). Their results indicated that spherical shaped particles caused the maximum pressure drop. Promvong et al. [12] investigated the drying kinetics of peppercorns in rectangular fluidized-bed dryers with wavy walls at three different blockage ratios (e/H). Their results showed that the using this drying equipment required shorter times than that typical rectangular fluidized-bed dryers. The average drying time in a rectangular fluidized-bed dryer with wavy walls at an e/H = 0.4375 was around 43% less than that of a typical dryer. Ozbey and Soylemez [13] examined the influence of swirling flow on drying characteristics using an axial guide vane at various mass flow rates and air temperatures. In their work, the swirl dryer increases the moisture removal rate by up to 25% and improve dryer efficiency by as much as 38% compare driers not equipped with a swirl generator. The best drying performance was found at a swirl number, S_w, of 0.85. This was generated by a camber angle of 90° and stagger angle of 75°. Çakmak and Yıldız [14] developed a swirling flow dryer with a solar collector that was used to heat air and compared its drying period with an open-air dryer operated under natural conditions. They reported that a decrease in the drying velocity resulted in increased drying time. Batcha and Raghavan [15] employed a swirling fluidized bed dryer operated with annular-blade distributors at various blade overlap angles (9° and 12°), bed weights (500–2000 g) and superficial velocities (1.0–7.0 m/s). They observed that the pressure loss of the swirling fluidized bed increased with superficial velocity after minimum fluidization was achieved.

Drying performance is strongly dependent on the drying methods and conditions used [11,13–15], as can be seen in Fig. 1. Due to the promising performance of twisted tapes as swirl generators in enhancing heat and mass transfer rates in thermal systems, new designed multiple-group twisted tape swirl generators were proposed for use in the fluidized bed dryer of the present investigation. It

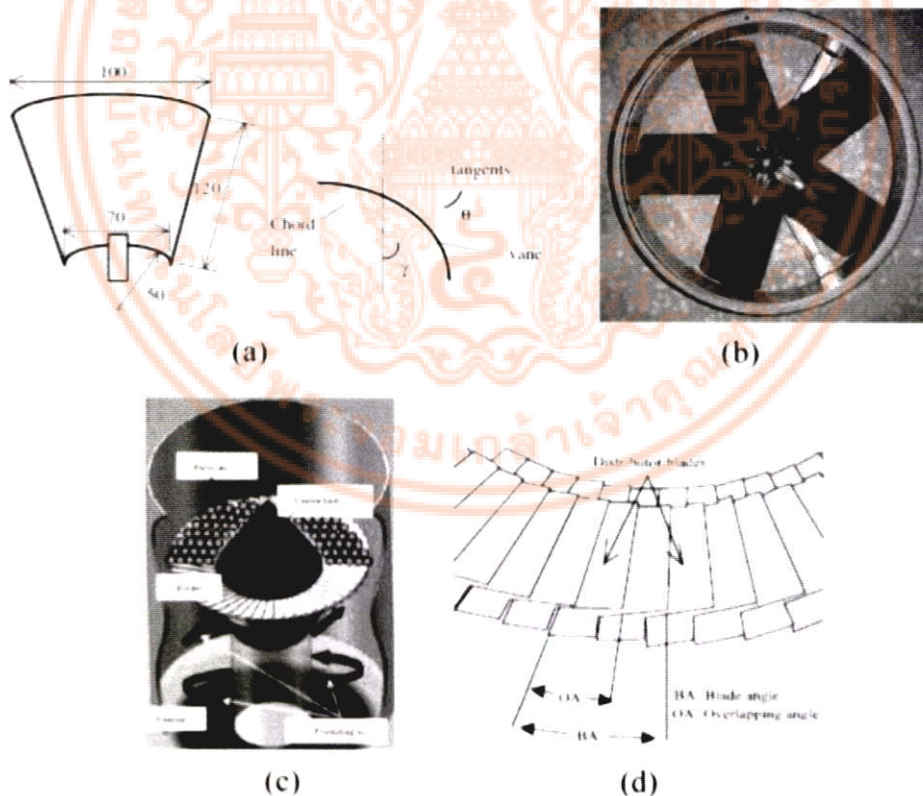


Fig. 1. Various types of swirl generators in fluidized bed dryers: (a) guide vane front and side views [13], (b) swirl element with arranged triangles [14], (c) annular spiral distributor [11] and (d) blade angle and blade overlapping angle [15].



Fig. 2. Details of the multiple-group twisted tape swirl generators installed at the bottom of the bed.

is expected that insertion multiple-group twisted tape swirl generators at the bottom of the bed will induce multiple longitudinal swirls/vortices facilitating heat transfer rate between the air and the drying particles. A conventional fluidized-bed dryer without multiple-group twisted tape swirl generators was also tested for an assessment. The influence of multiple swirling flows on the moisture ratio and drying rate were experimentally studied. Furthermore, mathematical models of the moisture ratio with respect to drying times are also proposed.

2. Experimental setup

Schematic diagrams of a laboratory scale swirling fluidized-bed dryer (S-FBD) system are shown in Figs. 2 and 3. The experimental setup consisted of a fluidized bed dryer with twisted tape swirl generators (S-FBD/FBD) at the air inlet, a bed with a distributor plate, humidity sticks for measurement of air humidity, a high pressure centrifugal fan driven by a 10 hp and 2900 rpm AC electric motor, an inverter, a 5 kW electrical air heater unit, a sample bowl, a digital weighing machine, swirl generators, a temperature controller, resistance temperature detectors for measurement of temperature at the entrance and exit the fluidized bed air, pressure taps, a data acquisition system, a personal computer, a hot wire anemometer to measure inlet air velocity, an orifice flow meter with inclined manometer or digital pressure gage, a power meter, a power supply system, a control valve, insulator and other support structures. In the experiments, fresh green peppers were harvested from a green house in Chanthaburi Province, Thailand. They had a mean diameter of 4.3 mm.

The bed of fluidized bed dryer was made from an acrylic cylinder with diameter of 140 mm and height of 1000 mm as depicted in Fig. 2. In the FBD, a distributor plate was placed at the bottom of the column. In the S-FBD, the distributor plate was replaced by the multiple-group twisted tapes to generate several swirls at the bottom of the bed. The twisted tapes used in the present study are also displayed in Fig. 2. They were made of aluminum sheets with a thickness of 1.2 mm, 30 mm in width (w), and 300 mm (L) in length. The twisted tapes were fabricated by twisting a straight tape about its longitudinal axis by 180° at which time, the tape was twisted with a constant twist ratio of $y/w = 2.0$ (y , pitch length). In the present experiments, six twisted tapes (TTs) were installed at the bottom of the bed to create multiple longitudinal vortex flows and increase the lateral fluidization in the bed in addition to vertical fluidization. The setup of the typical fluidized-bed dryer (FBD) was the same as the S-FBD, except that the twisted tape swirl generators were not installed. A computational fluid dynamics (CFD) investigation of flow behaviors in the FBD and S-FBD was performed at a constant superficial air velocity ($U^* = U/U_{mf}$) of 1.0. The results are depicted in Fig. 4. The flow in the FBD was nearly uniform and did not significantly change with the height of dryer. In the swirling fluidized-bed dryer (S-FBD), multiple strong swirling flows were detected just above the air inlet (near the multiple twisted tapes). The multiple swirling flows helped promote turbulent air flow which facilitated contact between the peppercorns and hot air and thus accelerating the removal moisture from the grains. However, the swirling flows gradually decayed (indicated by a reduction of velocity vector) with increasing height since the distance from the multiple twisted tapes (swirl generators) became longer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

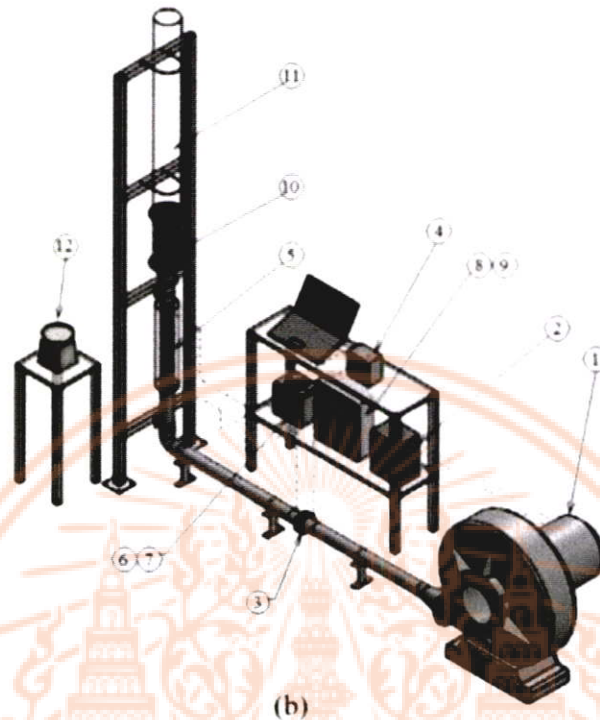


Fig. 3. (continued)

$$MR = (M - M_e)/(M_0 - M_e) \tag{1}$$

The drying rate (DR) can be expressed as:

$$DR = dM/dt = (M_{i+\Delta t} - M_i)/\Delta t \tag{2}$$

The following factors were considered in evaluating the mathematical drying models: the root mean square error (RMSE), the correlation coefficient (R^2) and Chi-square (χ^2) as detailed below.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2 \right]^{1/2} \tag{3}$$

and

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N - p} \tag{4}$$

4. Results and discussion

The results of the flow and drying characterization in the swirling fluidized-bed dryer (S-FBD) at various superficial air velocities ($U^* = U/U_{mf} = 1.0, 1.1$ and 1.2 m/s) are reported together with those of typical fluidized-bed dryers (FBD). Additionally, five mathematical models for predicting the relationship between drying time (DT) and moisture content ratio (MR) are also presented.

The influences of drying time and superficial air velocity on the moisture content ratio and drying rate are presented in Figs. 5–7. Generally, the moisture content ratio and drying rate of peppercorns abruptly decreases in the first stage of drying process (after 40 min) and thereafter the moisture content gradually decreased. At the same drying time, moisture content decreased with increasing superficial air velocity ($U^* = U/U_{mf}$) due to the increased quantity of the moisture carrier (air) and stronger turbulence. Additionally, at low superficial air velocities, the peppercorns near the inlet swirl generator were densely packed leading to inefficient water vaporization. For the S-FBD, the rate of reduction moisture content ratio and drying rate at the highest superficial air velocity ($U^* = U/U_{mf} = 1.2$) were greater than those at $U^* = 1.0$ and 1.1 . At the same drying time and superficial air velocity, the reduction rate of moisture content and drying rate in the S-FBD was higher than in the FBD. This indicates that the evaporation of water and thus moisture removal is enhanced by the swirl effect, which is accordance with the numerical results previously discussed. Additionally, swirl flow helps in increasing superficial air velocity, since the same throughput must be accommodated by an increase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

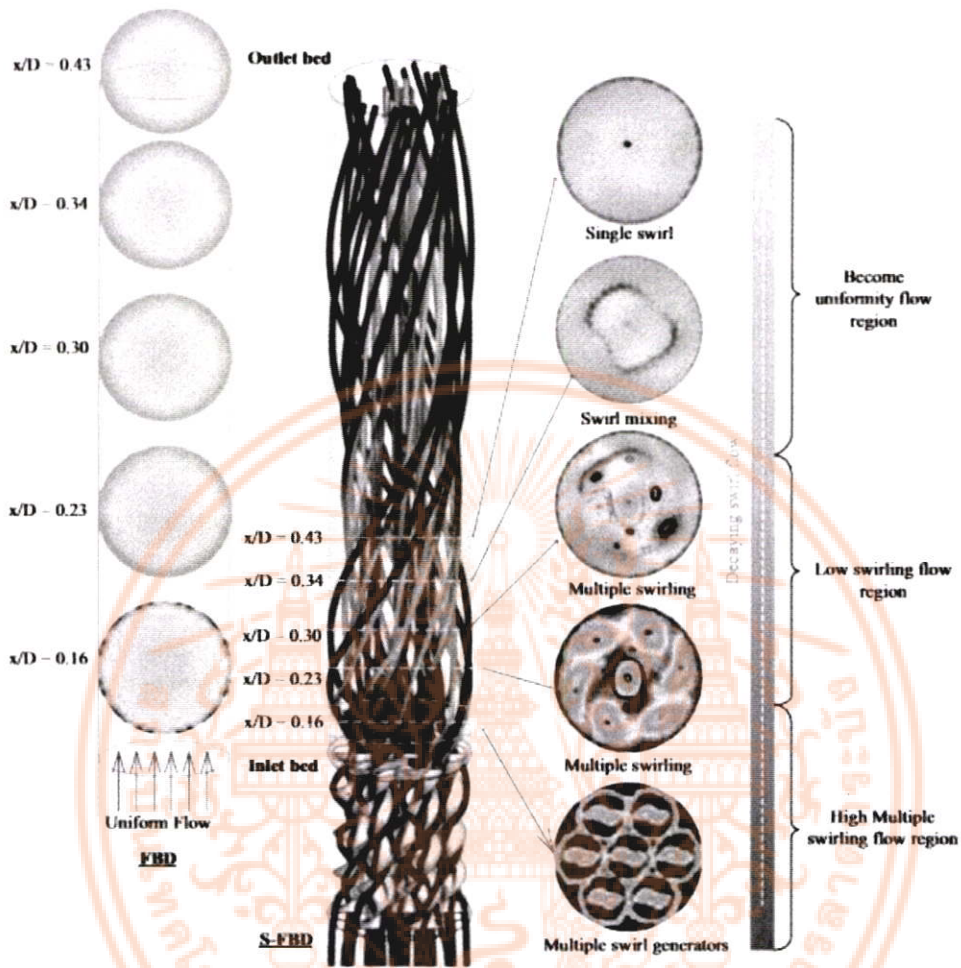


Fig. 4. Flow mechanism in a swirling fluidized-bed into which multiple-group twisted tape was installed at the bottom of the bed.

Table 1
Mathematical models applied to the drying predictions.

Model name	Model	References
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Doymaz and Pala [16]
Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	Zhang and Litchfield [17]
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Ayensu [18]
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis [19]
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Kassem [20]

flow mixing, resulting in larger flow and temperature gradients, the effective driving potentials for heat and mass transfer. All superficial air velocities ($U^* = 1.0, 1.1$ and 1.2), the drying rates in the S-FBD were higher than those in the FBD.

The moisture content ratios of peppercorns predicted by five different mathematical models are depicted in Fig. 8(a-d). A drying constant (k) was obtained from the equation in Table 1. Table 2 depicts the statistical results of mathematical modeling of peppercorn drying using five different models. The developed equations and drying parameters (a, k and n), RMSE and R^2 are listed in the table. Initial and equilibrium moisture content values were taken measured experimentally. It is notable that the modeling was conducted for the falling rate zone. The experimental moisture content ratios were compared with their corresponding prediction as seen in Fig. 8(a-d). Generally, experimental and predicted results are in good agreement. Among the models, the logarithmic model gives the best fit to the experimental results signified by its highest value of R^2 and lowest RMSE for the FBD and S-FBD. The drying constant decreased as the drying temperature increased. The logarithmic model offers $R^2 = 0.999$ and 0.996 for the FBD and S-FBD, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

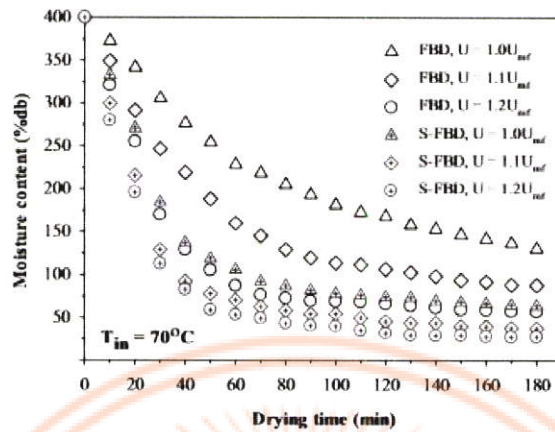


Fig. 5. Relationship between moisture content (MC) and drying time (DT: minute) of peppercorn at various superficial air velocity of typical fluidized-bed dryer (FBD) and swirling fluidized bed dryer (S-FBD) installed with multiple twisted tapes.

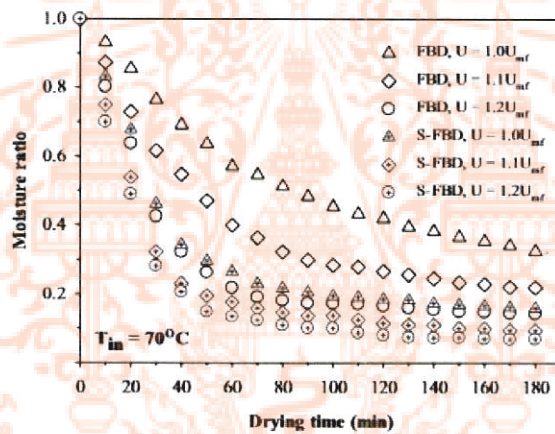


Fig. 6. Relationship between moisture ratio (MR) and drying time (DT, minutes) of peppercorns at various superficial air velocities in a conventional fluidized-bed dryer (FBD) and swirling fluidized-bed dryer (S-FBD) with multiple-group twisted tapes installed.

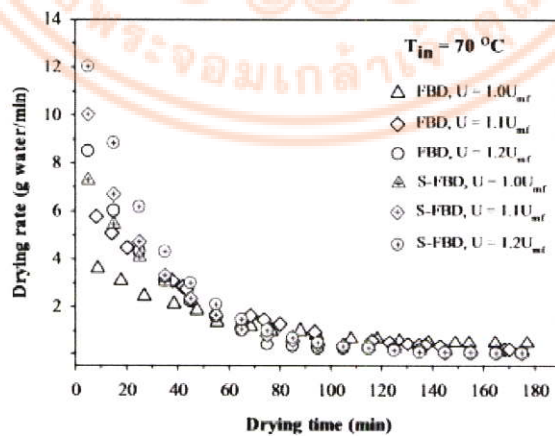


Fig. 7. Relationship between the drying rate (DR) and drying time (DT, minutes) for peppercorns at various superficial air velocities in a conventional fluidized-bed dryer (FBD) and swirling fluidized-bed dryer (S-FBD) with multiple-group twisted tapes installed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

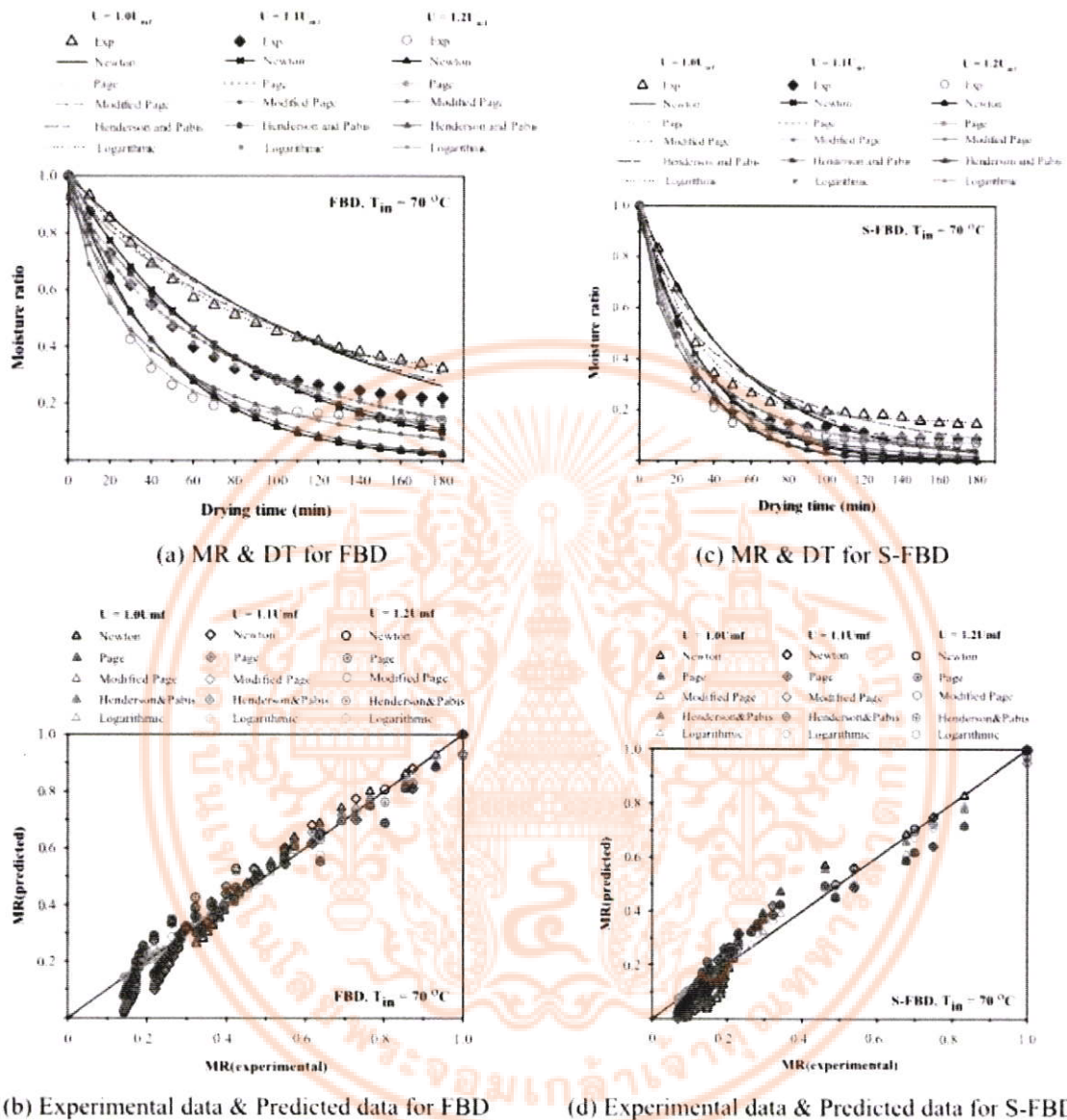


Fig. 8. Comparison of experimental measurements and predicted data for a conventional fluidized-bed dryer (FBD) and swirling fluidized-bed dryer (S-FBD) with multiple-group twisted tapes installed for various superficial air velocities ($1.0U_{mf}$, $1.1U_{mf}$ and $1.2U_{mf}$).

5. Conclusions

This study deals with the effect of multiple swirling flows on the peppercorn drying characteristics (moisture content ratio and drying rate) in a swirling fluidized bed dryer (S-FBD) at superficial air velocities ($U^* = U/U_{mf}$) of 1.0, 1.1 and 1.2 m/s. The experimental results show that the S-FBD fitted with a multiple-group twisted tape swirl generator at the bottom of the bed reduced the peppercorn moisture content ratio better than a FBD. The S-FBD also has a higher drying rate and decreased drying time as compared to a FBD. This suggests that it is feasible to develop compact S-FBDs with good control over drying conditions. It was also found that drying at higher superficial air velocities results in a greater rate of reduction in the moisture content ratio or drying rate due to increase the quantity of moisture carrier (air) and stronger turbulence. Additionally, the predictions of peppercorn drying characteristics for the S-FBD using the logarithmic model more closely fit the experimental results ($R^2 = 0.9962915$) than other models.

Table 2Statistical results of five mathematical models at various superficial air velocities ($U^* = U/U_{mf} = 1.0, 1.1$ and 1.2 m/s).

Model			R ²	RMSE	X ²
FBD	Newton Page	$k = 0.136265 - 0.2943U^* + 0.1655U^{*2}$	0.9582655	0.0592221	0.0035699
		$k = 1.364168 - 2.71797U^* + 1.3734U^{*2}$	0.9938557	0.0377567	0.0014774
	Modified Page	$n = -2.687531 + 6.897475U^* - 3.41795U^{*2}$	0.9938558	0.0377567	0.0014774
		$n = -2.687531 + 6.897475U^* - 3.41795U^{*2}$	0.9938558	0.0377567	0.0014774
	Henderson and Pabis	$a = 1.965154 - 1.719495U^* + 0.70995U^{*2}$	0.9870381	0.0553389	0.0031738
		$k = 0.115345 - 0.250435U^* + 0.1420499U^{*2}$	0.9990314	0.0151280	0.0002416
Logarithmic	$a = 0.475309 - 0.935585U^* + 0.47475U^{*2}$	0.9990314	0.0151280	0.0002416	
	$k = -2.794379 + 5.851265U^* - 2.31355U^{*2}$	0.9990314	0.0151280	0.0002416	
	$c = 5.865768 - 9.66623U^* + 4.0795U^{*2}$	0.9990314	0.0151280	0.0002416	
S-FBD	Newton Page	$k = -0.314432 + 0.544395U^* - 0.21115U^{*2}$	0.9465258	0.066953	0.0045627
		$k = -1.450063 + 2.701185U^* - 1.18185U^{*2}$	0.9814682	0.0479433	0.0023821
	Modified Page	$n = 2.563082 - 3.64883U^* + 1.7679U^{*2}$	0.9814682	0.0479433	0.0023821
		$n = 2.563082 - 3.64883U^* + 1.7679U^{*2}$	0.9814682	0.0479433	0.0023821
	Henderson and Pabis	$a = 0.051377 + 1.37546U^* - 0.5065U^{*2}$	0.9668606	0.0650164	0.0043808
		$k = -0.289625 + 0.49238U^* - 0.1858U^{*2}$	0.9962915	0.0217553	0.0004996
Logarithmic	$a = -0.723232 + 2.71313U^* - 1.1035U^{*2}$	0.9962915	0.0217553	0.0004996	
	$k = -0.34741 + 0.6465U^* - 0.2661U^{*2}$	0.9962915	0.0217553	0.0004996	
	$c = 2.357831 - 3.70719U^* + 1.5028U^{*2}$	0.9962915	0.0217553	0.0004996	

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge with appreciation King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand, for financial support of this work (KREF 015910).

Conflicts of Interest

The authors declare there are no conflicts of interest.

References

- [1] T. Chen, J. Cao, B. Jin, The effect of rice straw gasification temperature on the release and occurrence modes of Na and K in a fluidized bed, *Appl. Sci.* 7 (2017) 1–13.
- [2] C. Thianpong, A. Boonloi, P. Promvong, Drying kinetic of peppercorns in a rectangular fluidized bed with wavy surfaces, *Proceedings of the International Conference on Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies* Article number 5598861, 2010.
- [3] V. Chuwattanakul, K. Banthumporn, P. Promvong, S. Eiamsa-ard, Drying peppercorn characteristics in fluidized bed dryer equipped with baffle vortex generators, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 136 Article number 012020, 2018.
- [4] N. Parlak, Fluidized bed drying characteristics and modeling of ginger (*Zingiber officinale*) slices, *Heat Mass Transf./Wärme und Stoff.* 51 (2015) 1085–1095.
- [5] C. Rattananamechaiskul, N. Junka, C. Wongsaree, S. Prachayawarakorn, S. Soponronnarit, Influence of hot air fluidized bed drying on quality changes of purple rice, *Dry. Technol.* 34 (2016) 1462–1470.
- [6] M. Khanali, A. Banisharif, S. Rafiee, Modeling of moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in fluidized bed drying of rough rice, *Heat Mass Transf./Wärme und Stoff.* 52 (2016) 2541–2549.
- [7] N. Yang, Y. Zhou, Y. Miao, Analysis and modeling of wangqing oil shale drying characteristics in a novel fluidized bed dryer with asynchronous rotating air distributor, *China Pet. Process. Petrochem. Technol.* 18 (2016) 70–79.
- [8] J. Nejadi, A.M. Nikbakht, Numerical simulation of corn drying in a hybrid fluidized bed-infrared dryer, *J. Food Process Eng.* 40 (2016), <https://doi.org/10.1111/jfpe.12373>.
- [9] W. Lv, S. Li, Q. Han, Y. Zhao, H. Wu, Study of the drying process of ginger (*Zingiber officinale* roseae) slices in microwave fluidized bed dryer, *Dry. Technol.* 34 (2016) 1690–1699.
- [10] F. Cárdenas-Bailón, G. Osorio-Revilla, T. Gallardo-Velázquez, Evaluation of quality parameters of dried carrot cubes in a spout-fluidized-bed dryer with and without draft tube, *J. Food Meas. Charact.* (2016) 1–11, <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9391-3>.
- [11] V.K. Venkiteswaran, G.J. Jun, C.Y. Sing, S.A. Sulaiman, V.R. Raghavan, Variation of bed pressure drop with particle shapes in a swirling fluidized bed, *J. Appl. Sci.* 12 (2012) 2598–2603.
- [12] P. Promvong, A. Boonloi, M. Pimsan, C. Thianpong, Drying characteristics of peppercorns in a rectangular fluidized-bed with triangular wavy walls, *Int Commun. Heat Mass Transf.* 38 (2011) 1239–1246.
- [13] M. Ozbey, M.S. Soylemez, Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains, *Energy Convers. Manag.* 46 (2005) 1495–1512.
- [14] G. Çakmak, C. Yildiz, Design of a new solar dryer system with swirling flow for drying seeded grape, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 36 (2009) 984–990.
- [15] M.F.M. Batcha, V.R. Raghavan, Experimental studies on a swirling fluidized bed with annular distributor, *J. Appl. Sci.* 11 (2011) 1980–1986.
- [16] I. Doymaz, M. Pala, Hot air drying characteristics of red pepper, *J. Food Eng.* 55 (2002) 331–335.
- [17] Q. Jiang, J.B. Litchfield, An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer, *Dry. Technol. Int. J.* 9 (1991) 383–395.
- [18] A. Ayensu, Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow, *Sol. Energy* 59 (1997) 121–126.
- [19] S.M. Henderson, S. Pabis, Grain drying theory II: temperature effects on drying coefficients, *J. Agric. Eng. Res.* 6 (1961) 169–174.
- [20] A. Kassem, Comparative studies on thin layer drying model for wheat, 13th International Congress on Agricultural Engineering, Morocco, 26 February 1998.

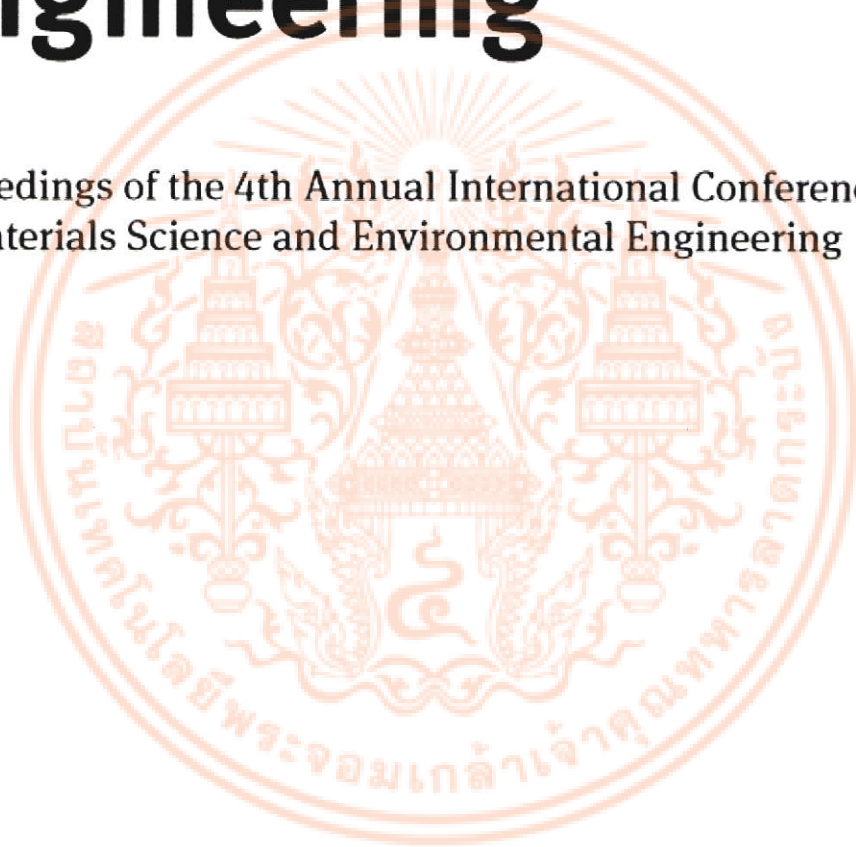
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Materials in Environmental Engineering

—
Proceedings of the 4th Annual International Conference
on Materials Science and Environmental Engineering



DE GRUYTER

Unauthenticated
Download Date | 10/7/17 12:17 PM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



e-ISBN (PDF) 978-3-11-051662-3
e-ISBN (EPUB) 978-3-11-051573-2

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

A CIP catalog record for this book has been applied for at the Library of Congress.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the Internet at <http://dnb.dnb.de>.

© 2018 Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston

www.degruyter.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Unauthenticated

Varesa Chuwattanakul¹, Kesmanee Banthumporn², Pongjet Promvonge³ and Smith Eiamsa-ard⁴

Drying Behavior of Fluidized Bed Dried Peppercorns

Abstract: Drying experiments were performed in a fluidized bed dryer to study the peppercorn drying behaviors. The influences of the inlet drying hot air temperatures ($T_{in} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) and superficial air velocities ($U^* = U/U_{mf} = 1.2$ and 1.8) on the drying rate are reported. Experimental results show that drying time (DT) of the peppercorn can be reduced by increasing inlet drying hot air temperatures (T_{in}) and superficial air velocities (U^*). In addition, three different semi-theoretical drying mathematical models (Newton model, Page model and Henderson and Pabis model) were comparatively investigated based on their coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE) to predict the drying characteristic of peppercorns.

Keywords: dryer, fluidized bed dryer, superficial air velocity, drying, peppercorn

1 Introduction

Peppercorn is an important crop in Thailand which gives export income 50-70 million baht per year. The average capacity of peppercorn production is 3.5 million kilograms per year. Moreover, the product price tends to consistently increase. Peppercorn can be used not only herbal ingredient in a variety of foods but also used as food flavor. It contains essential volatile oils that help to preserve the food and extend shelf life. In addition, peppercorn can active substances stimulated the secretion of gastric acid, reduce blood sugar levels, relieve muscle and joint pain and inhibit the spread of cancer cells. At room temperature or in the refrigerator, peppercorn can last for several days to a few weeks before it starts to rot. For a longer storage, food preservation is necessary. Drying of food products is one of the most

¹ Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. Email: varesaatkmitl@gmail.com

² Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. Email: kes_haski@hotmail.com

³ Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. Email: kppongje@kmitl.ac.th

⁴ Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand. Email: smith@mut.ac.th

DOI 10.1515/9783110516623-137

Brought to you by | De Gruyter / TCS

Authenticated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

important processes of preserving foods. Removal of water via drying inhibits the growth of bacteria, yeasts, and mold which cause food deterioration. Drying is the process of simultaneous heat and mass transfer. During drying, heat is supplied to particles of material and moisture vapor is removed from the material into the drying medium. Although tray and tunnel drying are usually applied for commercial vegetable dehydration, fluidized-bed drying is a promising alternative technique.

Fluidized bed dryers have been applied in many thermal engineering application areas, for example, drying of particles in food, agriculture industries, combustion and chemical, pharmaceutical. High drying rates due to excellent gas-particle contact leading to high heat and mass transfer rates, smaller flow area, higher thermal efficiency, lower capital and maintenance costs and ease of control are some of the advantages of fluidized bed dryers. The application of a fluidized-bed drying was studied by many investigators [1-11]. The fluidized-bed technique has been also used widely for the dehydration of wet solid particles such as food products (maize, coconut, chillies, black tea, and soybean), agricultural products (paddy and colza), chemical products (biosynthesis products, nylon, and baker's yeast), and bleaching agents (sodium perborate and sodiumpercarbonate) [2]. The advantages of fluidized-bed drying include its high energy saving and short drying period owing to the effective contact between particles and drying mediums [3, 4]. The effect of air velocity on drying kinetics in the drying of various food products (potatoes, bird's eye chilli, onion, green pepper thin-layer chopped coconut, carrot, seeded grape, sweet cherry, bird's chillies, and peppercorns) was extensively investigated [2-11]. Ozbey and Soylemez [7] studied the batch drying of wheat grains in a fluidized bed dryer fitted with an axial guide vane type swirl generator. Influences of the mass flow rate, drying temperature and the swirling rate on the drying characteristics were also examined. Çakmak and Yıldız [9] carried out a comparative study of seeded grape drying by grapes grown by using swirling flow dryer and classical dryer. Their results showed that drying in the swirling flow dryer resulted in lower moisture and shorter drying period than that in the classical one. In addition, drying rate increased with increasing drying air velocity. Promvong et al. [11] investigated the drying kinetics of peppercorns in rectangular fluidized-beds with/without wavy walls. The effect of blockage ratios ($e/H = 0.3125, 0.3750$ and 0.4375) on drying rate was also reported. Evidently, drying in beds with wavy walls needed shorter drying time than that in the one without wavy wall. Drying rate increased as blockage ratio increased.

In general, the moisture content (MC) is one of the most important parameter in the fluidized bed drying. The moisture content (MC) is described as a measure of amount of water or its vapor included within a substance. The MC is defined as dry basis (kg water/kg dry solid) which can be calculated by dividing weight of water by weight of dry material as:

$$MC = W_w / W_d \quad (1)$$

Brought to you by | De Gruyter / TCS

Authenticated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

or

$$MC = (W_b - W_d) / W_d \quad (2)$$

During drying process, the moisture ratio (*MR*) of samples can be written as

$$MR = (MC_t - MC_e) / (MC_i - MC_e) \quad (3)$$

Nazghelichi et al. [12] and Dincer [13] have mentioned that MC_e is relatively very small as compare to MC_i and MC_t . Therefore, a moisture ratio (*MR*) can be simplified to

$$MR = MC_t / MC_i \quad (4)$$

In the present research, effects of inlet drying hot air temperatures ($T_m = 60\text{ }^\circ\text{C}$, $70\text{ }^\circ\text{C}$ and $80\text{ }^\circ\text{C}$) and superficial air velocities ($U^* = U/U_{mf} = 1.2$ and 1.8) on moisture content (*MC*), drying rate (*DR*) and color of peppercorns after drying were determined. Furthermore, Newton model, Page model and Henderson and Pabis model were also developed from experiment data.

2 Theoretical Procedure and Mathematical Model

Drying of moist materials is a complicated process involving simultaneous heat and mass transfer [11, 14-15]. Thin-layer drying is the process of drying in one layer of sample particles; it is used to describe the drying phenomenon of products. Most of the food drying from the previous works found that food drying occurs mainly in the falling rate period. The falling rate period is the second phase of drying, in which the moisture transfer is driven mainly by the moisture diffusion inside the peppercorns. In order to model the thin layer drying kinetics in the fluidized bed dryer and the fluidized bed dryer, drying will be assumed to occur only in the falling rate period. Empirical model is one of the thin-layer drying models which consider only the external resistance to moisture transfer between products and heating air. In thin layer drying model, the rate of change in material moisture content in the falling rate drying period is proportional to the instantaneous difference between material moisture content and the expected material moisture content when it comes into equilibrium with the drying air. It is assumed that the material layer is thin enough or the air velocity is high so that the conditions of the drying air (humidity and temperature) are kept constant throughout the material. For model analysis, empirical model neglects the fundamentals of drying process and presents a direct relationship between average moisture and drying time by means of regression analysis [16]. The drying curves obtained are fitted with three different expressions of moisture

ratio models. The drying speed or drying rate (DR) of peppercorns during drying experiments are defined as:

$$DR = \frac{dMC}{dt} = \frac{MC_{t+dt} - MC_t}{dt} \quad (5)$$

In the next stage of empirical modeling, moisture experimental data were rewritten in the moisture content (MC) and drying rate (DR) forms.

A non-linear regression analysis was performed using the Excel program, and the least squares method was used for fitting the experimental data to all the considered models (Newton model, Page model and Henderson and Pabis model). Regression analysis of the experimental drying data was carried out by statistical software. The moisture ratio is usually expressed as found in equation (3). The correlation coefficient, R^2 was one of the primary criteria for selecting the best equation expressing the drying curves of the sample. In addition to R^2 , the various statistical parameters such as; root mean square error (RMSE) was used to evaluate the consistency of the fitting process. Modeling the drying behavior of different agricultural products often requires the statistical methods of regression and correlation analysis. Linear and non-linear regression models are important tools to find the relationship between different variables, especially for which no established empirical relationship exists. In the present study, the constants and coefficients of the best fitting model involving the drying variables such as temperature, velocity of the drying air were determined. The effects of these variables on the constants and coefficients of drying expressions were also investigated by multiple linear regression analysis. The higher R^2 and the lower RMSE were the better model fitting. RMSE was calculated from this statistical package based on the following equations:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2 \right] \quad (6)$$

3 Experimental Setup

3.1 Peppercorn Sample

In the present investigation, fresh peppercorn was used as the drying feed. The fresh peppercorn is green, fully mature fruit with high moisture content. The peppercorn is assumed to be a spherical shape with mean diameter of around 5 mm while its density is approximately 1500 kg/m³. In each test run, 200 g of peppercorn kernels with initial moisture content of around 500% (wb.) determined by drying the sample at 105 °C for 24 h or/until the weight becomes constant, were used as the sample for the drying in a preheated bed. Details of the fresh peppercorn can be found in Table 1.

height (H). The distributor plate was also made of acrylic. The plate was a bubble cap type having 100 holes which gave an opening area of 75 %, each hole had diameter of 2.4 mm. An acrylic plastic fluidized bed dryer column was assembled in a vertical acrylic plastic pipeline. The drying was performed at the peppercorn capacity of 200 g corresponding to the packed bed height of 30 mm. The bed height was expanded up to 200 mm during fluidization test.

Table 1: Experimental setup and peppercorn characteristics

Fluidized bed dryer	
Bed diameter	170 mm
Bed height	1000 mm
Material	acrylic plastic
Fraction distributor plate area	75 %
Properties	
Species	Chanthaburi
Diameter	4.5 to 5.5 mm
Initial moisture content	500% dry basis
Test conditions	
Superficial air velocity	1.2 and 1.8
Drying temperature	60 °C, 70 °C and 80 °C
Ambient temperature	25 °C

In the current work, a high-pressure blower with 10 hp was used to supply air which was preheated with a 3000 W electrical heater. The current passing through the electrical heater was measured by AC/DC clamp meter. The electric heater can provide hot air with a maximum temperature of 120 °C. It took around 30 minutes to raise bed temperature to 80 °C. The temperature of fluidized bed dryer was varied from 60 °C to 80 °C. In experiments, the drying air temperature (T_m) of the bed was measured by means of RTDs. The measurement of fluidizing airflow rate was taken using an orifice meter together with an inclined manometer. The minimum fluidization velocity was evaluated from the point of interaction between two straight lines on a plot of air velocity and the pressure drop across the bed.

Experiments were carried out at two different superficial air velocities ($U^* = U/U_{mf} = 1.2$ and 1.8) and three different inlet hot air temperatures ($T_m = 60$ °C, 70 °C and 80 °C). Each run was performed at an initial moisture content of 500 % until the moisture content was reduced to 40 %. All of the experimental details are shown in Table 1. Weight loss of peppercorns was measured manually using an electronic balance (accuracy of ± 0.01 g.) in 10 s. Drying time and weight of pepper-

corns were measured in 5 minute intervals for 2 h. During experiments, the data collection was taken at steady state condition.

4 Result and Discussion

In this section, the experimental results describing the influences of inlet drying hot air temperature ($T_{in} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) and superficial air velocities ($U^* = U/U_{mf} = 1.2$ and 1.8) on moisture content reduction and drying rate of peppercorns are reported. In addition, the developed relationships by using Newton model, Page model and Henderson and Pabis model are proposed. The comparison between the predicted results and experimental ones is also described.

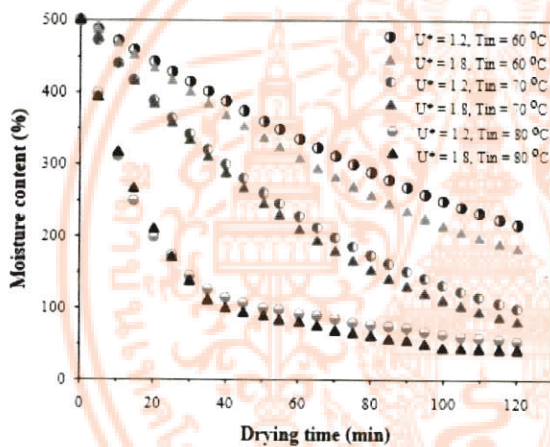


Fig. 2: Moisture content versus drying times.

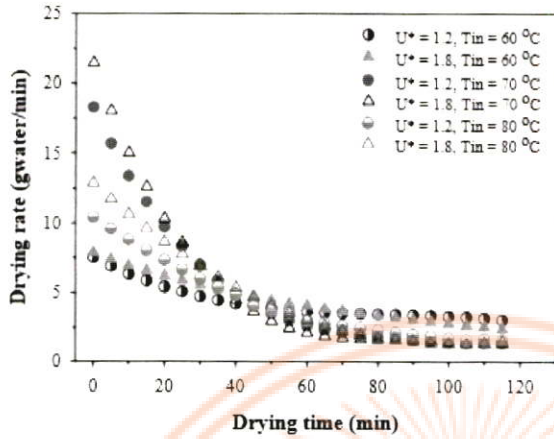


Fig. 3: Drying rate versus drying times.

4.1 Effects of Inlet Air Temperature

Figure 2 shows that moisture content (MC) of peppercorn decreases with drying time for all cases. The moisture content reduction is more significant at the initial stage due to the evaporation of surface moisture. Then the drying process slows down when all the surface moisture evaporated and the drying front diffuses inside the material as confirmed by the drying rate shown Fig. 3. At a given drying time, moisture content decreases as inlet air temperature increases due to the higher driving force of evaporation caused by the higher heat and mass transfer. At inlet air temperatures of 80°C, moisture content abruptly decreases from 500% to around 100% in first 40 min. and moisture content reaches 79% at 60 min. Figure 3 also shows that there is no constant rate period in peppercorn drying. All the drying processes occur in the falling rate period signifying that the internal mass transfer proceeds through diffusion only.

(a)

$$* = U/U_{mf} = 1.2$$

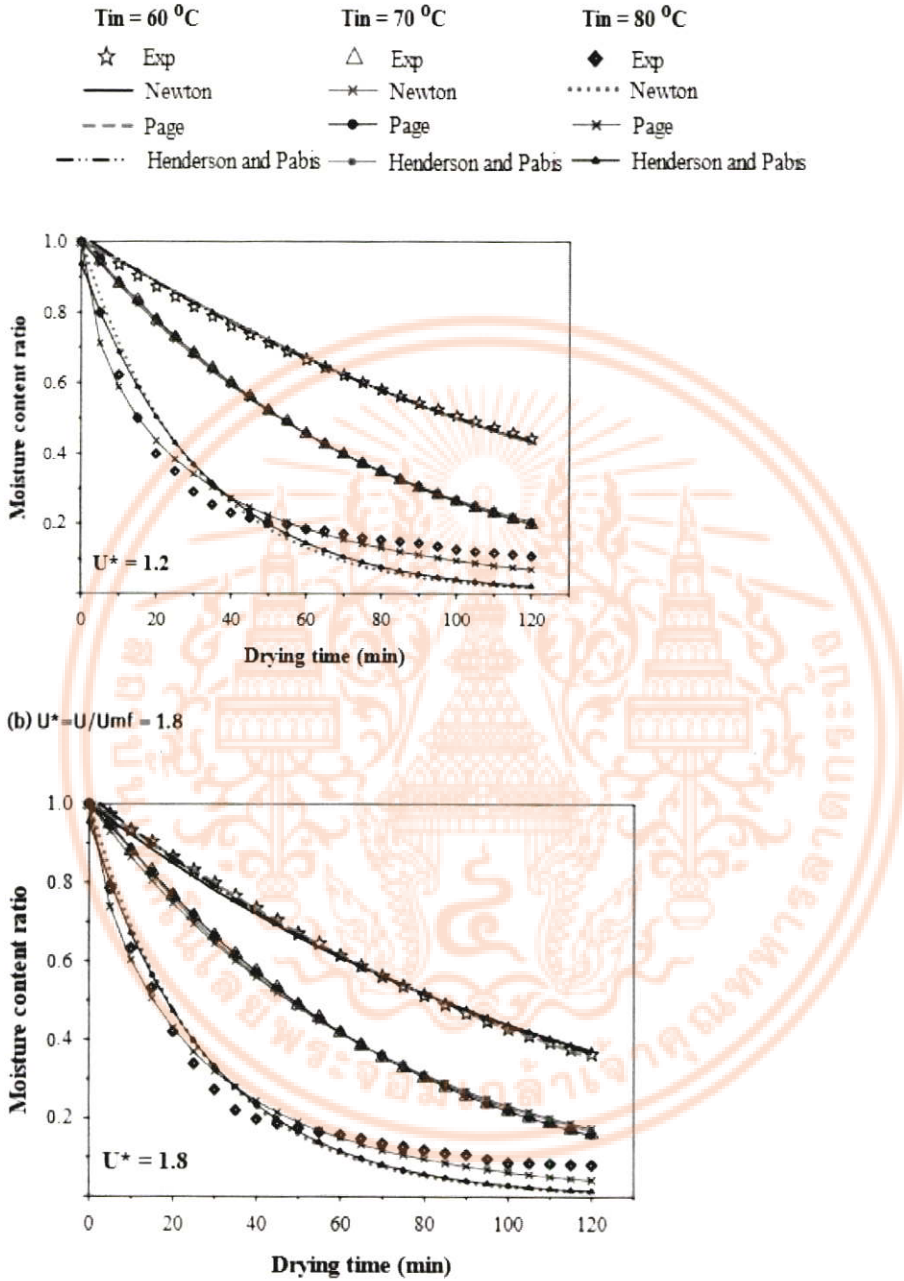


Fig. 4: Experimental moisture content ratio (MR) data compared with predicted values from various models.

Brought to you by | De Gruyter / TCS

Authenticated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Table 2: Statistical results for mathematical modeling of drying curves for all cases.

Model	Model equation	Drying parameters	R^2	RMSE
Newton	$MR = \exp(-kt)$	$k = -0.09362 + 0.03646U^* + 0.0008266T$	0.977491	0.000046698
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = -0.4537 + 0.1712U^* + 0.003393T$ $n = 1.2671 + 0.7278U^* - 0.009694T$	0.993478	0.000017387
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$a = 1.4258 - 0.1280U^* - 0.003409T$ $k = -0.08155 + 0.03237U^* + 0.0007336T$	0.980257	0.000041321

4.2 Effect of Superficial Air Velocity

The experimental results in Figs. 2 and 3 show that as superficial air velocity increases, moisture content (MC) decreases and drying rate is promoted. This can be explained that the increase of superficial air velocity or air flow results in the increases of moisture carrier and flow turbulence intensity. Therefore, moisture is more effectively removed because heat and mass transfer between the hot air and the solid phase is enhanced. However, in the studied range ($U^* = U/U_m = 1.2$ and 1.8), the effect of superficial air velocity on moisture removal is less important than that of inlet air temperature. This indicates that the increase of inlet air temperature is more efficient in augmenting evaporation of water and thus moisture removal.

4.3 Mathematical Model

Table 2 shows the statistical results for mathematical modeling of peppercorn drying by using Newton model, Page model and Henderson and Pabis model. The developed equations of drying parameters (a , k and n), RMSE and R^2 are listed in the table. It should be noted that, modeling was conducted for the falling rate zone, regarding to the experimental results. Figure 4 depicts the comparison between the predicted moisture content ratios (MR) and the experimental ones. In general, predicted results are in good agreement with the experimental ones. Among the applied models, Page model gives the best fit to the experimental results signified by the highest value of R^2 and the lowest of RMSE.

5 Conclusion

A drying experimental work of peppercorns has been performed in the fluidized bed dryer with three different inlet drying hot air temperatures (T_m) and two superficial air velocities (U^*). The experimental results indicate that the effect of the inlet dry-

ing hot air temperature on moisture content removal and drying rate is more important than that of superficial air velocity. Drying at $T_m = 80$ °C results in dramatic drop of moisture content and substantially higher drying rate as compared to those at $T_m = 60$ and 70 °C. In addition, the Page model can be predicted the drying rate (MR) closely to the experimental data with R^2 and RMSE of $0.993478 = 0.000017387$, respectively.

Acknowledgement: The authors would like to acknowledge with appreciation King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand for financial support of this work.

Nomenclature

a, n, k empirical constants of drying models
 MC particle moisture content on dry basis,
 kg water/kg dry solid
 MC_e equilibrium moisture content,
 kg water/kg dry solid
 MC_i initial moisture content, kg water/kg dry solid
 MC_t moisture content at time t, kg water/kg dry solid
 MC_{t+dt} moisture content at time t+dt,
 kg water/kg dry solid
 MR moisture ratio
 N number of observations
 R² coefficient of determination
 RMSE root mean square error
 t drying time, s
 T drying air temperature, °C
 U drying air velocity (m/s)
 U* normalized air velocity, U/U_{mf}
 U_{mf} minimum fluidization velocity (m/s)
 W_b weight of material before drying, kg
 W_d weight of dry material, kg
 W_w W_b - W_d

References

- [1] M.S. Nargal, and B. Oraikul, "Effect of some physical and chemical pre-treatment on improvement of drying characteristics of hash-brown potatoes," *J Food Science Technology*, vol. 33, pp. 436-439, 1996.
- [2] C.T. Kiranoudis, Z.B. Maroulis, and D. Marinou-Kouris, "Drying kinetics of onion and green pepper," *Drying Technology*, vol. 10, pp. 955-1011, 1992.
- [3] Mulet, A. Berna, M. Borrna, and F. Pinaga, "Effect of air flow rate on carrot drying," *Drying Technology*, vol. 5, pp. 245-258, 1987.

Brought to you by | De Gruyter / TCS

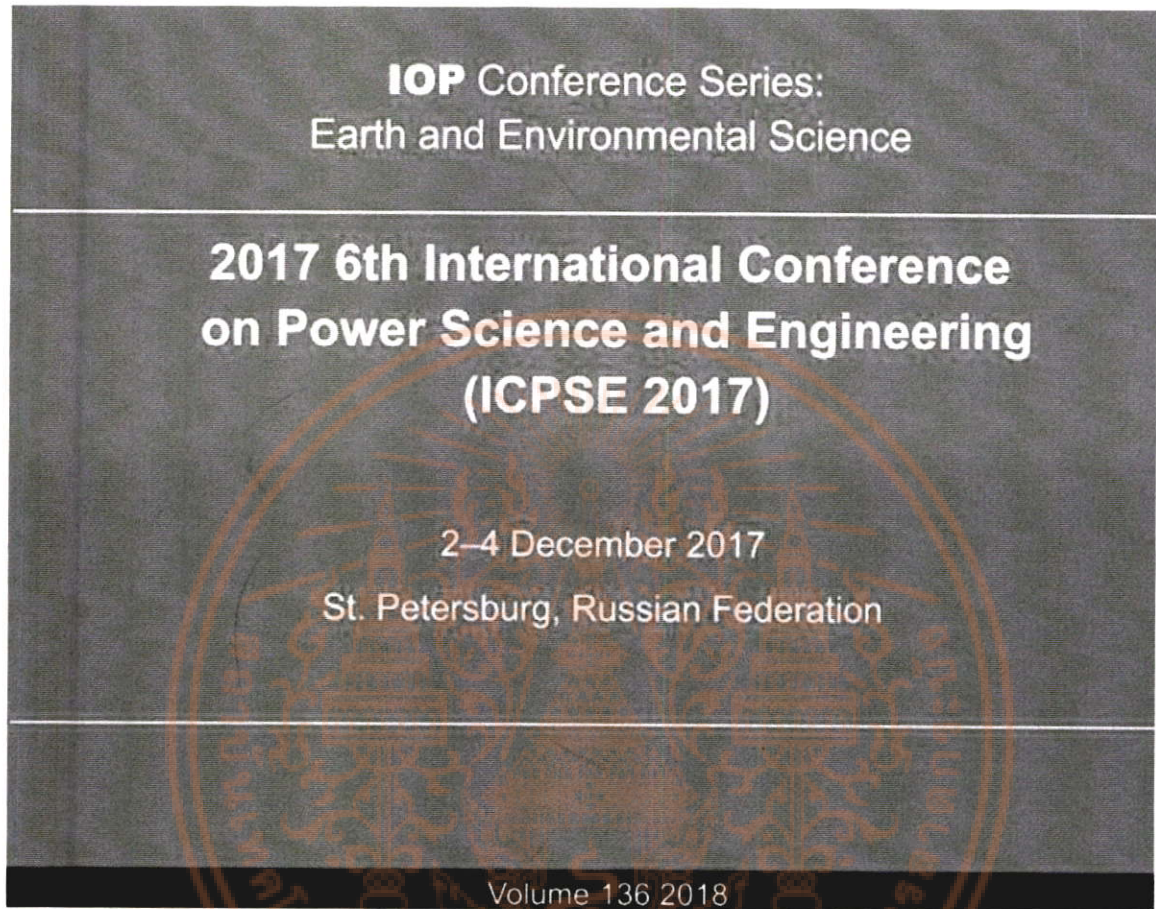
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำเป็นประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [4] Rossello, J. Canellas, and S.A. Simal, "Simple mathematical model to predict the drying rates of potatoes," *J Agric Food Chemical*, vol. 40, pp. 2374-2378, 1992.
- [5] S.M. Tasirin, S.K. Kamarudin, J.A. Ghani, and K.F. Lee, "Optimization of drying parameters of bird's eye chilli in a fluidized bed dryer," *Journal of Food Engineering*, vol. 80, pp. 695-700, 2007.
- [6] S.M. Tasirin, S.K. Kamarudin, K. Jaafar, and K.F. Lee, "The drying kinetics of bird's chillies in a fluidized bed dryer," *Journal of Food Engineering*, vol. 79, pp. 695-705, 2007.
- [7] M. Ozbey, and M.S. Soylemez, "Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains," *Energy Conversion and Management*, vol. 46, pp. 1495-1512, 2005.
- [8] T. Madhiyanona, A. Philaa, and S. Soponronnaritb, "Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 2849-2854, 2009.
- [9] G. Çakmak and C. Yildiz, "Design of a new solar dryer system with swirling flow for drying seeded grape," *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36, pp. 984-990, 2009.
- [10] Doymaz and O. Ismail, "Drying characteristics of sweet cherry," *food and bioproducts processing*, vol. 89, pp. 31-38, 2011.
- [11] P. Promvong, A. Boonloi, M. Pimsarn, and C. Thianpong, "Drying characteristics of peppercorns in a rectangular fluidized-bed with triangular wavy walls," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, pp. 1239-1246, 2011.
- [12] T. Nazghelichi, M.H. Klanmehr, and M. Aghbashlo, "Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes," *Energy*, vol. 35, pp. 4679-4684, 2010.
- [13] Dincer, "On energetic, exergetic and environmental aspects of drying systems," *International Journal Energy Resource*, vol. 26, pp. 717-727 2002.
- [14] Boonloi, N. Depaiwa, and P. Promvong, "Drying kinetic of peppercorns in a rectangular fluidized-bed," *International Conference on Green and Sustainable Innovation, 2-4 December 2009, Thailand*.
- [15] B.S. Yilbas, M.M. Hussain, and I. Dincer, "Heat and moisture diffusion in slab products due to convective boundary condition," *Heat and Mass Transfer*, vol. 39, pp. 471-476, 2003.
- [16] M. Özdemir and Y.O. Devres, "The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting," *Journal of Food Engineering*, vol. 42, pp. 225-233, 1999.

6.2.3 Drying Peppercorn Characteristics in Fluidized Bed Dryer Equipped with Baffle Vortex Generators



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Document details

[← Back to results](#)
[← Previous](#)
 2 of 18
 [Next](#) [→](#)

[Export](#)
[Download](#)
[Print](#)
[Email](#)
[Save to PDF](#)
[Save to list](#)
[More](#) [→](#)

[View at Publisher](#)

IOP Conference Series: Earth and Environmental Science
 Volume 136, Issue 1, 26 March 2018, Article number 012020
 2017 6th International Conference on Power Science and Engineering, ICPSPE 2017, St. Petersburg, Russian Federation, 2 December
 2017 through 4 December 2017, Code:135651

Drying peppercorn characteristics in fluidized bed dryer equipped with baffle vortex generators

Conference Paper Open Access

Chuwattanakul, V.*  Banthumporn, K.[†] Promvong, P.[†] Eiamsa-ard, S.[†] 

*Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

[†]Faculty of Engineering, Mahasarakham University of Technology, Bangkok, Thailand

Abstract

[View references \(23\)](#)

The paper deals with the characteristic study of drying peppercorn using fluidized bed dryer fitted with baffle vortex generators. The experiments were operated at three different superficial air velocities of 1.20 m/s , 1.40 m/s and 1.60 m/s . Experiments were operated from the initial to final moisture contents of around 22% (dry basis). During the experiments, peppercorns were sampling every 5 minutes, for moisture analysis. A typical fluidized bed dryer was also tested under similar operating conditions for the assessment. The results indicate that the influence of superficial air velocity on drying peppercorn characteristic in the fluidized bed dryer fitted with baffle vortex generators is more significant than that in the typical fluidized bed dryer. It is observed that fluidized bed dryer fitted with baffle vortex generators shows better performance in reducing moisture content with faster drying rate than the typical fluidized bed dryer especially at high superficial air velocity due to the strong longitudinal vortex which helps in improving the fluid mixing, heat and mass transfer rates. © Published under licence by IOP Publishing Ltd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

PAPER • OPEN ACCESS

2017 6th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE 2017)

To cite this article: 2018 *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci* **136** 011001

[View the article online for updates and enhancements](#)

Related content

- 2017 International Conference on Renewable Energy and Environment (ICREE 2017)
- 2017 International Conference on Materials and Intelligent Manufacturing (ICMIIM 2017)
- The 4th International Conference on Manufacturing and Industrial Technologies



This content was downloaded from IP address 203.188.16.23 on 31/03/2018 at 05:58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

PREFACE

2017 6th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE2017) is held during Dec 2-4, 2017 in St. Petersburg, Russia. The major goal and feature of the conference is to bring scholars, academic scientists, engineers, industry researchers together to exchange and share their experiences and research results, and discuss the practical challenges encountered and the solutions adopted in the field of power science and engineering.

This proceedings presents a selection from papers submitted to conference from universities, research institutes and industries. Each contributed paper was rigorously peer-reviewed by reviewers who were drawn from a large pool of technical committee members as well as other international reviewers in related fields. The papers selected depended on their quality and their relevancy to the conference. The volume tends to present readers the recent advances in topics of New Energy Development and Utilization, Power Electronics and Electrical Engineering, Mechanical Design and Control Technology.

We feel deeply grateful to all the people that have contributed to make this event possible: the authors who contributed papers, conference committee, the invited speakers, and the diligent reviewers. Thanks are also extended to the conference administrative committee, and supporters, for their tirelessly efforts throughout the course of the conference.

Finally, we wish to thank all authors and attendees for participating in conference. I hope you have a fruitful and memorable experience in St. Petersburg.

ICPSE2017
Conference Committee



Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

Published under licence by IOP Publishing Ltd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Drying peppercorn characteristics in fluidized bed dryer equipped with baffle vortex generators

V Chuwattanakul¹, K Banthumporn¹, P Promvong¹ and S Eiamsa-ard²

¹Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

²Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok 10530, Thailand


E-mail: varesaatkmitl@gmail.com

Abstract. The paper deals with the characteristic study of drying peppercorn using fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators. The experiments were operated at three different superficial air velocities of $1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ and $1.6U_{mf}$. Experiments were operated from the initial to final moisture contents of around 12% (dry basis). During the experiments, peppercorns were sampling every 5 minutes, for moisture analysis. A typical fluidized-bed dryer was also tested under similar operating conditions for the assessment. The results indicate that the influence of superficial air velocity on drying peppercorn characteristic in the fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators is more significant than that in the typical fluidized-bed dryer. It is observed that fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators shows better performance in reducing moisture content with faster drying rate than the typical fluidized bed dryer especially at high superficial air velocity due to the strong longitudinal vortex which helps in improving the fluid mixing, heat and mass transfer rates.

1. Introduction

Peppercorn is one of economical crops in Thailand which gives export income of around 50-70 million baht per year. The average capacity of peppercorn production is 3.5 million tons per year. Peppercorn was used not only herbal ingredient in various kind of foods but also used as food additive and flavour. It contains essential volatile oils that assist to preserve food and extend shelf life. Drying of foodstuff is one of popular thermal processes that help to preserve foods by removing of water. This process helps to inhibit growth of bacteria, yeasts, and mold that cause food deterioration. Drying process is simultaneous heat and mass transfer. During the process, heat is supplied to particles of material and moisture vapor is removed from the material into drying medium. Although there are various ways of drying method for food preservation, fluidized-bed drying is a one of promising alternative technique which is fast, easy, less time and homogenous drying used for small food products.

Drying kinetic behaviors in the drying of different food products have been extensively reported. Kooli *et al.* [1] investigated drying behaviors such as moisture content (MC) and drying rate of the red pepper at different test conditions (greenhouse and open sun). Scala *et al.* [2] proposed the mathematical model for predicting the drying rate of red pepper. In addition, the product results (nutritional and organoleptic attributes) was also reported. Darvishi *et al.* [3] investigated the effect of microwave power on the drying kinetics, energy consumption and drying efficiency of green pepper during different microwave drying. They found that the drying time decreased from 9 to 2.5 min,

 Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.
Published under licence by IOP Publishing Ltd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

attributed to the promoted moisture diffusivity by increasing the microwave output power from 180 to 540 W. Lechtańska *et al.* [4] presented the drying characteristics (drying kinetics, product quality and energy consumption) of green pepper with hybrid drying between convective drying and microwave drying. Azaizia *et al.* [5] modeled a new solar greenhouse drying system for the drying of red peppers. They proposed mixed-mode (SGDS) consisted of two parts (flat plate solar air collector and greenhouse). The effects of the area of the product to be dried, airflow rate and collector area, on moisture content changes, air temperature and humidity inside the greenhouse were also reported. According to the literature review, the drying efficiency is strongly dependent on drying method and condition. From the previous works, vortex generators have been used for enhancing the heat transfer rate in thermal systems [6-16]. This research aimed to further improve the drying efficiency of the conventional fluidized-bed dryer (FBD) by equipping baffle vortex generator with the dryer. For an assessment, the conventional typical fluidized-bed dryer without baffle vortex generator was also tested. Peppercorns were used as the drying feed. In each operating run, 400 grams of fresh peppercorns with the initial moisture content at about 550% (wet basis) were dried using hot air with constant temperature. The inlet hot air temperature was 70°C, the relative air humidity 63% and the air velocity varied from about 1.2U_{mf} to 1.6U_{mf}. Furthermore, five mathematical models (Newton Page Modified-Page Logarithmic Henderson and Pabis) are applied in terms of moisture ratio (MR) with respect to drying times (DT).

2. Theoretical analysis

In the present work, the model is presented the relationship between moisture and drying time by means of regression analysis [17-18] as found details in table 1. The moisture ratio (MR) is usually expressed as:

$$MR = (M - M_e) / (M_0 - M_e) \quad (1)$$

The drying speed or drying rate of samples is expressed as

$$DR = dM/dt = (M_0 - M_e) / dt \quad (2)$$

To evaluate the fitting process of each mathematical model, (1) correlation coefficient (R^2), (2) root mean square error (RMSE) and (3) chi-square (χ^2) were considered. The regression analysis was performed by using statistical software. The best fitting model is the one giving the highest of correlation coefficient (R^2) and the lowest root mean square error (RMSE) and chi-square (χ^2). Details of the statistical package based are presented in equation below and table 1.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

and

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N-p} \quad (4)$$

Table 1. Mathematical models applied to the drying curves.

Model name	Model	References
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Doymaz and Pala [19]
Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Zhang and Litchfield [20]
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Ayensu [21]
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis [22]
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Kassem [23]

3. Experimental description

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Peppercorn is one of economical crops in Thailand which gives export income of around 50-70 million baht per year. The average capacity of peppercorn production is 3.5 million tons per year. Peppercorn was used not only herbal ingredient in various kind of foods but also used as food additive and flavour. It contains essential volatile oils that assist to preserve food and extend shelf life. Drying of foodstuff is one of popular thermal processes that help to preserve foods by removing of water. This process helps to inhibit growth of bacteria, yeasts, and mold that cause food deterioration. Drying process is simultaneous heat and mass transfer. During the process, heat is supplied to particles of material and moisture vapor is removed from the material into drying medium. Although there are various ways of drying method for food preservation, fluidized-bed drying is a one of promising alternative technique which is fast, easy, less time and homogenous drying used for small food products.

3.1. Materials

Fresh green peppers were harvested from a green house in the Chanthaburi province of Thailand, in March 2017 and were stored in the refrigerator at temperature of 4 °C until the experiments were carried out. Before the experiments, the samples were removed from the refrigerator and allowed to reach room temperature (about 25 °C). The green peppers (average dimensions of 4.5 ± 0.1 mm diameter) were washed and halved as seen in Fig. 1. It was selected carefully in an attempt to minimum effect of the kernel size. The green pepper had an initial moisture content of 550% (wet basis), which was determined by drying in a convective oven at 105 °C until the weight became constant.

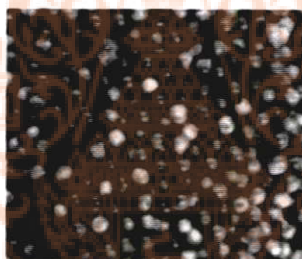


Figure 1. Photograph of fresh peppercorns.

3.2. Experimental setup and method

The fluidized bed dryer with vortex generators was set up by equipping baffles with the typical fluidized-bed dryer. The baffle bundles used in the present experiment are also demonstrated in Fig. 2. The baffle vortex generators were made of stainless sheet with thickness of 1.2 mm. Each baffle is connected to the other in series with constant pitch lengths (P) of 210 mm which correspond to pitch ratios (P/D) of 1.5. The baffle bundles were inserted into the bed column. It is noteworthy that the bed alone (typical fluidized-bed dryer) was also tested for comparison. The setup of the fluidized-bed dryer with baffle vortex generator was the same rig as the typical fluidized-bed dryer but different bed. The baffle was used to create vortex recirculating flows or to increase the lateral fluidization in the bed apart from the vertical fluidization. A numerical simulation of the flow behaviours at superficial velocity of $1.2U_{mf}$ in the fluidized-bed with baffle vortex generator is depicted in Fig. 2. It can be observed that two longitudinal vortex flows generated by the baffle bundles that could be helped to induce chaotic mixing between peppercorns and hot air leading to shorter drying time in comparison with the plain bed.

A schematic diagram of the experimental setup is shown in Fig. 3. The experimental facility consisted of bed column with/without baffle vortex generators (B-FBD/FBD), distributor plate, sample-containing bowl, weight digital, 5 kW electric air heater unit, 10 hp high pressure air blower, temperature controller, hot wire anemometer for calibrating, orifice flow meter with pressure differential digital for measuring the volumetric air flow rate, power meter and an inverter. The bed made of acrylic cylinder with 140 mm in diameter and 1000 mm height. A perforated plate with 140 mm

diameter was located at the bed bottom as air distributor. The plate consisted of 408 holes, the diameter of each hole was 3 mm (total hole area was 75% of total plate area).

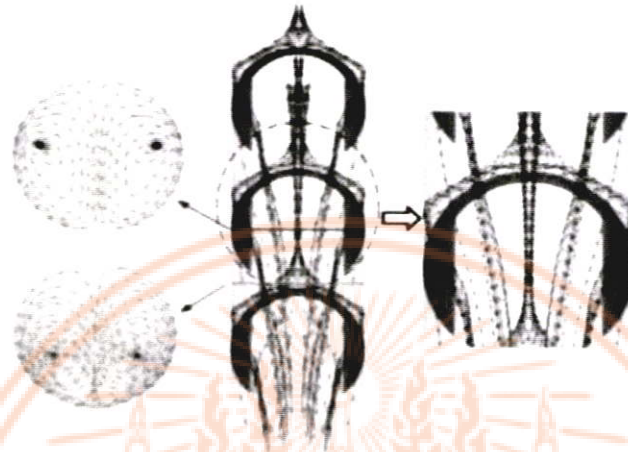


Figure 2. Streamlines displaying flow structure in B-FBD.

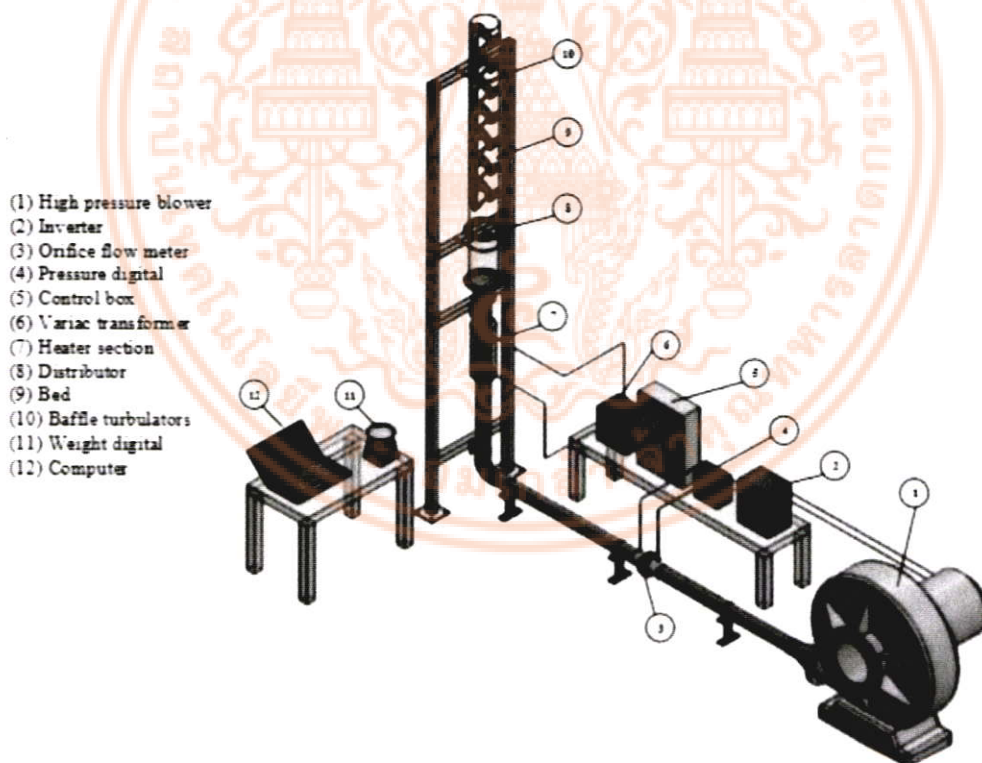


Figure 3. Schematic diagram of experimental setup.

For fluidized bed drying, the most significant component is the drying column. Therefore, the thermal balance was derived by applying mass, energy and entropy balances to the drying column in batch fluidization. The drying process in a batch-fluidized bed was modeled by assuming a perfect mixing of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

particles. The process took place under isobaric condition due to the simultaneous heat and mass transfer between hot air and peppercorns. The superficial air velocities in the bed were set to be $1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ and $1.6U_{mf}$, respectively. A blower supplied air through a 5 kW electric air heater unit. The blower speed could be adjusted via an inverter where the volumetric air flow rate was monitored by through an orifice flow meter. All hot air passages were wrapped by insulation to minimize heat loss to environment. The system was preheated until the rig temperature was constant at 70°C before running the experiment. When the rig temperature was steady, the 400 grams of peppercorn feed was loaded into the rig. The corn grain was sampled every 5 minutes for moisture measuring. Drying was corrected until a moisture content (MC) of 10% (dry basis) or lower. After drying process, the peppercorns in the drying bed were removed and weighed by digital weighing scales which recorded to the personal computer (PC).

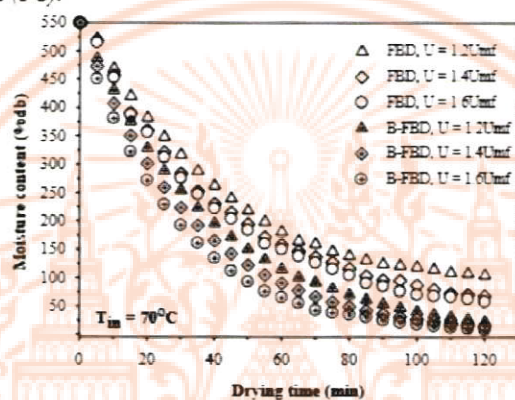


Figure 4. Relationship between moisture content (MC) and drying time (DT) of peppercorn at various superficial air velocity of fluidized-bed dryer fitted with without baffle vortex generators.

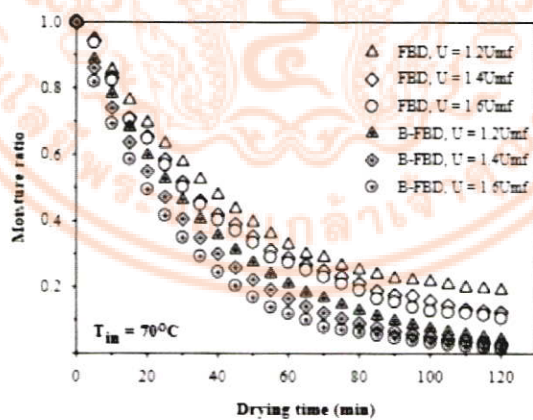


Figure 5. Relationship between moisture ratio (MR) and drying time (DT) of peppercorn at various superficial air velocity of fluidized-bed dryer fitted with without baffle vortex generators.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

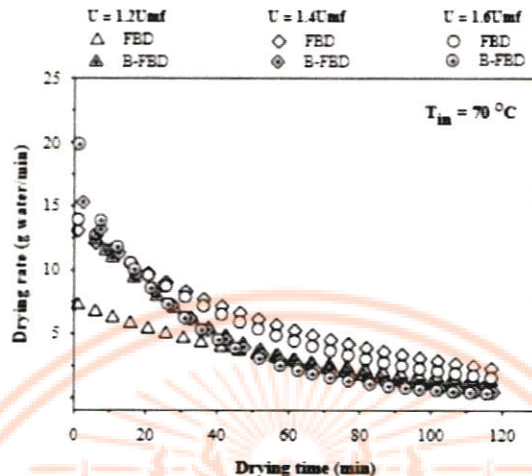


Figure 6. Relationship between drying rate (DR) and drying time (DT) of peppercorn at various superficial air velocity of fluidized-bed dryer fitted with without baffle vortex generators.

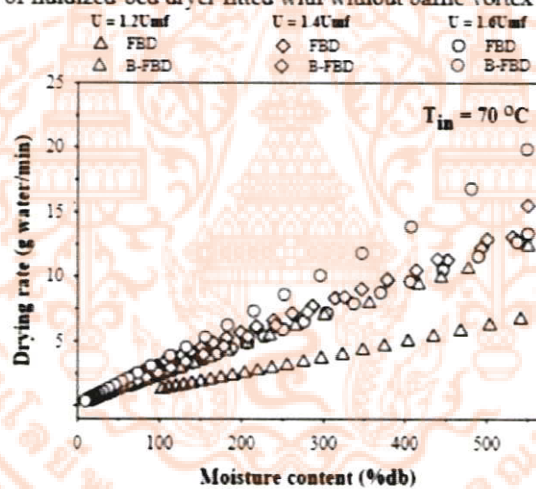


Figure 7. Relationship between drying rate (DR) and moisture content of peppercorn at various superficial air velocity of fluidized-bed dryer fitted with without baffle vortex generators.

4. Results and discussion

In this experimental result sections, the influences of superficial air velocity ($1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ and $1.6U_{mf}$) on drying behaviours of peppercorns are described regarding to the results in Figs. 4-8. Then, the comparison of drying in the typical fluidized-bed dryer and the fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators are reported in Figs. 6-7. Evidently, the moisture content of peppercorns decreases with drying time for both in the typical fluidized-bed dryer (FBD) and the fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators (B-FBD) as seen in Figs. 4 and 5. The moisture content (MC) of peppercorn abruptly decreases in the initial period and thereafter the moisture content (MC) gradually reduced during the mechanism of convection from the vaporization rate of heat and mass transfer between the peppercorns and hot air. At the same drying time (DT), the moisture content of peppercorns tends to decrease with increasing superficial air velocity. Because more available hot air as the carrier at higher superficial velocity, thus moisture can be removed more efficiently. It is noteworthy that the influence of superficial air velocity on drying peppercorn in the fluidized-bed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

dryer fitted with baffle vortex generators (B-FBD) is more significant than that in the typical fluidized-bed dryer (FBD). The more significant outcome in the dryer with baffle vortex generators can be attributed to the combined effects of vortex flow with the increased axial flow.

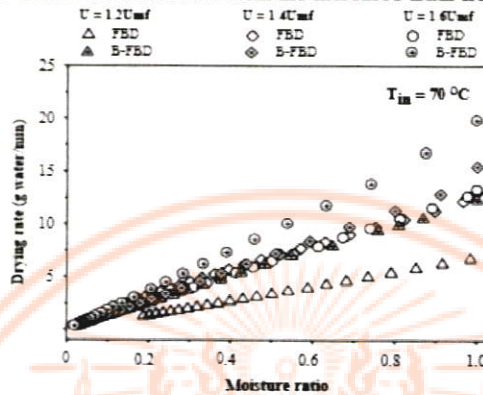


Figure 8. Relationship between drying rate (DR) and moisture content of peppercorn at various superficial air velocity of fluidized-bed dryer fitted with without baffle vortex generators.

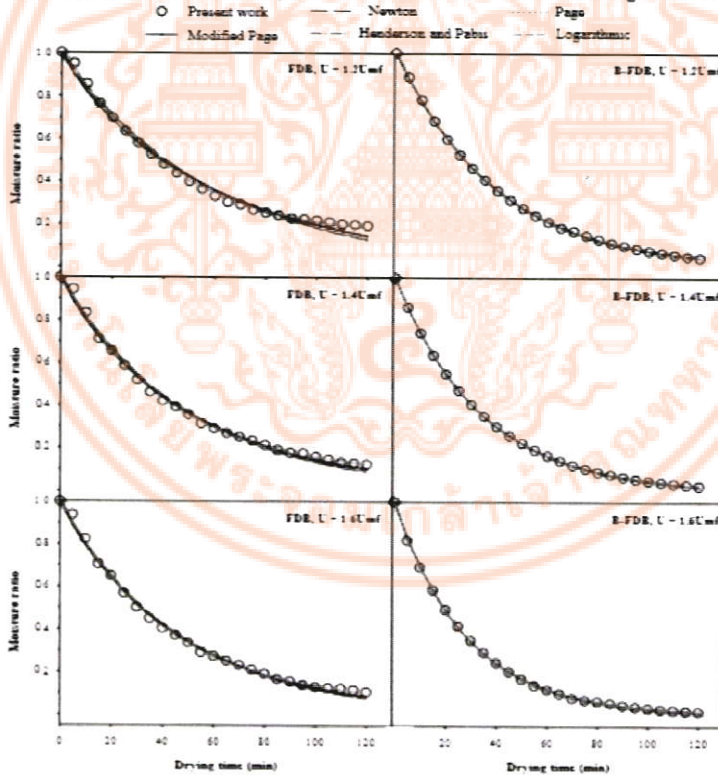


Figure 9. Comparison between experimental and predicted data of FBD fitted with/without baffles of all superficial air velocities ($1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ and $1.6U_{mf}$).

The comparison in Fig 4 shows that at the same drying time, the moisture contents (MC) of peppercorns in the fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators of all superficial air velocity ($1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ and $1.6U_{mf}$) are considerable lower than those in the typical fluidized-bed dryer. In

other words, the drying efficiencies or drying rates in the fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators are higher than those in the typical fluidized-bed dryer. The better performance of the one with baffle vortex generators is due to the higher turbulence intensity which leads to better contact leading between the hot air and the peppercorns (gas-particle) and thus higher water evaporation due to high heat and mass transfer rate with smaller flow area.

The results in Fig. 6 also indicated that all drying curve consist of two stages: (1) constant rate period and (2) falling rate period. Interestingly, the constant rate period in the typical fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators (B-FBD) ends within the first 100 minutes while that in the typical fluidized-bed dryer (FBD) extends until around 80 minutes. The shorter constant rate period in the fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators (B-FBD) is attributed to the lower remaining moisture content of peppercorns due to the faster drying or higher moisture diffusion in the constant rate period.

Influence of the bed fitted with baffle vortex generators and superficial air velocity ($1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ and $1.6U_{mf}$) on drying rate (DR) is also examined and presented in Fig. 6. It is obvious that the drying rate (DR) is decreased continuously with increasing drying time (DT) which it is no constant rate period in the drying curve of present drying rate. It is also found that the drying rate (DR) tends to decrease with raising the drying time (DT) as mention above and the fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators (B-FBD) gives the drying rate (DR) higher than the typical fluidized-bed dryer (FBD) for all superficial air velocity. At the beginning drying process or drying time, the drying rate (DR) of the fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators (B-FBD) is visible to be high than that typical fluidized-bed dryer (FBD) due to strong longitudinal vortex flow performs rise to higher turbulence intensity between the hot air and the peppercorn grains in the bed. This implies that the use of fluidized-bed dryer fitted with baffles with high superficial air velocity leads to higher heat and mass at the beginning of drying process due to very high moisture content in fresh peppercorns. The initial values (0-25 minutes) of drying rate (DR) for the fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators and the typical fluidized-bed dryer are, respectively, about 57% and 31% at the superficial air velocity of $1.6U_{mf}$, and it becomes less important after approximately 25 minutes for the fluidized-bed dryer fitted with baffles but the typical fluidized-bed dryer is different since the change of the drying rate (DR) is nearly constant for longer drying time. The highest drying rates (DR) of the fluidized-bed dryer fitted with baffles at superficial air velocity of $1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ and $1.6U_{mf}$ are up to 16%, 47% and 58% higher than that typical fluidized-bed dryer in the range of drying time of 0-15 minutes.

Relationship between the drying rate (DR) and moisture content (MC) or moisture ratio (MR) is presented in Figs. 7 and 8. It is clearly seen that the drying rate (DR) is varied linearly with those the moisture content (MC) and moisture ratio (MR) and also seen that at higher superficial air velocity ($1.6U_{mf}$) the slope became steeper than the lower superficial air velocity ($1.2U_{mf}$ and $1.4U_{mf}$), especially for the fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators which it is also found that the drying rate (DR) is decreased with the reduction of moisture content (MC) and moisture ratio (MR). The drying rate (DR) of the fluidized-bed dryer fitted with baffles are higher than those of typical fluidized-bed dryer for all superficial air velocity. In addition, the average drying rate (DR) of the fluidized-bed dryer fitted with baffles are, respectively, seen to be around 2.83, 1.91, and 2.69 g water/min for superficial air velocity of $1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ and $1.6U_{mf}$ in the range of drying time of 0-25 minutes.

For mathematical modelling, the moisture content of peppercorns at different drying velocities (superficial air velocities of $1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ and $1.6U_{mf}$) obtained from the experiment data are predicted with five different mathematical models for example the Newton model, Page model, Modified Page model, Henderson and Pabis model, and Logarithmic model in the form of the moisture ratio (MR) as demonstrated in Table 1 and Fig. 9. In the present study, the modelling works were done using least square algorithm in MATLAB at various superficial air velocities. Table 2 and Fig. 9 presented the comparison criteria used to evaluate the RMSE, chi-square (χ^2) and R^2 . A comparison of the present experimental data versus the predictions (from five different models) of statistical parameter examines (RMSE, χ^2 and R^2) for the for the drying peppercorn by using

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators with three superficial air velocities of $1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ and $1.6U_{mf}$ is also displayed in Figs. 9 and 10.

Table 2. Statistical results for five mathematical models at various superficial air velocity ($1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ and $1.6U_{mf}$) in term of $U^* = U/U_{mf}$.

Model		R^2	RMSE	χ^2	
FBD	Newton	$k = -0.038072 - 0.072488U^*$ $0.022063U^*$	0.9955892	0.023295	0.0011305
	Page	$k = -0.053355 - 0.113235U^*$ $0.039825U^*$ $n = 0.917577$ $0.105542U^* - 0.079512U^*$	0.9941618	0.0195168	0.0007936
	Modified Page	$k = -$ $0.041962 - 0.077948U^* - 0.079512U^*$ $n = 0.917577 - 0.105542U^* - 0.05265U^*$	0.9693263	0.3204202	0.106947
	Henderson and Pabis	$a = 1.052835 - 0.117995U^* - 0.05265U^*$ $k = -0.036132 - 0.068818U^*$ $0.020538U^*$	0.995545	0.0230804	0.0028944
	Logarithmic	$a = 0.306802 - 0.761528U^*$ $0.218738U^*$ $k = 0.001462 - 0.030545U^* - 0.0098U^*$ $c = 1.00201 - 1.142453U^* - 0.345338U^*$	0.9978796	0.0105659	0.0001163
B-FBD	Newton	$k = 0.021552 - 0.011955U^* - 0.01285U^*$	0.9993927	0.0034642	1.25E-05
	Page	$k = 0.047047 - 0.0575U^* - 0.032375U^*$ $n = 0.883947 - 0.242713U^*$ $0.114163U^*$	0.9994227	0.0028532	8.48E-06
	Modified Page	$k = 0.023617$ $0.015425U^* - 0.014275U^*$ $n = 0.883947 - 0.242713U^*$ $0.114163U^*$	0.99948	0.0029674	9.172E-06
	Henderson and Pabis	$a = 0.958238 - 0.098688U^*$ $0.049188U^*$ $k = 0.018653 - 0.00656U^* - 0.010475U^*$	0.9994917	0.0028033	8.727E-06
	Logarithmic	$a = 0.942817 - 0.124683U^*$ $0.059888U^*$ $k = 0.024085$ $0.015252U^* - 0.013912U^*$ $c = 0.039725$ $0.065283U^* - 0.026363U^*$	0.9995071	0.0011063	8.19E-06

It can be obvious that the predicted results of all models performed generally are in good agreement with the those the experimental work. It is also obvious that of all the mathematical models (Newton model, Page model, Modified Page model, Henderson and Pabis model, and Logarithmic model), the R^2 , RMSE and χ^2 value are ranged of 0.9693263 to 0.9978796, 0.0105659 to 0.3204202 and 0.0001163 to 0.106947 for the typical fluidized-bed dryer (FBD), and 0.9993927 to 0.9995071, 0.0011063 to 0.0034642 and 0.00000819 to 0.0000125 for the fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators (B-FBD), respectively. Logarithmic model gives best due to the highest value of R^2 (0.9995071) and the lowest of RMSE (0.0011063) and χ^2 (0.00000819). This means that the Logarithmic model gives the best fit with the measurement data as seen in the table 2 and Figs. 9 and 10. In addition, it is also clearly observed that at the low superficial air velocities ($1.2U_{mf}$ and $1.4U_{mf}$) of typical fluidized-bed dryer (FBD), use of the Logarithmic model leads to more accurate results than those other models in compared with the present data (measurement).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

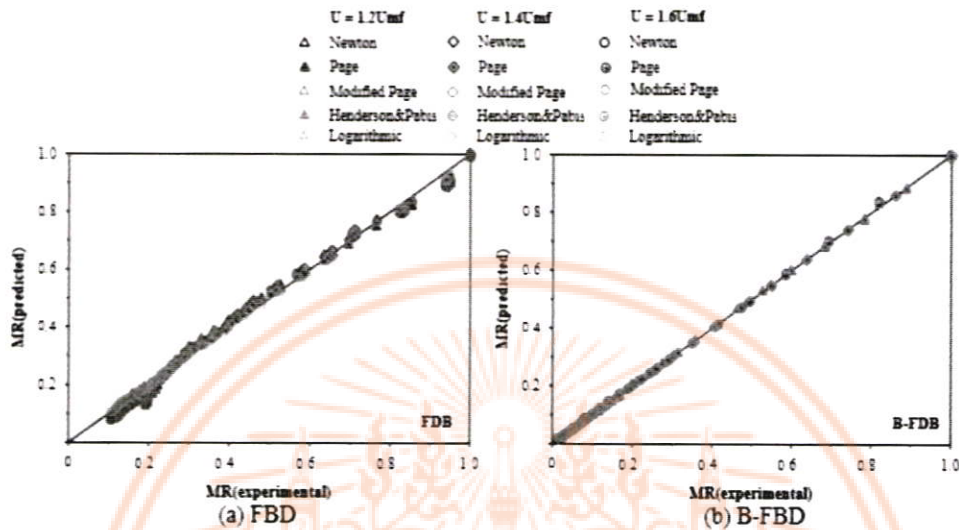


Figure 10. Experimental and predicted results for five various mathematical models (Newton Page Modified-Page Logarithmic Henderson and Pabis model).

5. Conclusion

The drying characteristics of fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators are experimentally investigated at various superficial air velocity. The main results from the present work can be summarized as follow below:

- The influence of superficial air velocity on drying peppercorn characteristic in the fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators (B-FBD) is more significant than that the typical fluidized-bed dryer (FBD) at the initial interval of the drying time.
- The drying rate (DR) of fluidized-bed dryer fitted with baffle vortex generators (B-FBD) is dependent on superficial air velocities due to strong of dual longitudinal vortex near around the baffles that help to better the hot air mixing with the peppercorn leading to the higher mechanism of heat and mass transfer
- The present drying rate data of the pepper corn of both dryer techniques were made to fit with five mathematical models which the best fit was based on the highest value of R^2 , and lowest value of RMSE and γ^2 . Logarithmic model is performed the best fit model with the highest value of R^2 and the lowest value of RMSE and γ^2 for B-FBD. Furthermore, B-FBD and FBD are compact and have good control over drying conditioned, relatively high drying rates at the initial interval of the drying time.

6. Acknowledgment

The authors would like to acknowledge with appreciation King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand for financial support of this work (KREF 015910).

7. Nomenclatures

- DR drying rate (g water min)
- MC moisture content (%db)
- MR moisture ratio
- M moisture content any time (g water g dry matter)
- Me equilibrium moisture content (g water g dry matter)
- M0 initial moisture content (g water g dry matter)
- Mt moisture content at t (g water g dry matter)

$M_t - \Delta t$ moisture content at $t + dt$ (g water/g dry matter)
 t drying time (min)

8. References

- [1] Kooli S, Fadhel A, Farhat A and Belghith A 2007 *J. Food Engineering* **79** 1094
- [2] Scala K D and Crapiste G 2008 *LWT-Food Science and Technology* **41** 789
- [3] Darvishi H, Asl A R, Asghari A, Azadbakht M, Najafi G and Khodaei J 2014 *J. Saudi Society of Agricultural Sciences* **13** 130
- [4] Lechtańska J M, Szadzińska J and Kowalski S J 2015 *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* **98** 155
- [5] Azaizia Z, Kooli S, Elkhadraoui A, Hamdi I and Guizani A A 2017 *Int. J. Hydrogen Energy* **42** 8818
- [6] Thianpong C, Eiamsa-ard P, Promvong P and Eiamsa-ard S 2012 *Energy Procedia* **14** 1117
- [7] Eiamsa-ard S, Somkleang P, Nuntadusit C and Thianpong C 2013 *Applied Thermal Engineering* **54** 289
- [8] Kongkaiatpaiboon V, Nanan K and Eiamsa-ard S 2010 *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer* **37** 560
- [9] Zhang X, Liu Z and Liu W 2013 *Int. J. of Heat and Mass Transfer* **60** 490
- [10] Thianpong C, Yongsiri K, Nanan K and Eiamsa-ard S 2012 *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer* **39** 861
- [11] Matsunaga T and Sumitomo T 2014 *J. of Research and Applications in Mechanical Engineering* **2** 65
- [12] Eiamsa-ard S 2010 *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer* **37** 644
- [13] Eiamsa-ard S, Wongcharee K and Promvong P 2010 *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer* **37** 156
- [14] Promvong P and Eiamsa-ard S 2007 *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer* **34** 838
- [15] Sivashanmugam P, Nagarajan P K and Suresh S 2008 *Chemical Engineering Communication* **195** 977
- [16] Eiamsa-ard S, Yongsiri K, Nanan K and Thianpong C 2012 *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* **60** 42
- [17] Yilbas B S, Hussain M M and Dincer I 2003 *Heat and Mass Transfer* **39** 471
- [18] Özdemir M and Devres Y O 1999 *J. of Food Engineering* **42** 225
- [19] Doymaz I and Pala M 2002 *J. of Food Engineering* **55** 331
- [20] Zhang Q and Litchfield J B 1991 *Drying Technology: An Int. J.* **9** 383
- [21] Ayensu A 1997 *Solar Energy* **59** 121
- [22] Henderson S M and Pabis S 1961 *J. of Agricultural Engineering Research* **6** 169
- [23] Kassem A 1998 *13th Int. congress on agricultural engineering* **6** (Morocco) February 2-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

เอกสารอ้างอิง

1. ศูนย์วิจัยพืชสวนจันทบุรี, สถาบันวิจัยพืชสวน และ กรมวิชาการเกษตร, เพิ่มประสิทธิ ภาพการผลิตพริกไทย เพื่อลดผลกระทบจากการเปิดเสรีทางการค้า (FTA), หน้า 2
2. Alton Brown, (2016) “Every Day Cook”, Random House Publishing Group, Published: Sep 27
3. K.V. Peter, 2006. “Handbook of herbs and spices”, Woodhead Publishing Limited, Published in North and South America by CRC Press LLC.
4. S. Darshan and R. Doreswamy, (2004) “Patented anti-inflammatory plant drug development from traditional medicine”, *Phytother Res* 18:343–57.
5. Y.C. Yang, S.G. Lee, H.K. Lee, M.K. Kim, S.H. Lee and H.S. Lee, (2002) “A piperidine amide extracted from *Piper longum* L. fruit shows activity against *Aedes aegypti* mosquito larvae”, *J Agric Food Chem*, Jun 19;50(13):3765-7.
6. V.A. Parthasarathy, B. Chempakam and T.J. Zachariah, (2008) “Chemistry of spices”, London CABI.
7. S. Sosa, M. Balick, R. Arvigo, R. Esposito, C. Pizza, G. Altinier and A. Tubaro, (2002) “Screening of the topical anti-inflammatory activity of some Central American plants”, *J Ethnopharmacol* 81:211–5.
8. G. Raman and V.G. Gaikar, (2002) “Process for extraction of piperine from piper species” Google Patents.
9. การถนอมอาหารในสมัยโบราณ. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว [Online] Available: <http://kanchanapisek.or.th> (สืบค้นวันที่ 2 ส.ค. 2559).
10. Mert Gur and Mesut Gur, (2014) “Comparing Corn Drying in Fluidized Bed Dryer and Convective Tray Dryer”, Springer International, book *Progress in Exergy, Energy and the Environment* (pp.687-694).
11. A. Boonloi and P. Promvong, (2006) “Drying Kinetic of Pepper Corns in a Fluidized-bed with Helical Distributor Plate”, *The 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE)*.
12. M. Ozbey and M.S. Soylemez, (2005) “Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains”, *Energy conversion and management* 46 p(1495-1512).
13. V.K. Venkiteswaran, G.J. Jun, C.Y. Sing, S.A. Sulaiman and V.R. Raghavan, (2012) “Variation of bed pressure drop with particle shapes in a swirling fluidized bed”, *Journal of Applied Sciences* 12 (2012) 2598-2603.
14. P. Promvong, A. Boonloi, M. Pimsarn, C. Thianpong, (2011) “Drying characteristics of peppercorns in a rectangular fluidized-bed with triangular wavy walls”, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38 (2011) 1239-1246.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

15. อิทธิพล แก่งสันเทียะ, (2551) “พฤติกรรมการอบแห้งเมล็ดพริกไทยในหอพลูอิดโดซ์เบดที่มีครีบริปตัววี” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
16. วิวัฒน์ วุฒิวิวัฒน์ชัย, (2540) “แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคพลูอิดโดเซชัน” วิทยานิพนธ์ (วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
17. P.P. Thant, P.P. Mahanta and P.S. Robi, (2015) “Performance enhancement of Inclined bubbling fluidized bed paddy dryer by design modification,” International Journal of Engineering and Applied Science, 2, 2394-3661.
18. E. Ozahi and H. Demir, (2015) “Drying performance analysis of a batch type fluidized bed drying process for corn and unshelled pistachio nut regarding to energetic and exergetic efficiencies,” Measurement, 60, 85-96.
19. อัจฉรา แซ่ไคว้, สุภวรรณ ภูริระวณิชกุล และ ยุทธนา ภูริระวณิชกุล (2556) “ปัจจัยของการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานความร้อนแบบการพาและการแผ่รังสีความร้อนที่มีต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของพริกไทยดำ”, วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. ปีที่ 18 ฉบับที่ 1, หน้า 166-180
20. อรุมา หนูทอง และ ณรงค์ อังกิมบัวน (2557) “การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง”, วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ฉบับพิเศษ การประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 6
21. Gorgani, Maedeh Mohammadi, Ghasem D. Najafpour, and Maryam Nikzad, (2017) “Piperine The Bioactive Compound of Black Pepper: From Isolation to Medicinal Formulations”, Institute of Food Technologists, Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety Vol.16.
22. K. Hirasa and M. Takemasa, (1998) “Spice science and technology”, Boca Raton, Fla.: CRC Press.
23. O.P. Agarwal, (2010) “Chemistry of organic natural products”, Meerut India:Goel Publishing House.
24. RISFAHERI and N. NURDJANNAH, (2000) “Pepper processing – The Indonesian Scenario”, In: Ravindran, P.N (Ed.) Black Pepper, Harwood Academic, 355–366
25. T.J. ZACHARIAH, (2000) “On farm processing of black pepper” In: Ravindran, P.N. (Ed.) Black Pepper, Harwood Academic, pp. 335–54
26. เฉลิมชล ช่างถม, “จันทบุรี เมืองแห่งพริกไทยพันธุ์ดี” กลุ่มส่งเสริมและพัฒนาการผลิต สำนักงานจังหวัดจันทบุรี, วารสารเคหการเกษตรในรูปแบบ e-book ฉบับเดือน มกราคม 2559.
27. Arun S. Mujumdar, (1995) “Handbook of Industrial Drying”, second edition, CRC Press LLC
28. B.S. Yilbas, M.M. Hussain and I. Dincer (2003) “Heat and moisture diffusion in slab products due to convective boundary condition”, Heat and Mass Transfer 39, pp. 471–476.
29. M. Özdemir and Y.O. Devres (1999) “The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting”, Journal of Food Engineering, vol. 42, pp. 225-233.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

30. D.B. Brooker, F.W. Bakker-Arkema and C.W. Hall, (1992) "Drying and storage of grains and oilseeds," Van Nostrand Reinhold, New York NY.
31. Watcharin Dongbang and Rungtawan Wiwattanasirikul, (2015) "Experimental Comparisons of Anchovy Drying using Centrifugal and Gravitational Fluidized Bed Techniques", American Journal of Applied Sciences, 12 (2): 72.79
32. D.C. Sau, S. Mohanty and K.C. Biswal, (2007) "Minimum fluidization velocities and maximum bed pressure drops for gas-solid tapered fluidized beds", Chem. Eng. J., 132: 151-157., DOI: 10.1016/j.cej.2007.01.036.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ภาคผนวก ก
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย

โครงการ การอบแห้งเมล็ดพริกไทยแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีชุดสร้างการไหลหมุนควง
Drying of Pepper Corn in a Fluidized-Bed with Swirl Generators
รายงานความก้าวหน้าของโครงการในรอบ 24 เดือน

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัย ผู้รับทุน ผศ. ดร. วรีสา ชูวัฒน์กุล
รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ธันวาคม 2559 **ถึงวันที่** 30 พฤศจิกายน 2561

สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย	ค่าใช้จ่าย	รวมค่าใช้จ่ายสะสมถึงปัจจุบัน	คงเหลือ (หรือเกิน)
		1 ธันวาคม 2559 ถึง 1 ธันวาคม 2560	2 ธันวาคม 2560 ถึง 30 พฤศจิกายน 2561		
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว					
งบดำเนินงาน					
ค่าตอบแทน	70080	-	71400	71400	0
ค่าใช้สอย	53000	21754.8	49679.54	71434.34	0
ค่าวัสดุ	315920	161008.25	155357.74	316365.99	0
ค่าสาธารณูปโภค					
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	41000	-	42800	42800	0
รวม	480000	182763.05	319237.28	502000.33	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินที่ใช้จ่าย

งวดเงินที่ได้รับ	จำนวนเงินที่ได้รับ(บาท)	เมื่อ (ระบุนวัน เดือน ปี)
งวดที่ 1	189050	15/02/2561
งวดที่ 2	231504	22/01/2062
ดอกเบีย ครั้งที่ 1	89.45	25/06/2561
ดอกเบีย ครั้งที่ 2	30.95	25/12/2561
ดอกเบีย ครั้งที่ 3	479.93	25/06/2562
ดอกเบีย ครั้งที่ 4	361.87	25/12/2562
รวม	421516.2	① 421516.2

งวดที่	จำนวนเงินที่ใช้จ่าย (บาท)	
งวดที่ 1	182763.05	
งวดที่ 2	319237.28	
รวม	502000.33	② 502000.33

จำนวนเงินคงเหลือ ① - ② 0 บาท

.....
 วัลลา ชูสมานกุล

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล..... ผศ. ดร. วริสา ชูวัฒนกุล.....
เพศ ชาย หญิง วันเดือนปีเกิด..... 10 มิถุนายน 2525..... อายุ..... 36..... ปี
หน้าที่การงานปัจจุบัน..... อาจารย์ประจำ
ตำแหน่ง..... อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เริ่มทำงาน ณ สจล. ตั้งแต่เดือนเมษายน..... พ.ศ. 2556
เงินเดือนประจำ..... 35,540 บาท..... เงินประจำตำแหน่ง.....

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
Doctor of Philosophy in Engineering (PhD. Eng)	Advanced of science and biotechnology	Osaka University	2555
Master of Engineering (M.Eng)	Advanced of science and biotechnology	Osaka University	2550
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ)	เทคโนโลยีชีวภาพ	มหาวิทยาลัยมหิดล	2548

ประสบการณ์วิจัยหรือสาขาที่ชำนาญเทคโนโลยีชีวภาพทางอาหาร, จุลชีววิทยาทางอาหาร, การแปรรูปอาหาร.....

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2558	Hitachi Research Fellowship	Hitachi Global Foundation, Japan
2558	ทุนวิจัยโครงการพัฒนานวัตกรรมต้นแบบเพื่อสร้างมูลค่าเครื่องดื่มจากน้ำอ้อย	สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย
2558	ทุนวิจัยโครงการผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าและปริมาณมอลโตเดกตรินต่อคุณภาพของแก้วมังกรผงโดยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2557	ทุนวิจัยโครงการผลของส่วนประกอบในน้ำกะทิกระป๋องต่อลักษณะทางกายภาพ เคมี และการแทรกผ่านความร้อนในการฆ่าเชื้อ	บริษัท ผลิตภัณฑ์อาหารเมอริท จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

2550	Doctor Course at Graduate School of Engineering, Department of Biotechnology, Osaka University, Japan	The Matsuda Yosahichi Memorial Foreign Students Scholarship, Japan
2548	Master Course at Graduate School of Engineering, Department of Biotechnology, Osaka University, Japan	The Asahi Glass Scholarship Foundation, Japan
2548	- Excellent Student Award - Best Presentation Award, Open House	Faculty of Science, Mahidol University

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่

ISI International Journal

- F. Khatun, K. Kurata, **V. Chuwattanakul**, Y. Kaneko, S. Harashima, Increased transcription of *RPL40A* and *RPL40B* is important for the improvement of RNA production in *Saccharomyces cerevisiae*, Journal of Bioscience and Bioengineering, Volume 116, Issue 4, Pages 423-432, 2013.
- **V. Chuwattanakul**, M. Sugiyama, F. Khatun, Y. Kaneko, S. Harashima, Increased transcription of *NOP15*, involved in ribosome biogenesis in *Saccharomyces cerevisiae*, enhances the production yield of RNA as a source of nucleotide seasoning, Journal of Bioscience and Bioengineering, Volume 114, Issue 1, Pages 17-22, 2012.
- **V. Chuwattanakul**, Y.H. Kim, M. Sugiyama, Y. Kaneko, S. Harashima, Construction of a *Saccharomyces cerevisiae* strain with a high level of RNA, Journal of Bioscience and Bioengineering, Volume 112, Issue 1, Pages 1-7, 2011.

International Conference

- **V. Chuwattanakul** and S. Eiamsa-ard, Effect of inlet air temperature and Maltodextrin content on the qualities of spray-dried dragon fruit powder, The 8th Asia-Pacific Drying Conference (ADC 2015), Kuala Lumpur, Malaysia, 10-12 August 2015.
- S. Eiamsa-ard, P. Promvong and **V. Chuwattanakul**, Heat transfer rate and uniformity of swirling impinging jets, The 8th Asia-Pacific Drying Conference (ADC 2015), Kuala Lumpur, Malaysia, 10-12 August 2015.
- S. Eiamsa-ard, K. Wongcharee, P. Eiamsa-ard and **V. Chuwattanakul**, Heat transfer enhancement of turbulent flow through dimpled tubes fitted with twisted tapes,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- Proceedings of the International Conference on Power Engineering-15 (ICOPE-15), November 30 - December 4, 2015, Yokohama, Japan.
- P. Somravysin, W. Changcharoen, **V. Chuwattanakul** and S. Eiamsa-ard, Influence of delta-winged dual twisted tapes insertion on heat transfer and pressure drop characteristics, Proceedings of the International Conference on Power Engineering-15 (ICOPE-15), November 30 - December 4, 2015, Yokohama, Japan.
 - S. Eiamsa-ard, P. Promthaisong and **V. Chuwattanakul**, Turbulent heat transfer enhancement in round tubes by inserting triple twisted-tapes, Proceedings of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, AJK2015-FED, July 26-31, 2015, Seoul, Korea (AJK2015-03721)
 - S. Eiamsa-ard, P. Somravysin, W. Changcharoen, P. Promthaisong, **V. Chuwattanakul** and M. Pimsarn, Flow-field and thermal behaviors of turbulent flow through a round tube equipped with dual twisted tapes, The 13th Asian Symposium on Visualization, June 22–26, 2015, Novosibirsk, Russia.
 - **V. Chuwattanakul**, M. Sugiyama, F. Khatun, K. Kurata, I. Tomita, Y. Kaneko, and S. Harashima, “Increased transcription of *NOP15* involved in ribosome biogenesis in *Saccharomyces cerevisiae* enhances production yield of RNA as a source of nucleotide seasonings” Proceedings of The 34th Annual Meeting of the Molecular Biology Society of Japan (34th **日本分子生物学会**, 2011), December 13-16, 2011, Yokohama, Japan
 - **V. Chuwattanakul**, Y.H. Kim, K. Kurata, F. Khatun, I. Tomita, M. Sugiyama, H. Nishiuchi, H. Miwa, Y. Kaneko, and S. Harashima, “Characterization of a suppressor of $\Delta rrn10$ disruptant causing the defect in rRNA transcription in *Saccharomyces cerevisiae*” Proceedings of Yeast Genetics and Molecular Biology Conference (43rd **酵母遺伝学フォーラム**, 2010), September 9-11, 2010, Nara, Japan
 - **V. Chuwattanakul**, Y.H. Kim, K. Kurata, F. Khatun, I. Tomita, M. Sugiyama, H. Nishiuchi, H. Miwa, Y. Kaneko, and S. Harashima, “Molecular analysis of $\Delta rrn10$ suppressor which influence the Pol I transcription in *Saccharomyces cerevisiae*” Proceedings of The Society for Biotechnology Conference, Japan (61th **日本生物工学会大会**, 2009), September 23-25, 2009, Nagoya, Japan
 - **V. Chuwattanakul**, Y.H. Kim, M. Sugiyama, H. Nishiuchi, H. Miwa, Y. Kaneko, and S. Harashima, “Molecular breeding of *Saccharomyces cerevisiae* strain with high amount of RNA” Proceedings of The 30th Annual Meeting of the Molecular Biology Society of Japan (30th **日本分子生物学会**, 2007), December 12-15, 2007, Yokohama, Japan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- **V. Chuwattanakul**, Y.H. Kim, M. Sugiyama, H. Nishiuchi, H. Miwa, Y. Kaneko, and S. Harashima, “Strategy for breeding of *Saccharomyces cerevisiae* strain with high amount of RNA” Proceedings of The 2nd Thai - Japanese Students' Academic Exchange Meeting (TJSE'07), Thai Students' Association in Japan under Royal Patronage (TSAJ), December 2-3, 2007, Osaka, Japan
- Y.H. Kim, **V. Chuwattanakul**, M. Sugiyama, H. Nishiuchi, H. Miwa, Y. Kaneko, and S. Harashima, “RNA合成能の高い出芽酵母の分子育種” Proceedings of The Society for Biotechnology Conference, Japan (59th 日本物工学会大会, 2007), September 25-27, 2007, Hiroshima, Japan
- **V. Chuwattanakul**, Y.H. Kim, M. Sugiyama, H. Nishiuchi, H. Miwa, Y. Kaneko, and S. Harashima, “Strategy for breeding of *Saccharomyces cerevisiae* strain with high amount of RNA” Proceedings of Yeast Genetics and Molecular Biology Conference (40th 酵母遺伝学フォーラム, 2007), September 11-13, 2007, Osaka, Japan

National Conference

- ศศิมา เรืองมนัสสุทธิ, ททัยชนก วาณิชเจริญทรัพย์, ณัฐกฤช จารุวัฒนาสกุล และ วรีสา ชูวัฒนกุล. การศึกษาส่วนประกอบของแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงเปลือกแดงในการสกัดและความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำแก้วมังกรที่มีผลต่อการทำแห้งแบบพ่นฝอยและคุณภาพผง. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมอาหารแห่งชาติครั้งที่ 1 ประจำปี 2558 ณ ห้องเธียเตอร์ อาคารศูนย์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาลัยเขตกำแพงแสน วันที่ 27 มีนาคม 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.