ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
250312

การอบแห้งฟักทองรูปทรงลูกบาศก์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ทิพาวรรณ บุญเชื่อม

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

b00254971

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
250312

การอบแห้งฟักทองรูปทรงลูกบาศก์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ทิพาวรรณ บุญเชื่อม

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

การอบแห้งฟักทองรูปทรงลูกบาศก์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ทิพาวรรณ บุญเชื่อม

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ อัจฉริยวิริยะ

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอดขวัญ นามสงวน

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระ ฟ้าเฟื่องวิทยากุล

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาตุพงศ์ วาฤทธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอดขวัญ นามสงวน

20 ตุลาคม 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร. กอดขวัญ นามสงวน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร. ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร.อารีย์ อัจฉริยวิริยะ ซึ่งเป็นผู้กรุณาให้ความรู้ ความเข้าใจ คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระ ฟ้าเฟื่องวิทยากุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จาตุพงศ์ วาฤทธิ์ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ คุณครูทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ อบรมสั่งสอน แนะนำตักเตือนผู้เขียนจนมีวันนี้

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่สนับสนุนการวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ดำเนินงานวิจัย เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ประกอบการทดลอง

ขอขอบคุณ คุณสารภี ชัญถาวร คุณณัฐวุฒิ กุลเสถียร และนักศึกษาทุกคนในห้องปฏิบัติการอบแห้ง รวมถึงเพื่อนๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในเรื่องต่างๆ เป็นอย่างดี ที่กรุณาให้คำแนะนำและช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ น้อง และญาติๆ ที่ค่อยให้กำลังใจ คอยเอาใจใส่ดูแล และสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่าง โดยเฉพาะให้การศึกษาที่ดีแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด ความสำเร็จใดๆ ที่มีได้ในชีวิตขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้คงจะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากก็น้อยต่อไป

ทิพาวรรณ บุญเชื่อม

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การอบแห้งฟักทองรูปทรงลูกบาศก์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ผู้เขียน นางสาวทิพาวรรณ บุญเชื่อม

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมพลังงาน)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอดขวัญ นามสงวน

บทคัดย่อ

250312

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของฟักทองโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีต่อเวลาการอบแห้งและคุณภาพของฟักทองหลังการอบแห้ง โดยทำการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 °C, 140 °C, 160 °C และ 180 °C ที่ความเร็ว 2 m/s และ 4 m/s ทำการอบแห้งฟักทองจนถึงความชื้นสุดท้าย 18% d.b. จากนั้นวิเคราะห์คุณภาพสี การหดตัว และเนื้อสัมผัส

จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งฟักทองโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ค่าความชื้นในวัสดุจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและช้าลงในช่วงหลังของการอบแห้ง อุณหภูมิและความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีผลต่อเวลาการอบแห้งโดยอุณหภูมิมีผลมากกว่าความเร็ว โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิและความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นเวลาการอบแห้งจะลดลง จากการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมและค่าคงที่การอบแห้งมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นและจากการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากสมการการอบแห้งทางทฤษฎีและกึ่งทฤษฎี มาใช้ทำนายผลการทดลองการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่าสมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎีสามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าสมการการอบแห้งทางทฤษฎี

ด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่าผลของอุณหภูมิและความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีแนวโน้มไม่แน่นอนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูงมีผล

250312

ให้การหดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วลดลง จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความเร็วไม่มีผลต่อการหดตัวเกือบทุกอุณหภูมิการทดลอง ด้านเนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแข็ง พบว่า ความแข็งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น (ก่อนการคืนตัว) ส่วนการคืนตัวที่อุณหภูมิสูงความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำจะได้ค่าการคืนตัวที่ดีกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูง ส่วนคุณภาพค่าเนื้อสัมผัสหลังการคืนตัวพบว่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นแต่ในส่วนของความเร็วการอบแห้งความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วในการอบแห้งสูงขึ้น

จากการพิจารณาทั้งคุณภาพ และระยะเวลาในการอบแห้งพบว่าการอบแห้งฟักทองโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 160°C ความเร็ว 2 m/s เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้ง 0.5 ชั่วโมง (30 นาที) และฟักทองที่ได้หลังการอบแห้งมีสีเหลืองอมส้มใกล้เคียงกับสีฟักทองสดที่สุด แม้ว่าจะเกิดการหดตัวมากแต่สามารถคืนตัวได้มากที่สุด ส่วนค่าความแข็งอยู่ในระดับกลางทั้งก่อนและหลังการทดสอบการคืนตัว

Thesis Title Drying of Cubic Pumpkin with Superheated Steam

Author Ms.Thiphawan Boonchuem

Degree Master of Engineering (Energy Engineering)

Thesis Advisor Asst. Prof. Dr. Kodkwan Namsanguan

ABSTRACT

250312

The purpose of this research is to study the drying kinetics of pumpkin using superheated steam. The experiments were performed at the superheated steam temperatures of 120 °C, 140 °C, 160°C and 180°C and steam velocities of 2 m/s and 4 m/s. The products were dried to final moisture content at approximately 18% dry basis. The effects of drying temperature and drying velocity on drying kinetics and quality of dried products were investigated. The quality of pumpkin was evaluated in terms of color, rehydration and texture before and after rehydration behavior.

The results showed that moisture ratio of material rapidly decreased in first period and decelerated after drying pumpkin with superheated steam, that means the temperature had a greater effect on drying curve than the velocity. It was found that drying period decreased when the superheated steam temperature and superheated steam velocity increased. The effective diffusion coefficient and drying constant increased with increasing of superheated steam temperature and superheated steam velocity. Drying kinetic models, including theoretical model and semi-theoretical model, were developed and validated with experimental results. It was found that semi-theoretical model gave better predictions than the other.

250312

Regarding the quality of products, it was found that temperature and speed of superheated steam effect to color changing uncertainly. The drying with high superheated steam temperature effects to the shrinkage increasingly or decreasingly. The statistic analysis showed that speed didn't effect to shrinkage in almost experiment temperatures. Regarding the texture is hardness, it was found that the hardness decreased when the temperature was being high (before rehydration). Regarding the rehydration, drying at high temperature, the low speed of superheated steam gave better value of rehydration than the drying at low temperature and high speed superheated steam. For the quality of texture after rehydration, it was found that the value of hardness increased when the temperature of drying increased while hardness decreased when the speed increased.

Considering both product quality and drying time, the pumpkin drying by using superheated steam at 160°C and 2 m/s is the suitable drying condition for drying pumpkin the drying time was 0.5 hour (30 minutes) and the best product of orange color pumpkin was similar to the color of fresh pumpkin. Although there was shrinkage too much, there was rehydration too much. The value of hardness of returning pretest and posttest was middle.

สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญตาราง	ฎ
สารบาญภาพ	ฐ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.4 ขอบเขตการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	7
2.1 การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	7
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	9
2.3 ข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	11
2.4 อุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Inversion Temperature)	12
2.5 คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร	15
2.6 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับฟักทอง	21
2.7 สมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	29
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง	29

สารบาญ (ต่อ)

		หน้า
3.2	ขั้นตอนการทำงานของเครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	29
3.3	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ	30
3.4	วิธีการทดลอง	30
	3.4.1 วิธีการทดลองอบแห้งฟักทองโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	30
	3.4.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งฟักทองโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	31
	3.4.3 การทดสอบคุณภาพของฟักทองหลังการอบแห้ง	32
3.5	การวิเคราะห์ข้อมูล	35
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์	
4.1	ผลการทดลองหาการลดลงของความชื้นหลังการอบแห้งฟักทองโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	36
4.2	การวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ของสมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม (D) ของสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งทางทฤษฎี	40
4.3	การวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ค่าคงที่การอบแห้งของสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี	48
4.4	ผลการทดลองวัดค่าสีของฟักทองอบแห้ง	55
4.5	ผลการทดลองวัดค่าการหดตัวของฟักทองอบแห้ง	57
4.6	ผลการทดลองวัดค่าเนื้อสัมผัสของฟักทองอบแห้ง	57
4.7	ผลการทดลองวัดค่าการคืนตัวของฟักทองอบแห้ง	58
4.8	ผลการทดลองการวัดค่าเนื้อสัมผัสของฟักทองหลังทำการอบแห้งหลังนำไปทดสอบการคืนตัว	60
บทที่ 5	สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ	
5.1	สรุปผลการวิเคราะห์	61
5.2	ข้อเสนอแนะ	62

สารบาญ (ต่อ)

		หน้า
เอกสารอ้างอิง		63
ภาคผนวก		66
ภาคผนวก ก	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	67
ภาคผนวก ข	ภาพผลการทดลองฟักทองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	74
ภาคผนวก ค	ข้อมูลการทดลองการอบแห้ง	78
ภาคผนวก ง	ผลการคำนวนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมและค่าคงที่การอบแห้ง	83
ภาคผนวก จ	ผลการคำนวนอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	86
ภาคผนวก ฉ	ข้อมูลการทดลองการหาปริมาตรของวัสดุหลังอบแห้ง	91
ภาคผนวก ช	การคำนวณหาค่าความชื้นของวัสดุ การวิเคราะห์สมการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด และการวิเคราะห์ความแปรปรวน	94
ภาคผนวก ซ	บทความตีพิมพ์	99
ประวัติผู้เขียน		106

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ค่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Inversion temperature) จากงานวิจัยต่างๆ	15
2.2	คุณค่าทางโภชนาการของฟักทอง (ส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม)	23
2.3	ปริมาณเบต้าแคโรทีนจากพืชผัก 100 กรัม	24
2.4	แสดงสรุปสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งวัสดุรูปทรงต่างๆ	27
2.5	สมการแบบจำลองค่า D ของการอบแห้งวัสดุต่างๆ ด้วยลมร้อน	27
4.1	สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) สำหรับการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วงอุณหภูมิ 120 - 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ 4 m/s	42
4.2	สมการแบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (k) สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วงอุณหภูมิ 120 - 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 – 4 m/s	49
ค.1	ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	79
ค.2	ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 140°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	79
ค.3	ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 160°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	80
ค.4	ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	80
ค.5	ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s	81
ค.6	ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 140°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง4 m/s	81
ค.7	ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 160°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง4 m/s	82
ค.8	ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง4 m/s	82

สารบาญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ง.1	ผลการคานวนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140, 160 และ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ 4 m/s	84
ง.2	ผลการคานวนค่าคงที่การอบแห้งของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 120, 140, 160 และ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ 4 m/s	85
จ.1	อัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 120°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)	87
จ.2	อัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 120°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)	87
จ.3	อัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 140°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)	88
จ.4	อัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 140°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง4 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)	88
จ.5	อัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 160°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง2 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)	89
จ.6	อัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 160°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง4 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)	89
จ.7	อัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง2 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)	90
จ.8	อัตราส่วนความชื้นของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง4 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)	90
ฉ.1	ข้อมูลการทดลองการหาปริมาตรของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120, 140, 160 และ 180°C ความเร็ว 2 m/s	92
ฉ.2	ข้อมูลการทดลองการหาปริมาตรของฟักทองที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 120, 140, 160 และ 180°C ความเร็ว 4 m/s	93

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
2.1	ลักษณะทางกายภาพของชั้นแห้งและโซนเปียกในการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	8
2.2	ระบบการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	9
2.3	เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำ ร้อนยวดยิ่งกับอากาศ	12
2.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นของอากาศ	13
2.5	การบรรยายสีในระบบ CIE Lab มองในระนาบ 2 มิติ: Hue บรรยายถึงเฉดสี และ Chroma บรรยายถึงความมันวาวหรือความเข้มของโทนสี	19
2.6	แสดงการหา Texture Parameter ต่างๆ ใน TPA Curve	21
3.1	แสดงระบบอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	30
3.2	แสดงการหาปริมาตรของวัตถุ	34
4.1	ความชื้นของฟักทองกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140, 160 และ180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	37
4.2	ความชื้นของฟักทองกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140, 160 และ 180 °C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s	37
4.3	ความชื้นของฟักทองกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ4 m/s	38
4.4	ความชื้นของฟักทองกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ4 m/s	38
4.5	ความชื้นของฟักทองกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ4 m/s	39
4.6	ความชื้นของฟักทองกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ4 m/s	39
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมกับอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งจากการทดลองอบแห้งฟักทองที่ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ 4 m/s	40
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมกับความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งจากการทดลองอบแห้งฟักทองที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120 - 180°C	41

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.9	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 และ 2 จากการอบแห้งฟักทองที่ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	43
4.10	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 และ 2 จากการอบแห้งฟักทองที่ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s	43
4.11	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยรวมของการ อบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	44
4.12	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยรวมของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s	44
4.13	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยรวมของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	45
4.14	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยรวมของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s	45
4.15	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยรวมของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	46
4.16	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยรวมของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s	46
4.17	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยรวมของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 180°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	47

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.18	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยรวมของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 180°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s	47
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การอบแห้งกึ่งทฤษฎีกับอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งจากการทดลองอบแห้งของฟักทองที่ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ 4 m/s	48
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การอบแห้งกึ่งทฤษฎีกับความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งจากการทดลองอบแห้งฟักทองที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120 - 180°C	49
4.21	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของการอบแห้งที่หาได้จากการทดลองกับค่าที่หาจาก Semi – Theorical Equation แบบจำลองที่ 4 และ 5 จากการอบแห้งฟักทองที่ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	50
4.22	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของการอบแห้งที่หาได้จากการทดลองกับค่าที่หาจาก Semi – Theorical Equation แบบจำลองที่ 4 และ 5 จากการอบแห้งฟักทองที่ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s	51
4.23	การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	51
4.24	การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 100°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s	52
4.25	การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	52
4.26	การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s	53

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.27	การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	53
4.28	การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s	54
4.29	การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 180°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	54
4.30	การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 180°C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s	55
4.31	ค่าสีของฟักทองอบแห้งที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิอบแห้ง 120°, 140° , 160° และ 180° C ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ 4 m/s	56
4.32	เปรียบเทียบค่าการหดตัวของฟักทองอบแห้งที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิอบแห้ง 120°, 140°, 160° และ 180° C ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ4 m/s	57
4.33	เปรียบเทียบค่าเนื้อสัมผัสของฟักทองอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิอบแห้ง 120°, 140° , 160° และ 180° C ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ4 m/s ก่อนนาไปทดสอบการคืนตัว	58
4.34	เปรียบเทียบค่าการคืนตัวของฟักทองอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิอบแห้ง 120°, 140°, 160° และ 180° C ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s	59
4.35	เปรียบเทียบค่าการคืนตัวของฟักทองอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิอบแห้ง 120°, 140°, 160° และ 180°C ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s	59

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.36	เปรียบเทียบค่าเนื้อสัมผัสของฟักทองอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิอบแห้ง 120°, 140° , 160° และ 180° C ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ4 m/s หลังนำไปทดสอบการคืนตัว	60
ก.1	เครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	68
ก.2	ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ยี่ห้อ WBT Binder รุ่น BD/ED/FD with R3-Controller	68
ก.3	เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.001 กรัม ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CR323S	69
ก.4	อุปกรณ์วัดความเร็วลมและความดัน ยี่ห้อ TSI รุ่น 8385-M-GB	69
ก.5	เวอร์เนียร์	70
ก.6	เครื่องวัดสี Miniscan XE plus	70
ก.7	เครื่องดูดอากาศและเครื่องผนึกถุง	71
ก.8	เครื่องวัด Water activity รุ่น Testo 650	71
ก.9	เครื่องมือวัดอุณหภูมิ Kane-May รุ่น KM330 (Type K)	72
ก. 10	เครื่อง Texture Analyzer (TA.XT2*i*/50 Texture Technologies, US)	72
ก. 11	การจัดอุปกรณ์วัดปริมาตรของวัสดุ	73
ก. 12	เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์	73
ข.1	หั่นฟักทองเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 mm^3	75
ข.2	ฟักทองรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 mm3 ก่อนทำการอบแห้ง	75
ข.3	เตรียมฟักทองสดก่อนทำการอบแห้ง	76
ข.4	ลักษณะการหดตัวฟักทองหลังทำการอบแห้ง	76
ข.5	ลักษณะการคืนตัวฟักทองหลังทำการอบแห้ง	77

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
A	พื้นที่การถ่ายเทมวล, m^2
C	ความเข้มข้นของความชื้น, kg / m^3
C_p	ความจุความร้อนที่เฉพาะเจาะจง , J / (kg. ° K))
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม, m^2 / h
D_o	Arrhenius factor
E_a	Activation energy, J/kg)
i, j, k	จำนวนเต็มมีค่า 0, 1, 2, 3....
l	ระยะ, m
k	ค่าคงที่ของการอบแห้ง, h^{-1}
K	การนำความร้อน , W / (m · K))
M	ความชื้นวัสดุ, ทศนิยมมาตรฐานแห้ง
$\overline{M}$	ความชื้นเฉลี่ย, ทศนิยมมาตรฐานแห้ง
M_{in}	ความชื้นเริ่มต้น, ทศนิยมมาตรฐานแห้ง
M_{eq}	ความชื้นสมดุล, ทศนิยมมาตรฐานแห้ง
$\dot{m}_w$	อัตราการถ่ายเทมวล, kg / h
m	มวล, g
R	ค่าคงที่สากลของแก๊ส, 8.314 kJ/kmol·K
t	เวลา, h
T	อุณหภูมิลมร้อน, °C
T_{abs}	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง, K
V	ปริมาตรของวัตถุที่ต้องการหาปริมาตร, m^3
v	ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง, m/s
W	มวล, kg
ρ	ความหนาแน่นของของเหลว, g/ml
α	การแพร่ความร้อน, m^2/s

อักษรย่อ	ความหมาย
MR	อัตราส่วนความชื้น
MRS	ข้อผิดพลาดมาตรฐานของการประมาณการ (Mean residual Square)
R^2	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (The Coefficient of Determination)
RH	ความชื้นสัมพัทธ์, ทศนิยม