



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน
เพื่อเป็นต้นแบบในการผลิตยางแท่ง STR 20 ระดับอุตสาหกรรม

โดย ผศ.ดร.หมุดตอเล็บ หนิสอ และคณะ

กุมภาพันธ์ 2558

สัญญาเลขที่ RDG5650090

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน
เพื่อเป็นต้นแบบในการผลิตยางแท่ง STR 20 ระดับอุตสาหกรรม

คณะผู้วิจัย

ผศ.ดร. หมดต่อเล็บ หนิสอหัวหน้าคณะทำงาน
นายไพรวัลย์ เกิดทองมี
นายอาทิตย์ พรรณา

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.-สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

Executive Summary

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ โดยที่ลมร้อนจะทำให้เกิดความร้อนที่บริเวณผิวของก้อนยาง ในขณะที่คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนสูงภายในก้อนยาง โดยผลรวมของพลังงานทั้งสองจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างสม่ำเสมอกับก้อนยาง สามารถอบยางได้เร็วขึ้นและมีคุณภาพตามมาตรฐานของยางSTR20 โดยมีผลการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. ได้จำลอง ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับการทดลองการอบแห้งยางด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ขนาดของกระบะ $650 \times 950 \times 350 \text{ mm}^3$ กำลังไมโครเวฟ 9.6 kW โดยมีอัตราการอบแห้งมากกว่า 30 kg/h ยางแห้งมีคุณภาพตามมาตรฐานของSTR20 ลดเวลาการอบลง 44% และประหยัดค่าพลังงาน 24%
2. ได้ศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการอบแห้งยางด้วยลมร้อน กับการอบแห้งยางด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนยาง โดยพบว่าเมื่อยางดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน แล้วทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกมาจากเมื่อยางเร็วขึ้น ทำให้การอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว 1.9 เท่า
3. ประสิทธิภาพสำเร็จในการอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่มีความหนา มากกว่า 30 cm และมีอัตราการอบสูงกว่า 30 kg/h มากกว่าเป้าหมายที่ได้ตั้งเอาไว้
4. ยางที่อบด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีคุณสมบัติตามมาตรฐานของยางSTR20
5. ได้ออกแบบเครื่องต้นแบบอุตสาหกรรมเพื่อการอบแห้งยางด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน กำลังไมโครเวฟ 132 kW อัตราการอบแห้งมากกว่า 300 kg/h และเสนอแนวทางในการพัฒนาเครื่องอบแห้งระดับโรงงานซึ่งมีอัตราการอบแห้ง 3 ton/h

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง อำเภอนาบอน และ ศูนย์วิจัยยางสงขลา ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการผลิตยางSTR20 และให้ความอนุเคราะห์ยางดิบ ในการศึกษาวิจัย ขอขอบคุณผศ.ดร.อรสา ภัทรไพบุลย์ชัย ที่ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และความรู้ เกี่ยวกับยางพารา และการช่วยวิเคราะห์คุณสมบัติของยางแห้ง ขอขอบคุณปรีดีเปรม ทศนกุล ที่ให้การสนับสนุนและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับกระบวนการอบแห้งยางให้ได้คุณภาพ และขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.)ที่สนับสนุนทุนวิจัย

รหัสโครงการ	RDG5650090
ชื่อโครงการ	การพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเพื่อเป็นต้นแบบในการผลิต ยางแท่ง STR 20 ระดับอุตสาหกรรม
ชื่อนักวิจัย	ผศ.ดร.หมุดตอเล็บ หนิสอ และไพรวลัย เกิดทองมี
หน่วยงาน ที่อยู่	สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ 222 ต.ไทยบุรี อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช 80160

บทคัดย่อ

ยางแท่ง STR 20 เป็นผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่มีความต้องการสูงสุดทั้งในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบในการผลิตของอุตสาหกรรมที่สำคัญต่างๆ เช่น ล้อรถยนต์ สายพานต่างๆ ยางรองพื้น ยางรองคอสพาน และยางกันกระแทก เป็นต้น ในกระบวนการผลิตยางแท่งนั้นการอบแห้งเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดและมีการใช้พลังงานสูงสุด โดยเทคโนโลยีในปัจจุบันจะใช้ลมร้อนจากการเผาไหม้ของแก๊สหรือน้ำมันเตากระตุ้นให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากเม็ดยางหรือฝอยยาง ก่อนที่จะนำไปอัดเป็นยางแท่ง การใช้ลมร้อนมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานต่ำ การพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ในการอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในการอบแห้งสามารถอบแห้งได้เร็วขึ้น และทำให้คุณภาพของยางแท่งดีขึ้น โดยคลื่นไมโครเวฟสามารถกระตุ้นให้เกิดความร้อนกับก้อนยางได้อย่างทั่วถึงตลอดทั้งก้อนและรวดเร็วโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้กับอากาศและสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ โดยที่ลมร้อนจะทำให้เกิดความร้อนที่บริเวณผิวของก้อนยาง ในขณะที่คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนสูงภายในก้อนยาง โดยผลรวมของพลังงานทั้งสองจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างสม่ำเสมอกับก้อนยาง ยางจะแห้งได้เร็วขึ้นและมีคุณภาพดีขึ้น เมื่อใช้กะบะขนาด $650 \times 950 \times 350 \text{ mm}^3$ จะสามารถอบแห้งก้อนยางที่มีความหนาเกิน 30 ซม. มีอัตราการอบแห้งมากกว่า 30 กก./ชม. ลดเวลาการอบแห้งลง 44% และประหยัดค่าพลังงานประมาณ 24% ยางแท่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐานSTR20 เทคโนโลยีที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถต่อยอดเพื่อสร้างเครื่องต้นแบบระดับอุตสาหกรรมในการผลิตยางแท่งSTR20

Project code	RDG5650090
Project title	Development of microwave-infrared drying system for industrial prototype of STR20 production
Researcher name	Asst.Prof.Dr.Mudtorlep Nisoa and Priwan Kerdongmee
Institute	School of Science and Center for scientific and technological equipment, Walailak University
Address	222 Taiburi, Tasala, Nakhon-si-thammarat

บทคัดย่อ

Rubber block STR20 is a natural rubber product which has highest market need for both locally and internationally. STR20 is used as raw materials for various industries, such as tire, conveyor, elastomeric bearing pad and shockproof rubber case. Drying process is the most important in the rubber block production, which also consume the most of energy use. Typically, the dryers use hot air, supplied by the combustion of fuel oil or LPG, to remove the moisture from rubber granules, before compression for STR20 rubber block. Normally, the drying time is longer than 3 hours, since the heat transfer occurs slowly inside the rubber granule. There have to be temperature gradient between surface and inside of the granule for the heat transfer. Because of energy loss by ambient air and the dryer's wall, hot air dryer has low energy efficiency. Development of new drying technology by using microwave will increase the energy efficiency, reduce the drying time and increase the quality of the rubber block. The microwave can heat the rubber granule uniformly, without energy loss to the air and the environment. In this research, we have developed drying system by using combined microwave-hot air process. The hot air will heat up the surface, while microwave will cause the high temperature inside, resulting as uniform heating of the granule. The drying time is shorter and the quality of the dried rubber is better. For the drying capacity, rubber bed-depth is greater than 30 cm, and drying rate is more than 30 kg/h, when the tray size is $650 \times 950 \times 350 \text{ mm}^3$. Time and energy cost saving are approximately about 44% and 24%, respectively. The drying technology has potential for development of industrial prototype of STR20 rubber block production in the future.

สารบัญ

		หน้า
	บทสรุปผู้บริหาร	i
	กิตติกรรมประกาศ	ii
	บทคัดย่อ	iii
	สารบัญ	v
บทที่ 1	บทนำ	
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
	1.2 ทบทวนวรรณกรรม	3
	1.3 หลักการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	4
	เอกสารอ้างอิง	6
บทที่ 2	การจำลองการส่งคลื่นไมโครเวฟ	
	2.1 สมการของแมกซ์เวลล์	7
	2.2 การจำลองเพื่อหาลักษณะการวางของท่อนำคลื่น 1 คู่	8
	2.2 การจำลองเพื่อหาลักษณะการวางของท่อนำคลื่น 3 คู่	10
บทที่ 3	การออกแบบและการสร้าง	
	3.1 ห้องอบ	12
	3.2 ระบบกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ	12
	3.3 ระบบสร้างลมร้อน	15
บทที่ 4	ผลการทดลองและข้อวิจารณ์	
	4.1 การทดลองเบื้องต้น	16
	4.2 การพัฒนาเครื่องต้นแบบ	23
	4.3 การออกแบบเครื่องต้นแบบอุตสาหกรรม	29
บทที่ 5	สรุป	
	5.1 สรุปผล	32
	5.2 ตารางเปรียบเทียบผลการดำเนินงาน	33
ภาคผนวก		
	ก ราคาก๊าซLPG	34
	ข อัตราค่าไฟฟ้า	35
	ค มาตรฐานยางแท่ง STR20	36
	ง ข้อเสนอแนะรายงานความก้าวหน้า 2 เดือน	37
	จ ข้อเสนอแนะรายงานความก้าวหน้า 6 เดือน	38
	ฉ ข้อเสนอแนะรายงานความก้าวหน้า 8 เดือน	40
	ช ข้อเสนอแนะรายงานฉบับสมบูรณ์	43
	ซ บทความนำเสนอในที่ประชุม SPC2015	47

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงความเร็วของลมขณะที่เปิดBlowerเต็มที่เมื่อเปิดและปิดShutter	15
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าใช้จ่ายในการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว	27
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติต่างๆของยางแห้งที่อบด้วยไมโครเวฟร่วมกับร้อน และอบด้วยลมร้อน กับค่ามาตรฐานยางแห้ง STR20	29
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบข้อเสนอและผลการดำเนินงาน	33

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 (a) การดูคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ของก้อนยาง และการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อน(Hot air) กับก้อนยาง และ (b) กราฟแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในก้อนยางที่มีรัศมี d เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟ (T_m) ลมร้อน (T_{lm}) และผลรวมของคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน (T_t)	2
รูปที่ 1.2 แสดงการอบแห้งวัสดุขึ้นโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (Microwave-hot air convection drying)	4
รูปที่ 1.3 เปรียบเทียบ Drying curve ของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (Microwave-hot air convection drying) กับการใช้ลมร้อน (Hot air convection drying) อย่างเดียว	5
รูปที่ 2.1 แบบจำลองของตู้อบไมโครเวฟเมื่อท่อนำคลื่น(a)ขนาน และ(b)ตั้งฉากกับด้านหน้าของตู้อบ	8
รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟในห้องคลื่น(cavity)บนระนาบ xy เมื่อท่อนำคลื่น(a)ขนาน และ(b)ตั้งฉาก กับด้านหน้าของตู้อบ	9
รูปที่ 2.3 แบบจำลองของตู้อบไมโครเวฟเมื่อท่อนำคลื่น(a)ขนาน และ(b)ตั้งฉากกับด้านหน้าของตู้อบ	10
รูปที่ 2.4 การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟในห้องคลื่น(cavity)บนระนาบ xy เมื่อท่อนำคลื่น(a)ขนาน และ(b)ตั้งฉาก กับด้านหน้าของตู้อบ เมื่อ $x = 12$ cm	10
รูปที่ 3.1 แบบของระบบอบยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ซึ่งประกอบด้วยห้องอบระบบกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ และระบบสร้างลมร้อนจากการเผาไหม้ของแก๊สLPG	12

รูปที่ 3.2(a)ลักษณะของแมกนีตรอน (b)ส่วนประกอบของแมกนีตรอน	13
รูปที่ 3.3วงจรไฟฟ้าเพื่อกำเนิดคลื่นไมโครเวฟของแมกนีตรอน	13
รูปที่ 3.4 ระบบควบคุมไมโครเวฟแบบควบคุมเปิดปิด	14
รูปที่ 3.5 การควบคุมทิศทางการไหลของลมร้อนเพื่อให้ผ่านเม็ดยางอย่างสม่ำเสมอ	15
รูปที่ 3.6(a)ระบบอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน(b)กระเบใส่เม็ดยาง	16
รูปที่ 4.1ตู้อบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจากInfrared heater เพื่อการศึกษาพฤติกรรม การอบแห้งยาง (ก)ส่วนประกอบของตู้อบ (ข)ลักษณะของตู้อบ	16
รูปที่ 4.2 แสดงการวางภาชนะใส่น้ำเพื่อเป็นโหลดในการวัดกำลังของคลื่นไมโครเวฟ	17
รูปที่ 4.3 ลักษณะยางที่นำมาอบทดลอง	18
รูปที่ 4.4 Drying curve ของยางที่ใช้ในการศึกษา	18
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางเมื่ออบแห้งด้วยลมร้อน และด้วยไมโครเวฟ ร่วมกับลมร้อน	19
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิของอากาศร้อนและอุณหภูมิของยางขณะอบแห้งด้วยลมร้อน และด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	19
รูปที่ 4.7 ยางหลังจากอบแห้งเหลือความชื้นประมาณ 0.8% (ก) อบแห้งด้วยไมโครเวฟ ร่วมกับลมร้อน (ข) อบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว	19
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางเมื่ออบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยใช้กำลังไมโครเวฟที่มีDuty cycle 30% และ 70%	20
รูปที่ 4.9 อุณหภูมิของอากาศร้อน และอุณหภูมิของยาง ขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ร่วมกับลมร้อนที่มีกำลังไมโครเวฟที่มีDuty cycle 30% และ 70%	21
รูปที่ 4.10 ยางหลังจากอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนให้เหลือความชื้นประมาณ 0.8% เมื่อใช้กำลังไมโครเวฟที่มีDuty cycle (ก) 30% (ข) 70%	21
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางเมื่ออบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยใช้มวลของยาง 5kg(ความหนา 6 cm) และ 10 kg(ความหนา 11 cm)	22
รูปที่ 4.12 อุณหภูมิของอากาศร้อน และอุณหภูมิของยาง ขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ร่วมกับลมร้อนที่มีกำลังไมโครเวฟที่มีDuty cycle 60% เมื่อใช้มวลยาง 5 kg และ 10 kg	22
รูปที่ 4.13 ยางหลังจากอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนให้เหลือความชื้น ประมาณ 0.8% เมื่อใช้มวลยาง (ก) 5 kg (ข) 10 kg	23
รูปที่ 4.14 อุณหภูมิของลมร้อนก่อนผ่านเม็ดยาง T_1 และหลังผ่านเม็ดยาง T_2 เมื่อ อบแห้งยางโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว	24
รูปที่ 4.15 อุณหภูมิของลมร้อนก่อนผ่านเม็ดยาง T_1 และหลังผ่านเม็ดยาง T_2 เมื่อ อบแห้งยางโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	24

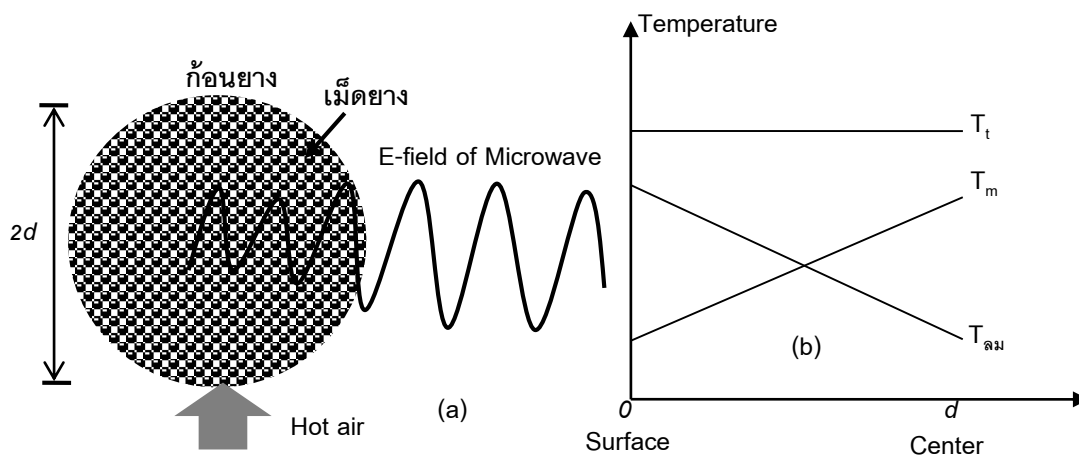
รูปที่ 4.16 แสดงอุณหภูมิ T_1 ที่เวลาต่างๆ เมื่ออบเม็ดยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว	26
รูปที่ 4.17 แสดงอุณหภูมิ T_2 ที่เวลาต่างๆ เมื่ออบเม็ดยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว	26
รูปที่ 4.18 (ก) ลักษณะของเม็ดยางสดซึ่งใส่ในกระเบว้างในตู้อบ (ข) ลักษณะของเม็ดยางแห้งซึ่งอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	28
รูปที่ 4.19 ภาพเสมือนจริงของเครื่องต้นแบบอุตสาหกรรมเพื่อการอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยมองจาก (ก) ด้านข้าง (ข) ด้านบน	29
รูปที่ 4.20 ภาพวาด(ก)แสดงส่วนประกอบ และ(ข)ส่วนประกอบและขนาดของเครื่อง	30

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ยางแท่ง STR 20 เป็นผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่มีความต้องการสูงสุดทั้งในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบในการผลิตของอุตสาหกรรมที่สำคัญต่างๆ เช่น ล้อรถยนต์ สายพานต่างๆ ยางรองพื้น ยางรองคอสพาน และยางกันกระแทก เป็นต้น โดยในปี 2554 และ 2555 มีมูลค่าในการผลิตยางแท่งสูงกว่าหนึ่งแสนล้านบาท ในกระบวนการผลิตยางแท่งนั้นการอบแห้งเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดและมีการใช้พลังงานสูงสุด[1] โดยเทคโนโลยีในปัจจุบันจะใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ของแก๊สหรือน้ำมันเตากระตุ้นให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากเม็ดยางหรือฝอยยาง ก่อนที่จะนำไปอัดเป็นยางแท่ง การใช้ความร้อนมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานต่ำ เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานให้กับอากาศและผนังของห้องอบ ต้องการความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวและอุณหภูมิภายในของก้อนยางในการถ่ายเทความร้อนให้ทั่วถึง เนื่องจากยางมีค่าความนำความร้อนต่ำ ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งมากกว่า 3-4 ชั่วโมง[1,2] การพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ในการอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในการอบแห้งสามารถอบแห้งได้เร็วขึ้น และทำให้คุณภาพของยางแท่งดีขึ้น โดยคลื่นไมโครเวฟสามารถกระตุ้นให้เกิดความร้อนกับก้อนยางได้อย่างทั่วถึงตลอดทั้งก้อนและรวดเร็วโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้กับอากาศและสิ่งแวดล้อมแต่เนื่องจากข้อจำกัดที่มีลักษณะเฉพาะของอันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟและก้อนยางในการเกิดความร้อนทำให้ยังไม่สามารถอบแห้งก้อนยางที่มีความหนาเกิน 30 cm และยังไม่มีการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวเพื่อใช้งานในระดับอุตสาหกรรม[3, 4] ข้อจำกัดดังกล่าวมีสาเหตุมาจากพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟเข้าไปในก้อนยางดังแสดงในรูป 1.1(a) ซึ่งทำให้อุณหภูมิภายในก้อนยางเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่ไม่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ทันเมื่อก้อนยางมีความหนามากขึ้น และจะทำให้อุณหภูมิของก้อนยางไม่สม่ำเสมอ โดยอุณหภูมิภายในก้อนยางจะสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกตามเส้นกราฟ T_m ในรูป 1.1(b)



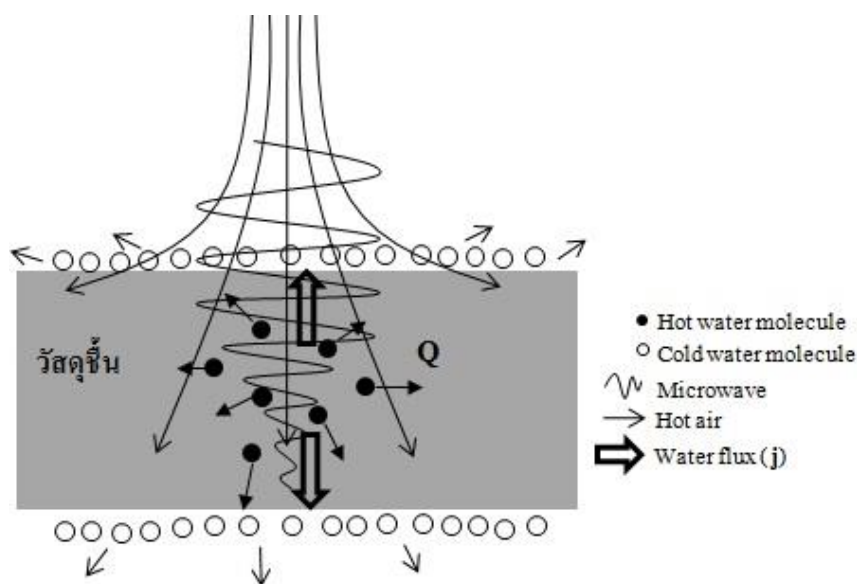
รูปที่ 1.1 (a) การดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ของก้อนยาง และการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อน (Hot air) กับก้อนยาง และ (b) กราฟแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในก้อนยางที่มีรัศมี d เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟ (T_m) ลมร้อน (T_{lm}) และผลรวมของคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน (T_i)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความต้องการจะพัฒนากระบวนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ โดยที่ลมร้อนจะทำให้เกิดความร้อนที่บริเวณผิวของก้อนยาง[เส้นกราฟ T_{lm} ในรูป 1(b)] ในขณะที่คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนสูงภายในก้อนยาง[เส้นกราฟ T_m ในรูป 1(b)] โดยผลรวมของพลังงานทั้งสองจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างสม่ำเสมอกับก้อนยาง[เส้นกราฟ T_i ในรูป 1(b)] ยางจะแห้งได้เร็วขึ้นและมีคุณภาพดีขึ้น โดยจะสามารถอบแห้งก้อนยางที่มีความหนาเกิน 30 ซม.ได้ ซึ่งจะทำให้สามารถอบแห้งก้อนยางด้วยอัตราที่สูงขึ้น ที่มีศักยภาพในการพัฒนาให้สามารถผลิตยางแท่ง STR 20 ในระดับอุตสาหกรรมได้ เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟจะทำให้ประเทศไทยมีศักยภาพในการเป็นผู้นำในการผลิตยางแท่งในกลุ่มประเทศAECต่อไปในอนาคต

1.2 ทบทวนวรรณกรรม

ยางSTR 20 เป็นยางแท่งที่ผลิตจากยางกันล้วย ยางแผ่น หรือเศษยาง โดยจะต้องนำมาเย็บเป็นเม็ดเล็กๆขนาด 2-3 mm ยางเริ่มต้นมีความชื้น(Wet base) 40-50% และจะต้องอบแห้งจนมีความชื้นต่ำกว่า 0.8%[1-4] ในการศึกษาวิจัยเพื่ออบแห้งเม็ดยางและฝอยยางสำหรับการผลิตยางแท่ง STR 20 นั้นพบว่าการใช้ลมร้อนสามารถอบแห้งยางที่มีคุณสมบัติได้ตามมาตรฐานภายในเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง[1-2] โดยการใช้พลังงานคลื่นไมโครเวฟจะสามารถลดเวลาการอบแห้งเม็ดยางให้เหลือเพียงประมาณ 14 นาที[5]และเวลาในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มมวลและความหนาของเนื้อยาง เมื่อทำการอบแห้งยางที่มีความหนา 10 ซม.จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 30 นาที และยางแห้งที่ได้มีคุณสมบัติตามมาตรฐานของยางแท่ง STR 20[3, 4] สำหรับประสิทธิภาพในการใช้พลังงานในการอบแห้งนั้นพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดค่าการใช้พลังงานจำเพาะ(Specific Energy Consumption SEC)ลงเกือบ 3 เท่า โดยการอบยางด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีค่าการใช้พลังงานจำเพาะประมาณ 22.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ในขณะที่การอบแห้งยางด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจะมีค่าการใช้พลังงานจำเพาะประมาณ 8 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย [4]และจากการทดลองเบื้องต้นของห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสติกมาเพื่อการประยุกต์ทางวิศวกรรมพบว่าสามารถอบแห้งก้อนเม็ดยาง 1 กิโลกรัมด้วยไมโครเวฟกำลังประมาณ 500 วัตต์ในเวลาประมาณ 30 นาที ยางที่มีความชื้นสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดีเนื่องจากโมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนขั้วของสนามไฟฟ้า(E field)ที่ความถี่ 2.45 GHzแล้วเกิดเป็นความร้อนขึ้นโดยกระบวนการที่เรียกว่าDielectric heating และด้วยคุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สนามไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในก้อนยางด้วยความเร็วใกล้เคียงแสงแล้วทำให้เกิดความร้อนพร้อมๆกันทั้งก้อนยางอย่างรวดเร็ว[5, 6] โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความดันไอน้ำขึ้นภายในก้อนยางและทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ออกจากก้อนยาง

1.3 หลักการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน



รูปที่ 1.2 แสดงการอบแห้งวัสดุชิ้นโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน(Microwave-hot air convection drying) (ดัดแปลงจาก[8])

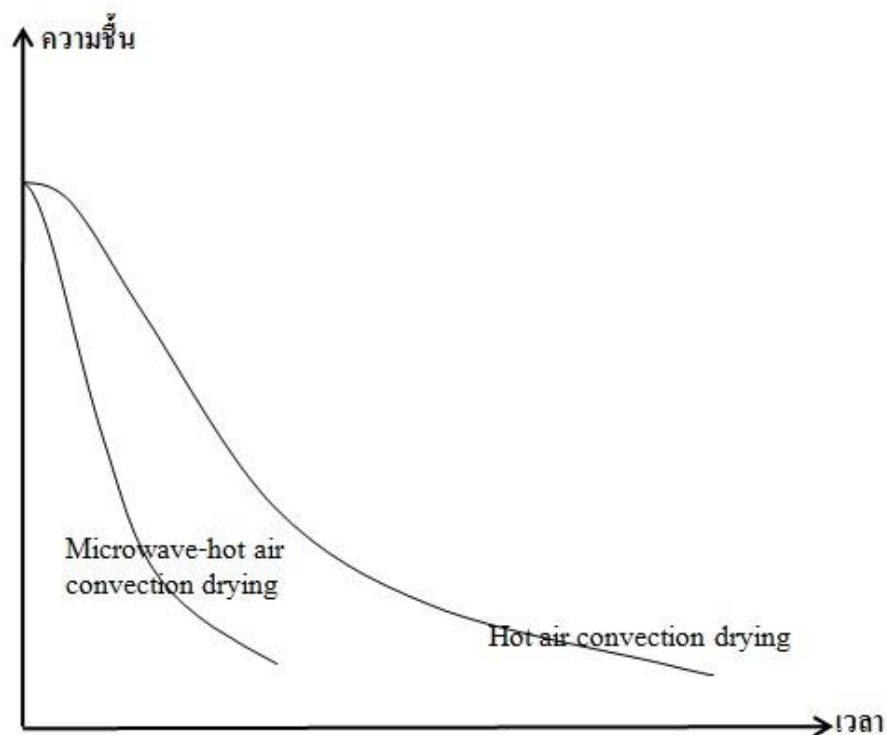
ในการอบแห้งวัสดุที่ขึ้นหรือวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (Microwave-hot air convection drying) นั้น โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุจะดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟด้วยกระบวนการDielectric heating[7] แล้วเกิดเป็นความร้อน Q ขึ้น โดยที่

$$Q = 2\pi f \varepsilon' \varepsilon'' E^2 \quad (1)$$

เมื่อ ε' และ ε'' คือส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ε โดยค่า ε' จะแสดงถึงความสามารถในการเก็บพลังงานสนามไฟฟ้าในวัสดุโดยไม่มีการสูญเสีย ส่วนค่า ε'' จะแสดงถึงความสามารถในการดูดกลืนพลังงานไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ สำหรับในอากาศจะไม่มี การสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเนื่องจากอากาศมีค่า ε'' เท่ากับศูนย์ โดยทั่วไปแล้ว ε' และ ε'' จะเป็นฟังก์ชันของความถี่ f ของคลื่นไมโครเวฟ โดยในการอบแห้งวัสดุนั้นจะใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$ เนื่องจากน้ำจะมีค่า ε'' สูงที่ความถี่นี้ และจะทำให้ น้ำสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดี ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้น้ำเคลื่อนที่มายังผิวของวัสดุ ถ้า j คือการไหลของน้ำจากภายในมายังผิวของวัสดุ จะได้ว่า[8]

$$j = \rho_0 D_e (\nabla M + \delta \nabla T) \quad (2)$$

เมื่อ ρ_0 คือ Density of dry material skeleton, D_e คือ Effective diffusivity of water, M คือ Moisture content of material, δ คือ Thermal gradient coefficient และ T คือ Temperature of material ซึ่งจะพบว่าถ้า ρ_0 มีค่ามาก วัสดุจะมีความพรุนสูง จะทำให้ j มีค่ามากด้วย และ $j \propto D_e$ โดยที่ D_e จะเป็นสัมประสิทธิ์ที่กำหนดความสามารถในการแพร่ของความชื้นจากภายในวัสดุออกมาที่ผิว ซึ่งสามารถเกิดขึ้นด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น diffusion, capillary flow, internal pressure set up by shrinkage during drying[8] โดยที่ D_e จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ T มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการตุดกลั่นกลั่นไมโครเวฟจะทำให้วัสดุมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นพร้อมกันทั้งก้อนอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุด้วยความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วแสง ดังนั้นการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจะทำให้มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการใช้ลมร้อน(Hot air convection drying)อย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 1.3[9]



รูปที่ 1.3 เปรียบเทียบ Drying curve ของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (Microwave-hot air convection drying) กับการใช้ลมร้อน (Hot air convection drying) อย่างเดียว (ดัดแปลงจาก[9])

เอกสารอ้างอิง

1. PinpongKongchana, Ms.C. Thesis, *Drying of Industrial Rubber STR20 for the Purpose of Low Energy Consumption*, Prince of Songkhla University, 2550.
2. สุภวรรณภูริระวิชย์กุล และคณะ, การศึกษาความเป็นไปได้เทคนิคในการอบแห้งยางดิบเพื่อผลิตยางแท่งเอสที อาร์ 20, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19 วันที่ 19 - 21 ตุลาคม 2548 จังหวัดภูเก็ต
3. เอกพจน์ วิเชียรโชติ, ธเนศรัตน์วิไล และ ชยุตนันท์ดุสิต, *การอบแห้งยางธรรมชาติสำหรับผลิตยางแท่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ*, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 24 วันที่ 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี
4. เฉลิมขวัญอริยะวงศ์และค่านิงวาทโยธา, *การศึกษากระบวนการอบแห้งยางแท่ง STR 20 ด้วยไมโครเวฟ*, การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 วันที่ 4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่
5. Chen Mei,Wang Yong-Zhou,LuGuangand Wang Xiao-Ping, *Effects of Different Drying Methods on theMicrostructure and Thermal Oxidative Aging Resistance of Natural Rubber*, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 126, 1808–1813 (2012)
6. M.S. Venkateshand G.S.V. Raghavan, *An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties ofAgri-food Materials*, Biosystems Engineering (2004) 88 (1), 1–18
7. Roger Meredith, *Engineers’ handbook of industrial microwave heating*, The institute of electrical engineers, London, United Kingdom, 1998
8. P. G. Jolly, *Temperature controlled combined microwave-convection drying*, J. MICROWAVE POWER, 1986, p. 65-74
9. Ratthasak Prommas, *Energy and exergy analyses in drying process of unsaturated porous media (Convective drying and microwave drying)*, Ph.D thesis, Thammasat University, 2010

บทที่ 2

การจำลองการส่งคลื่นไมโครเวฟ

ในการออกแบบตู้อบไมโครเวฟเพื่อให้ความร้อนในการอบแห้งยางนั้น จะต้องทำการออกแบบรูปร่างเรขาคณิตของตู้ที่เหมาะสม รวมไปถึงการวางตำแหน่งของท่อนำคลื่น (Waveguide) และแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ เพื่อให้เกิดความร้อนในยางสูงอย่างสม่ำเสมอ และใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ ซึ่งจะทำให้ได้ตู้อบไมโครเวฟที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง แต่เนื่องจากความซับซ้อนของพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟในตัวกลางที่มีขอบเขตจำกัดทำให้ต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการจำลองที่จะหาลักษณะของตู้อบไมโครเวฟที่เหมาะสมในการจำลองการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม สมการพื้นฐานที่สำคัญคือสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมาจากชุดสมการแมกเวลล์ และเนื่องจากการส่งคลื่นในกรณีนี้เป็นการส่งคลื่นผ่านท่อนำคลื่นซึ่งมีขอบเขตที่จำกัด ซึ่งมีโหมดที่ส่งผ่านได้คือโหมด TE หรือ TM หรือโหมดผสม แต่สำหรับการจำลองครั้งนี้ได้เลือกใช้โหมด TE ในการจำลองนี้จะคำนวณปัญหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multi-Physics รุ่น 4.1 โดยในการใช้โปรแกรมดังกล่าว จะใช้ผ่านการให้บริการของศูนย์กริติดมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการเช่าชั่วโมงการใช้งานเครื่องเซิร์ฟเวอร์คลัสเตอร์และโปรแกรมประกอบการคำนวณ โดยมีคุณลักษณะของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้เป็น Intel Xeon Processor X5680 (Six-Core, 3.33GHz) จำนวน 2 หน่วยประมวลผล (12 คอร์) แรม 48 GB หน่วยเก็บข้อมูล (Storage) ขนาด 2 TB และใช้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows 2008 R2)

2.1 สมการแมกเวลล์(Maxwell's equations)

พิจารณากรณีคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใดๆ โดยที่ตัวกลางมีเนื้อเดียวกัน

(Homogeneous) ไอโซทรอปิก (Isotropic) และเป็นเชิงเส้น (Linear) สมการแมกเวลล์เป็นสมการพื้นฐานในการอธิบายพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟและแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ ซึ่งประกอบด้วย 4 สมการดังนี้

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (6)$$

$$\nabla \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} \quad (7)$$

โดยที่

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (8)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (9)$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (10)$$

เมื่อ $\vec{E}$ คือ สนามไฟฟ้า, $\vec{D}$ คือ การกระจัดทางไฟฟ้า, $\vec{H}$ คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก, $\vec{B}$ คือ การกระจัดทางแม่เหล็ก, $\vec{J}$ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า, ϵ คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของตัวกลาง, μ คือ ความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กของตัวกลาง และ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้า

และจากสมการที่ 6 และสมการที่ 7 จะสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟได้ดังสมการที่ 11

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (11)$$

เมื่อ μ_r คือ relative permeability, k_0 คือ wave number ในอวกาศ และ ϵ_r คือ relative permittivity

โดยในการเคลื่อนที่ในบริเวณที่มีขอบเขตซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี (Perfect electric conductor) เงื่อนไขของขอบเขต (Boundary conditions) จะเป็นไปตามสมการที่ 12 และสมการที่ 13

$$\vec{E}_t = 0 \text{ หรือ } n \times \vec{E} = 0 \quad (12)$$

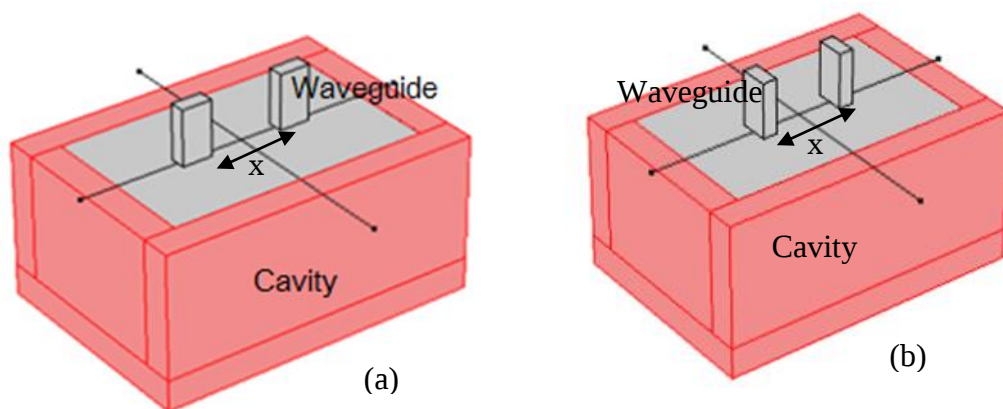
และ

$$\vec{H}_n = 0 \text{ หรือ } n \cdot \vec{H} = 0 \quad (13)$$

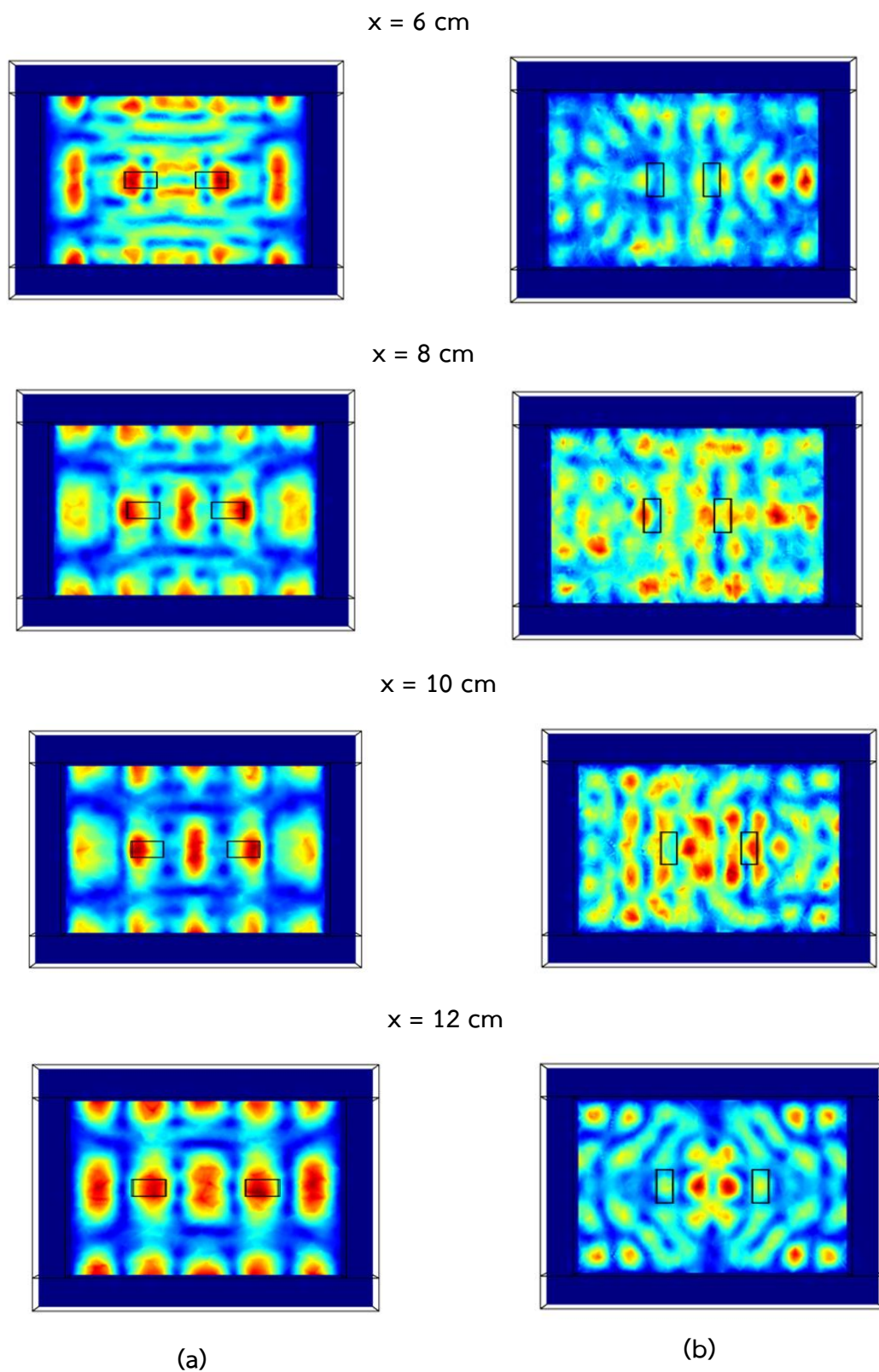
สมการที่ 12 หมายถึงไม่มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส (Tangential direction) หรือเท่ากับศูนย์ และสมการที่ 13 หมายถึงไม่มีองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (Normal direction) และมีเงื่อนไขขอบเขตของความต้านทาน (Impedance boundary) ตามสมการที่ 14

$$\frac{1}{\mu_{r1}} n \times (\nabla \times \vec{E}) - \frac{jk_0}{\eta} n \times (n \times \vec{E}) = 0 \quad (14)$$

2.2 การจำลองเพื่อหาลักษณะการวางของท่อนำคลื่น 1 คู่



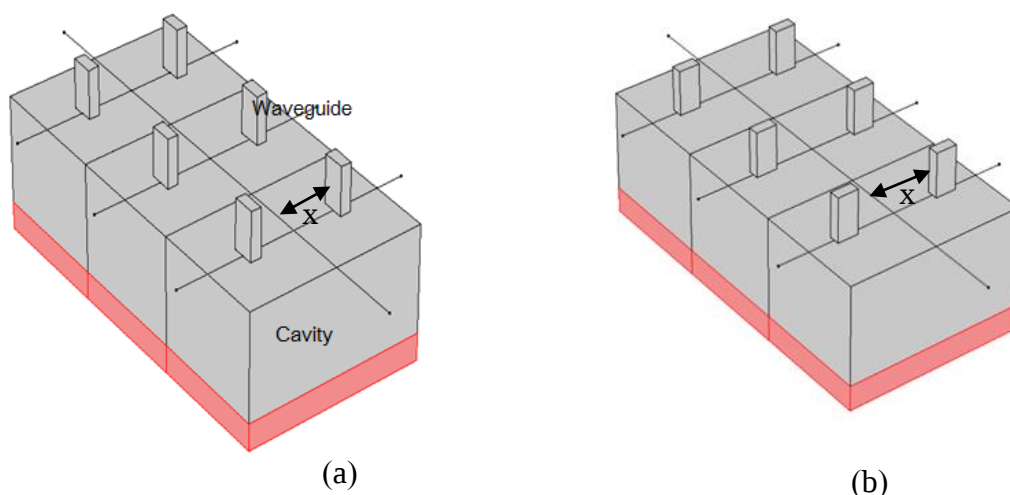
รูปที่ 2.1 แบบจำลองของตู้อบไมโครเวฟเมื่อท่อนำคลื่น (a) ขนาน และ (b) ตั้งฉาก กับด้านหน้าของตู้อบ



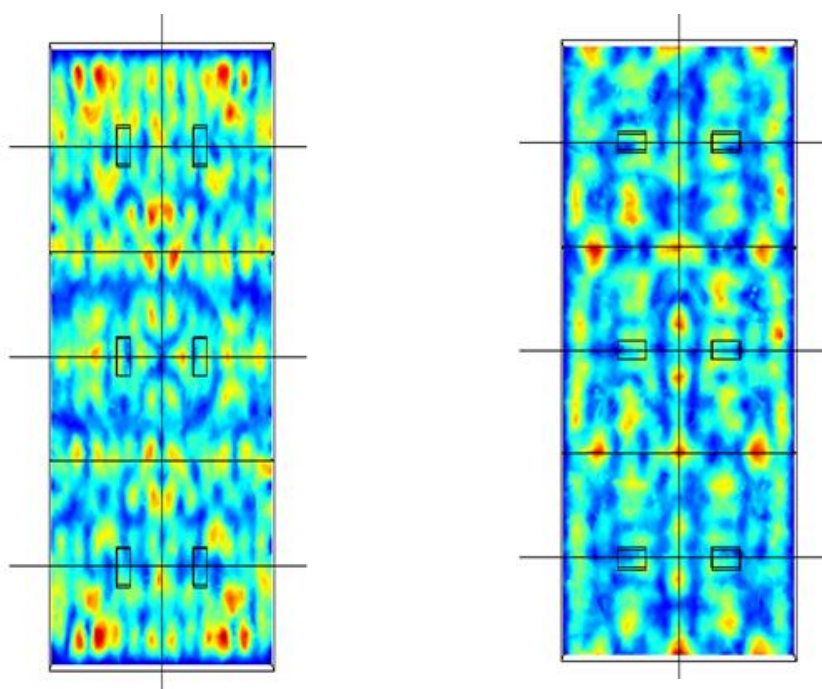
รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟในห้องคลื่น(cavity)บนระนาบ xy เมื่อทำหน้าคลื่น(a)ขนาน และ(b)ตั้งฉาก กับด้านหน้าของตุ๋น

ในการจำลองเพื่อหาลักษณะการติดตั้งท่อนำคลื่น 1 คู่บนห้องคลื่น(cavity) จะใช้แบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยวางท่อนำคลื่นขนานหรือตั้งฉากกับด้านหน้าของตู้อบสี่เหลี่ยม จากผลการ จำลองในรูปที่ 2.2 พบว่าการวางท่อนำคลื่นในแนวขนานกับห้องอบจะทำให้คลื่นมีการกระจายตัว สม่าเสมอกว่าการวางท่อนำคลื่นตั้งฉากกับห้องอบ โดยระยะห่าง x ประมาณ 10 -12 cm

2.3 การจำลองเพื่อหาลักษณะการวางของท่อนำคลื่น 3 คู่



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของตู้อบไมโครเวฟเมื่อท่อนำคลื่น(a)ขนาน และ(b)ตั้งฉาก กับด้านหน้าของตู้อบ

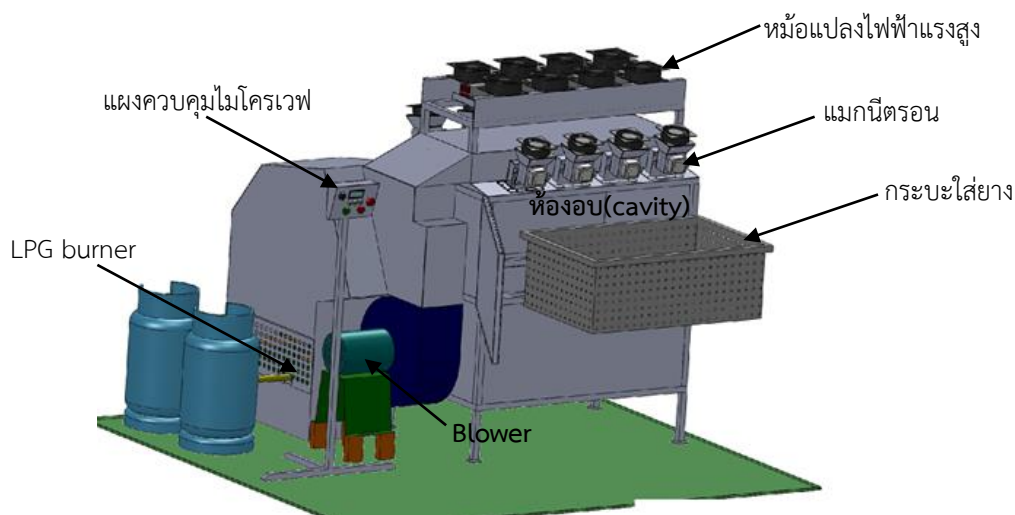


รูปที่ 2.4 การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟในห้องคลื่น(cavity)บนระนาบ xy เมื่อท่อนำ คลื่น(a)ขนาน และ(b)ตั้งฉาก กับด้านหน้าของตู้อบ เมื่อ $x = 12$ cm

ในการจำลองเพื่อลักษณะการวางท่อนำคลื่นจำนวน 3 คู่ โดยแต่ละคู่วางขนานหรือวางตั้งฉากกับ
ด้านหน้าของห้องคลื่น(cavity)ดังแสดงในรูป2.3(a)หรือ2.3(b)ตามลำดับ โดย x เป็นระยะห่างระหว่าง
ท่อนำคลื่นแต่ละคู่ จากผลการจำลองเมื่อ $x = 12$ cm พบว่าการวางท่อนำคลื่นขนานกับด้านหน้าของ
ห้องคลื่นจะทำให้มีการกระจายตัวของคลื่นสม่ำเสมอว่า

บทที่ 3

การออกแบบและสร้าง



รูปที่ 3.1 แบบของระบบอบยางด้วยไมโครเวฟร่วมความร้อน ซึ่งประกอบด้วยห้องอบ ระบบกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ และระบบสร้างความร้อนจากการเผาไหม้ของแก๊สLPG

ระบบอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับความร้อนที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยประกอบด้วย

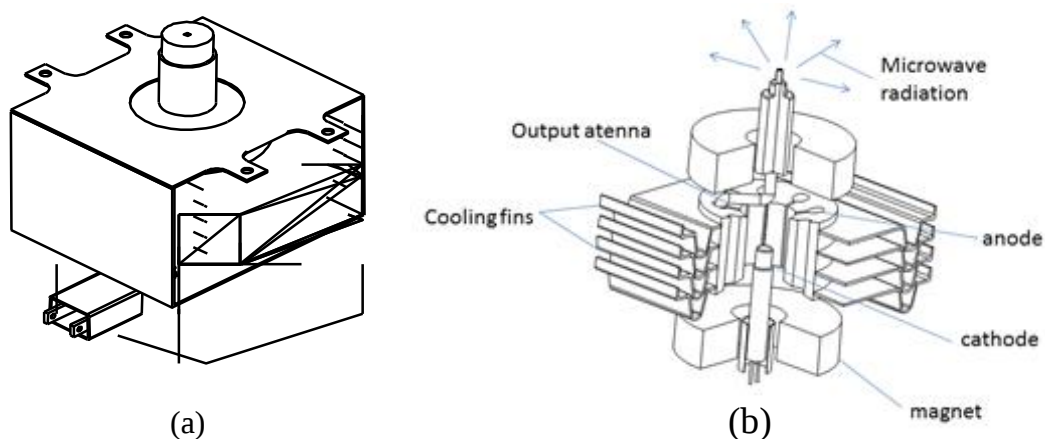
1. ห้องอบ(cavity) ทำด้วยเหล็กเคลือบ และบุผนังด้วยฉนวนความร้อนชนิดใยเซรามิกส์ โดยมีขนาด กว้าง x ลึก x สูง เท่ากับ $1.2 \times 0.6 \times 0.5 \text{ m}^3$ มีประตูที่ด้านข้างของห้องอบและติดตั้งChoke ที่ขอบประตูเพื่อป้องกันคลื่นรั่วภายในห้องอบสามารถวางกระบะใส่ยางที่สามารถบรรจุยางดิบได้สูงสุดประมาณ 30 kg ห้องอบจะรับคลื่นไมโครเวฟและความร้อนจากด้านบน

2. ระบบกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ประกอบด้วยชุดกำเนิดคลื่นไมโครเวฟจำนวน 8 ชุด โดยแต่ละชุดประกอบด้วย แมกนีตรอนกำลัง 1200 วัตต์ 1 หัว หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง 1 ลูกและอุปกรณ์สำหรับเพิ่มแรงดัน ซึ่งจะควบคุมการทำงานของแมกนีตรอนโดยใช้การเปิด-ปิด(On-Off)เป็นเปอร์เซ็นต์ กำลังรวมทั้งหมดของไมโครเวฟ 9.6 kW

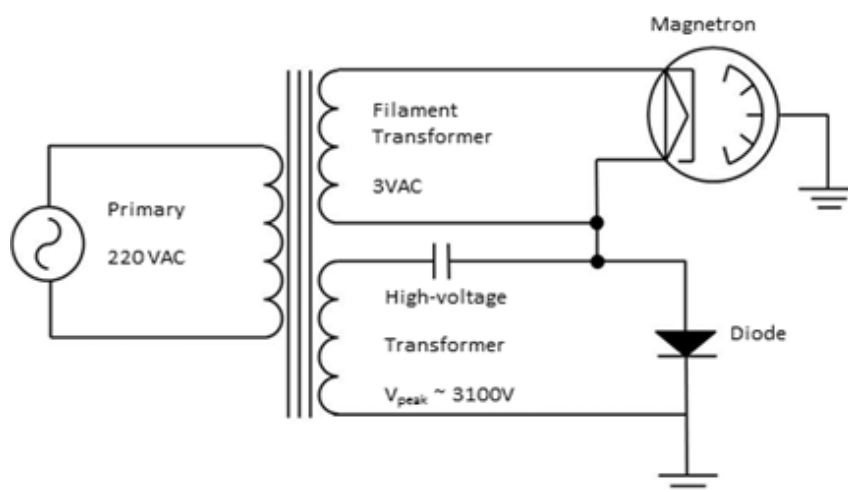
2.1. วงจรและการทำงานของ แมกนีตรอน (Magnetron)

แมกนีตรอนเป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่จ่ายคลื่นไมโครเวฟ โดยการทำงานของแมกนีตรอนจะต้องจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำประมาณ 3 - 4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ จะทำให้ไส้หลอดร้อนและปล่อยอิเล็กตรอนออกมา แล้วจ่ายแรงดันสูง 4000-6000 โวลต์ เข้าที่ขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอดซึ่งทำหน้าที่เป็นคาโทดเทียบกับขั้วแอโนด ก็จะทำให้อิเล็กตรอนถูกบังคับให้เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของ

สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กถาวร ซึ่งจะทำให้แมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้ โดยรูปที่ 3.2 จะแสดงลักษณะของแมกนีตรอนที่ใช้ในตู้ไมโครเวฟและส่วนประกอบหลักของแมกนีตรอน



รูปที่ 3.2(a)ลักษณะของแมกนีตรอน (b)ส่วนประกอบของแมกนีตรอน



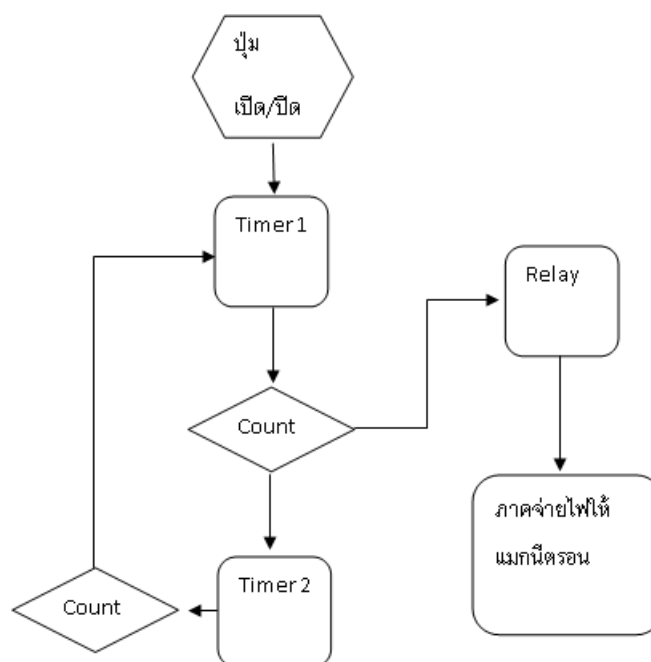
รูปที่3.3วงจรไฟฟ้าเพื่อกำเนิดคลื่นไมโครเวฟของแมกนีตรอน

จากวงจรรูปที่ 3.3 แสดงวงจรการทำงานของแมกนีตรอน โดยหม้อแปลงจะจ่ายไฟฟ้า กระแสสลับแรงดันต่ำประมาณ 3-4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ เข้าที่ไส้หลอดของแมกนีตรอน จากนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage Transformer) ซึ่งสามารถขยายแรงดันได้ 10 เท่า ก็จะได้แรงดันประมาณ 3100 โวลต์ แล้วผ่านวงจรทวีแรงดัน (Voltage doubler)ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุและไดโอด ซึ่งตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เก็บประจุจนเต็มและจะปล่อยออกมาเป็นแรงดันลบ

และรวมกับแรงดันลบที่ผ่านไดโอด ก็จะทำให้แรงดันลบเพิ่มเป็น 2 เท่า ซึ่งจะได้แรงดันสูงสุดประมาณ 6200 โวลต์ แล้วต่อเข้ากับขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอด ก็จะทำให้แมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้

2.2 การควบคุมไมโครเวฟแบบเปิดปิด

การควบคุมกำลังไมโครเวฟต้องการกำลังที่เต็มประสิทธิภาพสามารถใช้วิธีควบคุมโดยการเปิดปิดไฟเข้าระบบไมโครเวฟได้โดยตรง โดยกำลังที่ออกมาจะเป็นกำลังเฉลี่ย ขึ้นอยู่กับเวลาที่เปิดและปิดไมโครเวฟ และเป็นวิธีพื้นฐานในการควบคุมไมโครเวฟโดยทั่วไป สำหรับระบบควบคุมไมโครเวฟที่ออกแบบขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม จะเน้นใช้อุปกรณ์พื้นฐานที่มีใช้ในโรงงานเพื่อให้่ายในการซ่อมแซมและบำรุงรักษาผังการต่อระบบควบคุมไมโครเวฟแบบควบคุมเปิดปิดแสดงดังรูปที่ 3.4

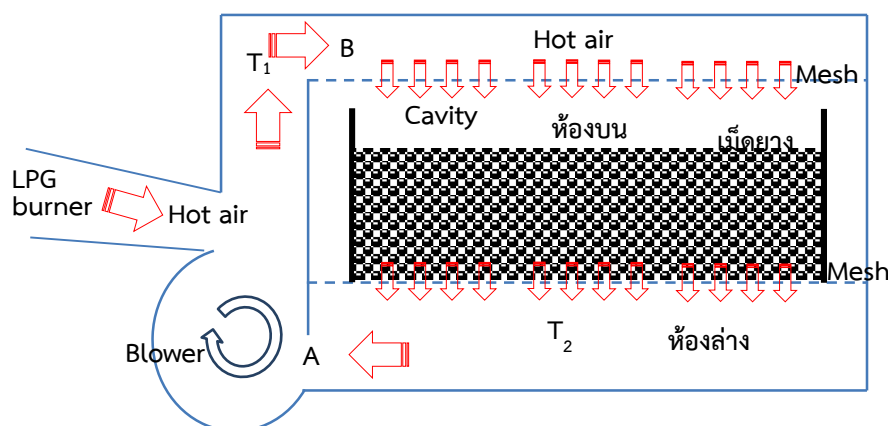


รูปที่ 3.4 ระบบควบคุมไมโครเวฟแบบควบคุมเปิดปิด

หลักการทำงานของระบบควบคุมไมโครเวฟแบบเปิดปิด เริ่มจาก การกดปุ่มเปิดเครื่อง Timer1 จะเริ่มทำงาน นับเวลาตามที่ได้ตั้งไว้ พร้อมทั้งจ่ายไฟให้ Relay ทำงาน Relay จะต่อหน้าสัมผัสแล้วจ่ายไปยังชุดจ่ายไฟให้แมกนีตรอน เมื่อ Timer1 นับเวลาครบตามที่ตั้งไว้ จะทำการตัดไฟที่จ่ายให้กับ

Relay ทำให้หน้าสัมผัส Relay เปิด ทำให้แมกนีตรอนหยุดทำงาน ส่วน Timer2 จะเริ่มทำงาน หลังจาก Timer1 หยุดทำงาน เพื่อทำการนับเวลา เพื่อที่จะไปรีเซ็ตค่า Timer1 ให้ทำงานใหม่ ซึ่งการทำงาน of ระบบนี้จะทำงานวนลูปไปเรื่อยๆ จนกว่าจะกดปุ่ม ปิด กำลังไมโครเวฟที่ได้จากการควบคุมด้วยระบบนี้ จะเป็นค่ากำลังโดยเฉลี่ย โดยตั้งจาก Timer1 และ Timer2

3. ระบบสร้างลมร้อนจากการเผาไหม้ของแก๊ส



รูปที่ 3.5 การควบคุมทิศทางการไหลของลมร้อนเพื่อให้ผ่านเม็ดยางอย่างสม่ำเสมอ

รูปที่ 3.5 แสดงการควบคุมทิศทางการไหลของลมร้อนเพื่อให้ผ่านเม็ดยางอย่างสม่ำเสมอ โดยใช้ LPG burner 2 หัวในการกำเนิดลมร้อน Blower ขนาดกำลัง 750 วัตต์ จะทำหน้าที่ดึงลมร้อนเข้ามาและดันเข้าไปในห้องคลื่น โดยตะแกรงโลหะ (Mesh) จะทำให้ลมร้อนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ก่อนที่จะผ่านไปยังกระเบาะใส่เม็ดยางในห้องบน ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังเม็ดยางเพื่อให้ความร้อนออกมา ลมที่เย็นตัวลงจะผ่านไปยังห้องล่าง โดยมีวาล์วสำหรับควบคุมปริมาณลมและความร้อนออกจากห้องอบ ลมส่วนที่เหลือจะผ่านเข้าไปใน Blower ใหม่ เพื่อผสมกับลมร้อนที่ถูกดึงมาจาก LPG burner โดยควบคุมอัตราการเผาไหม้ของ Burner และปริมาณลมที่ถูกปล่อยออกจากห้องอบ จะทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบได้ โดยมี Thermocouple 2 ตัววัดอุณหภูมิ T_1 และ T_2

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงความเร็วของลมขณะเปิด Blower เต็มที่เมื่อเปิดและปิด Shutter

ตำแหน่ง	ความเร็วลม (m/s)	
	Shutter open 100% (no recycle of hot air)	Shutter close 100% (totally recycle of hot air)
A	13	12
B	17	16

ความเร็วของลมในตู้อบซึ่งวัดโดยเครื่องวัดความเร็วลม testo 425 มีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งพบว่าความเร็วที่ตำแหน่งBมีค่าสูงกว่าความเร็วลมที่ตำแหน่งA โดยขณะที่เปิดShutterจะมีความเร็วลมสูงกว่าเมื่อปิดShutterเมื่อเปิดShutter100%ซึ่งจะไม่มีการนำลมร้อนกลับมาใช้ใหม่ จะมีความเร็วลมที่ตำแหน่งAตำแหน่งBประมาณ 13 m/s และ 17 m/s ตามลำดับ ระบบอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่สร้างเสร็จมีลักษณะดังแสดงในรูปที่3.6



(a)



(b)

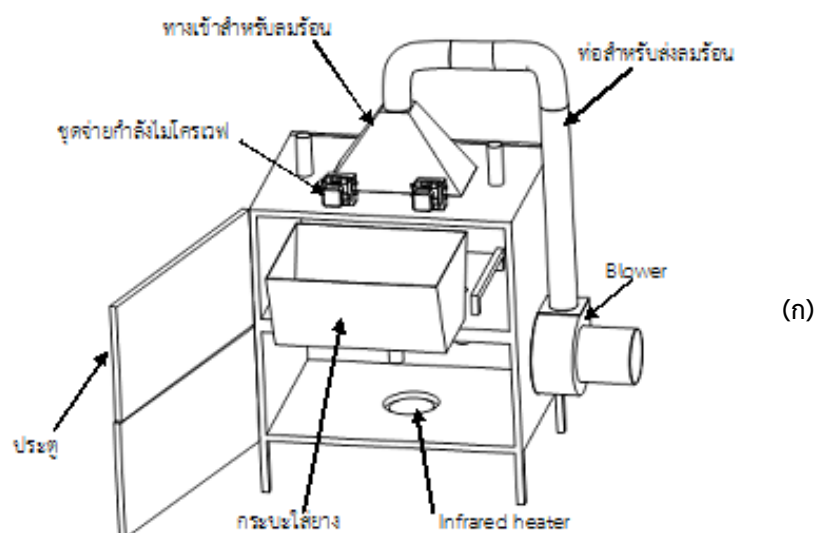
รูปที่ 3.6(a)ระบบอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน(b)กระบะใส่เม็ดยาง

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

1. การทดลองเบื้องต้น

ในการศึกษาเพื่อเข้าใจพฤติกรรมในการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และการอบด้วยลมร้อนอย่างเดียว ได้ออกแบบสร้างตู้อบซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่4.1ตู้อบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจากInfrared heater เพื่อการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้ง
 ยาง (ก)ส่วนประกอบของตู้อบ (ข)ลักษณะของตู้อบ

ตู้อบมีห้องคลื่น(Heating cavity)สำหรับการอบยาง โดยติดตั้งแมกนีตรอน 2 หัวที่ด้านบนของห้องอบ และติดตั้งInfrared heaterที่ด้านล่างของห้องอบ โดยมีBlowerทำหน้าที่ดึงลมร้อนผ่านท่อPVCเข้าสู่ด้านบนของห้องอบ

1.1 การวัดกำลังของคลื่นไมโครเวฟ

กำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกจากแมกนีตรอนจะมีค่าขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแมกนีตรอน โดยในการวัดกำลังคลื่นไมโครเวฟในห้องอบนั้นจะใช้น้ำเป็นโหลด เนื่องจากน้ำเป็นตัวกลางที่สามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้อย่างสมบูรณ์ โดยกำลังของคลื่นไมโครเวฟ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$P(\text{Watt}) = \frac{4.19V\Delta T}{t} \quad (1)$$

เมื่อ P คือกำลังของคลื่นไมโครเวฟในหน่วยวัตต์(Watt) V คือปริมาตรของน้ำในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร ΔT คืออุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟในหน่วยองศาเซลเซียส และ t คือเวลาของการดูดกลืนคลื่น



รูปที่4.2 แสดงการวางภาชนะใส่น้ำเพื่อเป็นโหลดในการวัดกำลังของคลื่นไมโครเวฟ

การวัดทดสอบประสิทธิภาพของการส่งกำลังคลื่นไมโครเวฟ เพื่อให้ทราบถึงกำลังวัตต์ที่แท้จริงที่ใช้ในการทดลองจึงทำการทดลองนี้ขึ้นโดยใช้น้ำขนาด 1000 cc ใสในภาชนะ จำนวน 2ชุด โดยตั้งตำแหน่งที่พอดีกันก่อนนำคลื่นดังแสดงในรูปที่4.2 ทำการทดลองเปิดไมโครเวฟเป็นเวลา 1 นาทีวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนำไปคำนวณหากำลังวัตต์ของไมโครเวฟ ซึ่งพบว่าแมกนีตรอนหัวแรกให้กำลังประมาณ 1120 W และหัวที่สองให้กำลังประมาณ 910 W รวมกำลังไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองนี้เท่ากับ 2030 W

1.2 การศึกษาจลนศาสตร์ในการอบแห้งยางด้วยลมร้อน และไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

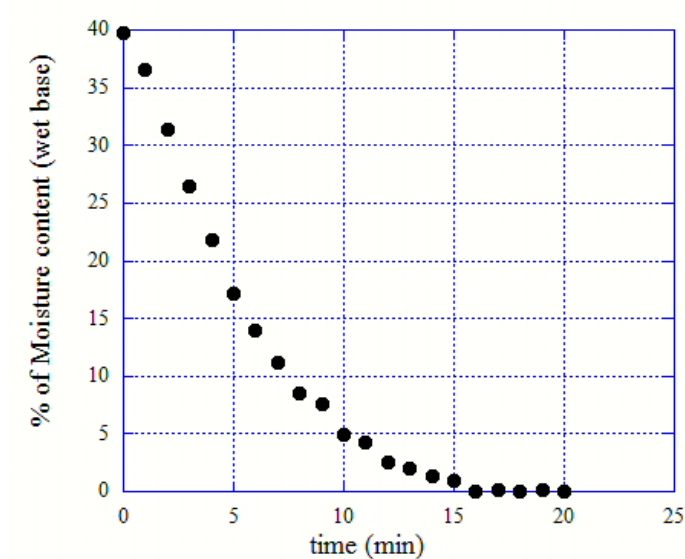
ยางที่นำมาอบในการทดลองเป็น ยางกันถ้วย ที่ผ่านการรีด และตัดย่อย จากศูนย์วิจัยยางสงขลา สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตร เขต8 กรมวิชาการเกษตร มีลักษณะเป็นเม็ดฝอย โดยมีขนาดของเม็ดประมาณ 2-3 มิลลิเมตรดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะยางที่นำมาอบทดลอง

1.2.1 การหาDrying curve

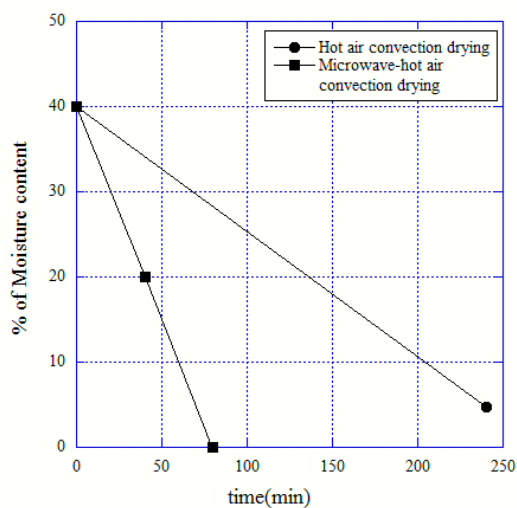
หาDrying curve โดยใช้ยางมวล 10 กรัมอบไมโครเวฟในตู้ทดสอบ ใช้กำลังไมโครเวฟคงที่ 900 W วัดมวลของยางทุกๆ 1 นาที จนกระทั่งมวลคงที่ แล้วนำมาหาDrying curve ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากDrying curve พบว่ายางดิบก่อนอบมีความชื้น 40%



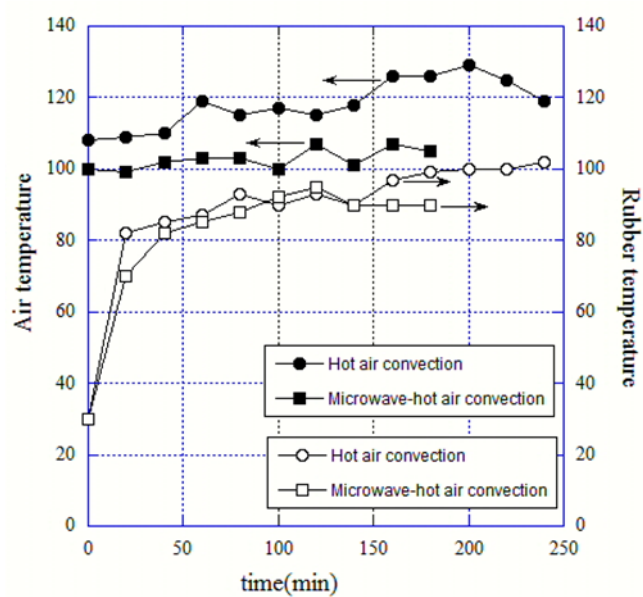
รูปที่ 4.4Drying curve ของยางที่ใช้ในการศึกษา

1.2.2 การอบแห้งยางด้วยลมร้อน และไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งยางด้วยคลื่นไมโครเวฟ จึงได้ทำการทดลองการอบแห้งยางเปรียบเทียบกันระหว่างการใช้ความร้อนอย่างเดียว และการใช้ไมโครเวฟร่วมกับความร้อน โดยใช้ยางเริ่มต้น 10 kg และควบคุมให้อุณหภูมิของยางใกล้เคียงกันทั้งสองวิธี โดยมีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5-4.7



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางเมื่ออบแห้งด้วยลมร้อน และด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิของอากาศร้อนและอุณหภูมิของยางขณะอบแห้งด้วยลมร้อน และด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน



(ก)



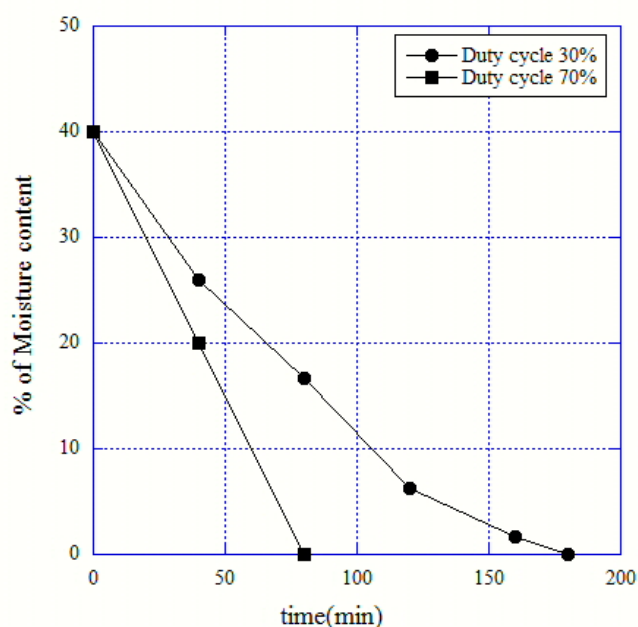
(ข)

รูปที่ 4.7 ยางหลังจากอบแห้งเหลือความชื้นประมาณ 0.8% (ก) อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (ข) อบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว

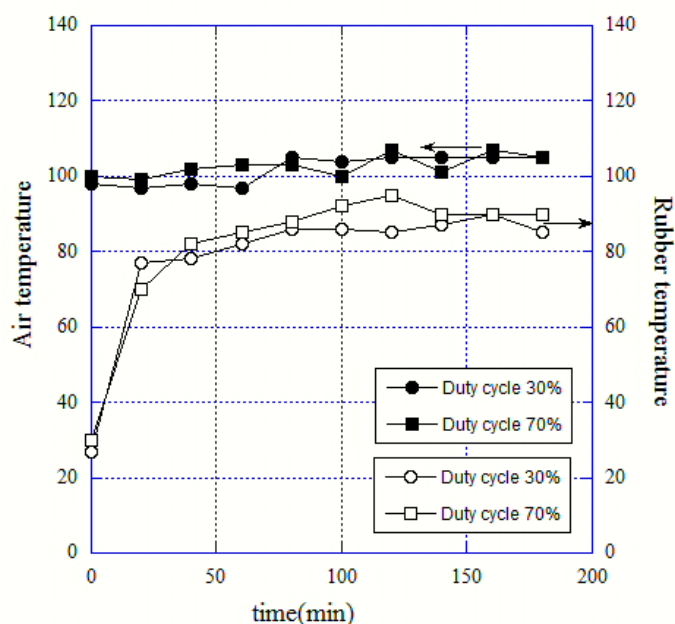
จากรูปที่ 4.5 พบว่าการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดเวลาการอบแห้งได้มากกว่า 3 เท่า โดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจะใช้อุณหภูมิของลมร้อนต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว เพื่อที่จะรักษาให้อุณหภูมิของยางมีค่า 90 – 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ในรูปที่ 4.7 พบว่ายางแห้งที่ได้จากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีสีจางกว่ายางแห้งที่ได้จากการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว

1.2.3 การอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเมื่อใช้Duty cycleของกำลังไมโครเวฟต่างกัน

การทดลองเพื่อศึกษาผลของกำลังไมโครเวฟในการอบแห้งยาง ได้ใช้กำลังไมโครเวฟที่มีDutycycle 30% และ 60% โดยควบคุมให้อุณหภูมิของลมร้อนเท่ากัน และทำการอบแห้งยางเปียก 10 kgซึ่งมีความชื้น 40% ให้มีความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.8% มีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8-4.10



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางเมื่ออบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยใช้กำลังไมโครเวฟที่มีDuty cycle 30% และ 70%



รูปที่ 4.9 อุณหภูมิของอากาศร้อน และอุณหภูมิของยาง ขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่มีกำลังไมโครเวฟที่มี Duty cycle 30% และ 70%



(ก)



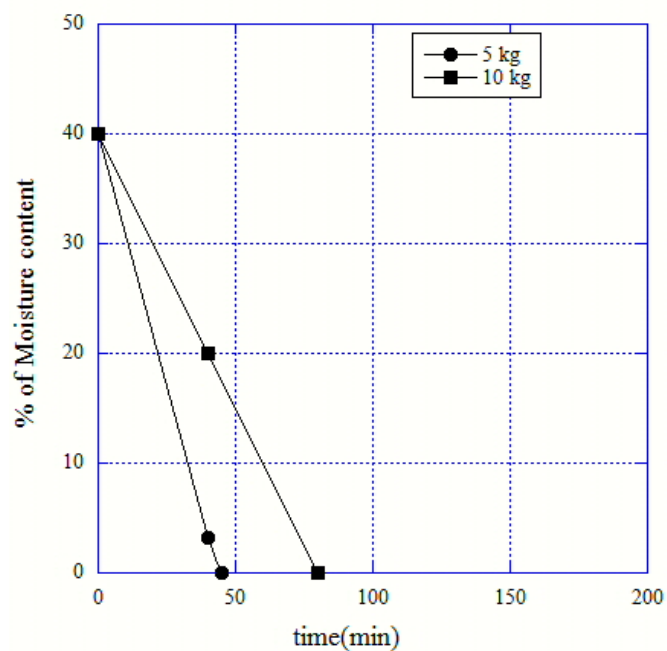
(ข)

รูปที่ 4.10 ยางหลังจากอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนให้เหลือความชื้นประมาณ 0.8% เมื่อใช้กำลังไมโครเวฟที่มี Duty cycle (ก) 30% (ข) 70%

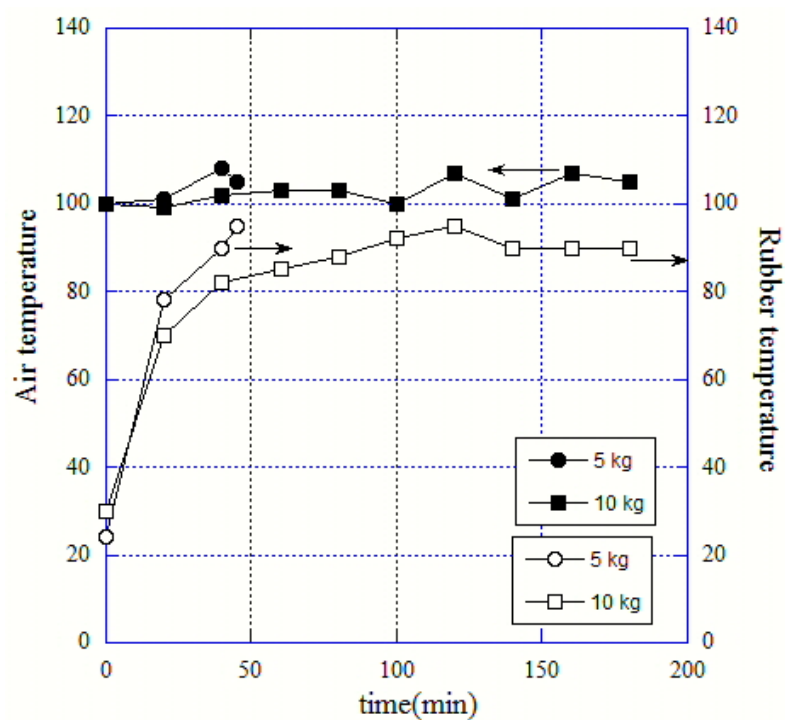
จากรูปที่ 4.8 พบว่าการเพิ่ม Duty cycle ของกำลังไมโครเวฟเป็น 2.3 เท่าทำให้สามารถลดเวลาการอบแห้งได้ประมาณ 2.3 เท่าเช่นเดียวกัน ในขณะที่อุณหภูมิของลมร้อนและอุณหภูมิของยางไม่ค่อยแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยการอบแห้งยางด้วย Duty cycle ที่สูงกว่าจะให้ยางแห้งมีความชื้นของสีมากกว่าในรูปที่ 4.10

1.2.4 การอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเมื่อใช้มวลยาง(ความหนา)ต่างกัน

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนา(มวลยาง)เมื่ออบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนซึ่งใช้กำลังของไมโครเวฟที่มี Duty cycle เท่ากัน โดยใช้ยางจำนวน 5 kg(ความหนา 6 cm) และ 10 kg(ความหนา 11 cm) และใช้ Duty cycle ของกำลังไมโครเวฟ 60% โดยทำการอบแห้งยางให้มีความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.8% มีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.11 – 4.13



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางเมื่ออบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยใช้มวลของยาง 5 kg (ความหนา 6 cm) และ 10 kg (ความหนา 11 cm)



รูปที่ 4.12 อุณหภูมิของอากาศร้อน และอุณหภูมิของยาง ขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่มีกำลังไมโครเวฟที่มี Duty cycle 60% เมื่อใช้มวลยาง 5 kg และ 10 kg



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.13 ยางหลังจากอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนให้เหลือความชื้นประมาณ 0.8% เมื่อใช้มวลยาง (ก) 5 kg (ข) 10 kg

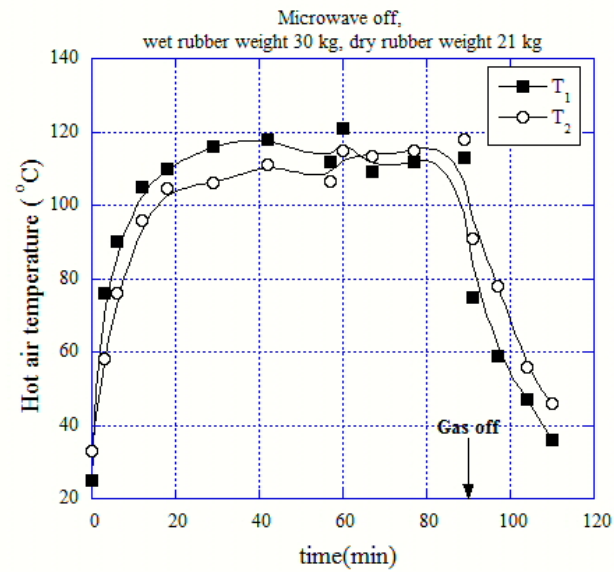
จากรูปที่ 4.11 พบว่าการเพิ่มมวลของยางที่ Duty cycle คงที่ จะทำให้เวลาในการอบแห้งยางเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มมวล 2 เท่า จะทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มเป็นประมาณ 2 เท่าเช่นกัน โดยที่ยางมวลน้อยกว่าจะอุณหภูมิสูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.12 ในขณะที่สีของยางไม่ต่างกันมากนักดังในรูปที่ 4.13

2. การพัฒนาเครื่องต้นแบบการอบยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

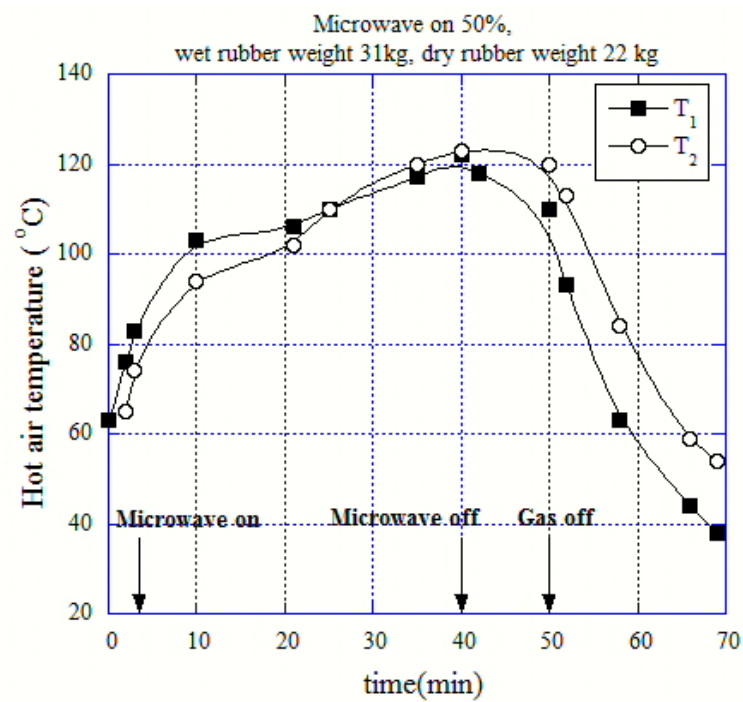
รายละเอียดของเครื่องต้นแบบการอบยางด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 โดยได้ออกแบบให้สามารถอบยางได้อย่างน้อย 30 kg/h

2.1 การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้ง

เพื่อเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งยางโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน กับการอบแห้งยางโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว ได้ทำการทดลองโดยใช้ยางเปียกประมาณ 30 กิโลกรัม แล้วทำการอบแห้งจนกระทั่งไม่มีจุดขาวของเม็ดยาง ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในรูป 4.14-4.15



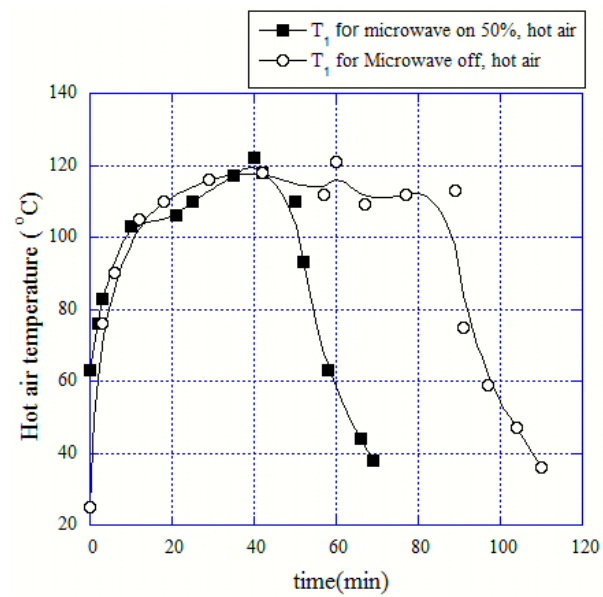
รูปที่ 4.14 อุณหภูมิของลมร้อนก่อนผ่านเม็ดยาง T_1 และหลังผ่านเม็ดยาง T_2 เมื่ออบแห้งยางโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว



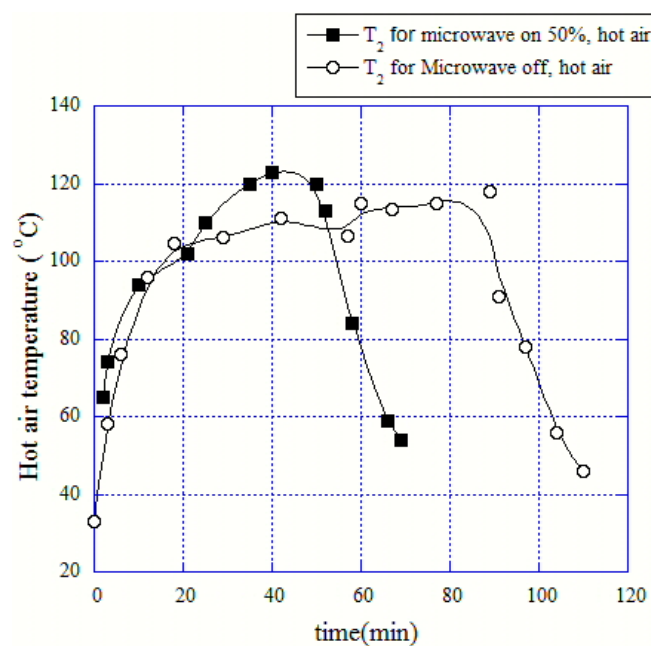
รูปที่ 4.15 อุณหภูมิของลมร้อนก่อนผ่านเม็ดยาง T_1 และหลังผ่านเม็ดยาง T_2 เมื่ออบแห้งยางโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

ในการอบแห้งทั้งสองกรณีจะควบคุมให้ลมร้อนจากจากBlowerที่จะเข้าห้องอบมีอุณหภูมิ T_1 ไม่เกิน 120 องศาเซลเซียส โดยพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบจนกระทั่งไม่มีจุดขาวของเม็ดยางมีความแตกต่างกันระหว่างการใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและการใช้ลมร้อนอย่างเดียว ในการใช้ลมร้อนอย่างเดียวจะใช้เวลาประมาณ 90 นาที(รูปที่4.14) ในขณะที่การใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจะใช้เวลาประมาณ 50 นาที(รูปที่4.15) ในการอบทั้งสองกรณีพบว่าในช่วงแรก $T_1 > T_2$ และในช่วงหลัง $T_2 > T_1$ เนื่องจากเม็ดยางจะดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดเป็นความร้อนขึ้นในเม็ดยาง ความร้อนและความชื้นที่ออกมาจากเม็ดยางจะทำให้การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถเพิ่มอุณหภูมิของ T_2 ได้เร็วกว่า ซึ่งพบว่าการใช้ไมโครเวฟช่วยจะทำให้ T_2 ตัด T_1 ที่เวลาประมาณ 25 นาที(รูปที่4.15) ในขณะที่การใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว T_2 ตัด T_1 ที่เวลาประมาณ 65 นาที(รูปที่4.14)

จากรูปที่4.16พบว่าในขณะอบแห้งอุณหภูมิลมร้อน T_1 ของการอบแห้งทั้งสองกรณีไม่ต่างกัน โดยจะใช้เวลาประมาณ 10 นาทีที่ทำให้ลมร้อนมีอุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส และควบคุมอัตราการเผาไหม้ของแก๊สLPGไม่ให้อุณหภูมิของลมร้อนเกิน 120 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิลมร้อน T_2 ของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวประมาณ 10 องศาเซลเซียสดังแสดงในรูปที่4.17 ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟของเม็ดยาง และทำให้การใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถอบแห้งยางได้เร็วกว่า โดยการใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถอบแห้งยางได้ 37 kg/h ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวสามารถอบแห้งยางได้ 20 kg/h



รูปที่ 4.16 แสดงอุณหภูมิ T_1 ที่เวลาต่างๆ เมื่ออบเม็ดยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.17 แสดงอุณหภูมิ T_2 ที่เวลาต่างๆ เมื่ออบเม็ดยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

2.3 ค่าใช้จ่ายในการอบ

ในการอบยางด้วยวิธีทั้งสองมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 การอบด้วยลมร้อน: เม็ดยางสด 30 กิโลกรัม เวลาอบ 90 นาที Blower ขนาด 750 วัตต์ ใช้แก๊ส LPG 2.1 กิโลกรัม ใช้ไฟฟ้า 1.125 หน่วย

2.3.2 การอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน: เม็ดยางสด 31 กิโลกรัม เปิดไมโครเวฟ กำลัง 9.02 kW (41 A, 220 V) 20 นาที (50% ของ 40 นาที) เปิด Blower 50 นาที ใช้แก๊ส LPG 1.4 กิโลกรัม ใช้ไฟฟ้า 3.635 หน่วย ไมโครเวฟ 3.01 หน่วย Blower 0.625 หน่วย

เมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายในการอบโดยใช้ค่าแก๊ส 29.02 บาท/กก. และค่าไฟฟ้าสำหรับกิจการ ขนาดกลาง 2.6880 บาท/หน่วย (ดูภาคผนวก ก และภาคผนวก ข ตามลำดับ) จะได้ค่าใช้จ่ายในการ แห้งแต่ละกรณีตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าใช้จ่ายในการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และด้วยลมร้อนเพียง อย่างเดียว

วิธีการอบ	ปริมาณ ยางสด (kg)	ปริมาณ ยางแห้ง (kg)	เวลาอบ	ค่าแก๊ส (บาท)	ค่าไฟฟ้า (บาท)	ค่าใช้จ่ายต่อ กก.ยางสด (บาท/กก.)	ค่าใช้จ่ายต่อ กก.ยางแห้ง (บาท/กก.)
ลมร้อน อย่างเดียว	30	21	90 นาที (เปิด Blower เปิดแก๊ส 90 นาที)	60.94	3.02	2.13	3.05
ไมโครเวฟ ร่วมกับลม ร้อน	31	22	เปิดไมโครเวฟ 20 นาที (50% ของ 40 นาที) เปิด Blower 50 นาที เปิด แก๊ส 50 นาที	40.63	9.77	1.63	2.29

สำหรับโรงงานที่ผลิตยางแท่ง STR20 วันละ 100 ตัน หรือเดือนละ 3,000 ตันสามารถ ประหยัดค่าใช้จ่ายในการอบได้ประมาณ 2,280,000 บาท/เดือน

2.4 คุณภาพของยางอบแห้ง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.18(ก)ลักษณะของเม็ดยางสดซึ่งใส่ในกระบะวางในตู้อบ (ข)ลักษณะของเม็ดยางแห้งซึ่งอบแห้งโดยใช้คลีนไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

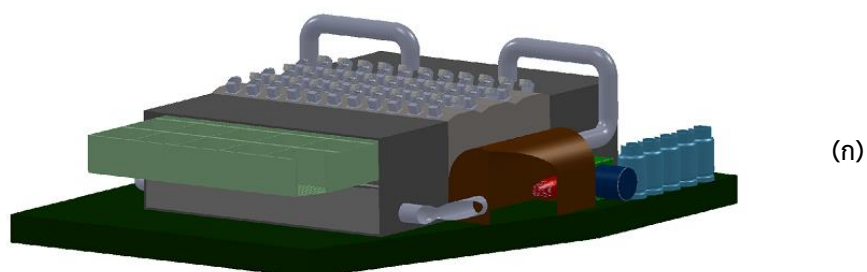
เม็ดยางสดที่นำมาอบมีสีขาว เมื่ออบแห้งแล้วจะมีสีน้ำตาลไม่มีจุดขาวดังแสดงในรูปที่4.18(ก) และ4.18(ข)ตามลำดับ ซึ่งเมื่อวัดค่าต่างๆตามมาตรฐานของยางSTR20(ดูภาคผนวก ค)ได้ค่าแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าการอบยางด้วยวิธีทั้งสองมีค่าต่างๆตามมาตรฐานยางแห้งSTR20 โดยการอบด้วยลมร้อนมีค่าMLสูงกว่าการอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติต่างๆของยางแห้งที่อบด้วยไมโครเวฟร่วมกับร้อน และอบด้วยลมร้อน กับค่ามาตรฐานยางแห้ง STR20

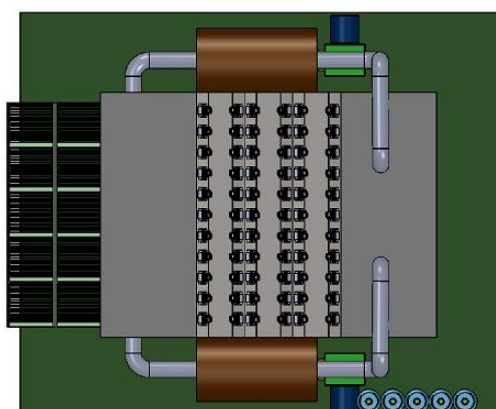
สมบัติยางแห้ง STR 20	มาตรฐานยางแห้ง STR 20	อบด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	อบด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว
%N ₂	0.6 max	0.535±0.005	0.56±0.01
%VM	0.8 max	0.31±0.00	0.35±0.01
%Ash	0.8 max	0.59±0.01	0.665±0.015
%Dirt	0.16 max	0.1295±0.0005	0.1355±0.0005
Initial Plasticity PO	30±3	31.25±0.25	32.5±0.0
Plasticity Retention Index PRI	55±5	52.8±0.4	56.2±0.8
Mooney Viscosity ML	80±10	83.6±0.5	89.2±0.0

3. การออกแบบเครื่องต้นแบบอุตสาหกรรมเพื่อการแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

จากผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนขนาด 30 กก./ชม. จะสามารถออกแบบเครื่องต้นแบบอุตสาหกรรมเพื่อการอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนขนาด 300 กก./ชม. ดังแสดงในรูปที่ 4.19 - 4.20

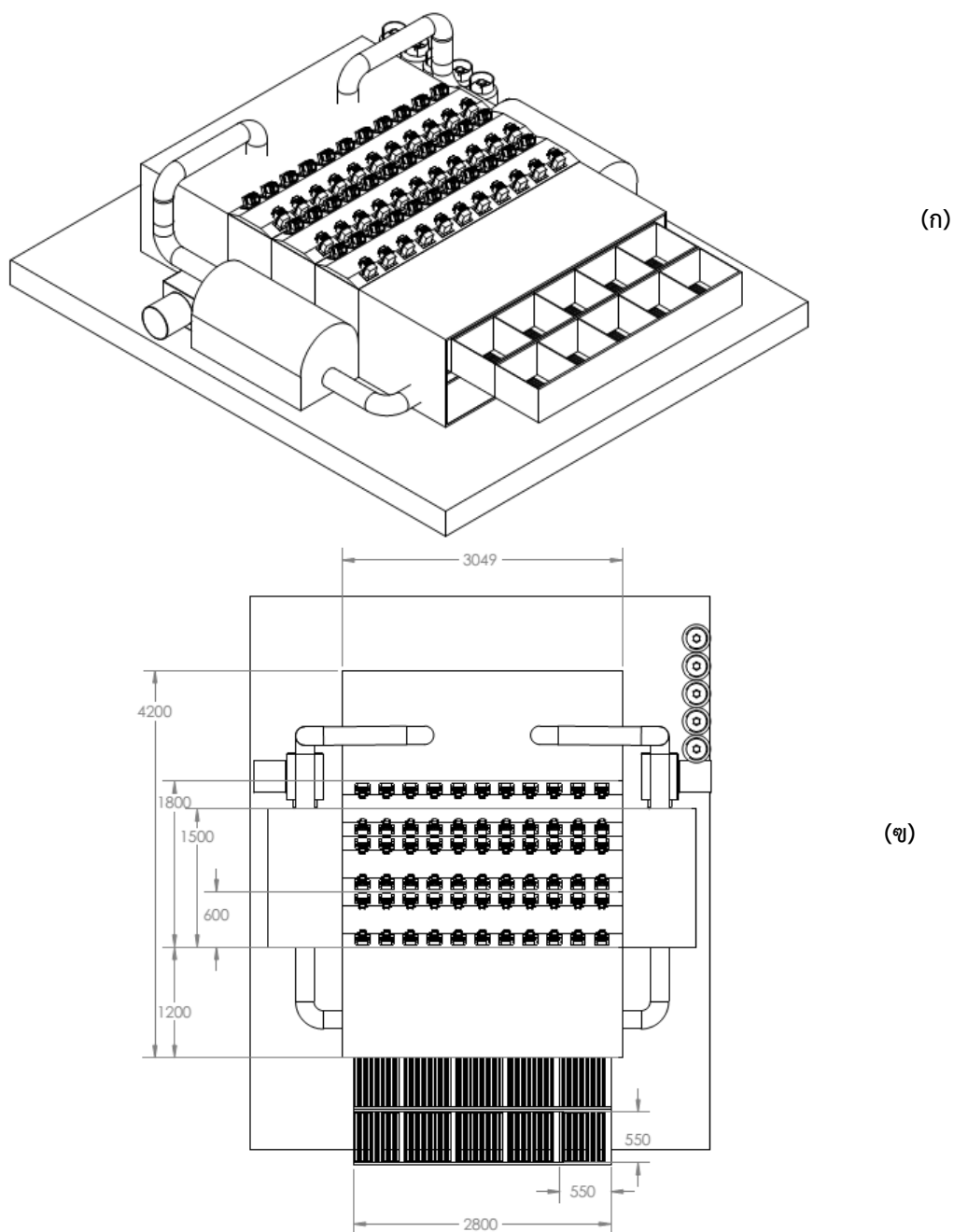


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 ภาพเสมือนจริงของเครื่องต้นแบบอุตสาหกรรมเพื่อการอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยมองจาก (ก)ด้านข้าง (ข)ด้านบน



รูปที่ 4.20 ภาพวาด(ก)แสดงส่วนประกอบ และ(ข)ส่วนประกอบและขนาดของเครื่อง

รูปที่ 4.19 แสดงรูปเสมือนจริงของเครื่องอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยติดตั้งแมกนีตรอนด้านบนของตู้อบจำนวน 6 แถวๆละ 11 ตัว จำนวนทั้งหมด 66 ตัว ถ้าใช้แมกนีตรอนขนาด 2 kW/หัว จะได้กำลังรวมของไมโครเวฟ 132 kW และมีแหล่งกำเนิดลมร้อนอยู่สองด้านของตู้อบ ลมร้อนจะถูกดันจากด้านข้างของตู้อบเข้าไปด้านล่างของกระบะยาง โดยลมร้อนจะผ่านเม็ดยางในกระบะแล้วขึ้นสู่ด้านบนของห้องอบ ซึ่งลมร้อนจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่จากด้านหลังของตู้อบ ขนาดของตู้อบแสดงในรูปที่ 4.20 เครื่องที่ได้ออกแบบนี้สามารถอบแห้งยางได้มากกว่า 300 กก./ชม. ถ้าจะ

เพิ่มความสามารถในการอบายเป็น 3 ตัน/ชม. คาดว่าจะสามารถทำได้โดยการเพิ่มขนาดของเครื่อง
และกำลังไมโครเวฟตามสัดส่วนที่เหมาะสม

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ โดยที่ลมร้อนจะทำให้เกิดความร้อนที่บริเวณผิวของก้อนยาง ในขณะที่คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนสูงภายในก้อนยาง โดยผลรวมของพลังงานทั้งสองจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างสม่ำเสมอกับก้อนยาง สามารถอบยางได้เร็วขึ้นและมีคุณภาพตามมาตรฐานของยางSTR20 โดยมีผลการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. ได้จำลอง ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับการทดลองการอบแห้งยางด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน กำลังไมโครเวฟ 9.6 kW อัตราการอบแห้งมากกว่า 30 kg/h
2. ได้ศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการอบแห้งยางด้วยลมร้อน กับการอบแห้งยางด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนยาง โดยพบว่าเมื่อยางติดคลื่นไมโครเวฟแล้วทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน แล้วทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกมาจากเมื่อยางเร็วขึ้น ทำให้การอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว
3. ประสบความสำเร็จในการอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่มีความหนา มากกว่า 30 cm และมีอัตราการอบสูงกว่า 30 kg/h มากกว่าเป้าหมายที่ได้ตั้งเอาไว้
4. ยางที่อบด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีคุณสมบัติตามมาตรฐานของยางSTR20
5. ได้ออกแบบเครื่องต้นแบบอุตสาหกรรมเพื่อการอบแห้งยางด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน กำลังไมโครเวฟ 132 kW อัตราการอบแห้งมากกว่า 300 kg/h และเสนอแนวทางในการพัฒนาเครื่องอบแห้งระดับโรงงานซึ่งมีอัตราการอบแห้ง 3 ton/h

ตารางที่5.1 เปรียบเทียบข้อเสนอและผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงาน	ผลสำเร็จ เปอร์เซ็นต์	หมายเหตุ
1. ระบบการอบแห้งยางด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนขนาดกำลัง 1 kW และผลการอบแห้งยาง การออกแบบระบบการอบแห้งขนาดกำลัง 8 kWซึ่งประกอบด้วยห้องอบ(Cavity) ท่อนำคลื่น (Wave guide) ท่อกระจายคลื่น(Slot antenna)ระบบควบคุมการทำงานของแมกนีตรอน ระบบการกำเนิดและควบคุมลมร้อน และระบบการวัดอุณหภูมิยางและลมร้อน ผลการจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟและการไหลวนของลมร้อนภายในห้องอบ	100	ได้จำลอง ออกแบบและสร้างระบบการอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนขนาดกำลังไมโครเวฟ 3 kW
2. ระบบการอบแห้งยางด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนขนาดกำลัง 8 kW ผลการอบแห้งขึ้นยางสำหรับการผลิตยางแท่งSTR 20	100	ได้ออกแบบและสร้างระบบการอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนขนาดกำลังไมโครเวฟ 9.6 kW มีผลการทดลองอัตราการอบแห้งยาง ค่าใช้จ่ายในการอบ และการทดสอบคุณสมบัติยางแห้ง
3. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของยางแห้ง การวิเคราะห์ค่าพลังงานจำเพาะการออกแบบเครื่องต้นแบบการอบแห้งยางขนาดกำลัง 100 kW และผลการศึกษาความเป็นได้ในการพัฒนาเครื่องอบแห้งยางด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนระดับอุตสาหกรรมกำลังการผลิต 3 ตัน/ชม.	100	ได้ออกแบบระบบการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนขนาดกำลังไมโครเวฟ 132 kW

ข้อคิดเห็นและข้อเสนออื่นๆต่อ สกว.

- ☒ ประชุมกับผู้ช่วยกับผู้ช่วยวิจัยอาทิตย์ละ 1 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ผลการดำเนิน วางแผนการทดลอง และการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติม

ลงนาม.....

(หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน)

วันที่.....20 ก.พ. 58.....

ภาคผนวก ก ราคาก๊าซLPG



เศรษฐกิจ

Friday, 3 October, 2014 - 00:00

สนพ.ประกาศลด LPG ลดลง 30 สต. หลังราคาโลกดิ่ง

สนพ.ประกาศลดแอลพีจีภาคอุตสาหกรรมประจำเดือน ต.ค.2557 ลง 30 สตางค์ต่อกิโลกรัม เหลือ 29.02 บาทต่อกิโลกรัม หลังราคาลดลงมาอยู่ที่ 747 เหรียญสหรัฐต่อดิน

แหล่งข่าวสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) เปิดเผยว่า สนพ.ได้ประกาศราคาจำหน่ายก๊าซหุงต้ม (แอลพีจี) ภาคอุตสาหกรรม ประจำเดือน ต.ค.2557 โดยให้มีราคาปรับลดลงเหลือ 29.02 บาทต่อกิโลกรัม หรือลดลง ประมาณ 30 สตางค์ จากเดือน ก.ย.2557 ที่ราคา 29.33 บาทต่อกิโลกรัม และนับเป็นการประกาศปรับลดลงต่อเนื่องเป็นเดือนที่ 3 ของปี 2557 จากราคาเพดานสูงสุดที่ 30.13 บาทต่อกิโลกรัม

ทั้งนี้ เนื่องจากราคาแอลพีจีในตลาดโลกปรับลดลงต่อเนื่อง โดยปัจจุบันมาอยู่ที่ราคา 747 เหรียญสหรัฐต่อดิน จากเดือน ก.ย.2557 ที่อยู่ระดับ 761 เหรียญสหรัฐต่อดิน ซึ่งเป็นผลมาจากภาวะเศรษฐกิจในยุโรปยังไม่ฟื้นตัวดีนัก ส่งผลให้สกุลเงินยูโรอ่อนค่าลง และทำให้สกุลเงินสหรัฐแข็งค่าขึ้น มีผลกระทบต่อนักลงทุนในตลาดซื้อขายล่วงหน้าให้หันไปพึ่งก๊าซน้ำมันแทนก๊าซ จึงทำให้ราคาก๊าซในตลาดโลกปรับลดลงต่อเนื่อง

อย่างไรก็ตาม สถานการณ์ราคาพลังงานโลกในปี 2557 นี้ ไม่ค่อยปกตินัก เนื่องจากขณะนี้เริ่มเข้าสู่ฤดูหนาวของสหรัฐและยุโรป ซึ่งปกติจะเกิดการใช้แอลพีจีสูงเพื่อใช้ทดแทนความต้องการฤดูหนาวที่จะมาถึง และเดือน ต.ค.-พ.ย. ของทุกปีจะเป็นช่วงที่ราคาน้ำมันและก๊าซจะต้องทยอยปรับสูงขึ้นอย่างชัดเจน แต่ปี 2557 นี้ ราคาน้ำมันและก๊าซกลับปรับลดลง ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่คาดเดาได้ยากและต้องติดตามสถานการณ์ราคาก๊าซอย่างใกล้ชิดต่อไป

"การที่ราคาแอลพีจีตลาดโลกปรับลดลง กลับส่งผลดีต่อไทยช่วยให้กองทุนน้ำมันลดเงินชดเชยราคาแอลพีจีอุตสาหกรรมลง จากปัจจุบันต้องนำเงินไปชดเชยส่วนต่างราคา กรณีซื้อแอลพีจีราคาตลาดโลกที่สูงแต่ต้องมาจำหน่ายในราคาต่ำ 333 เหรียญสหรัฐต่อดิน ตามสัดส่วนที่ภาครัฐกำหนดให้อิงราคาตลาดโลกได้เพียง 76% และต้องอิงราคานำโรงกลั่นไทย 24% ที่ราคา 333 เหรียญสหรัฐต่อดิน ดังนั้น ราคาแอลพีจีตลาดโลกลดลง จึงส่งผลให้ส่วนต่างราคาดังกล่าวปรับลดลงเช่นกัน และทำให้ลดเงินที่นำไปชดเชยแอลพีจีลงได้ด้วย" แหล่งข่าวกล่าว

สำหรับราคาแอลพีจีของไทย ปัจจุบันแบ่งออกเป็น 3 ราคา ได้แก่ 1.ราคาจำหน่ายให้ภาคอุตสาหกรรมแบบกึ่งลอยตัว ปัจจุบันอยู่ที่ 29.02 บาทต่อกิโลกรัม 2.ราคาจำหน่ายให้ภาคครัวเรือนที่ภาครัฐตรึงราคาไว้ที่ 22.63 บาทต่อกิโลกรัม ยกเว้นผู้มีรายได้น้อยให้ใช้ราคา 18.13 บาทต่อกิโลกรัม และ 3.ภาคขนส่งปัจจุบันให้ตรึงราคาไว้ที่ 22 บาทต่อกิโลกรัม

โดยขณะนี้กระทรวงพลังงานกำลังอยู่ระหว่างการปรับโครงสร้างราคาแอลพีจี โดยเริ่มต้นจากการทำให้ราคาก๊าซครัวเรือนและภาคขนส่งมีราคาเท่ากันก่อน จากนั้นจะทยอยปรับขึ้นราคาไปพร้อมกันเพื่อไม่สะท้อนราคานำโรงกลั่นก๊าซที่ 24.82 บาทต่อกิโลกรัมต่อไป.

ภาคผนวก ข
อัตราค่าไฟฟ้า



ประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลาง

สำหรับการใช้ไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ อุตสาหกรรม หน่วยราชการ สำนักงาน หรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น รัฐวิสาหกิจ สถานทูต สถานที่ทำการของหน่วยงานราชการต่างประเทศ และสถานที่ทำการขององค์กรระหว่างประเทศ ตลอดจนบริเวณที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความต้องการพลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุด ตั้งแต่ 30 กิโลวัตต์ แต่ไม่ถึง 1,000 กิโลวัตต์ และมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3 เดือนก่อนหน้าไม่เกิน 250,000 หน่วยต่อเดือน โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว

3.1 อัตราปกติ	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
3.1.1 แรงดันตั้งแต่ 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	175.70	2.6506	312.24
3.1.2 แรงดัน 22 – 33 กิโลโวลต์	196.26	2.6880	312.24
3.1.3 แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์	221.50	2.7160	312.24

3.2 อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU)

	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	Peak	Peak Off Peak	
3.2.1 แรงดันตั้งแต่ 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	74.14	3.5982 2.1572	312.24
3.2.2 แรงดัน 22 – 33 กิโลโวลต์	132.93	3.6796 2.1760	312.24
3.2.3 แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์	210.00	3.8254 2.2092	312.24

อัตราขั้นต่ำ : ค่าไฟฟ้าต่ำสุดต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 70 ของค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดในรอบ 12 เดือน ที่ผ่านมาสิ้นสุดในเดือนปัจจุบัน

หมายเหตุ 1. กรณีติดตั้งเครื่องวัดไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงซึ่งเป็นสมบัติของผู้ใช้ไฟฟ้า ให้คำนวณกิโลวัตต์ และหน่วยคิดเงินเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 2 เพื่อครอบคลุมการสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมิได้วัดรวมไว้ด้วย

- ประเภทที่ 3.2 กำหนดเป็นอัตราสำหรับผู้ใช้อำนาจไฟฟ้าประเภทที่ 3 เป็นครั้งแรก ตั้งแต่ค่าไฟฟ้าประจำเดือน ตุลาคม 2543
- ประเภทที่ 3.2 เป็นอัตราเลือกสำหรับผู้ใช้อำนาจไฟฟ้ารายเดิม เมื่อใช้แล้วจะกลับไปใช้อัตราประเภทที่ 3.1 ไม่ได้ ทั้งนี้ ผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องชำระค่าเครื่องวัด TOU และหรือค่าใช้จ่ายอื่นตามที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด
- เดือนใดความต้องการพลังไฟฟ้าไม่ถึง 30 กิโลวัตต์ ค่าไฟฟ้ายังคงคำนวณตามอัตราดังกล่าว หากความต้องการพลังไฟฟ้าไม่ถึง 30 กิโลวัตต์ติดต่อกันเป็นเวลา 12 เดือน และในเดือนถัดไปก็ยังไม่ถึง 30 กิโลวัตต์อีก ให้เปลี่ยนประเภทผู้ใช้อำนาจไฟฟ้าเป็นประเภทที่ 2.1

อัตราค่าไฟฟ้าข้างต้น เริ่มใช้ตั้งแต่ ค่าไฟฟ้าประจำเดือน มิถุนายน 2555 เป็นต้นไป

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 200 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 1090

โทรศัพท์ 0-2590-9125, 0-2590-9127 โทรสาร 0-2590-9133-34 <http://www.pea.co.th> Call Center 1129

ภาคผนวก ค

มาตรฐานยางแท่งSTR20ที่กำหนดโดยตลาดสินค้าเกษตรล่วงหน้าแห่งประเทศไทย(AFET)

Properties	Specification
Dirt content (%wt.)	0.16 max
Ash content (%wt.)	0.80 max
Nitrogen (%wt.)	0.60 max
Volatile Matter (%wt.) VM	0.80 max
Initial Plasticity PO	33 ± 3
Plasticity Retention Index PRI	55 ± 5
Mooney Viscosity ML	80 ± 10

สรุปข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่อรายงานความก้าวหน้ารอบ 2 เดือน ของโครงการ

“การพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเพื่อเป็นต้นแบบในการผลิตยางแท่งSTR 20 ระดับอุตสาหกรรม”

ผศ.ดร.หมุดตอเล็บ หนีสอหัวหน้าโครงการ

ข้อเสนอแนะจากผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 1

- 1.ระหว่างอบแห้ง ยางเปลี่ยน property เช่น มีการหลอมติด ส่งผลต่อ mass Transportation ของการอบแห้ง เพราะฉะนั้นเป็นสภาพ Dynamics และเมื่อ MC. ลดลงสภาพของ MW. ก็ Dynamic เพราะฉะนั้นต้องศึกษา Kinetic ของการอบแห้ง เพื่อเอามา simulate ระบบใหญ่ได้
- 2.การจำลอง/ศึกษา น่าจะดูระบบ Intermittent (อบ + หยุด)
3. ควรดู Kinetic จาก 2 กลไก (ลมร้อน VS MW) เพื่อ Optimise operation ให้ต้นทุนต่ำ
 - ในการศึกษาจำลองการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ได้ใช้วิธีควบคุม Duty Cycleของกำลังไมโครเวฟ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของยางไม่ให้เกิน 120 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการหลอมของเม็ดยาง ซึ่งทำให้สามารถอบแห้งยางได้โดยไม่มีการหลอม และได้ออกแบบระบบเพื่อทำให้มีต้นทุนราคาต่ำ โดยใช้แหล่งความร้อนจากแก๊สLPG และสามารถใช้กำลังไมโครเวฟที่เหมาะสม ซึ่งจะมีการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในเครื่องต้นแบบขนาด 30kg/ชม ต่อไป

ข้อเสนอของผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 2

- 1.แนะนำให้ทีมวิจัยตั้งเป้าเชิงวิศวกรรมของต้นแบบที่กำลังพัฒนาขึ้น โดยคำนึงความเหมาะสมที่ผู้ประกอบการจะนำไปใช้ได้ (แข่งขันได้กับการอบแห้งแบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน) Cost + productivity เพื่อที่จะสามารถกำหนดรายละเอียดเชิงขีดความสามารถของต้นแบบนี้ได้
 - ในการออกแบบระบบการอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนนั้น ได้คำนึงถึงความสามารถในการพัฒนาเป็นเทคโนโลยีเพื่อทดแทนระบบเดิม โดยออกแบบให้ใช้แหล่งความร้อนจากแก๊สLPG(ซึ่งต่างจากงานวิจัยอื่นๆที่ใช้ Heaterจากไฟฟ้า) ซึ่งผู้ประกอบการใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยเพิ่มเทคโนโลยีไมโครเวฟเข้าไป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการอบ ลดเวลาและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยการใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟนั้น จะสามารถสร้างจากชิ้นส่วนที่สามารถจัดได้ในประเทศไทยได้ทั้งหมด และสามารถแข่งขันกับการนำเข้าจากต่างประเทศ โดยเฉพาะประเทศจีนได้

สรุปข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่อรายงานความก้าวหน้ารอบ 6 เดือน ของโครงการ
 “การพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเพื่อเป็นต้นแบบในการผลิตยางแท่งSTR 20 ระดับ
 อุตสาหกรรม”
 ผศ.ดร.หมุดตอเล็บ หนิสอหัวหน้าโครงการ

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิโดยนักวิจัย
ความเห็นด้านการพิมพ์ (Editorial)	
ความเห็นด้านวิชาการ (Technical) ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 1 1. ได้ข้อมูลใช้เวลาในการอบแห้งลดลง 3 เท่า สมรรถนะ 5 kg/h ต่ำกว่าวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 ผู้วิจัยนำเสนอจะพัฒนาต่อเป็น 30 kg/h ในช่วงหกเดือนหลัง ดังนั้นคิดว่าจะไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ เพราะจะไม่ได้เครื่องต้นแบบ 300 kg/h และ 3 ton/h อนึ่ง การขยายผลอาจได้ character ที่ต่างจากการทำ 10 kg ดังนั้นนักวิจัยควรต้องเสนอความคิดเห็น/ แนะนำ 2. ผู้วิจัยได้แสดงการจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟด้วยภาพ หากสามารถเพิ่มการอธิบายด้วยข้อความจะทำให้ผู้อ่านมีความเข้าใจยิ่งขึ้น ว่าทำไมจึงเลือกเช่นนั้น 3. การแห้งของยาง ควรจะได้เป็นเส้นโค้ง ไม่ใช่เส้นตรง การได้เป็นเส้นตรงอาจเป็นเพราะมีจำนวนข้อมูลไม่เหมาะสมก็เป็นไปได้ แต่ผู้วิจัยไม่ได้อธิบายว่าทำไมจึงเป็นเช่นนั้น 4. สีของเนื้อยาง ขึ้นกับ อุณหภูมิของเนื้อยางในขณะอบแห้ง แต่พลังงานความร้อนที่ยังได้รับมาจากสองส่วน คือ ลมร้อน (ความเร็วลม กับ อุณหภูมิ) และ คลื่นไมโครเวฟ (จะอธิบายด้วยอะไร)	1. หลังจากที่ได้ส่งรายงานหกเดือน ได้ทำการปรับปรุงห้องอบ ระบบลมร้อนเพื่อให้ลมร้อนมีการกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้น ควบคุมอัตราการไหลและอุณหภูมิของลมร้อนให้เหมาะสม ทำให้สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ โดยเมื่อใช้ลมร้อนร่วมกับพลังงานไมโครเวฟ คาดว่าจะสามารถเพิ่มอัตราการอบได้ถึง 30 kg/h ตามที่ได้เสนอไว้ 2. การจำลองการกระจายตัวของคลื่นในห้องอบ ทำให้สามารถกำหนดตำแหน่งของท่อนำคลื่น ที่จะทำให้คลื่นมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้การให้ความร้อนกับยางด้วยคลื่นไมโครเวฟมีความสม่ำเสมอด้วย 3. Drying curve ในทางทฤษฎีควรเป็นเส้นโค้งตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิเสนอ แต่เนื่องจากในการศึกษา มีเป้าหมายที่ลดความชื้นยางให้เหลือ 0.8% ตามมาตรฐานของยาง STR20 ซึ่งเก็บข้อมูลเฉพาะตอนเริ่มต้น และตอนที่ความชื้นเหลือน้อยกว่า 0.8% 4. ตามที่ได้เสนอในรายงานหกเดือน หัวข้อที่ 1.3 ความร้อนในยางเกิดจากลมร้อนและคลื่นไมโครเวฟ โดยจะช่วยเหลือกันเพื่อทำให้ลดความชื้นในยางได้เร็วขึ้น โดยลมร้อนจะให้อุณหภูมิด้านนอกสูงกว่าด้านใน ในขณะที่ไมโครเวฟจะทำให้อุณหภูมิด้านในสูงกว่าด้านนอก นอกจากนั้นลมร้อนจะช่วยพาความชื้นที่ออกมาจากเม็ดยางไปจากห้องอบ ดังนั้นสีของยางจะเป็นผลมาจากพลังงานทั้งสองรูป

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิโดยนักวิจัย
5. ข้อมูลตัวแปรที่เป็นปัจจัยเหล่านี้ควรเก็บและนำมาวิเคราะห์ ผสมผสานกับการแห้งของยางและคุณภาพไม้เช่นนั้นเราจะเอา ข้อมูลอะไรไปออกแบบเครื่องต้นแบบในเมื่อยังไม่ทราบ ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆครบ 6. ผลงานวิจัยที่ได้ยังไม่เพียงพอ ครอบคลุม และเป็นพื้นฐาน สำหรับใช้ออกแบบเครื่องต้นแบบตัวต่อไป โดยเฉพาะ “ความเร็วลมร้อน” เงื่อนไขที่ทำให้อุณหภูมิยาง ไม่ร้อนเกินไป 7. ปรับความเร็วลมโดยการปรับวาล์ว 8. พยายามเก็บข้อมูลให้ได้เงื่อนไขต่าง ๆ ครบในการอธิบาย สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ควรจะปรึกษาผู้เชี่ยวชาญด้านการอบแห้ง	5. จะดำเนินการตามที่คุณทรงคุณวุฒิเสนอ เพื่อออกแบบ เครื่องอบแห้งขนาด 300 kg/h โดยจะศึกษาตัวแปร ต่างๆเมื่อปรับปรุงเครื่องให้สามารถอบแห้งได้ตามที่ เสนอแล้ว 6. ยังอยู่ในระหว่างการทดลองและปรับปรุงเพื่อให้ได้ข้อมูล ที่เพียงพอในการออกแบบเครื่องต้นแบบต่อไป 7. กำลังอยู่ในระหว่างการปรับปรุงระบบให้เหมาะสม 8. กำลังดำเนินการ
ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 2 1. ควร discuss เรื่องปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการอบ เช่น ขนาดก้อน ยาง (mass) ควบคู่กับ การนำเสนอผลการทดลองด้วย 2. จากผลการศึกษาทดลองเบื้องต้น แสดงผลว่า duty cycle, rubber mass (i.e., varied at 5 kg และ 10 kg) มีผลต่อ drying characteristics (i.e., % moisture content vs. time & air temperature, time & physical appearance & the dried rubber) ดังนั้นผู้วิจัยจะต้องคำนึงถึงปัจจัย ดังกล่าวในการออกแบบระบบเป้าหมายให้เหมาะสมด้วย	1. กำลังอยู่ในระหว่างการดำเนินการ 2. ตอนนี้กำลังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนาแบบลมร้อนและ ระบบไมโครเวฟของตู้อบให้สามารถอบยางได้ 30 kg/h ตามวัตถุประสงค์ โดยการควบคุมอุณหภูมิของยางให้อยู่ ในเงื่อนไขที่จะทำให้ยางมีคุณสมบัติตามมาตรฐานของ STR20 และจะทำการวัดตัวแปรต่างๆเพื่อหา ความสัมพันธ์กับการอบแห้งของยาง เพื่อนำไปใช้ในการ ออกแบบเครื่องต้นแบบในระดับต้นแบบอุตสาหกรรม ต่อไป

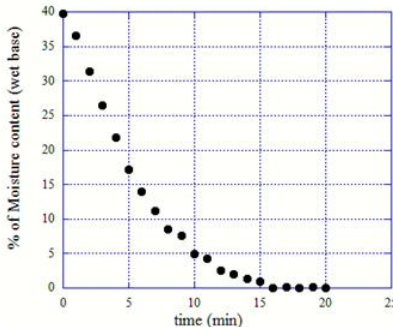
ความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิในการประเมินจากการประชุมรายงานความก้าวหน้า 8 เดือน
โครงการวิจัย การพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเพื่อเป็นต้นแบบในการผลิตยางแท่ง
STR 20 ระดับอุตสาหกรรม

หัวหน้าโครงการวิจัย ผศ.ดร. หมดต่อเล็บ หนิสอ

เพื่อให้ สกว. เห็นภาพชัดเจนว่า ข้อเสนอโครงการมีการพัฒนาอย่างรอบคอบ จึงขอให้ผู้ประสานงานแนบตารางข้างล่างนี้มาพร้อมกับรายงานการพัฒนาข้อเสนอโครงการด้วย

ตารางสรุปความเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิจัย และผู้ประสานงาน (เฉพาะประเด็นสำคัญ)

1. ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะต่อโครงการวิจัย

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 1 1. ความสัมพันธ์ในการเกิดจุดขาวเป็นอย่างไร	การเกิดจุดขาวของเม็ดยางสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความชื้นของเม็ดยาง ซึ่งสามารถเลือกกำลังไมโครเวฟ อุณหภูมิและอัตราการไหลของลมร้อนที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการเกิดจุดขาวของเม็ดยาง	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัย แก้ไข ตาม คำ แนะนำ ของ ผู้ทรงคุณวุฒิ
2. การ record พลังงาน เป็นอย่างไร และลมร้อน flow อย่างไร	ระบบการอบแห้งที่พัฒนาขึ้นใช้แหล่งพลังงานสองชนิดคือ พลังงานไฟฟ้า และพลังงานความร้อนจากแก๊สLPG ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าและบันทึกปริมาณการใช้แก๊สLPGจากน้ำหนักของน้ำมันที่เหลืออยู่ในถัง	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัย แก้ไข ตาม คำ แนะนำ ของ ผู้ทรงคุณวุฒิ
3. ลองเช็คค่าความชื้นสมดุล ไม่ใช่ "0" แน่แน่นอน	 จากDrying Curveในรายงาน 8 เดือน ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ความชื้นตามมาตรฐานเปียกของเม็ดยาง พบว่าจะสามารถลดความชื้นของยางได้หมดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นตู้อบแห้งที่พัฒนาขึ้นจะสามารถอบแห้งให้เม็ดยางมีความชื้นเท่าไรก็ได้ โดยเมื่อนำมาวางในสภาพแวดล้อมภายนอกตู้อบ ยางจะมีความชื้นสมดุลกับความชื้นภายนอก ซึ่งไม่เป็นศูนย์แน่นอน	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัย แก้ไข ตาม คำ แนะนำ ของ ผู้ทรงคุณวุฒิ
4. ต้องหาค่า vs MW (< 0.6 %), PO และ PRI	ตอนนี้งากำลังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนาระบบลมร้อนและระบบไมโครเวฟของตู้อบให้สามารถอบแห้งได้ 30 kg/h ตามวัตถุประสงค์ โดยการควบคุมอุณหภูมิ	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ

	ของยางให้อยู่ในเงื่อนไขที่จะทำให้ยางมีคุณสมบัติตามมาตรฐานของSTR20[1,2,3] และจะทำการวัดคุณสมบัติต่างๆตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิเสนอต่อไป โดยคุณสมบัติเหล่านั้นสามารถควบคุมได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการอบ 1. สุภวรรณภริระวิชกุล และคณะ, การศึกษาความเป็นไปได้เทคนิคในการอบแห้งยางดิบเพื่อผลิตยางแท่งเอสที อาร์ 20, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19 วันที่ 19 - 21 ตุลาคม 2548 จังหวัดภูเก็ต 2. เอกพจน์ วิเชียรโชติ, ธเนศรัตน์วิไล และ ชยุดนันทดุสิต, การอบแห้งยางธรรมชาติสำหรับผลิตยางแท่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 24 วันที่ 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี 3. เฉลิมขวัญอริยะวงศ์และค่านิงวาทโยธา, การศึกษากระบวนการอบแห้งยางแท่ง STR 20 ด้วยไมโครเวฟ, การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 วันที่ 4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่	ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัย แก้ไข ตาม คำ แนะนำ ของ ผู้ทรงคุณวุฒิ
ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 2 1. ควรพิจารณาทำการทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญของยางที่อบแห้งแล้ว คำนวณเพื่อเปรียบเทียบว่าการอบด้วยการใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ส่งผลบ้างหรือไม่อย่างไรนอกเหนือจากการสังเกตเบื้องต้นด้วยสายตา (visual inspection)	ตอนนี้กำลังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนาระบบลมร้อนและระบบไมโครเวฟของตู้อบให้สามารถอบยางได้ 30 kg/h ตามวัตถุประสงค์ โดยการควบคุมอุณหภูมิของยางให้อยู่ในเงื่อนไขที่จะทำให้ยางมีคุณสมบัติตามมาตรฐานของSTR20[1,2,3] และจะทำการวัดคุณสมบัติต่างๆตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิเสนอต่อไป โดยคุณสมบัติเหล่านั้นสามารถควบคุมได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการอบ 1. สุภวรรณภริระวิชกุล และคณะ, การศึกษาความเป็นไปได้เทคนิคในการอบแห้งยางดิบเพื่อผลิตยางแท่งเอสที อาร์ 20, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19 วันที่ 19 - 21 ตุลาคม 2548 จังหวัดภูเก็ต 2. เอกพจน์ วิเชียรโชติ, ธเนศรัตน์วิไล และ ชยุดนันทดุสิต, การอบแห้งยางธรรมชาติสำหรับผลิตยางแท่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 24 วันที่ 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี 3. เฉลิมขวัญอริยะวงศ์และค่านิงวาทโยธา, การศึกษากระบวนการอบแห้งยางแท่ง STR 20 ด้วยไมโครเวฟ, การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 วันที่ 4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัย แก้ไข ตาม คำ แนะนำ ของ ผู้ทรงคุณวุฒิ
2. คำนึงถึงการใช้พลังงานด้วยว่า สุด ท้าย แล้ว	เหตุผลเช่นเดียวกับข้อที่1 เมื่อได้ระบบที่สามารถอบแห้งยางที่อัตรา 30 kg/hแล้ว จะทำการ	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย

จะลดลงหรือประหยัดลงได้ เพียงใด	optimizenการใช้พลังงาน เพื่อจะตอบคำถามว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความเป็นไปได้ในการพัฒนา Industrial prototypeต่อไปหรือไม่	☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของ ผู้ทรงคุณวุฒิ
-----------------------------------	--	--

4. ข้อเสนอแนะต่อ สกว.

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 2 1. ควรลงพื้นที่เพื่อดูการทำงานใช้งานจริงของ ต้นแบบ	1. ขอให้ทาง สกว. แจ้าง ล่วงหน้า	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

5. ข้อคิดเห็นอื่นๆ

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
		☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

ความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิในการประเมินจากร่างรายงานฉบับสมบูรณ์ ปี 2556
โครงการวิจัย การพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเพื่อเป็นต้นแบบในการผลิตยางแท่ง STR 20 ระดับอุตสาหกรรม
หัวหน้าโครงการวิจัย ผศ.ดร.หมุดตอเล็บ หนิสอ

ตารางสรุปความเห็นของ ผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิจัย และผู้ประสานงาน (เฉพาะประเด็นสำคัญ)

1. โดยรวมแล้วผลงานที่ได้นี้เป็นงานที่น่าทำทำเพียงไร มีความยาก-ง่ายระดับใด และผลที่ได้แสดงให้เห็นว่านักวิจัยได้ใช้ความอุตสาหพยายามเพียงไร

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
1. ความท้าทายระดับปานกลางเพราะงานวิจัยอบแห้งไมโครเวฟและลมร้อนมีมาบ้างแล้วเพียงแต่เปลี่ยนวัสดุเป็นยาง	เห็นด้วยกับผู้ทรงคุณวุฒิ เป็นงานวิจัยที่น่าองค์ความรู้เกี่ยวกับการอบแห้งไมโครเวฟมาพัฒนาต่อ โดยต้องพัฒนาระบบลมร้อนและระบบการส่งกำลังไมโครเวฟให้เหมาะสมกับการอบยาง ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเฉพาะ การวิจัยที่มีมาก่อนจะอบแห้งยางในปริมาณที่น้อยกว่า 1 กก. และความน้อยกว่า 30 ชม. ดังนั้นความท้าทายที่สำคัญคือการพัฒนาระบบที่จะสามารถใช้งานในระดับอุตสาหกรรมได้ ใน ประเด็นนี้ ไม่มีการแก้ไขในรายงาน	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
2. ที่นักวิจัยพยายามทำคือเข้าใจตัวแปรต่างๆ แต่เนื่องจากขนาดการทดลองเล็กกว่าการใช้งานจริง ความท้าทายจึงอยู่ที่ผลจะสอดคล้องกับการ seak-up หรือไม่ ซึ่งประเด็นนี้งานวิจัยยังไม่ตอบ การออกแบบขนาด 300 kg/h ยังเป็นเพียงภาพ sketch โครงสร้างไม่ใช่ detailed design ที่จะเอาไปผลิตได้	เป็นการวิจัยเพื่อพัฒนาต้นแบบที่จะทำได้ข้อมูลในเชิงวิศวกรรม ซึ่งขนาดของการทดลองถูกจำกัดด้วยงบประมาณที่ได้รับ โดยผลการวิจัยที่ได้ ทำให้สามารถออกแบบเพื่อที่จะวิจัยในระบบอุตสาหกรรมต่อไป ประเด็นนี้ ไม่มีการแก้ไขในรายงาน	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

2. เมื่อเทียบกับวัตถุประสงค์และ output (โปรดดูเอกสารแนบ 1 ท้ายสัญญา) ท่านพบว่าโครงการวิจัยได้

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
-		

3. ท่านมีความเห็นต่อคุณภาพของร่างรายงานฉบับสมบูรณ์ในประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
1. ควรจัดทำคู่มือการพิจารณาสภาวะของการอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน อาทิ duty cycle setting VS Rubber mass สำหรับเป็นแนวทางให้ผู้ที่จะนำต้นแบบไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ	เนื่องจากผลการทดลองยังเป็นองค์ความรู้ในเชิงวิชาการ ซึ่งพบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับการมวลและDuty Cycle ซึ่งแสดงในรูปที่4.8 และ 4.11	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
	ดังนั้นนักวิจัยที่จะพัฒนาเทคโนโลยีนี้เพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรม สามารถใช้เป็นแนวทางในการวิจัยได้ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้อย่างอบแห้ง ที่มีคุณภาพ และคุ้มค่าในเชิงเศรษฐกิจ ประเด็นนี้ ไม่มีการแก้ไขในรายงาน	☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
2. ถ้าเพิ่มรายละเอียดการคำนวณเครื่องอบแห้งยาง 300 กก./ ชม. และ ข้อเสนอแนะจะดีขึ้น	ได้เพิ่มรายละเอียดในการคำนวณจำนวนแมกนีตรอน กำลังไมโครเวฟ และขนาดของกระบะที่ใช้ใส่ยางในรายงานหน้าที่ 31	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

4. ความสมบูรณ์ของรายงาน

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
1. ควรแก้ไขรายละเอียดในจุดเล็กๆ ได้แก่เลขนัยสำคัญ (จุดทศนิยม) ตาราง 4.2 หน้าที่ 29 ควร consistent/ meaningful จะใช้กี่จุดตำแหน่ง?	ปริมาณต่างๆในตารางที่ 4.2 ใช้เครื่องมือวัดที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้มีค่าความแม่นยำแตกต่างกัน จึงมีจำนวนจุดทศนิยมไม่เท่ากัน ส่วนค่ามาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบ ได้มาจากตลาดเกษตรล่วงหน้าในภาคผนวก ค. ประเด็นนี้ ไม่มีการแก้ไขในรายงาน	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
2. จัดทำรายละเอียดแบบวิศวกรรมของต้นแบบระบบอบแห้ง 30 kg/h engineering drawing bill of materials คู่มือการใช้งาน คู่มือการซ่อมดูแลรักษา เพิ่มเติมในภาคผนวก	รายละเอียดในการออกแบบระบบไมโครเวฟ และการออกแบบระบบลมร้อนอยู่ในบทที่ 3 ซึ่งจะทำให้ผู้ที่สนใจสามารถทำความเข้าใจและพัฒนาต่อไป ประเด็นนี้ ไม่มีการแก้ไขในรายงาน	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
3. จัดทำรายละเอียดแบบวิศวกรรมทางการออกแบบระบบอบแห้ง 300 kg/h engineering drawing bill of materials คู่มือการใช้งาน คู่มือการซ่อมดูแลรักษา เพิ่มเติมในภาคผนวก	งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อพัฒนาต้นแบบขนาด 30 กก./ชม. ซึ่งมีรายละเอียดทางฟิสิกส์และวิศวกรรมในการพัฒนาในบทที่ 3 สำหรับเครื่องขนาด 300 กก./ชม. นั้น ได้เสนอแบบเพื่อการพัฒนาต่อไป ประเด็นนี้ ไม่มีการแก้ไขในรายงาน	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
4. ในสถานการณ์จริงที่ >30kg/h energy saving น่าจะมากกว่า 24% แต่ =?	จากผลการทดลองซึ่งควบคุมตัวแปรต่างๆเช่น น้ำหนักยาง อุณหภูมิลมร้อน สามารถประหยัดค่าพลังงานได้ประมาณ 24% ส่วนในการใช้งานจริงในโรงงาน ซึ่งเป็นเงื่อนไขอื่นๆที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่นความสม่ำเสมอของยาง อุณหภูมิในโรงงาน ความ	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
	มาไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้า ทำให้ยังไม่สามารถบอกได้ว่าค่าพลังงานจะเพิ่มหรือลดอีกก็เปอร์เซ็นต์ ประเด็นนี้ ไม่มีการแก้ไขในรายงาน	
5. ถ้าเอา 24% เป็นฐานที่ต่ำสุด จะเทียบได้ = กับาทในสายการผลิตจริงและ break even กับ capital cool	เนื่องจากเครื่องระดับอุตสาหกรรมมีขนาดมากกว่า เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมากกว่า 100 เท่า ซึ่งยังมีปัญหาทางวิศวกรรมอีกหลายอย่างที่จะต้องศึกษาดังนั้นจึงยังไม่สามารถคาดการณ์ความคุ้มค่า ประเด็นนี้ ไม่มีการแก้ไขในรายงาน	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
6. บทคัดย่อควรสรุปผลส่วนสำคัญกับอุตสาหกรรม เช่น การลดเวลา% การลดพลังงาน %	ได้เพิ่มข้อมูลตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิในบทคัดย่อแล้ว	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
7. ความเร็วลมอธิบายอะไร เพราะมีพื้นที่หน้าตัดมาเกี่ยวข้องด้วย ความจริงควรวัด ๑ ๑๐	ความเร็วลมเป็นปริมาณที่สัมพันธ์กับอัตราการอบแห้ง เนื่องจากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการถ่ายเทพลังงานจากBurner และการถ่ายเทความร้อนของยาง โดยวัดความเร็วในหน่วยมาตรฐานSIคือ m/s ประเด็นนี้ ไม่มีการแก้ไขในรายงาน	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

5. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม (เช่น ประเด็นที่ควรทำเพิ่ม, การขยายผลด้านผู้ใช้ ฯลฯ)

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
1. ในการประเมินค่าใช้จ่ายในการอบแห้งยาง ตามตารางที่ 4.1 สะท้อนเฉพาะค่าใช้จ่ายพลังงาน แต่ควรประเมินให้ข้อมูลเปรียบเทียบกับต้นทุนการลงทุนตัวระบบรวมถึงค่าเสื่อมราคา ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาเปรียบเทียบ overall ด้วย ทั้งนี้จึงจะเป็นประโยชน์ให้ผู้สนใจสามารถตัดสินใจพิจารณาลงทุนได้อย่างเหมาะสม	ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการพัฒนาเทคโนโลยีต้นแบบ เพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีระดับอุตสาหกรรมต่อไป ยังนั้นยังไม่ได้วิเคราะห์เกี่ยวกับการลงทุนเทคโนโลยี และการบำรุงรักษา การวิเคราะห์ดังกล่าวจะต้องดำเนินการหลังจากได้สร้างเครื่องระดับอุตสาหกรรมขึ้นแล้ว ประเด็นนี้ ไม่มีการแก้ไขในรายงาน	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
2. เนื่องจากเป็น final report ปิดงานแล้ว การเสนอประเด็นทำเพิ่มคงเป็นไปไม่ได้ ความจริงอยากได้ข้อมูลที่ใช้เทคนิค RSM นำจะออกแบบการทดลองแบบ RSM เพื่อหา parameter ที่ได้ค่า optimum	ในงานวิจัยนี้ได้ข้อสรุปว่าการอบแห้งยางด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีศักยภาพสำหรับการพัฒนาต่อไป เพื่อพัฒนาเครื่องระดับอุตสาหกรรม โดยพบว่าสามารถประหยัดเวลา และพลังงานในการอบแห้ง และเนื่องจากข้อจำกัดของงบประมาณ จึงไม่สามารถทำการทดลองด้วยเงื่อนไขที่หลากหลายได้ เนื่องจากต้องใช้วัตถุดิบเป็นจำนวนมาก ประเด็นนี้ ไม่มีการแก้ไขในรายงาน	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

6. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
ผลงานวิจัยมีแนวโน้มว่าจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยส่งต่อผู้ประกอบการผลิตยางแท่งหรืออุตสาหกรรมที่สนใจขยายขนาด	เห็นด้วยกับผู้ทรงคุณวุฒิ	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ



Development of microwave-infrared drying system for industrial prototype of STR20 production

Mudtorlep Nisoa and Priwan Kerdtongmee

**Plasma technology for agricultural applications research laboratory
School of Science, Walailak University**

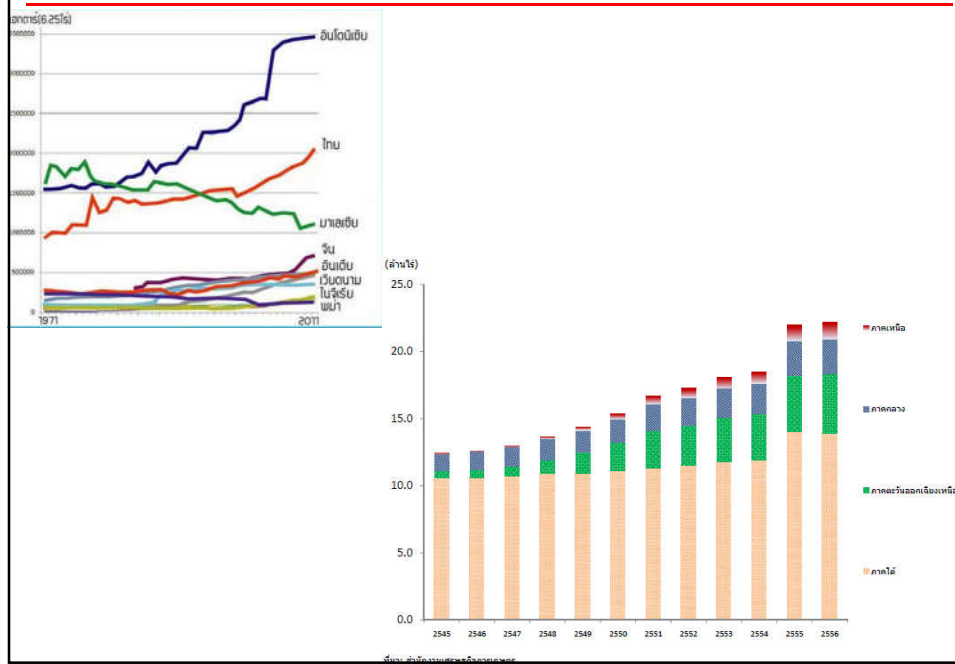
Topics

- Introduction
- Principles of Microwave-hot air drying
- Microwave field simulation
- Experimental setup
- Results and future work

Introduction



Introduction



Introduction



Introduction

STR20 Production process



Cup lump rubber



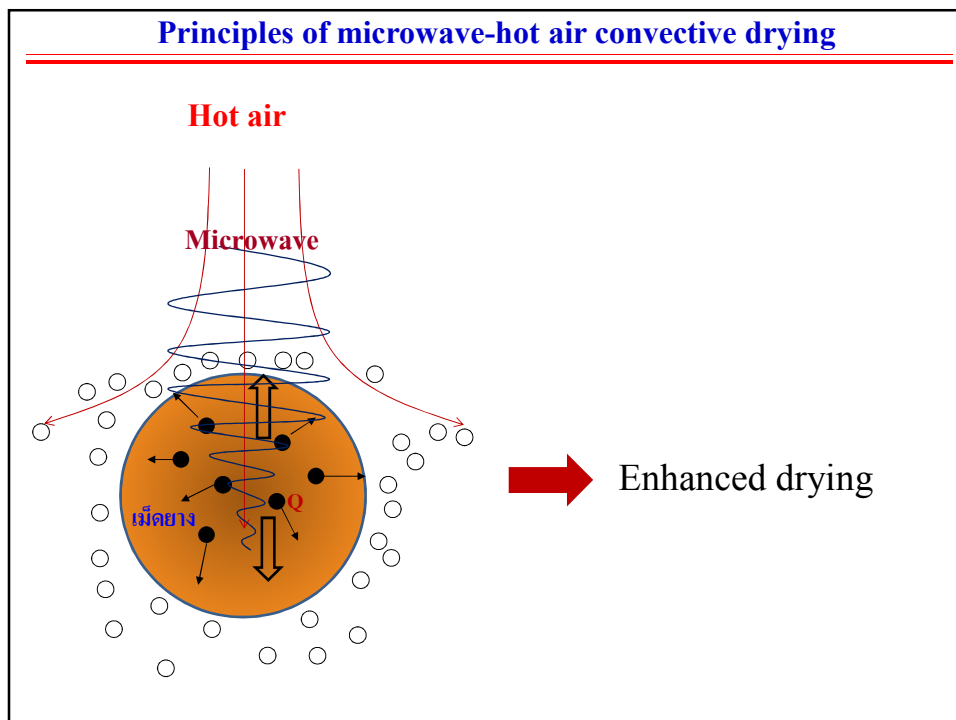
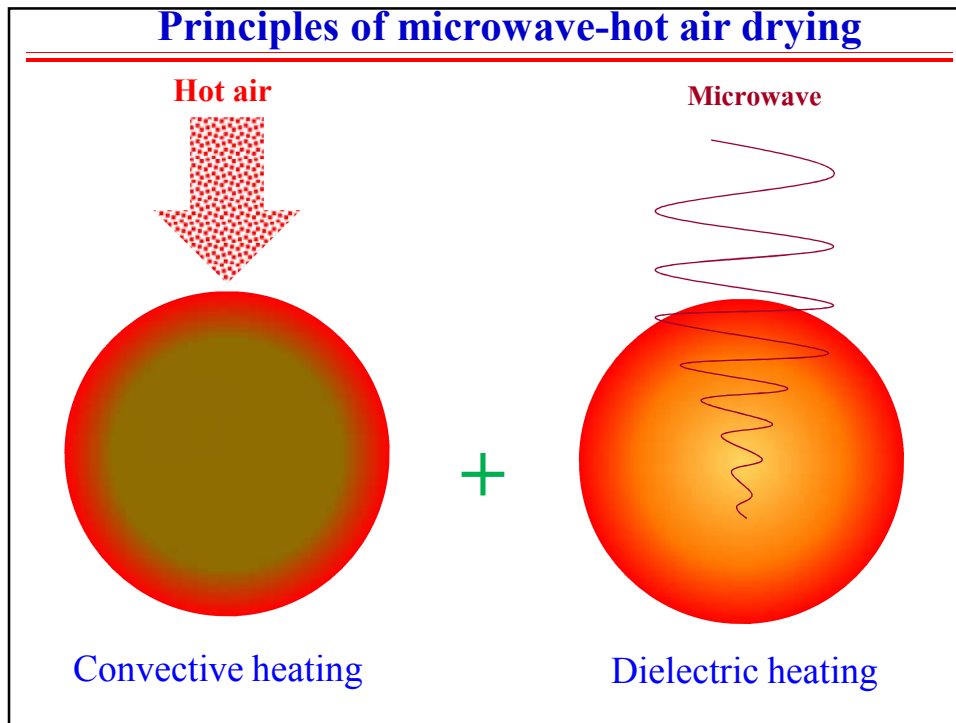
Drying



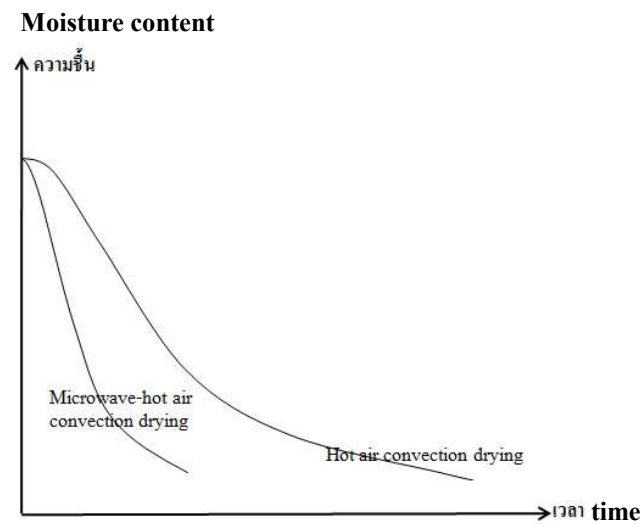
STR20



http://rubbereconomics.blogspot.com/2012/06/blog-post_29.html



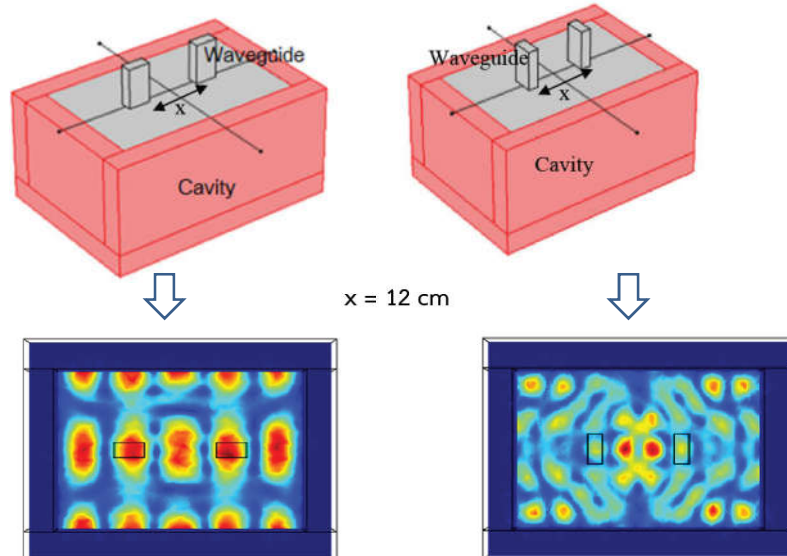
Principles of microwave-hot air convective drying



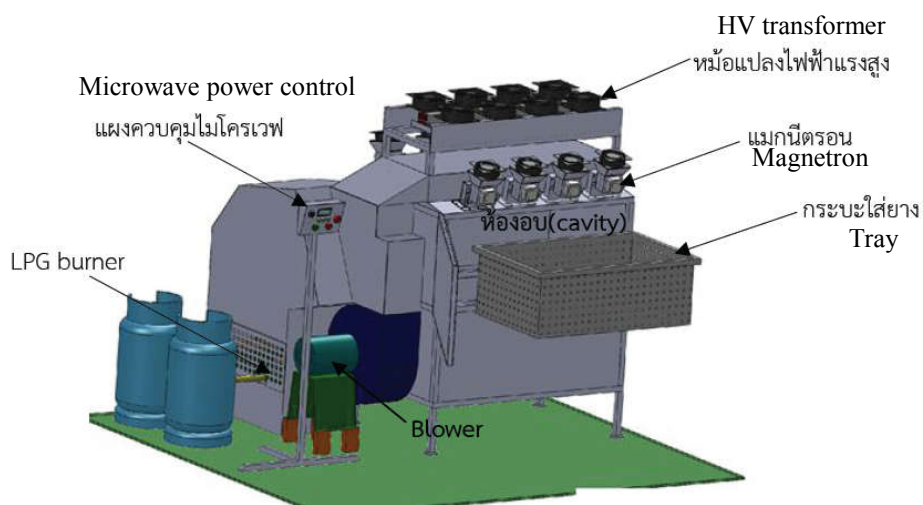
Ratthasak Prommas, *Energy and exergy analyses in drying process of unsaturated porous media (Convective drying and microwave drying)*, Ph.D thesis, Thammasat University, 2010

Microwave field simulation

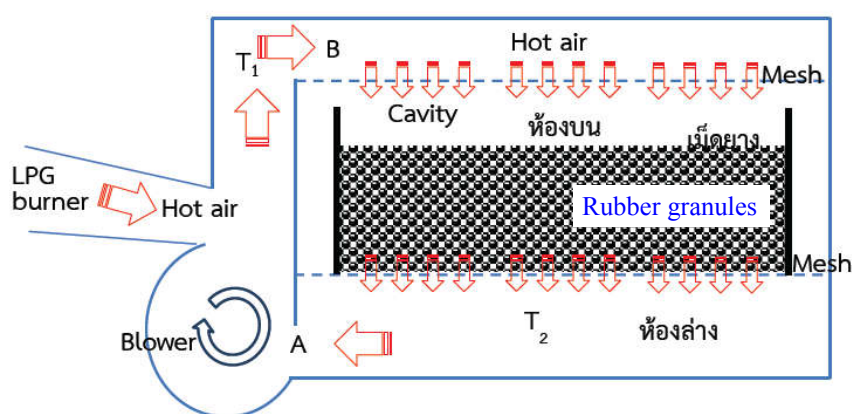
$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \vec{E} = 0$$



Experimental setup



Experimental setup



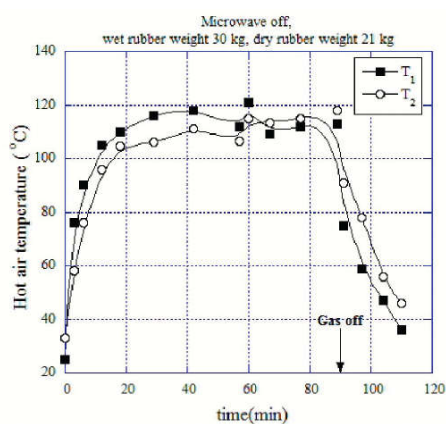
Experimental setup



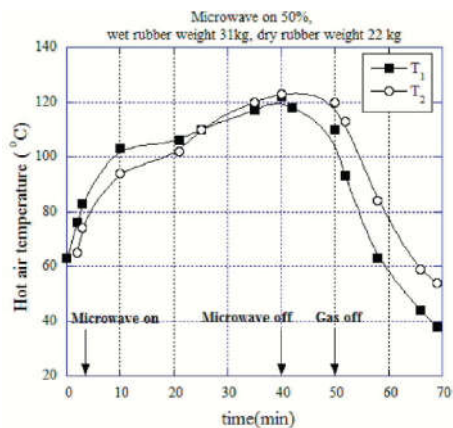
Experimental results



Experimental results

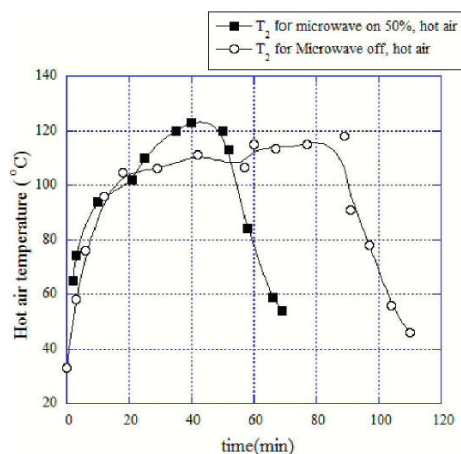
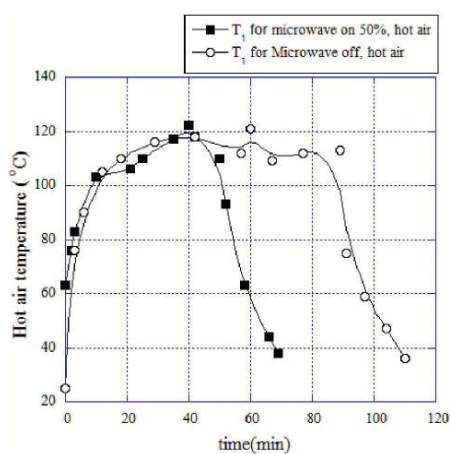


Hot air drying



Microwave-hot air convective drying

Experimental results



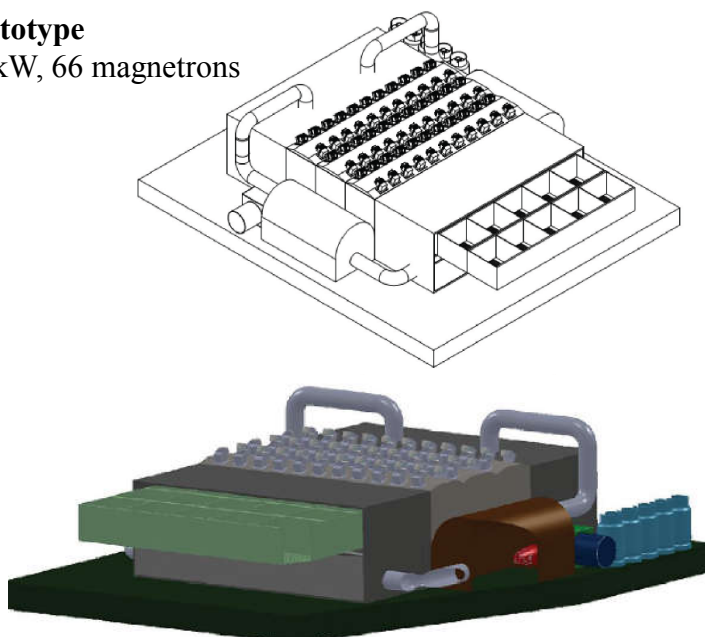
Experimental results

วิธีการอบ	ปริมาณ ยางสด (kg)	ปริมาณ ยางแห้ง (kg)	เวลาอบ	ค่าแก๊ส (บาท)	ค่าไฟฟ้า (บาท)	ค่าใช้จ่ายต่อ กก.ยางสด (บาท/กก.)	ค่าใช้จ่ายต่อ กก.ยางแห้ง (บาท/กก.)
ลมร้อน อย่างเดียว	30	21	90 นาที(เปิด Blower เปิดแก๊ส 90 นาที)	60.94	3.02	2.13	3.05
ไมโครเวฟ ร่วมกับลม ร้อน	31	22	เปิดไมโครเวฟ 20 นาที (50%ของ 40 นาที) เปิด Blower 50 นาที) เปิด แก๊ส 50 นาที	40.63	9.77	1.63	2.29

สำหรับโรงงานที่ผลิตยางแท่งSTR20วันละ 100 ตัน หรือเดือนละ 3,000 ตันสามารถ
ประหยัดค่าใช้จ่ายในการอบได้ประมาณ 2,280,000 บาท/เดือน

Future work

Industrial prototype
300 kg/h, 130 kW, 66 magnetrons



Acknowledgements

We would like to thank Thailand Research Fund(TRF)
for supporting the research funding.

Thank you very much
Questions and Comments