



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบแบบกระบวนการผลิตต่อครั้งร่วมกับไมโครเวฟและโหมดการ
กระตุ้นสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากขยะชีวมวล (กรณีศึกษาทะเลปาล์มน้ำมัน)

The prototype of batch process pyrolysis reactor combine with microwave
and stirrer mode for biomass residues to produce biofuels (case study: oil
palm shell)

คณะนักวิจัย

ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์

ชาคริต ทองอุไร

โครงการนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประเภททุนครูอาจารย์
ประจำปีงบประมาณ 2557 รหัสโครงการ SIT570492S

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
บทที่ 2 การตรวจสอบเอกสาร	4
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	8
3.1 การสร้างชุดเครื่องมือสอบเทียบวัดพลังงานไมโครเวฟ	8
3.2 การออกแบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟไพโรไลซิสพร้อมจำลอง ไมโครเวฟที่เกิดขึ้นด้วย Computer Simulation	9
3.3 สร้างเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟไพโรไลซิสแบบการเกิดคลื่นนิ่งหลายโหมด	10
3.4 อุปกรณ์การทดลอง	16
3.5 วัสดุการทดลอง	18
3.6 รูปแบบการทดลอง	19
3.7 ขั้นตอนการทดลอง	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	22
4.1 ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดกับระบบที่ออกแบบ	22
4.2 การออกแบบปรับปรุงระบบใหม่	26
4.3 ผลการทดลอง	29
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	40

สารบัญ (ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
เอกสารอ้างอิง	40
ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป	42
ภาคผนวก (บทความที่ตีพิมพ์แล้ว)	43

สารบัญรายการตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 1.1	ชนิดกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้เกณฑ์เวลาและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเป็นเกณฑ์	2
ตารางที่ 4.1	แสดงผล Proximate analysis สำหรับกะลาปาล์ม	29
ตารางที่ 4.2	แสดงผล Ultimate analysis สำหรับกะลาปาล์ม	29
ตารางที่ 4.3	ตารางแสดงค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์สถานะของแข็งและของเหลวที่ได้จากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส	37
ตารางที่ 4.4	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสที่กำลังไมโครเวฟ 800 W	37

สารบัญรายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.1	เทคนิคไฟโรไลซิสด้วยไมโครเวฟแบบต่างๆที่ผ่านมา	5
รูปที่ 2.2	เตาปฏิกรณ์ร่วมไมโครเวฟ และไฟโรไลซิสพร้อมโหมตกระตุ้น	6
รูปที่ 3.1	(a) ภาพแสดงองค์ประกอบชุดเครื่องมือสอบเทียบวัตพลังงานไมโครเวฟ (b) ชุดเครื่องมือสอบเทียบวัตพลังงานไมโครเวฟที่สร้างขึ้นจริง	8
รูปที่ 3.2	แสดงภาพการกระจายตัวสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟในแนวแกน y ภายในห้องอบที่ได้จำลองขึ้น	9
รูปที่ 3.3	แสดงองค์ประกอบโดยรวมทั้งหมดของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสต้นแบบแบบกระบวนการผลิตต่อครั้งร่วมกับไมโครเวฟและโหมตการกระตุ้นสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากขยะชีวมวล	10
รูปที่ 3.4	แสดงภาพด้านหน้าของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสต้นแบบแบบกระบวนการผลิตต่อครั้งร่วมกับไมโครเวฟและโหมตการกระตุ้นสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากขยะชีวมวลที่สร้างขึ้นจริง	11
รูปที่ 3.5	แสดงภาพด้านข้างของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสต้นแบบแบบกระบวนการผลิตต่อครั้งร่วมกับไมโครเวฟและโหมตการกระตุ้นสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากขยะชีวมวลที่สร้างขึ้นจริง	11
รูปที่ 3.6	แสดงภาพด้านบนของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสต้นแบบแบบกระบวนการผลิตต่อครั้งร่วมกับไมโครเวฟและโหมตการกระตุ้นสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากขยะชีวมวลที่สร้างขึ้นจริง	12
รูปที่ 3.7	แสดงภาพเตาปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสที่ได้สั่งทำขึ้นด้วยแก้วโบโรซิลิเกต	12
รูปที่ 3.8	แสดงภาพแผนที่กวนขยะชีวมวลผลิตจากแก้วโบโรซิลิเกต	13
รูปที่ 3.9	แสดงภาพแผนที่กวนขยะชีวมวล เมื่อทำการต่อเข้ากับมอเตอร์ขับเคลื่อนเป็นระบบการตีกวน (Stirrer mode)	13
รูปที่ 3.10	แสดงภาพหลอดลดอุณหภูมิของเหลวและทำการควบแน่นก๊าซที่ได้จากการระเหยของวัสดุชีวมวล	14
รูปที่ 3.11	แสดงภาพระบบเตาปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสต้นแบบแบบกระบวนการผลิตต่อครั้งร่วมกับไมโครเวฟและโหมตการกระตุ้นสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากขยะชีวมวล 15	
รูปที่ 3.12	เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค	16

สารบัญรายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 3.13	ตำแหน่งของช่องเสียบเทอร์โมคัปเปิลบนฝาเครื่องปฏิกรณ์	16
รูปที่ 3.14	เครื่องชั่งน้ำหนัก	17
รูปที่ 3.15	แคลมป์ลติมิเตอร์	17
รูปที่ 3.16	กะลาปาล์มที่ใช้ในงานวิจัย	18
รูปที่ 3.17	ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ผสมกับกะลาปาล์ม	18
รูปที่ 4.1	พีวีซีได้รับความร้อนจนเกิดการไหม้	22
รูปที่ 4.2	การร้วซึมที่เกิดกับระบบก่อนและหลังการปรับปรุงแก้ไข	23
รูปที่ 4.3	ภาชนะเซรามิกได้รับความร้อนสูงจนเกิดการแตก	24
รูปที่ 4.4	บีกเกอร์ PYREX ขนาด 600 ml เกิดการแตกเนื่องจากได้รับความร้อนสูง	24
รูปที่ 4.5	ก้านโลหะเกิดการพันรอบแท่งตีควน และการแตกหักของใบแท่งตีควน	25
รูปที่ 4.6	แมกนีตรอนที่เกิดการชำรุด	25
รูปที่ 4.7	บีกเกอร์ควอทซ์ที่ใช้ในการทดลอง	26
รูปที่ 4.8	แสดงการออกแบบฐานรองใหม่สำหรับบีกเกอร์ควอทซ์	26
รูปที่ 4.9	ภาพด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำการถอดมอเตอร์แท่งตีควนออกแล้ว	27
รูปที่ 4.10	ระบบสุดท้ายหลังจากได้รับการปรับปรุง และเป็นระบบที่ถูกใช้เพื่อทำการทดลองต่อไป โดยมีองค์ประกอบคือ (1)ถังก๊าซไนโตรเจน (2)โรตารีเตอร์ (3)เทอร์โมคัปเปิล (4)ตัวอ่านและเก็บค่าอุณหภูมิ (5)ฝาปิดเตาไมโครเวฟ (6)ยางรองฝากันก๊าซรั่ว (7)เตาไมโครเวฟ (8)แมกนีตรอนขวามือ (9)แมกนีตรอนซ้ายมือ (10)แหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับแมกนีตรอนตัวขวามือ (11)แหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับแมกนีตรอนตัวซ้ายมือ (12)ตัวอย่างซึ่งผสมระหว่างวัสดุชีวมวลและถ่านกัมมันต์ (13)เตาปฏิกรณ์ควอทซ์ (14)วาล์ว (15)หน่วยควบแน่นก๊าซ (16)ปั้มน้ำระบบหล่อเย็น	28
รูปที่ 4.11	แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกรณีต่างๆเมื่อใช้แหล่งกำเนิดกำลังไมโครเวฟที่ 450 วัตต์ (เมื่อ ML = Medium power Left, MR = Medium power Right, และ BM = Both Medium power)	30

สารบัญรายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4.12	แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบอนุหภูมิที่เกิดขึ้นในกรณีต่างๆเมื่อใช้แหล่งกำเนิดกำลังไมโครเวฟที่ 800 วัตต์ (เมื่อ HL = High power Left, HR = High power Right, และ BH = Both High power)	31
รูปที่ 4.13	รูปแบบอนุหภูมิต่อเวลาสำหรับปรากฏการณ์การให้พลังงานไมโครเวฟต่อถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียว (AC) และต่อกะลาปาล์มเพียงอย่างเดียว (OPS)	32
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของส่วนจริง (ϵ') และส่วนจินตภาพ (ϵ'') สำหรับตัวแปรค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของถ่านกัมมันต์ กับอนุหภูมิเมื่อทำการพล็อตที่ความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz	34
รูปที่ 4.15	(a) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสในรูปของแข็ง (bio-char)	35
รูปที่ 4.15	(b) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสในรูปของเหลว (bio-oil)	35
รูปที่ 4.16	แผนภูมิแท่งอัตราผลผลิตโดยน้ำหนัก โดยเปรียบเทียบการให้พลังงานไมโครเวฟจากตำแหน่งที่แตกต่างกัน รวมถึงอัตราส่วนผสมของวัสดุที่แตกต่างกัน	36
รูปที่ 4.17	ลักษณะสัณฐานพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 1,500x (รูปซ้ายมือ) และ 5,000x (รูปขวามือ)	38

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้โอกาสในการทำงานวิจัยขึ้นนี้โดยการสนับสนุนทุนการวิจัยในโครงการทุนอุดหนุนอาจารย์ประจำปี 2557 ภายใต้เงื่อนไขสัญญาการรับทุน SIT70492S มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี บ้านและที่ทำงานของข้าพเจ้าที่เอื้อเพื่อสถานที่ในการทำงานวิจัยขึ้นนี้ นายจิรยุส และ นายศักรินทร์ ปิ่นเพชร นักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี ที่ได้ร่วมกันพัฒนาระบบ ร่วมกันทำการทดลอง จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยทุนอุดหนุนอาจารย์ รศ.ดร.ชาคริต ทองอุไร ที่ให้คำปรึกษา อำนวยความสะดวกและชี้แนะด้วยดีตลอดมา สุดท้ายคือ Assoc. Prof. Dr. Seppo Karilla ท่านผู้ช่วยในการอ่าน แก้ไข และปรับปรุงต้นฉบับ (manuscript) ภาษาอังกฤษจน เพื่อส่งไปยังวารสารระดับนานาชาติ (international journal)



ผศ.ดร.ยุทธพงศ์ เพ็ชรโรจน์

26 เมษายน 2560

บทคัดย่อภาษาไทยและอังกฤษ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบไมโครเวฟไพโรไลซิสขนาดกลางแบบการทดสอบต่อครั้งโดยทำการทดสอบการไพโรไลซิสวัสดุชีวมวลกะลาปาล์มน้ำมัน โดยในการออกแบบระบบในครั้งนี้ได้ทำการจำลองโดยใช้หลักการคำนวณไฟในเอลิเมนต์พิจารณาการซ้อนทับกันของคลื่นไมโครเวฟจากสองแหล่งกำเนิดเพื่อเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในห้องอบ หลังจากนั้นทำการทดลองกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสโดยการปรับเปลี่ยนส่วนผสมของวัสดุทดลองคือกะลาปาล์มต่อถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 โดยน้ำหนัก ทำการปรับระดับกำลังไมโครเวฟเป็นสองระดับคือ 450 หรือ 800 วัตต์ ร่วมกับการจ่ายกำลังไมโครเวฟจากแหล่งกำเนิดไมโครเวฟที่ต่างกันคือจ่ายจากแมกนีตรอนตัวซ้ายมือ ตัวขวามือ หรือ พร้อมกัน จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิในการไพโรไลซิสขึ้นกับตัวแปรดังกล่าว โดยที่อุณหภูมิและอัตราผลผลิตของผลิตภัณฑ์ในสถานะของเหลวสูงและก๊าซที่สุดจะเกิดขึ้นที่วัสดุทดลองที่มีอัตราส่วนผสมเป็น 75:25 กำลังไมโครเวฟที่ 800 วัตต์ และจ่ายด้วยแมกนีตรอนพร้อมกันทั้งสองตัว ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการถูกนำไปวิเคราะห์คุณภาพต่อใน ค่าเชิงความร้อนด้วย Bomb Calorimeter องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่อง GC-MS และวิเคราะห์ค่าสัณฐานพื้นผิวด้วย SEM จากการวิเคราะห์พบค่าเชิงความร้อนที่สูงสำหรับถ่านชีวภาพและน้ำมันชีวภาพ องค์ประกอบของน้ำมันมีสารในกลุ่ม phenolic ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิง และ สัณฐานพื้นผิวแสดงให้เห็นรูและโครงสร้างขนาดเล็ก ดังนั้นระบบและกระบวนการที่พัฒนาขึ้นเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานและพัฒนาต่อยอด

In this study, we designed and implemented bench-scale equipment for the microwave pyrolysis of biomass, and tested its effects on oil palm shell (OPS). The design uses the interference of two MW sources to increase the electric field intensity, based on model predictions by finite elements simulations. The MW pyrolysis experiments were done varying the mixture ratio of OPS and activated carbon (75:25, 50:50, or 25:75 by weight), the MW power

(450 or 800 W), and the use of MW source magnetrons (left, right, or both). The pyrolysis temperature depended on the varied experimental parameters. The highest temperature and the highest yields of liquid bio-oil and gas were obtained with the 75:25 mixture treated with 800W total power using both magnetrons. The end-products were assessed by analyses with bomb calorimeter, GC-MS, and the solid residue with SEM, showing good heating values, mainly phenolic compounds in the oil phase, and good surface morphology of the “active carbon” char. The results demonstrate that the bench-scale equipment is suited for experimental work on the pyrolysis of biomass, and provide new pyrolysis data for OPS.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มา

ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นแหล่งเพาะปลูก และ ผลิต พืชเศรษฐกิจ รวมถึงผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ และภูมิภาคอาเซียน กล่าวคือเป็นแหล่งเพาะปลูกปาล์มน้ำมัน มะพร้าว และ กาแฟ เป็นต้น จากการรายงานของหน่วยงานราชการ ผลผลิตที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ.2553 สำหรับปาล์มน้ำมันคือ 3,221,065 ตัน ("Suratthani Oil Palm Research Center," 3/Dec/2012), ปี พ.ศ.2547 สำหรับมะพร้าวคือ 1,199,041 ตัน ("Office of agricultural extension and development region 5, Songkhla," 3/Dec/2012) และ ปี พ.ศ.2555 สำหรับกาแฟคือ 67,620 ตัน ("Office of Agricultural Economics," 3/Dec/2012) จะเห็นได้ว่าพืชเศรษฐกิจทั้งสามชนิด จะมีผลผลิตเฉลี่ยรวมอยู่ที่กว่าล้านตันต่อปี ซึ่งพืชเศรษฐกิจทั้งสามชนิดจะถูกนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ด้วยกระบวนการผลิตแต่ละชนิดของพืชนั้นๆ สิ่งที่เหลือจากกระบวนการผลิตจะกลายเป็นขยะชีวมวล (biomass residues) ซึ่งมีปริมาณมากมาย ยกตัวอย่างเช่น ในสายการผลิตน้ำมันปาล์มโอเลอิน ขยะชีวภาพที่เกิดขึ้นคือ เปลือกหุ้มเมล็ด ทลายที่ไร้ผลปาล์มน้ำมัน เป็นต้น โดยปกติในสายการผลิตนั้นขยะชีวภาพเหล่านี้จะถูกนำกลับไปใช้ซ้ำอีกครั้ง โดยการนำไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับระบบให้ความร้อนหม้อน้ำ ระบบกำเนิดไฟฟ้าในโรงงานผลิต ด้วยวิธีการเผาในบรรยากาศ ข้อเสียที่เกิดขึ้นของการเผาขยะชีวมวลดังกล่าวข้างต้นคือ มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ และเป็นระบบดั้งเดิมที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนในระดับต่ำ ทางออกของปัญหาคือ เปลี่ยนขยะชีวภาพเหล่านี้ไปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ หรือน้ำมันชีวภาพเพื่อใช้แทนปิโตรเลียม ด้วยวิธีการเผาแบบไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่ไม่มีออกซิเจนเข้าไปร่วมในกระบวนการสันดาบ (thermal degradation without oxygen) ด้วยวิธีการไพโรไลซิสจะเปลี่ยนขยะชีวภาพไปเป็นผลิตภัณฑ์ในสามสถานะ คือ ถ่าน (char) ในสถานะของแข็ง ซึ่งมีประโยชน์ในการนำไปใช้เป็นตัวตั้งต้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ (activate carbon) เพื่อใช้ในกระบวนการ gasification เพื่อทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณมาก เป็นต้น สถานะต่อมาคือของเหลว น้ำมันไพโรไลซิส เป็นองค์ประกอบของสารโมเลกุลใหญ่ (heavy molecular weight compound) ซึ่งเกิดขึ้นด้วยการควบแน่น และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคการขนส่ง เชื้อเพลิงเผาไหม้ในระบบความร้อน เป็นต้น สถานะที่สามคือก๊าซ ที่เกิดจากสารประกอบโมเลกุลเล็ก (light molecular weight gases) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรงแทนเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ที่ให้พลังงาน

จะเห็นได้ว่า กระบวนการไพโรไลซิสเป็นการใช้ความร้อนโดยไม่มีก๊าซออกซิเจนร่วมใน กระบวนการสันดาบ เพื่อให้ขยะชีวภาพเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส ดังนั้นจะสามารถแบ่งแยกกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้ความร้อนและเวลาเป็นเกณฑ์ในการแบ่งแยก ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ชนิดกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้เกณฑ์เวลาและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเป็นเกณฑ์ ("Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials," 14 Feb 2011)

กระบวนการไพโรไลซิส	เวลาที่ใช้ในกระบวนการ (s)	อุณหภูมิ (K)
ช้า (slow)	450-550	500-950
เร็ว (fast)	0.5-10	850-1,250
ด่วน (flash)	<0.5	1,050-1,300

พบว่าในกระบวนการไพโรไลซิสชนิดช้านั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นถ่าน (Antal, et al., 2003) แต่สำหรับในปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานมีสูงขึ้น การนำผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบน้ำมันหรือก๊าซจะเป็นวิธีการที่ดีที่สุด ซึ่งพบว่าเมื่อใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบ เร็ว และ ด่วน จะสามารถเปลี่ยนขยะชีวภาพไปเป็นเชื้อเพลิงเหลว และ ก๊าซได้ดีขึ้น (Bridgwater, et al., 2000; Dufour, et al., 2009) ดังนั้นกระบวนการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ เพราะเป็นหนึ่งในวิธีการทำให้เกิดกระบวนการไพโรไลซิสชนิดเร็วและด่วน

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในย่าน 0.3-300 จิกะเฮิรตซ์ แต่สำหรับความถี่ที่ถูกนำมาใช้งานด้านการให้ความร้อนคือ 2.45 จิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้ในเตาไมโครเวฟครัวเรือนทั่วไป ข้อดีของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (Microwave heating) เมื่อเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนในแบบดั้งเดิม (conventional heating) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนในโหมดการนำความร้อน (conduction heating) การพาความร้อน (convection heating) และ การแผ่รังสีความร้อน (radiation heating) คือ การกระจายความร้อนจะเป็นแบบภายในสู่ภายนอก ทำให้อัตราการเกิดความร้อน (heating rate) สูงกว่าแบบดั้งเดิม ที่การกระจายความร้อนเป็นแบบภายนอกสู่ภายใน หรือเรียกอีกอย่างว่า การให้ความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heating) หลักการทั่วไปเพื่อให้ความร้อนแก่วัตถุด้วยไมโครเวฟนั้นจะขึ้นอยู่กับสองส่วน กล่าวคือ ระบบไมโครเวฟ ซึ่งจะทำหน้าที่กำเนิดคลื่นไมโครเวฟ แล้วส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟไปที่วัสดุ โดยระบบดังกล่าวจะประกอบไปด้วย ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง (high voltage power supply) ให้กับตัวกำเนิดไมโครเวฟ (Magnetron) ระบบท่อส่งไมโครเวฟ (wave guide) และห้องอบ (cavity) ซึ่งเป็นห้องที่วัสดุที่ต้องการให้ความร้อนตั้งอยู่ เพื่อรับพลังงานไมโครเวฟ เพื่อเปลี่ยนไปเป็นความร้อน ส่วนที่สองคือวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน หรือเรียกว่าวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) ในที่นี้คือขยะชีวภาพ โดยที่น้ำในวัสดุจะทำหน้าที่รับพลังงานไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟไปเป็นความร้อน โดยโมเลกุลของน้ำจะเกิดการหมุนและเสียดสีกันด้วยความถี่ไมโครเวฟ ส่งผลให้อุณหภูมิของวัสดุ

สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อน้ำในวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้น หมายความว่าพลังงานจลน์ของน้ำก็สูงขึ้นด้วย ทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความเป็นไดอิเล็กทริกของวัสดุลดลง อุณหภูมิของวัสดุเริ่มคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงต้องการอุณหภูมิที่สูงขึ้น ฉะนั้นมีการเติมตัวรับไมโครเวฟ (microwave receptor) เช่น ถ่านกัมมันต์ แกรไฟต์ (graphite) เป็นต้น เข้าไปผสมร่วมกับวัสดุเพื่อให้กระบวนการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟสมบูรณ์

1.2 วัตถุประสงค์

- สร้างเครื่องต้นแบบกระบวนการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟเพื่อเปลี่ยนขยะชีวภาพไปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลว (bio-fuel in liquid phase)
- ศึกษากระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสด้วยระบบที่ทำการสร้างขึ้น
- วิเคราะห์องค์ประกอบและคุณสมบัติของผลผลิตในเฟสของแข็ง (bio-char) และของเหลว (bio-fuel) ที่ได้จากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส

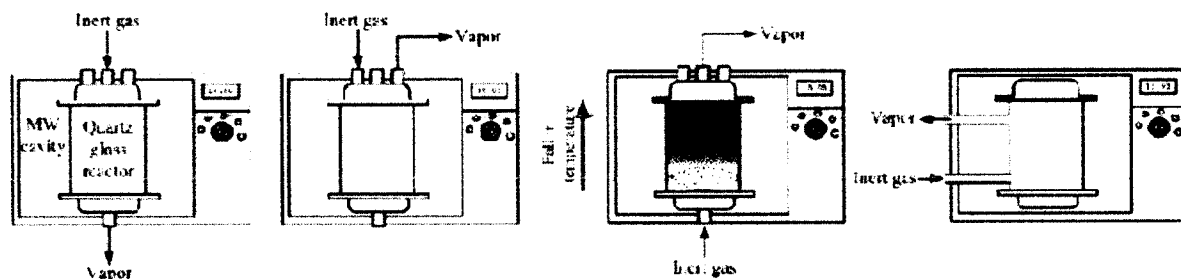
บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

Miura et al.(2004) ใช้วัสดุชีวมวลจำพวกไม้ชนิด Larch รูปทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 60, 80, 100, 300 มิลลิเมตร ความชื้น 8-12% ด้วยกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส ซึ่งใช้กำลังไมโครเวฟ 1.5 และ 3 กิโลวัตต์ นาน 90 นาที โดยทำการไล่ออกซิเจนด้วยการดูดอากาศออกจากเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสด้วยระบบดูดอากาศ แล้วทำการใส่ก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ด้วยอัตรา 5 ลิตร/นาที สารระเหยที่ได้จากกระบวนการถูกทำให้เย็นลงในรูปของเหลวและถ่าน Chen et al.(2008) และ Wang et al.(2008) ได้ทำการทดลองไมโครเวฟไพโรไลซิสกับเศษชี้เลื่อยของไม้ไพน์ (Pine) โดยคณะแรกได้ทำการเตรียมวัสดุก่อนการทดลอง (pretreatment) ด้วยชี้เลื่อยของไม้ไพน์ความชื้น 8.2% น้ำหนักแห้ง จำนวน 60 กรัม ผสมรวมกับสารเคมี 6 กรัมและน้ำ 400 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชี้เลื่อยที่ได้เตรียมไว้จำนวน 16.5 กรัม ผสมรวมกับ 25 กรัม ซิลิกอนคาร์ไบด์ (silicon carbide: SiC) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับไมโครเวฟ จากนั้นทำการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 12 องศาเซลเซียสต่อวินาที นาน 5 นาที พร้อมการไล่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจนในอัตรา 0.2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปของเหลว 26% ของแข็ง 36.7% และ ก๊าซ 37.3% นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้ทดลองกับชี้เลื่อยไม้ไพน์ที่ไม่ได้ทำการเตรียมวัสดุก่อนการทดลองด้วยเงื่อนไขการไมโครเวฟไพโรไลซิสที่เหมือนกัน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของเหลว 22.7% ของแข็ง 17.3% และก๊าซ 60% ส่วนคณะวิจัยชุดหลังได้ทดลองรวมไปถึงเปลือกถั่ว และ เมล็ดข้าวโพดด้วยโดยทำการเตรียมวัสดุก่อนการทดลองด้วยวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟก่อนเป็นเวลา 6 นาที แล้วทำการไมโครเวฟไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากระบบ เวลาที่ใช้้น้อยกว่า 1 วินาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากชี้เลื่อยไม้ไพน์, เปลือกถั่ว, และ เมล็ดข้าวโพด เป็นของเหลว 70%, 52% และ 51% ของแข็ง 15%, 31%, และ 30% และ ก๊าซ 15%, 17%, และ 19% ตามลำดับ คณะผู้วิจัยนำโดย Huang et al. (2008) ทำการทดลองกับฟางข้าวที่ความชื้น 8.25% ในเตาไมโครเวฟแบบการเกิดคลื่นนิ่งหนึ่งโหมด (single mode cavity) กำลังไมโครเวฟขนาด 100-500 วัตต์ โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนในอัตรา 50 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าที่กำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็น ของเหลว 22.56% ของแข็ง 28.01% และ ก๊าซ 49.37% นอกจากนั้นแล้วฟางข้าวสาลี (Budarin, et al., 2009; Zhao, et al., 2012; Zhao, et al., 2011) ที่ความชื้น 7.4% ได้ถูกทำการศึกษากระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสร่วมกับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิต่างๆกัน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูป ของเหลว/ของแข็ง/ก๊าซ(%) 25/57/18 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส, 31/48/21 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส, และ 31/46/23 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส คณะผู้วิจัยได้สรุปว่าอุณหภูมิไม่ได้รับผลกระทบมากต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) และปริมาตรรูพรุน พร้อมทั้งยังลดขนาดเฉลี่ยของรูพรุน A. A. Salema and F.N. Ani. (2011) ได้ทำการทดลองไมโครเวฟไพโรไลซิสกับไฟเบอร์และกะลาปาล์มน้ำมัน ที่ความชื้น 10% และ 8% ของน้ำหนักแห้ง

ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ ถ่าน ขนาด 100-300 ไมโครเมตร ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม มาเป็นตัวรับไมโครเวฟ และทำการดัดแปลงไมโครเวฟครัวเรือนแบบการเกิดคลื่นนิ่งหลายโหมด ร่วมกับเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสที่ทำจากควอทซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร สูง 0.15 เมตร กำลังไมโครเวฟที่ใช้เป็น 450 วัตต์ เวลาที่ใช้เป็น 25 นาที และยังมีการใช้ชุดตีกวน (stirrer) เพื่อให้วัสดุในกระบวนการไพโรไลซิสเคลื่อนที่ป้องกันปัญหาการเกิดความร้อนกระจายไม่ทั่วถึง โดยเป่าก๊าซไนโตรเจนขนาด 10 ลิตรต่อนาที เพื่อเป็นการไล่ก๊าซออกซิเจนออกไปจากระบบ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้อัตราส่วนผสมระหว่างขยะชีวมวลต่อตัวรับไมโครเวฟที่แตกต่างกัน ผลที่ได้พบว่าที่อัตรา 1:0.5 จะให้ปริมาณน้ำมันสูงสุด (yield) ของทั้งสองชนิดขยะชีวมวล เมื่อไม่นานมานี้ Z. Abubakar et al. (2013) ได้นำเสนอวิธีการใหม่ของกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส ร่วมกับการศึกษาผลกระทบของความเร็วของชุดตีกวน เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำมันชีวภาพ (bio-oil deposition) ที่ได้จากกระบวนการนี้ โดยคณะผู้วิจัยได้ใช้วิธีการเป่าก๊าซไนโตรเจนเข้าทางท่อด้านบนของเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส แล้วให้น้ำมันชีวภาพที่เกิดขึ้นไหลไปตามท่อด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ฯ โดยมีการเชื่อมต่อเข้ากับหน่วยควบแน่น (condensing unit) เพื่อทำการควบแน่นและลดอุณหภูมิ ของเหลวจากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส โดยทำการดัดแปลงชุดเตาปฏิกรณ์ แล้วนำไปบรรจุไว้ในเตาไมโครเวฟครัวเรือน

จากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตจะเห็นได้ว่าผู้วิจัยทั้งหมดจะใช้ไมโครเวฟครัวเรือน ทำการดัดแปลง และติดตั้งเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสที่ผลิตขึ้นจากควอทซ์เข้าไป ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (Abubakar, et al., 2013)

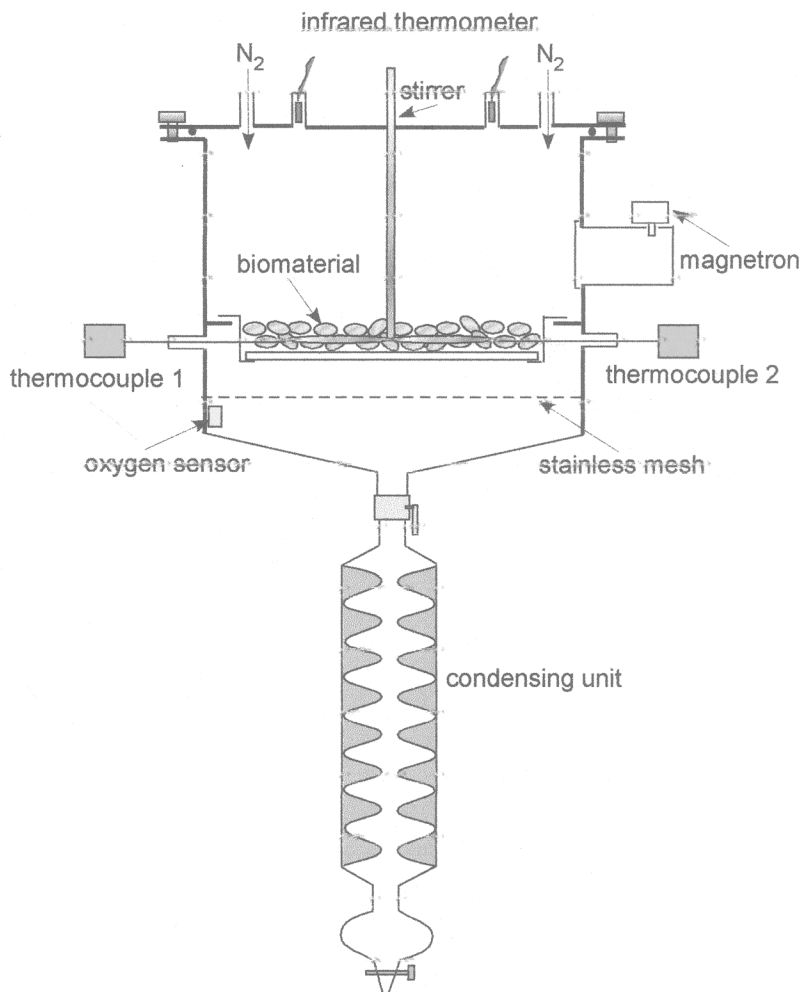


รูปที่ 2.1 เทคนิคไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟแบบต่างๆที่ผ่านมา

ดังนั้นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายกำลังให้กับไมโครเวฟครัวเรือนจะเป็นการใช้วงจรทวิแรงดันร่วมกับการตัดต่อของตัวควบคุมเวลา (timer) ผลที่ได้คือจะมีลักษณะการเปิดให้แมกนีตรอนทำงานเพื่อสร้างไมโครเวฟช่วงระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นปิดไมโครเวฟ สลับกันไปตลอดช่วงเวลาการทำกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส ส่งผลให้อุณหภูมิของวัสดุมีการแกว่งขึ้นลงตามการเปิดและปิดของแมกนีตรอน นอกจากนี้แล้วจากการสำรวจจึงพบว่าไม่มีหน่วยงานใดทั้งภาครัฐ และเอกชนในประเทศไทย ที่รับผลิตอุปกรณ์เครื่องแก้วที่ผลิตจากควอทซ์ จึงส่งผลให้

งานวิจัยชิ้นนี้ ได้ออกแบบให้เตาไมโครเวฟและเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสเป็นระบบร่วม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น สรุปจุดเด่นของวิจัยชิ้นนี้คือ

1. เป็นการออกแบบตัวเตาปฏิกรณ์ใหม่ โดยไม่ได้ใช้เตาไมโครเวฟที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปมาดัดแปลงและใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีในประเทศ
2. ใช้ระบบจ่ายกำลังแบบต่อเนื่อง จึงส่งผลดีต่อการควบคุมอุณหภูมิ
3. ใช้โหมดการกระตุ้นเพื่อให้ความร้อนของวัสดุกระจายตัวสม่ำเสมอ
4. มีออกซิเจนเซ็นเซอร์เป็นตัวติดตามปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในเตาปฏิกรณ์



รูปที่ 2.2 เตาปฏิกรณ์ร่วมไมโครเวฟ และไพโรไลซิสพร้อมโหมดกระตุ้น

จากการสืบค้นข้อมูลสิทธิบัตรจากเว็บไซต์ของกรมทรัพย์สินทางปัญญาพบว่า มีเลขที่คำขอ 2004305312 ผู้ขอจดคือ enterprise limited Cambridge ด้วยชื่อเรื่องสิ่งประดิษฐ์และออกแบบคือ

Microwave induced pyrolysis reactor and method บริษัท Nomascum Pty Ltd. ได้ยื่นจดสิทธิบัตร
สิ่งประดิษฐ์และออกแบบเรื่อง Microwave assisted pyrolysis of rubbery materials และ A method
for the reduction of waste tyres and scrap rubbery by microwave pyrolysis ตามเลขที่คำขอ
1998PP4162 และ 1998PP4160 ตามลำดับ ส่วนบริษัท Imtech Industries (Corp) Pty Ltd. ได้ยื่นจดสิทธิ
บัตรสิ่งประดิษฐ์และออกแบบเรื่อง Microwave assisted pyrolysis of rubbery materials และ A
method for the reduction of waste tyres and scrap rubber by microwave pyrolysis ตามเลขที่
คำขอ 1996PO3494, 1996PO1392, 1995PN6372, และ 1995PN4578

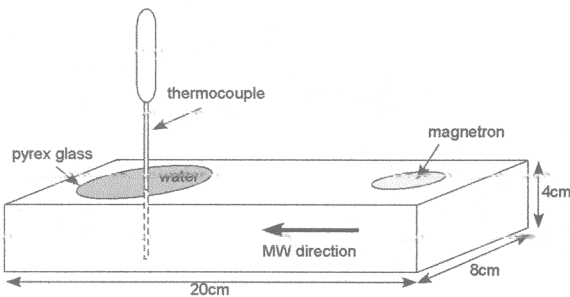
บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

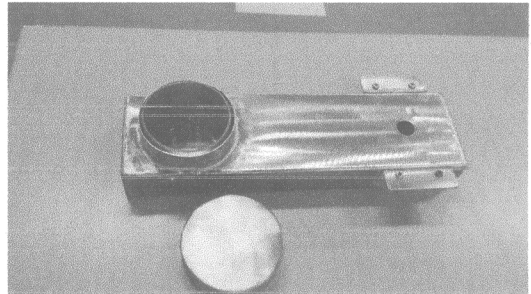
3.1 การสร้างชุดเครื่องมือสอบเทียบวัตต์พลังงานไมโครเวฟ

เนื่องจากไม่สามารถวัดพลังงานไมโครเวฟได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องใช้หลักการเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟไปเป็นพลังงานความร้อนโดยใช้น้ำเป็นตัวรับพลังงานไมโครเวฟ เนื่องจากน้ำมีโมเลกุลแบบมีขั้วจึงตอบสนองด้วยการสั่นและหมุนตามสนามไฟฟ้าในคลื่นไมโครเวฟ ด้วยความถี่ในย่านไมโครเวฟคือ 2.45 GHz ทำให้โมเลกุลของน้ำสั่นอย่างรุนแรงและพยายามหมุนตัวตอบสนองสนามไฟฟ้าในไมโครเวฟ ทำให้โมเลกุลเกิดการเสียดสีจนเกิดเป็นความร้อนขึ้นได้อย่างรวดเร็ว นี่คือเหตุผลที่ใช้น้ำเป็นตัวรับพลังงานไมโครเวฟและใช้เป็นหลักการสร้างเครื่องมือ และหลักการทำการสอบเทียบวัตต์พลังงานไมโครเวฟ

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงได้ทำการออกแบบสร้างเครื่องมือสอบเทียบวัตต์พลังงานไมโครเวฟ โดยไมโครเวฟจะถูกผลิตขึ้นจากแหล่งกำเนิดที่เรียกว่าแมกนีตรอน (magnetron) ซึ่งแมกนีตรอนจะใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไมโครเวฟ แล้วส่งผ่านท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (rectangular waveguide) ที่ทำด้วยสแตนเลส ขนาดหน้าตัด กว้าง 4 cm ยาว 8 cm ท่อมีความยาว 20 cm โดยปลายสุดของท่อจะมีภาชนะคือแก้ว pyrex ใส่ น้ำไว้ที่ปลายท่อ และมีเทอร์โมคัปเปิล type-K เสียบไว้เพื่อวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 3.1



(a)

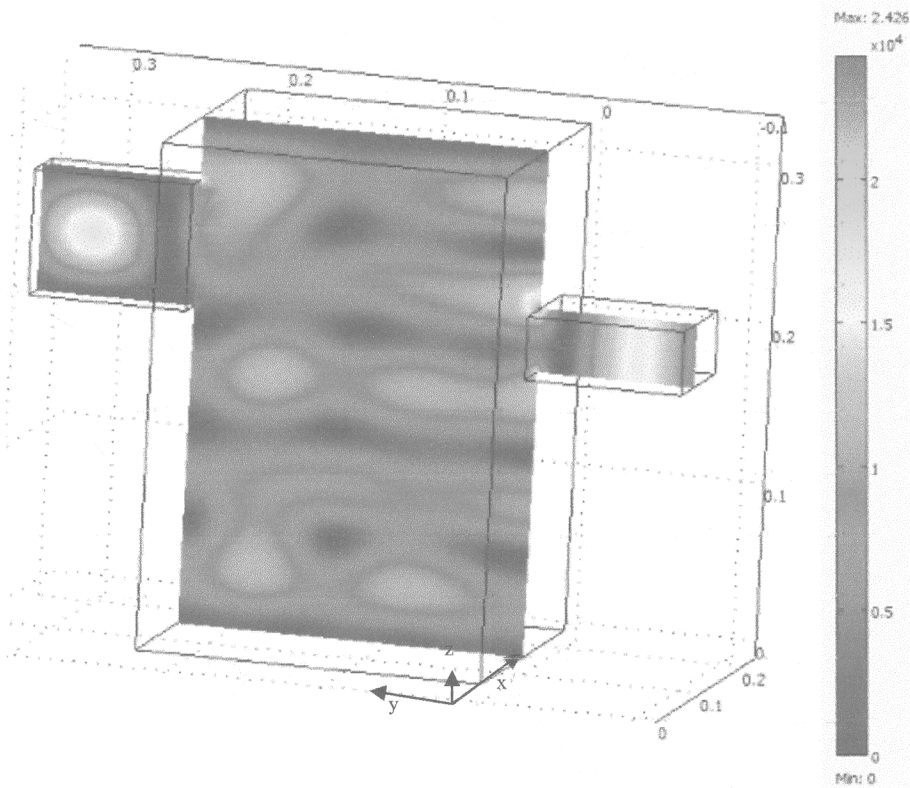


(b)

รูปที่ 3.1 (a) ภาพแสดงองค์ประกอบชุดเครื่องมือสอบเทียบวัตต์พลังงานไมโครเวฟ (b) ชุดเครื่องมือสอบเทียบวัตต์พลังงานไมโครเวฟที่สร้างขึ้นจริง

3.2 การออกแบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟไฟโรไลซิสพร้อมกับการจำลองไมโครเวฟที่เกิดขึ้นด้วย computer simulation

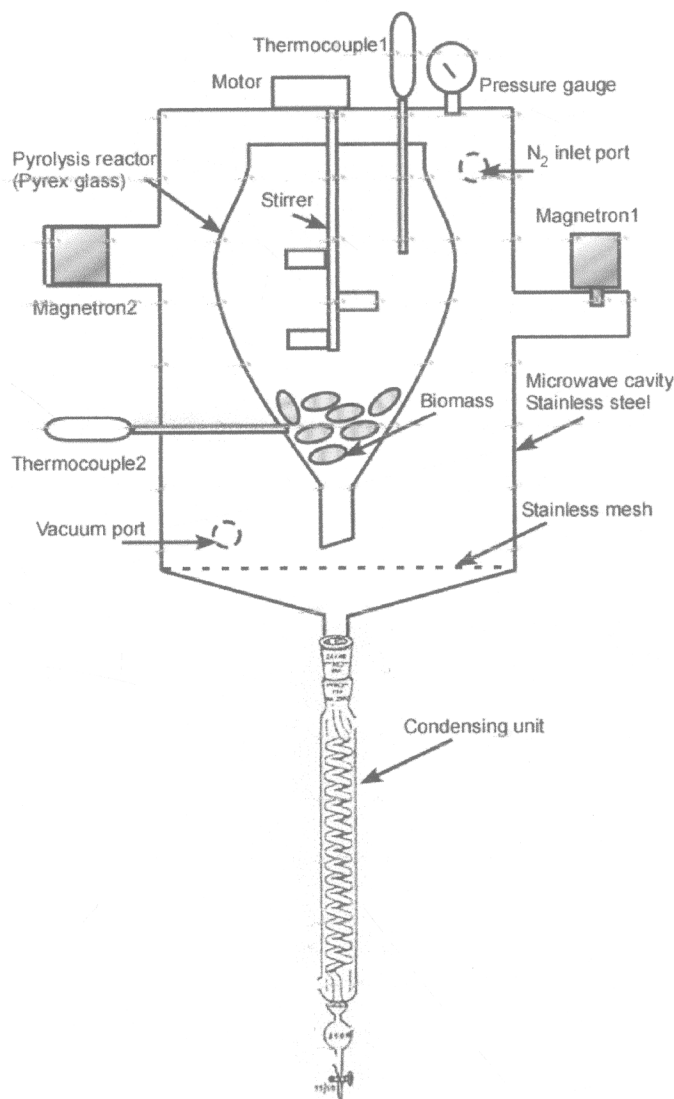
เนื่องจากไม่สามารถมองเห็นการกระจายตัวของไมโครเวฟที่เกิดขึ้นภายในห้องอบ (cavity) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้โปรแกรม simulation ที่ชื่อว่า COMSOL Multiphysics version 3.4 โมดูล RF module >> Electromagnetic waves >> Harmonic propagation เพื่อช่วยในการออกแบบห้องอบและดูการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในห้องอบ ก่อนทำการสร้างห้องอบขึ้นจริง โดยการออกแบบให้ขนาดห้องอบมีขนาดเป็น $x=20$, $y=22$, และ $z=32$ เซนติเมตร ตามลำดับ โดยการออกแบบเตาอบได้ออกแบบให้มีแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ สองแหล่ง เพื่อการใช้งานในอนาคตที่ต้องการให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีค่า (แมกนีตรอน) รวดเร็ว และอุณหภูมิสูง ผลการกระจายตัวสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟภายในห้องอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และเมื่อทำการทำการอินทิเกรตเพื่อหาสนามไฟฟ้าภายในห้องอบจากแบบที่ได้ทำการเขียนขึ้นพบว่ามีค่าสนามไฟฟ้ารวมทั้งหมด (normE_rfw) เท่ากับ 77.74 V.m^2



รูปที่ 3.2 แสดงภาพการกระจายตัวสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟในแนวแกน y ภายในห้องอบที่ได้จำลองขึ้น

3.3 สร้างเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟไพโรไลซิสแบบการเกิดคลื่นนิ่งหลายโหมด

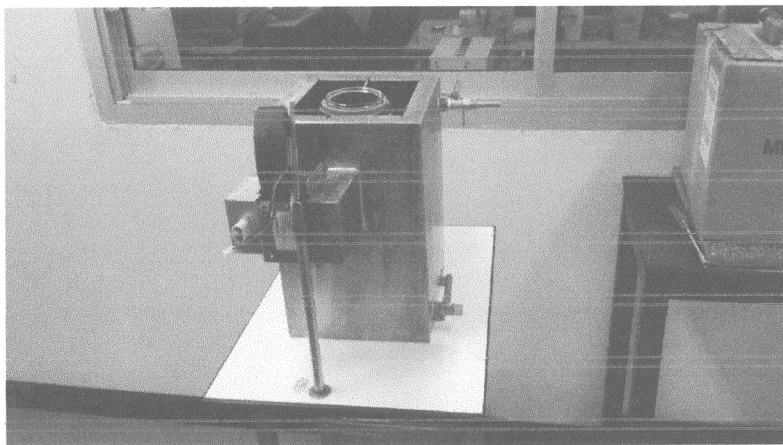
เมื่อได้ทำการออกแบบ และจำลองการเกิดรูปแบบของสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟซึ่งฟอร์มตัวเป็นคลื่นนิ่งภายในท่อนำคลื่น และ ห่องอบแล้วขั้นตอนนี้ก็คือการสร้างระบบท่อนำคลื่นไมโครเวฟเข้าสู่ห้องอบ ห้องอบ และระบบเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบแบบกระบวนการผลิตต่อครั้งร่วมกับไมโครเวฟและโหมดการกระตุ้นสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากขยะชีวมวล ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 และ รูปที่ 3.4-3.11 แสดงถึงส่วนประกอบ และระบบต่างๆ ที่ได้ทำการสร้างขึ้น ตามที่ได้ออกแบบไว้



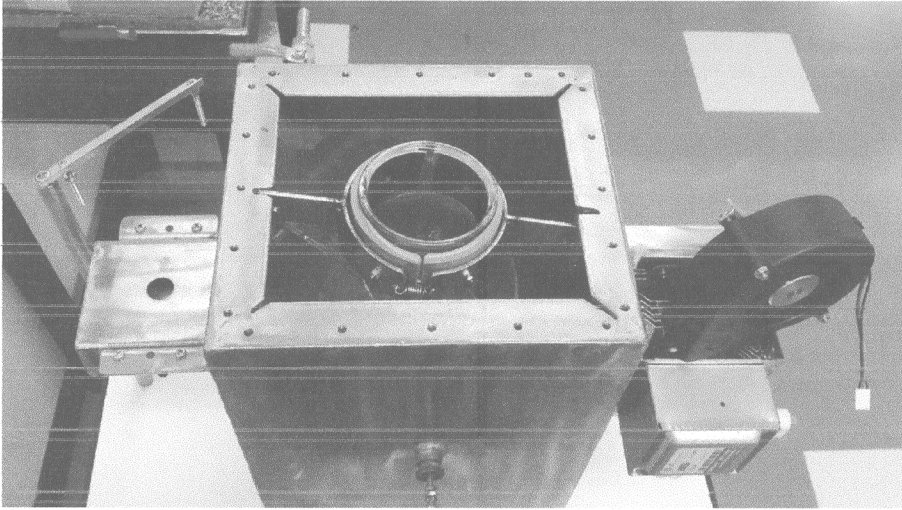
รูปที่ 3.3 แสดงองค์ประกอบโดยรวมทั้งหมดของระบบเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบแบบกระบวนการผลิตต่อครั้งร่วมกับไมโครเวฟและโหมดการกระตุ้นสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากขยะชีวมวล



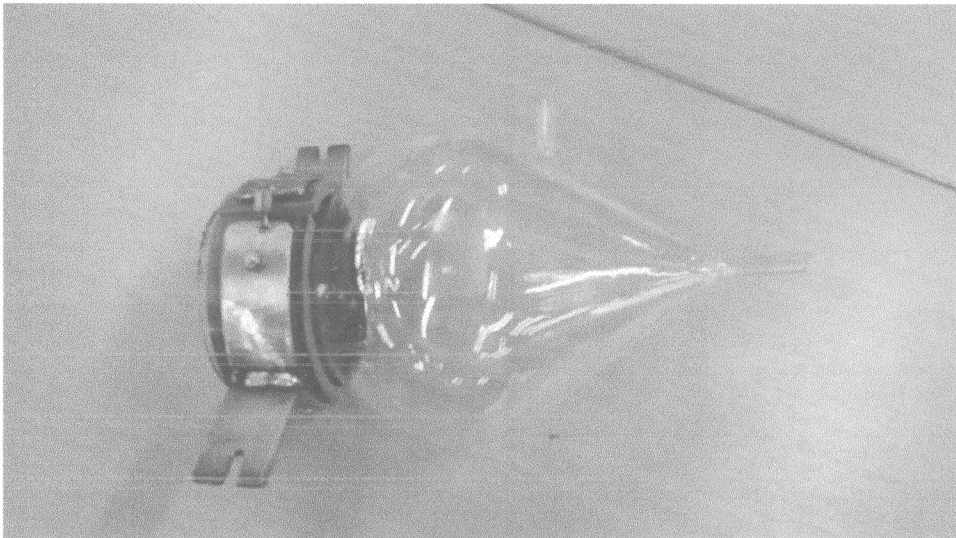
รูปที่ 3.4 แสดงภาพด้านหน้าของระบบเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบแบบกระบวนการผลิตต่อครั้งร่วมกับไมโครเวฟและโหมตการกระตุ้นสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากขยะชีวมวลที่สร้างขึ้นจริง



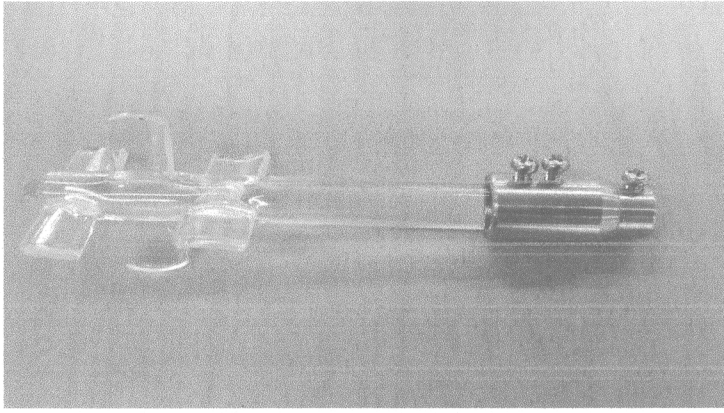
รูปที่ 3.5 แสดงภาพด้านข้างของระบบเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบแบบกระบวนการผลิตต่อครั้งร่วมกับไมโครเวฟและโหมตการกระตุ้นสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากขยะชีวมวลที่สร้างขึ้นจริง



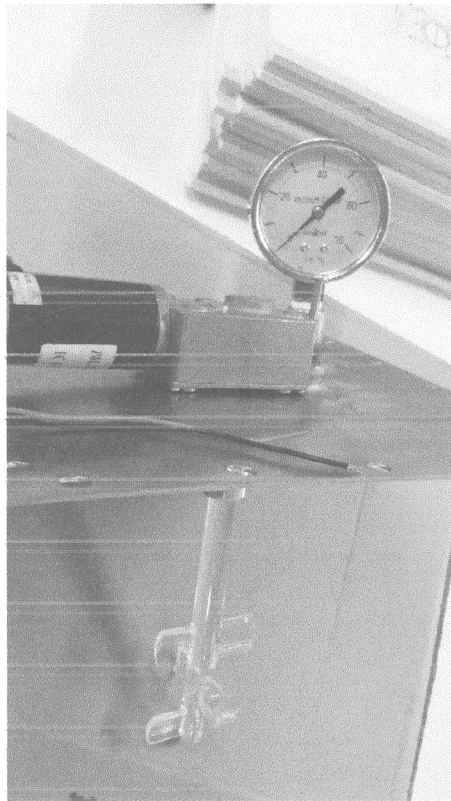
รูปที่ 3.6 แสดงภาพด้านบนของระบบเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบแบบกระบวนการผลิตต่อครั้งร่วมกับ
ไมโครเวฟและโหมตการกระตุ้นสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากขยะชีวมวลที่สร้างขึ้นจริง



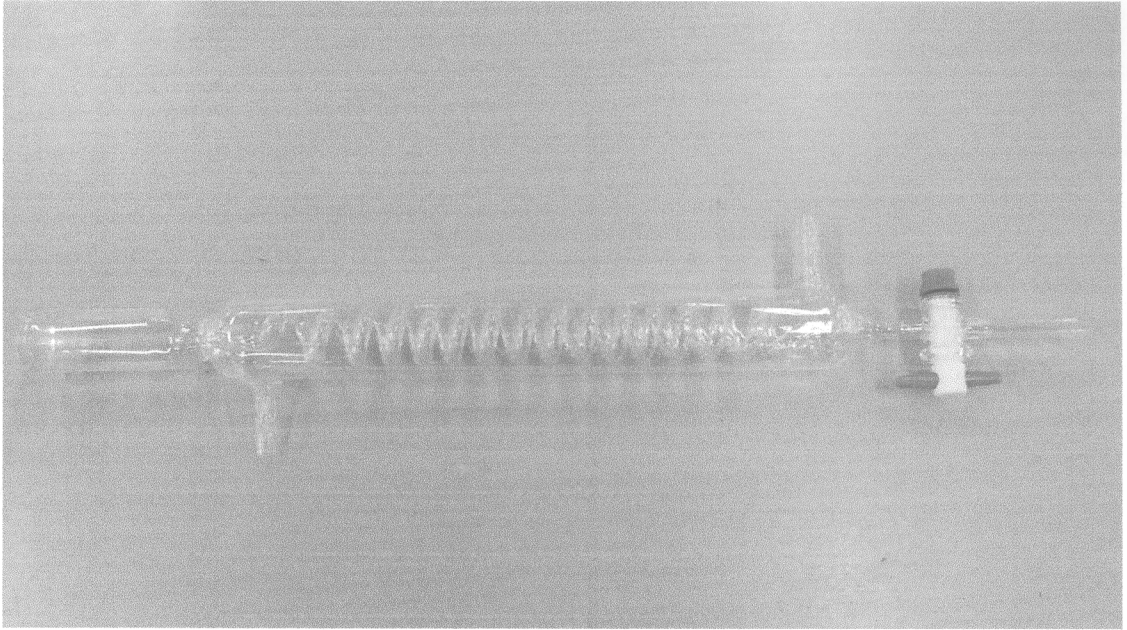
รูปที่ 3.7 แสดงภาพเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสที่ได้สั่งทำขึ้นด้วยแก้วโบโรซิลิเกต



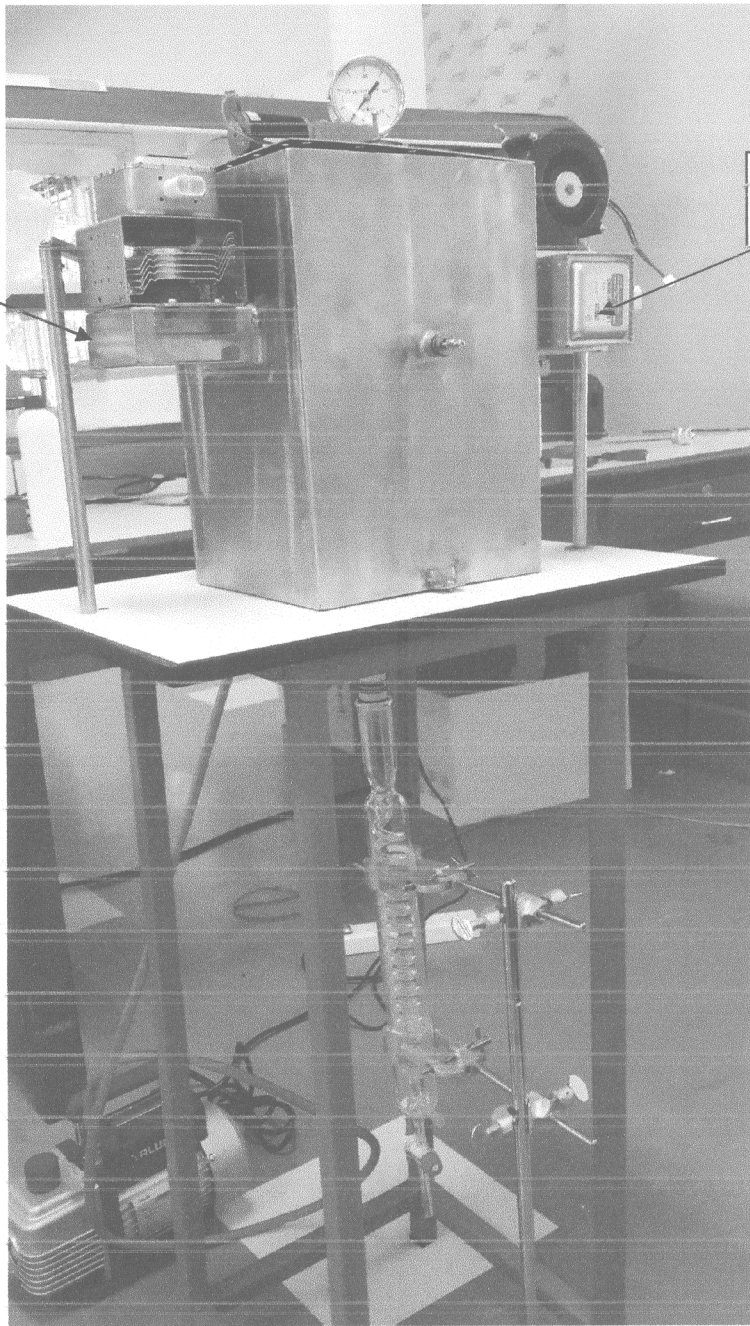
รูปที่ 3.8 แสดงภาพแชนตีกันขยะชีวมวลผลิตจากแก้วโพรซิไลเกต



รูปที่ 3.9 แสดงภาพแชนตีกันขยะชีวมวล เมื่อทำการต่อเข้ากับมอเตอร์ขับเคลื่อนเป็นระบบการตีกัน (Stirrer mode)



รูปที่ 3.10 แสดงภาพตลอดฤดูหนาวของเหลวและทำการควบแน่นก๊าซที่ได้จากการระเหยของวัสดุชีวมวล



รูปที่ 3.11 แสดงภาพระบบเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบแบบกระบวนการผลิตต่อครั้งร่วมด้วยไมโครเวฟและโหมมดการกระตุ้นสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากขยะชีวมวลที่ได้สร้างขึ้น (กรณีศึกษาทะเลปาล์มน้ำมัน)

3.4 อุปกรณ์การทดลอง

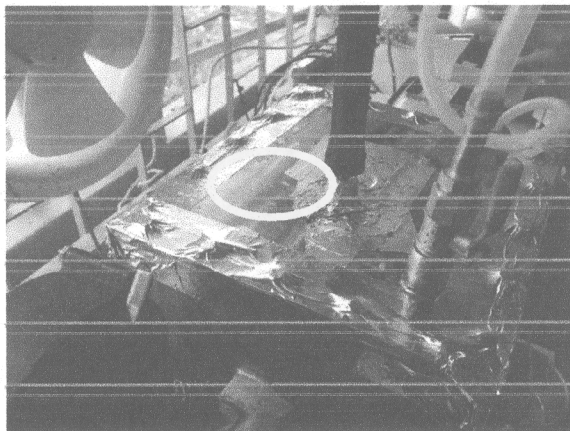
- เครื่องวัดอุณหภูมิ

เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าอุณหภูมิภายในระบบ โดยแสดงผลเป็นแบบดิจิทัล และทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิแบบอัตโนมัติเก็บไว้ใน SD card ในทุกๆ 2 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค

โดยทำการเสียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิทางด้านบนของตัวเตา ซึ่งตำแหน่งนี้จะตรงกับวัสดุชีวมวลพอดี้ และจะเริ่มทำการวัดอุณหภูมิตั้งแต่อ่อนทำงาน เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องไปจนเสร็จสิ้นการทดลอง



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งของช่องเสียบเทอร์โมคัปเปิลบนฝาเตาไมโครเวฟ

- เครื่องชั่งน้ำหนัก (Electronic Balance)

ใช้ในการทดลองเพื่อให้ได้อัตราส่วนตามที่กำหนด ซึ่งเครื่องชั่งนี้สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 5,000 กรัม และมีหน้าจอแสดงผลแบบดิจิทัล ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องชั่งน้ำหนัก

- มัลติมิเตอร์ (Multimeter)

ชนิด clamp ใช้ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด ดังแสดงใน

รูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แคลมป์มัลติมิเตอร์

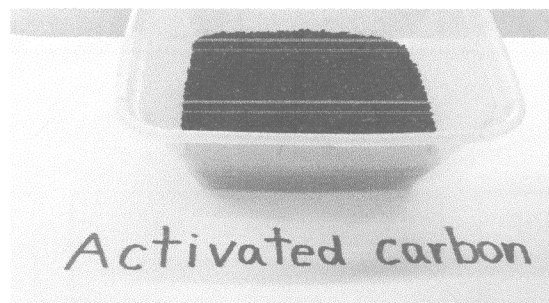
3.5 วัสดุการทดลอง

กะลาปาล์ม ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม บริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มดิบ (Curd Palm Oil: CPO) โดยกะลาปาล์มที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ คือ ส่วนที่เหลือจากกระบวนการผลิตจากโรงงาน โดยความชื้นเริ่มต้นประมาณ 18% โดยน้ำหนัก และขนาดเฉลี่ย 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กะลาปาล์มที่ใช้ในงานวิจัย

ถ่านกัมมันต์ ถูกใช้เป็นส่วนผสมกับกะลาปาล์มเนื่องจากกะลาปาล์มเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ในระดับต่ำมาก จึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟเพื่อเปลี่ยนไปเป็นความร้อนได้คืออย่างเป็นส่วนผสมดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับพลังงานไมโครเวฟ โดยถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นสารกรองน้ำของเครื่องกรองน้ำทั่วไป ซึ่งวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตคือกะลามะพร้าว มีขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.17 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ผสมกับกะลาปาล์ม

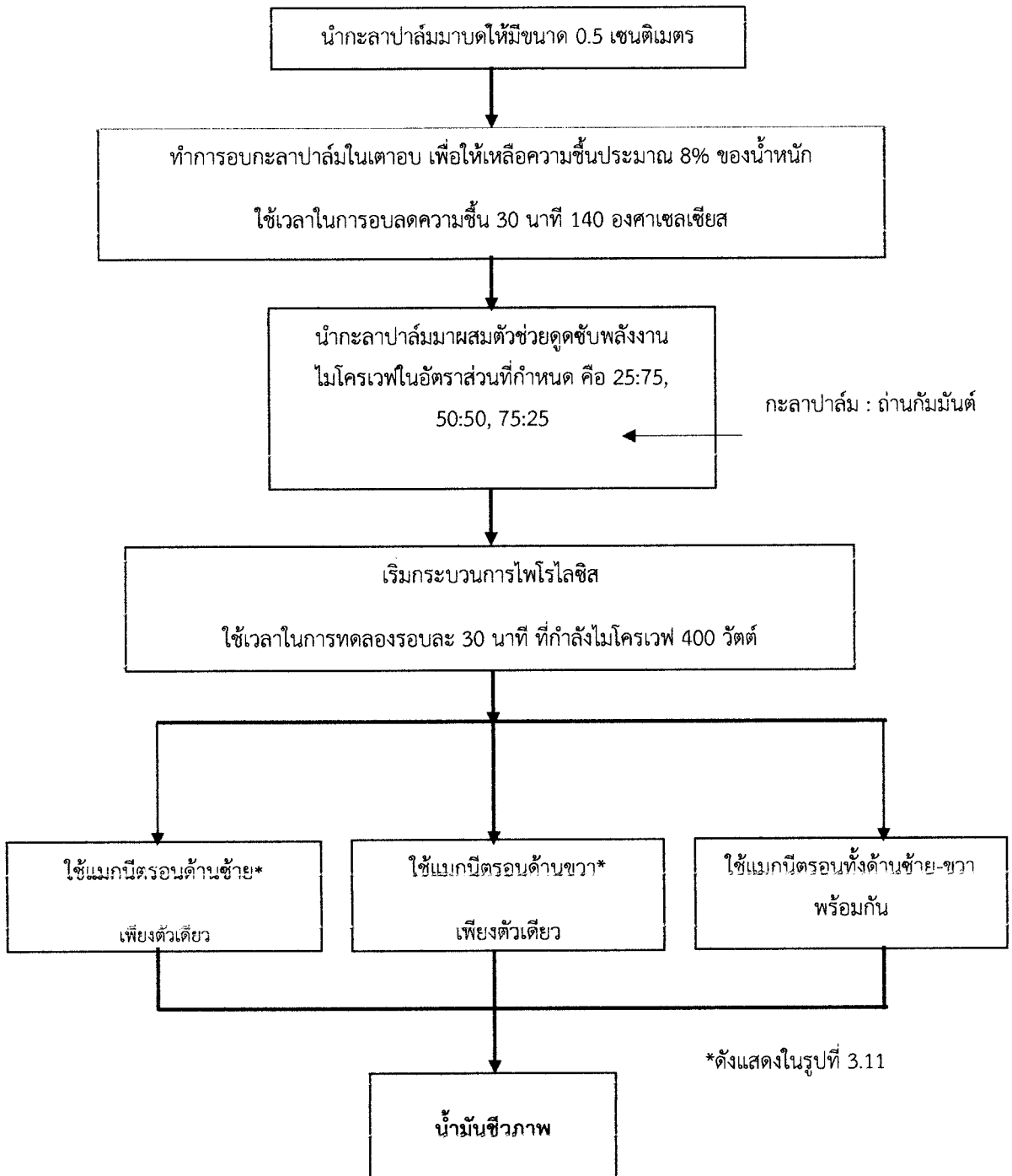
3.6 รูปแบบการทดลอง

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบหลัก คือ

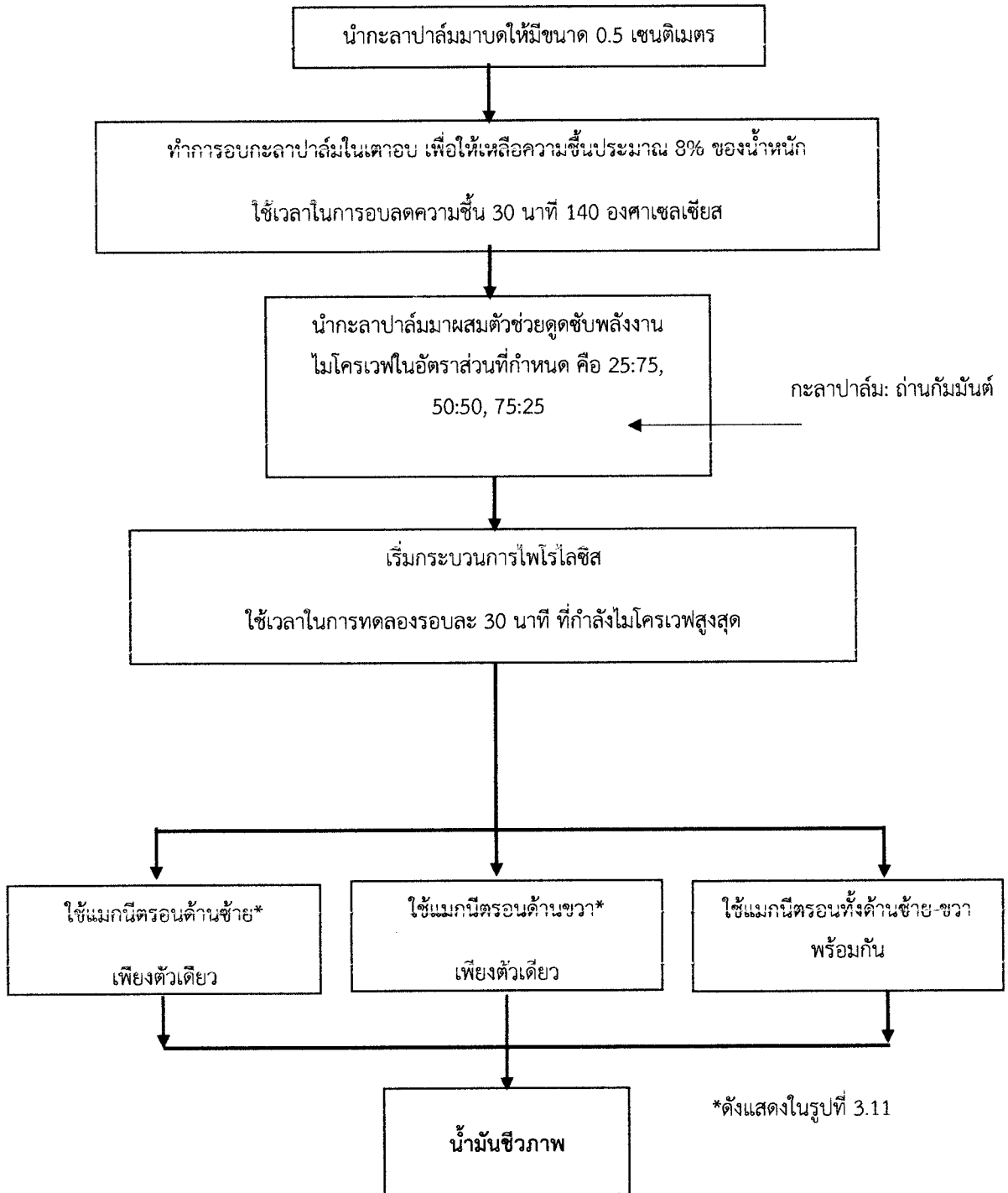
การทดลองที่ 1 ใช้ระดับกำลังปานกลาง (Medium power) 450 วัตต์

การทดลองที่ 2 ใช้ระดับกำลังสูงสุด (High power) 800 วัตต์

วิธีการทดลอง ที่ระดับกำลังไมโครเวฟที่ 450 วัตต์



วิธีการทดลอง ที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ (High power)



3.7 ขั้นตอนการทดลอง

- การทดลองที่ 1 ใช้ระดับวัตต์ที่กำลัง 450 วัตต์ และเลือกใช้แมกนีตรอนทางด้านซ้ายเพียงตัวเดียว โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างกะลาปาล์มกับถ่านกัมมันต์ คือ 75 : 25, 50 : 50, 25 : 75
- เตรียมอัตราส่วนผสมดังกล่าวข้างต้นให้ได้น้ำหนัก 400 กรัม
- นำหลอดแก้วทดลองมาติดตั้งในเครื่องปฏิกรณ์
- ปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ เพื่อไล่อากาศภายในระบบให้เกิดเป็นสภาวะเฉื่อย และป้องกันการสันดาปของวัสดุชีวมวล ในอัตรา 10 LPM เป็นเวลา 1 นาทีก่อนให้พลังงาน และระหว่างการให้พลังงานไมโครเวฟ
- เปิดระบบควบคุมแรงดัน บรรจุน้ำแข็งใต้น้ำมีอุณหภูมิระหว่าง 5-7 °C
- เริ่มการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้เวลาในการทดลอง 30 นาที
- วัดอุณหภูมิ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Type K) บันทึกข้อมูลด้วย SD card ทุก 2 วินาที
- บันทึกปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทดลองที่เวลา 30 นาที
- บันทึกน้ำหนักของวัสดุหลังการทดลอง
- บันทึกปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากมิเตอร์
- การทดลองที่ 2 ทำเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 แต่จะเปลี่ยนมาใช้แมกนีตรอนทางด้านขวาเพียงตัวเดียว
- การทดลองที่ 3 ทำเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 โดยจะใช้แมกนีตรอนทั้งซ้ายและขวาพร้อมกัน
- การทดลองที่ 4 ทำเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 แต่ใช้กำลัง 800 วัตต์
- การทดลองที่ 5 ทำเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 แต่ใช้กำลัง 800 วัตต์
- การทดลองที่ 6 ทำเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3 แต่ใช้กำลัง 800 วัตต์

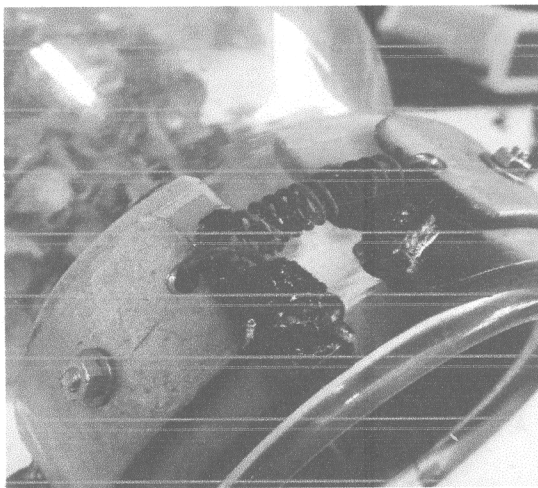
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดกับระบบที่ออกแบบ

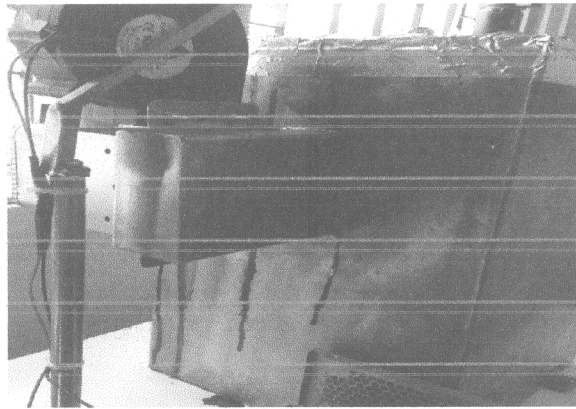
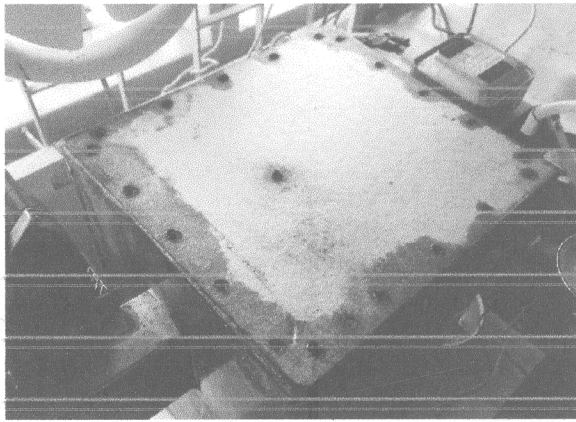
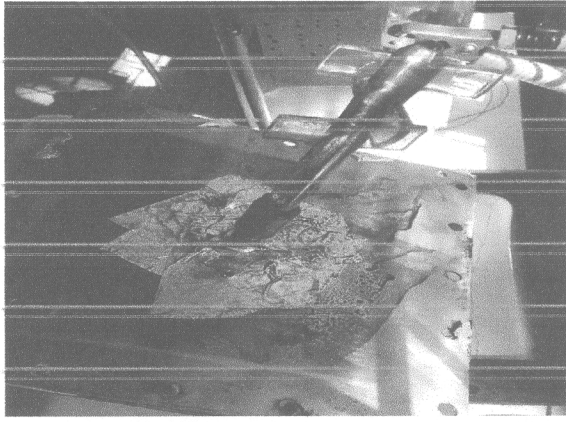
จากการทดสอบระบบที่ได้ทำการออกแบบปรากฏว่า เกิดปัญหาขึ้นในระหว่างการทดลอง อาทิเช่น หลอดแก้วเกิดการแตก ฐานรองหลอดแก้วใหม่ เกิดการรั่วของอากาศ จึงต้องมีการออกแบบและปรับปรุงระบบใหม่ เพื่อให้การทดลองสามารถดำเนินต่อไปได้ โดยรายละเอียดของปัญหาและการแก้ไขปัญหา รวมทั้งการออกแบบระบบใหม่มีดังต่อไปนี้

1. พีวีซีแหวนรองหลอดแก้ว ได้รับความร้อนมากเกินไปจนทำให้เกิดการไหม้ในส่วนที่ติดกับสปริง และสปริงเกิดชำรุดเนื่องจากการอัดออกจนผิดรูปดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งทำการแก้ไขโดยการถอดวัสดุที่เป็นพีวีซีออก



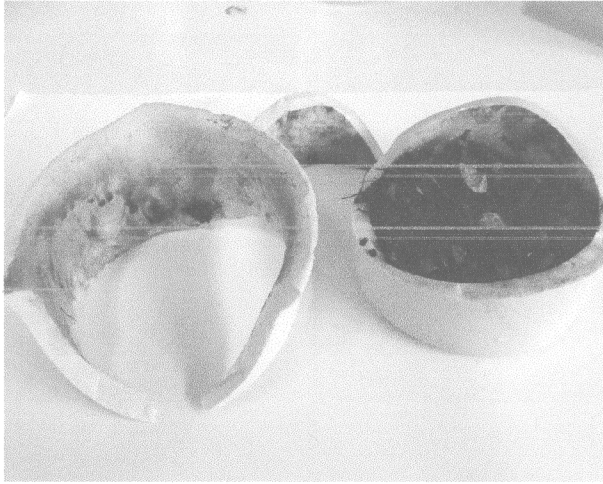
รูปที่ 4.1 พีวีซีได้รับความร้อนจนเกิดการไหม้

2. มีอากาศรั่วและซึมผ่านทางด้านบน ตรงตำแหน่งของมอเตอร์แท่งตีคววน นี้อัตยิตฝาเครื่องปฏิกรณ์ ตำแหน่งที่ติดตั้งแมกนิตรอน และตำแหน่งที่เสียบเทอร์โมคัปเปิล จนทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของควีน และเกิดการสะสมของคราบน้ำมันบริเวณที่เกิดการรั่วซึมดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งทำการแก้ไขโดยการนำเอา เทปอลูมิเนียมฟอยล์และแผ่นไมก้ามาปิดช่องว่างเพื่อลดการรั่วซึม



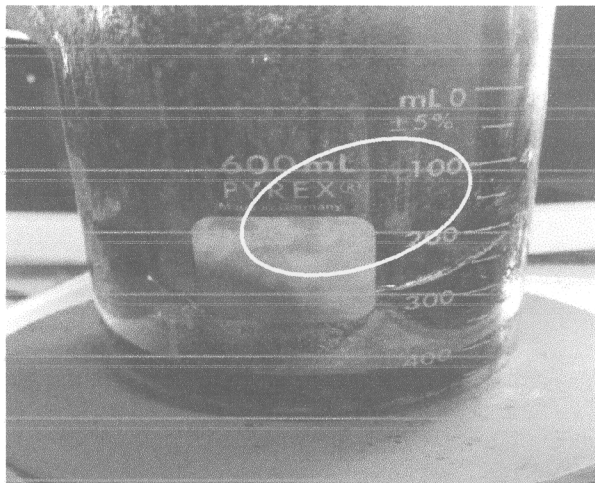
รูปที่ 4.2 การรั่วซึมที่เกิดกับระบบก่อนและหลังการปรับปรุงแก้ไข

3. ทดลองเปลี่ยนภาชนะสำหรับบรรจุวัสดุชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์ จากหลอดแก้วเป็นภาชนะเซรามิก และเริ่มทดลองตามปกติ โดยใช้วัตต์ที่กำลังสูงสุด ปรากฏว่า ภาชนะเซรามิกไม่สามารถทนความร้อนสูงในระดับ 600-700 °C ได้ และเกิดการแตกจนมีลักษณะดังรูปที่ 4.3



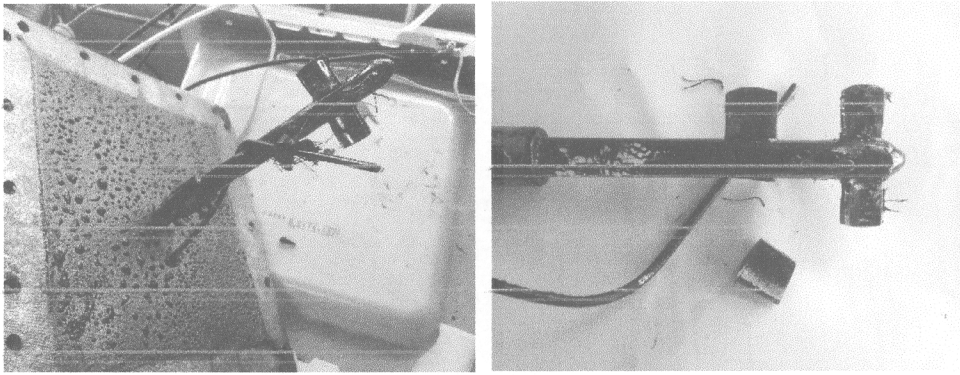
รูปที่ 4.3 ภาชนะเซรามิกได้รับความร้อนสูงจนเกิดการแตก

4. ทำลองเปลี่ยนภาชนะบรรจุวัสดุชีวมวลใหม่เป็นบีกเกอร์ PYREX ขนาด 600 ml และเริ่มทำการทดสอบ โดยใช้กำลังวัตต์สูงสุดเป็นเวลา 30 นาที ผลปรากฏว่า บีกเกอร์เกิดการแตก ดังแสดงในรูปที่ 4.4



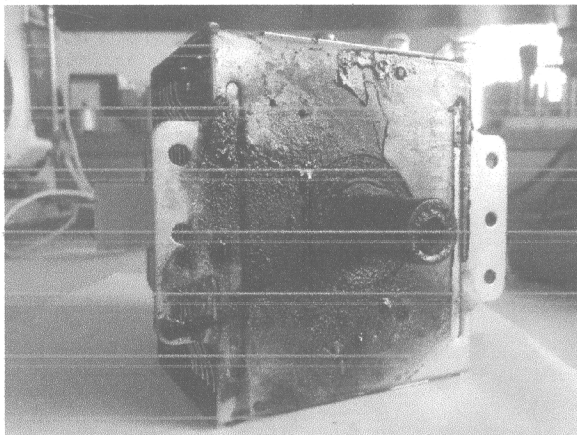
รูปที่ 4.4 บีกเกอร์ PYREX ขนาด 600 ml เกิดการแตกเนื่องจากได้รับความร้อนสูง

5. ก้านโลหะของเทอร์โมคัปเปิลเกิดพันรอบแท่งตีกวน จนทำให้มอเตอร์ของแท่งตีกวนไม่สามารถทำงานได้ และเกิดการแตกหักของใบแท่งตีกวน สาเหตุมาจากตำแหน่งของก้านโลหะอยู่ใกล้กับแท่งตีกวนมากเกินไป ทำให้เกิดการเกี่ยวกันระหว่างใบของแท่งตีกวนและก้านโลหะ จนเกิดการพันกันเนื่องจากแรงหมุนจากมอเตอร์ จนมีลักษณะดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ก้านโลหะเกิดการพันรอบแท่งตีกวน และการแตกหักของใบแท่งตีกวน

6. แมกนิตรอนทางด้านขวาเกิดชำรุดในระหว่างการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองต่อได้ เพราะไม่มีการปล่อยคลื่นไมโครเวฟเข้าสู่ระบบ แก้ไขโดยการเปลี่ยนแมกนิตรอนใหม่และทำการทดลองตามปกติ



รูปที่ 4.6 แมกนิตรอนที่เกิดการชำรุด

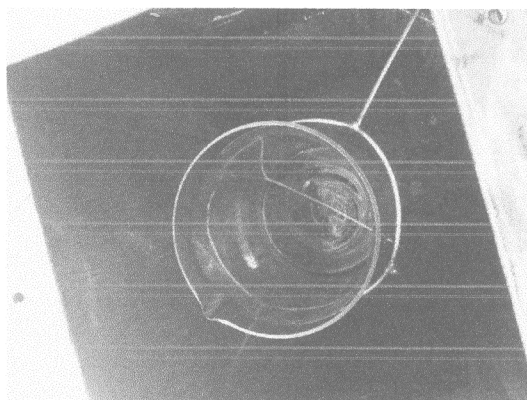
4.2 การออกแบบปรับปรุงระบบใหม่

ทำการเปลี่ยนภาชนะบรรจุวัสดุชีวมวลใหม่เป็นบีกเกอร์ควอทซ์ ขนาด 1,000 ml มีคุณสมบัติสามารถทนความร้อนที่สูงได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



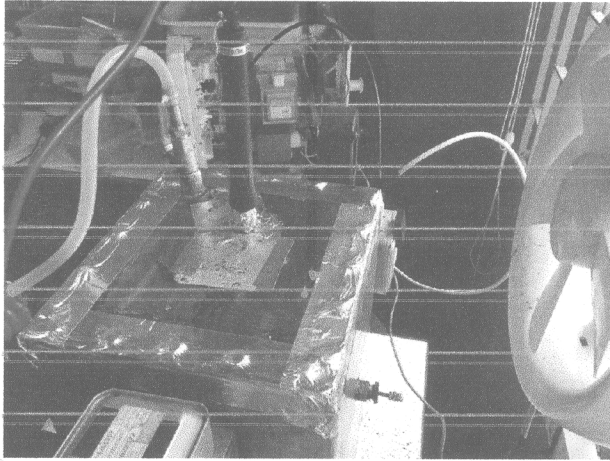
รูปที่ 4.7 บีกเกอร์ควอทซ์ที่ใช้ในการทดลอง

ทำการออกแบบฐานรองเตาปฏิกรณ์ควอทซ์ใหม่ เนื่องจากการเปลี่ยนชนิดของเตาปฏิกรณ์ใหม่ ซึ่งขนาดของเตาปฏิกรณ์นั้นจะมีขนาดไม่เท่ากันจึงไม่สามารถใส่ลงในฐานเก่าได้ ได้ทำการแก้ไขโดยการใช้ลวดอลูมิเนียมมาดัดให้สามารถรองรับและประคองหลอดแก้วไม่ให้เคลื่อนที่ ดังรูปที่ 4.8



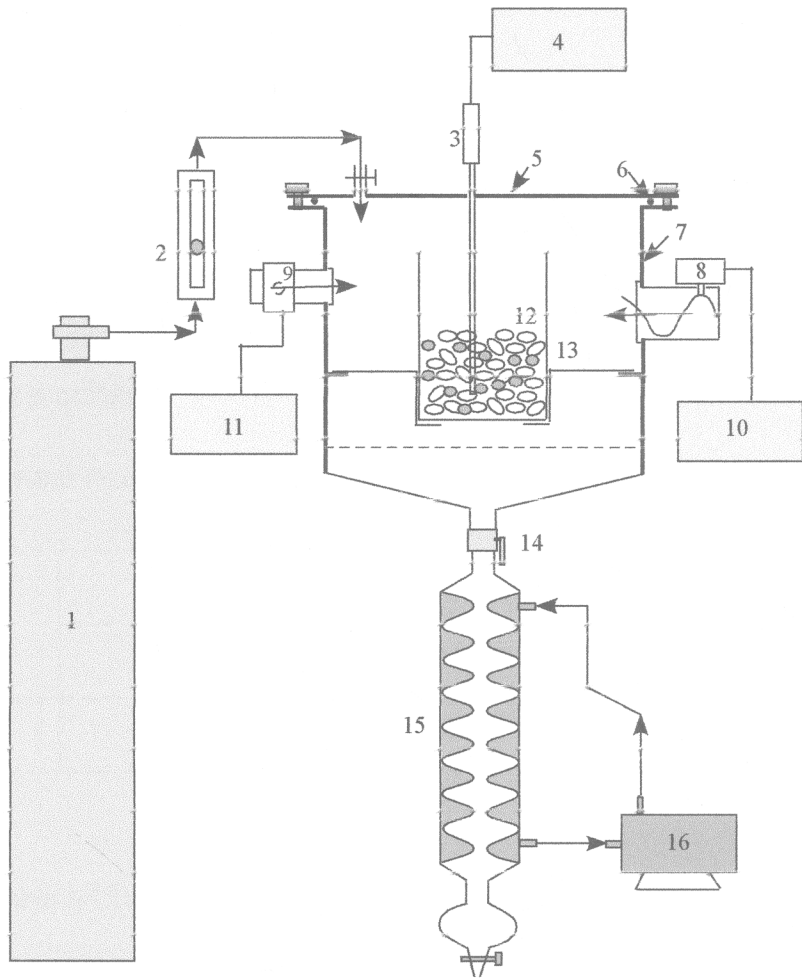
รูปที่ 4.8 แสดงการออกแบบฐานรองใหม่สำหรับเตาปฏิกรณ์ควอทซ์

นำมอเตอร์แห่งตีกวนออกแล้วทำการปิดผนึกโดยเทปอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อป้องกันการรั่วซึมของอากาศ สาเหตุที่ทำการถอดแห่งตีกวนออกเนื่องจากได้ทำการทดลองแบบไม่ใช้การตีกวน และพบว่าเกิดการเผาไหม้ที่ปกติและสามารถกระจายความร้อนได้ทั่วถึงดังแสดงในรูปที่ 4.9 จึงสรุปได้ว่า แห่งตีกวนไม่จำเป็นสำหรับการทดลอง และอาจจะทำให้เกิดปัญหาขึ้นอีก เช่น เกิดการเกี่ยวพันกับก้านโลหะ เกิดการรั่วซึมของอากาศผ่านมอเตอร์ของแห่งตีกวน



รูปที่ 4.9 ภาพด้านบนของเครื่องปฏิกิริยาที่ทำการถอดมอเตอร์แห่งตีกวนออกแล้ว

ภายหลังจากได้ทำการทดสอบระบบไมโครเวฟไพโรไลซิสจริง และพบปัญหาต่างๆ ดังได้รายงานผ่านมาในข้างต้น พร้อมกับได้ทำการปรับปรุงระบบที่ได้ทำการสร้างขึ้นเพื่อ ในที่สุดจึงได้ระบบไมโครเวฟไพโรไลซิสต้นแบบซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 และระบบนี้จะถูกนำไปใช้สำหรับการทดลองในแต่ละกรณีต่อไป



รูปที่ 4.10 ระบบสุดท้ายหลังจากได้รับการปรับปรุง และเป็นระบบที่ถูกใช้เพื่อทำการทดลองต่อไป โดยมีองค์ประกอบคือ (1)ถังก๊าซไนโตรเจน (2)โรตاميเตอร์ (3)เทอร์โมคัปเปิล (4)ตัวอ่านและเก็บค่าอุณหภูมิ (5)ฝาปิดเตาไมโครเวฟ (6)ยางรองฝากันก๊าซรั่ว (7)เตาไมโครเวฟ (8)แมกนีตรอนขวามือ (9)แมกนีตรอนซ้ายมือ (10)แหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับแมกนีตรอนตัวขวามือ (11)แหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับแมกนีตรอนตัวซ้ายมือ (12)ตัวอย่างซึ่งผสมระหว่างวัสดุชีวมวลและถ่านกัมมันต์ (13)เตาปฏิกรณ์ควอทซ์ (14)วาล์ว (15)หน่วยควบแน่นก๊าซ (16)ปั๊มน้ำระบบหล่อเย็น

4.3 ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้รับความอนุเคราะห์กะลาปาล์มจาก บ.ทักษิณปาล์มน้ำมัน จำกัด อ.พุนพิน จ.สุราษฎร์ธานี โดยกะลาปาล์มถูกสับตัวอย่าง แล้วส่งไปทำการวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ม.สงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยวิธี proximate analysis และ ultimate analysis ด้วยเครื่องมือ Thermogravimetric Analyzer, TGA7, Perkin Elmer, USA และ CHNS-O Analyzer, CE Instrument Flash EA 1112 Series, Thermo Quest, Italy ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 แสดงผล Proximate analysis สำหรับกะลาปาล์ม

Sample	Weight (%)			
	Moisture	Volatile Matter	Fix Carbon	Ash
Palm shell	11.393	65.760	19.730	3.117

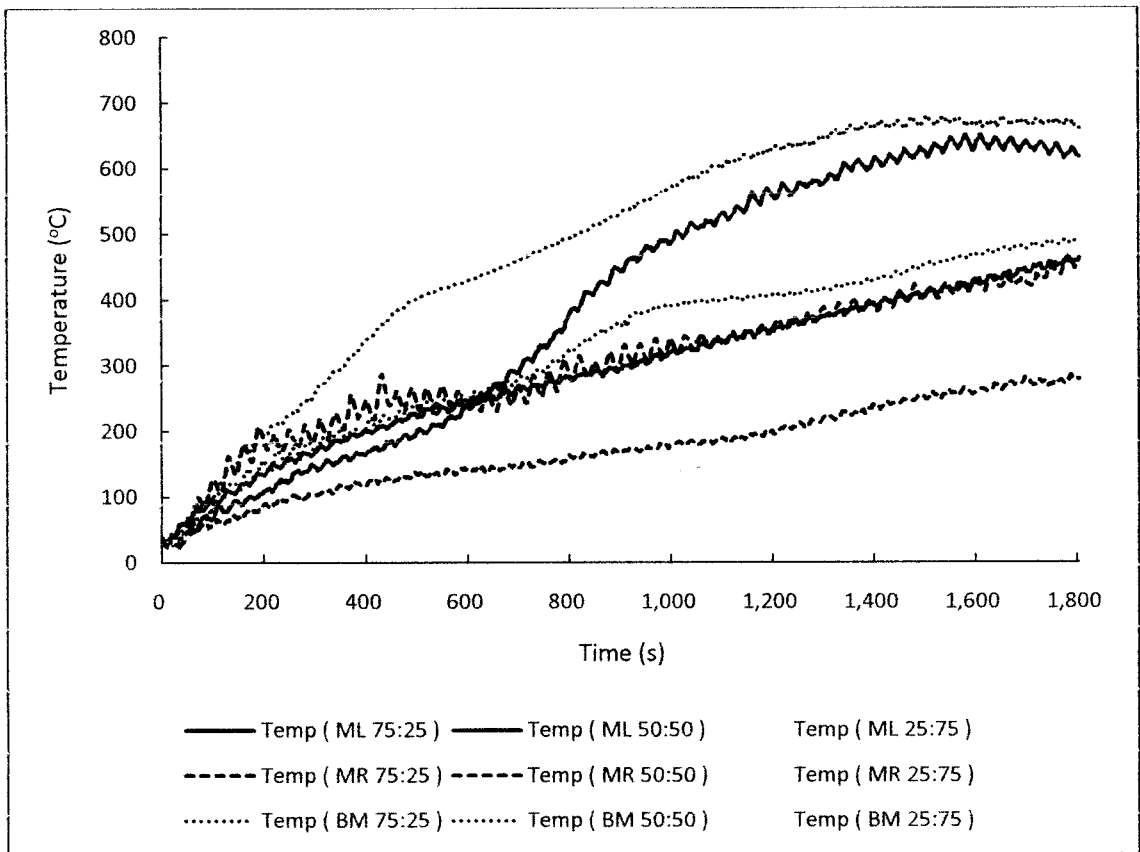
ตารางที่ 4.2. แสดงผล Ultimate analysis สำหรับกะลาปาล์ม

Sample	Parameter	Instrument/method	Unit	Result \pm SD
Palm shell	Nitrogen (N)	CHNS/O Analyzer	%	0.32 \pm 0.01
	Carbon (C)	CHNS/O Analyzer	%	45.65 \pm 0.26
	Hydrogen (H)	CHNS/O Analyzer	%	5.49 \pm 0.06
	Sulphur (S)	CHNS/O Analyzer	%	Not Detected
	Oxygen (O)	CHNS/O Analyzer	%	36.59 \pm 0.36

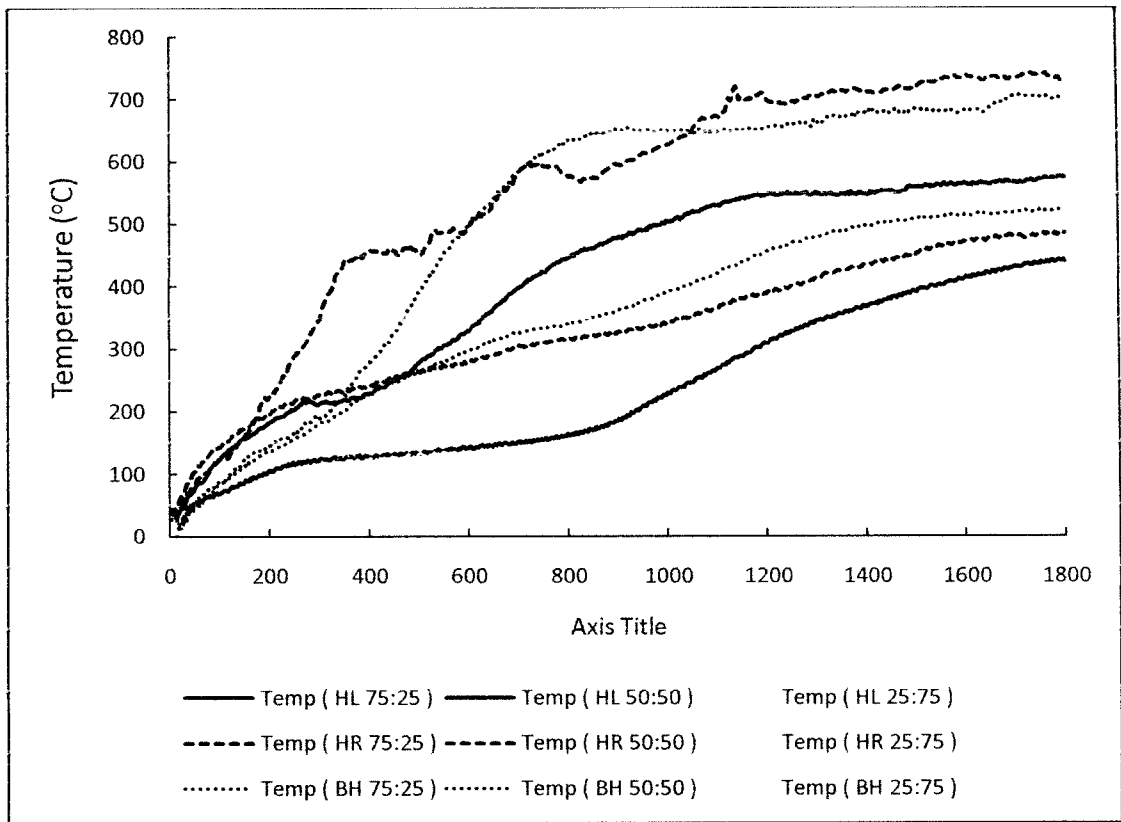
หลังจากนั้นนำกะลาปาล์มที่เหลือมาย่อยด้วยการทุบและร่อนผ่านตะแกรงให้มีขนาดประมาณ 0.5 เซนติเมตร แล้วนำไปอบลดความชื้นในตู้อบ ด้วยอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 30 นาที เพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายก่อนทำการทดลองไพโรไลซิสที่ 8.5 wt%

รูปแบบอุณหภูมิจากการทดลองเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟ 450 และ 800 วัตต์

เมื่อนำวัสดุการทดลองซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างซีมวล (กะลาปาล์ม OPS) : ถ่านกัมมันต์ (AC) ในอัตราส่วนผสม 75:25 (เส้นจุด), 50:50 (เส้นประ) และ 25:75 (เส้นทึบ) โดยทำการทดลองโดยใช้แหล่งกำเนิดพลังงานไมโครเวฟ (แมกนีตรอน) ในตำแหน่งที่ต่างกัน กล่าวคือ เปิดให้กำลังไมโครเวฟจากแมกนีตรอนตัวซ้ายมือ เปิดให้กำลังไมโครเวฟจากแมกนีตรอนตัวขวามือ และ เปิดให้กำลังไมโครเวฟจากแมกนีตรอนทั้งซ้ายมือและขวามือพร้อมกัน ด้วยกำลังสองระดับคือกำลังระดับกลาง (Medium) ที่ 450 วัตต์ หรือ ด้วยกำลังระดับสูง (High) ที่ 800 วัตต์ รูปแบบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสำหรับแต่ละกรณีสามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกรณีต่างๆเมื่อใช้แหล่งกำเนิดกำลังไมโครเวฟที่ 450 วัตต์ (เมื่อ ML = Medium power Left, MR = Medium power Right, และ BM = Both Medium power)

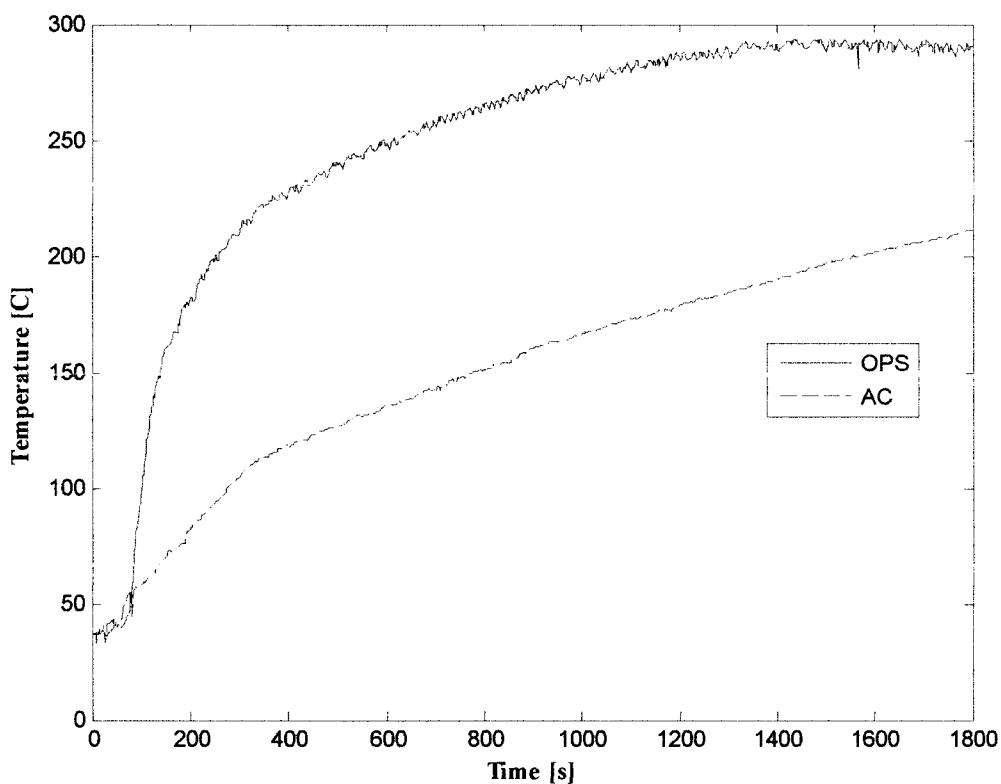


รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกรณีต่างๆเมื่อใช้แหล่งกำเนิดกำลังไมโครเวฟที่ 800 วัตต์ (เมื่อ HL = High power Left, HR = High power Right, และ BH = Both High power)

ไม่มีอะไรน่าแปลกใจสำหรับรูปแบบอุณหภูมิกล่าวคือเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟจากกำลังปานกลางไปเป็นกำลังสูงสุด และเพิ่มแหล่งจ่ายกำลังไมโครเวฟจากหนึ่งตัวเป็นสองตัวจะพบว่ารูปแบบอุณหภูมิก็น่าสนใจคือระบบที่ได้ทำการออกแบบให้สามารถใช้แหล่งจ่ายกำลังไมโครเวฟได้พร้อมกันในเวลาเดียวกันสองตัว สามารถทำให้อุณหภูมิการไพโรไลซิสสูงถึง 700 องศาเซลเซียส ซึ่งนับว่าเป็นความสำเร็จในการออกแบบเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยอุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ง่าย และราคาถูก

เมื่อพิจารณาจากรูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบอุณหภูมิตี่ 4.11 และ 4.12 พบว่าอุณหภูมิขึ้นกับตัวดูดซับพลังงานไมโครเวฟซึ่งในที่นี้คือถ่านกัมมันต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับพลังงานไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนไปเป็นความร้อนสะสมในตัวเองซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Maxwell-Wagner-Sillars หรือ MWS polarization (Kim, et al., 2014; Menéndez, et al., 2010; Meredith, et al., 1998; Zlotorzynski, 1995) เมื่อถ่านกัมมันต์เพียงอย่าง

เดียวได้รับพลังงานไมโครเวฟจะเปลี่ยนพลังงานไปเป็นความร้อนจากอุณหภูมิห้องไปเป็น 100 องศาเซลเซียสในเวลาเพียง 30 วินาที ส่วนในกรณีวัสดุชีวมวล (กะลาปาล์มน้ำมัน) เพียงอย่างเดียวเมื่อรับพลังงานจากไมโครเวฟ ความร้อนที่สะสมจะเพิ่มอุณหภูมิในช่วงแรกเนื่องจากภายในตัวของกะลาปาล์มเองมีความชื้นและสารประกอบอื่นๆที่สามารถระเหยได้ (volatile components) เป็นองค์ประกอบ แต่เมื่อองค์ประกอบเหล่านี้ระเหยออกไปแล้วทำให้อุณหภูมิของกะลาปาล์มคงที่ที่ 300 องศาเซลเซียส ไม่สามารถเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสได้ ซึ่งต้องการอุณหภูมิที่สูงถึง 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป ปรากฏการณ์ที่กล่าวมาทั้งในกรณีของการให้พลังงานไมโครเวฟต่อถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียวและต่อกะลาปาล์มเพียงอย่างเดียวแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 รูปแบบอุณหภูมิต่อเวลาสำหรับปรากฏการณ์การให้พลังงานไมโครเวฟต่อถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียว (AC) และต่อกะลาปาล์มเพียงอย่างเดียว (OPS)

ในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมีความสำคัญอย่างยิ่งคืออันตรกิริยาระหว่างไมโครเวฟและวัสดุ ซึ่งวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟไปเป็นความร้อนได้จะถูกเรียกว่าวัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric material) ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะถูกเรียกอีกอย่างในชื่อ dielectric heating ซึ่ง Atwater

et.al.(2004) ได้ทำการศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่มีพื้นที่ผิวสูง (a high surface area activated carbon) ซึ่งในการศึกษานี้คณะผู้วิจัยได้อธิบายคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในรูปแบบเชิงซ้อน (complex form, ϵ^*) ดังแสดงได้ตามสมการที่ 1

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega) \quad (1)$$

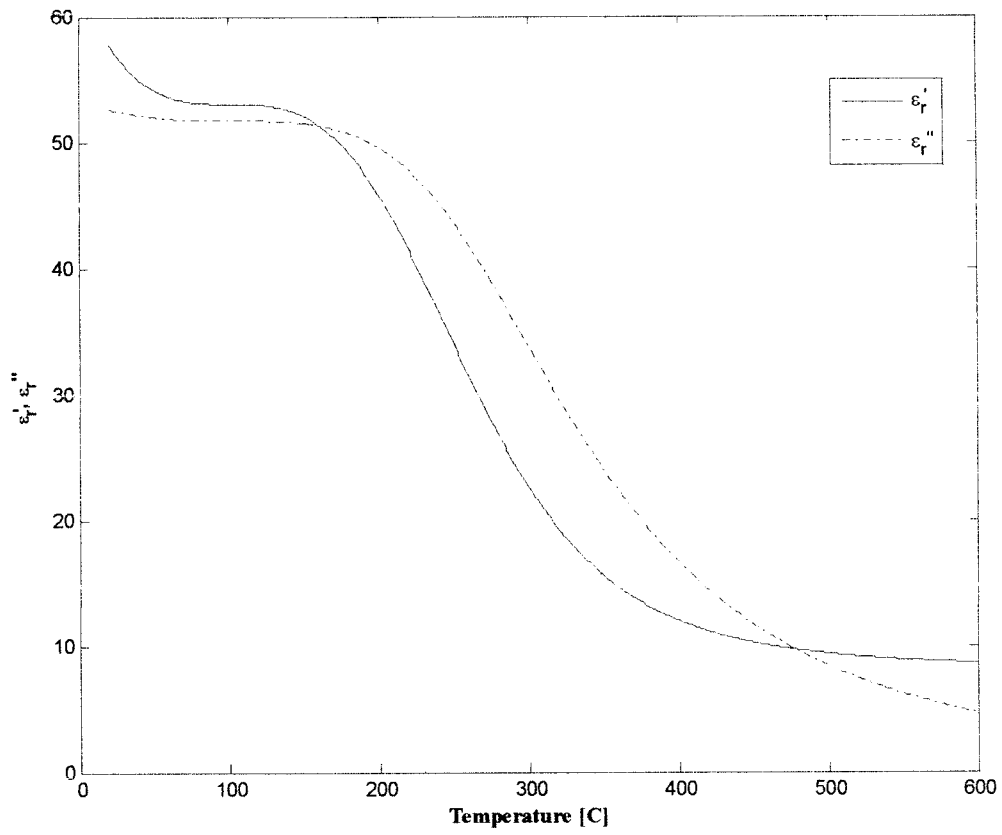
โดยที่,

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{2} \left[1 - \frac{\sinh(\beta \ln \omega \tau)}{\cosh(\beta \ln \omega \tau) + \cos\left(\frac{\beta\pi}{2}\right)} \right],$$

$$\epsilon''(\omega) = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \sin\left(\frac{\beta\pi}{2}\right)}{2 \left[\cosh(\beta \ln \omega \tau) + \cos\left(\frac{\beta\pi}{2}\right) \right]},$$

ϵ' เป็นส่วนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ'' เป็นส่วนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ω คือค่าความถี่เชิงมุม [rad/s] ($\omega = 2\pi f$; f คือความถี่ของไมโครเวฟ = 2.45 GHz), $\beta = 0.945$, $\epsilon_s = 1.097 \times 10^{-11}$, $\epsilon_\infty = 8.0$, และ τ เวลาผ่อนคลายของวัสดุซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$) โดยเขียนได้ดังสมการภายในวงเล็บ [$\times 10^{-11}$ s; $\tau = 1.48 \times 10^{-6} T^3 - 4.48 \times 10^{-4} T^2 + 0.0452 T + 6.92$] (Atwater and Wheeler, 2004). ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนี้สามารถแสดงเป็นค่าที่ไร้หน่วยได้เรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ($\epsilon_r = \epsilon^*/\epsilon_0$) ด้วยการหารด้วยค่าสภาพซึมซาบได้ของอากาศ ($\epsilon_0 = 8.84 \times 10^{-12}$ F/m).

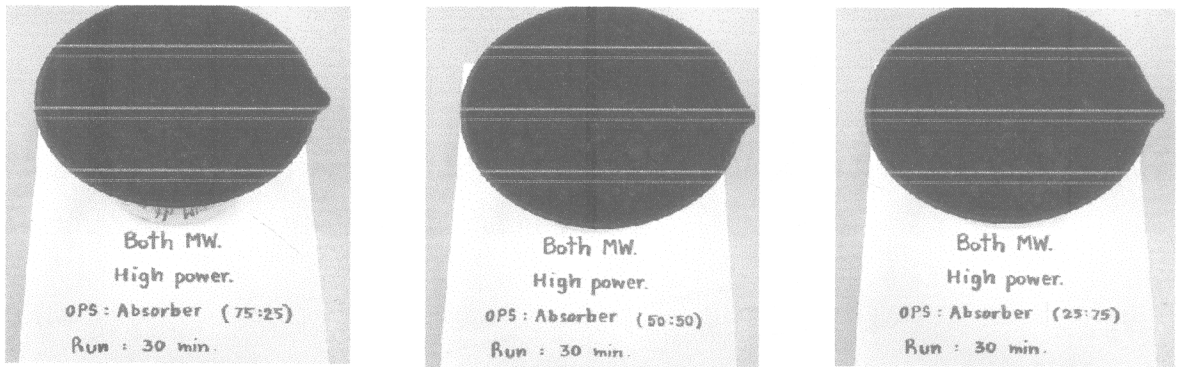
เมื่อนำตัวแปรทั้งในเทอมของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์มาทำการพล็อตกราฟร่วมกับแกนอุณหภูมิเมื่อความถี่ของไมโครเวฟคงที่ที่ 2.45 GHz ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.14 จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียสค่าของตัวแปรทั้งสองจะตกลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งหมายความว่าถ่านกัมมันต์จะสูญเสียคุณสมบัติความเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่สามารถรับพลังงานไมโครเวฟเพื่อเปลี่ยนไปเป็นความร้อนได้มากขึ้นเหมือนในช่วงอุณหภูมิต่ำ เป็นเหตุผลให้ต้องมีการผสมของวัสดุทั้งกะลาปาล์มและถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม



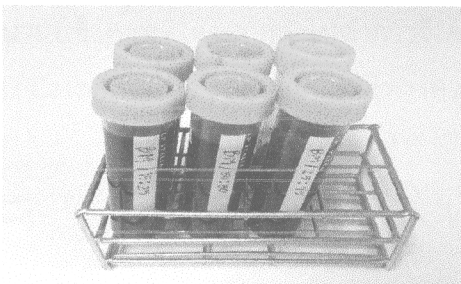
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของส่วนจริง (ϵ'') และส่วนจินตภาพ (ϵ') สำหรับตัวแปรค่าไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ของถ่านกัมมันต์ กับอุณหภูมิ เมื่อทำการพล็อตที่ความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz

4.4 ผลผลิตที่ได้อาจจากการไมโครเวฟไพโรไลซิส

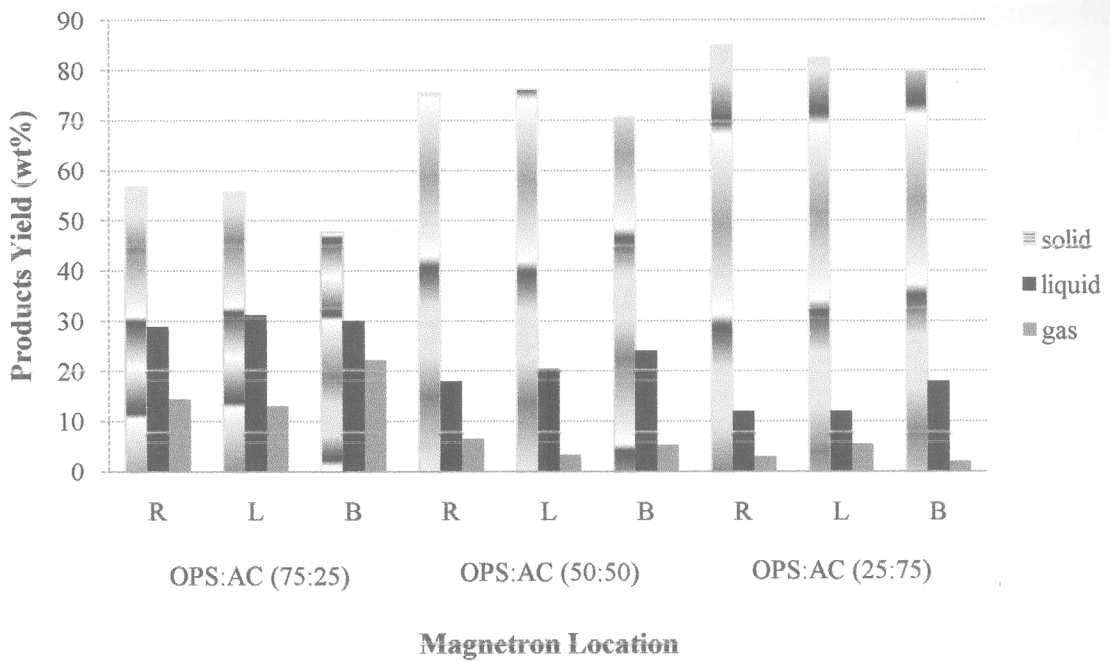
โดยตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไมโครเวฟไพโรไลซิสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งจะอยู่ในสถานะต่างๆ กล่าวคือของแข็ง หรือ เรียกว่าถ่านชีวภาพ (bio-char, 4.15 (a)) ของเหลวเรียกว่าน้ำมันชีวภาพ (bio-oil, 4.15 (b)) และ ก๊าซ (syngas) โดยจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือสร้างเครื่องต้นแบบกระบวนการไพโรไลซิสต่อครั้งด้วยไมโครเวฟ และมุ่งไปที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเป็นหลัก เมื่อทำการวิเคราะห์อัตราการผลิต (yield) ของแต่ละการทดลองสามารถแสดงการเปรียบเทียบได้ดังแผนภูมิแท่งในรูปที่ 4.16 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแล้วให้ผลของอัตราการผลิตไปในทิศทางเดียวกัน แต่การใช้แมกนีตรอนร่วมกันสองตัวในกระบวนการไพโรไลซิสจะให้แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ในรูปของเหลวและก๊าซ เมื่อทำการไพโรไลซิสร่วมกับวัสดุในอัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 ตามลำดับ เนื่องจากให้อุณหภูมิการไพโรไลซิสที่สูงถึง 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 (a) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากการไมโครเวฟไพโรไลซิสในรูปของแข็ง (bio-char)



รูปที่ 4.15 (b) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากการไมโครเวฟไพโรไลซิสในรูปของเหลว (bio-oil)



รูปที่ 4.16 แผนภูมิแท่งอัตราผลผลิตโดยน้ำหนัก โดยเปรียบเทียบการให้พลังงานไมโครเวฟจากตำแหน่งที่แตกต่างกัน รวมถึงอัตราส่วนผสมของวัสดุที่แตกต่างกัน

จากที่ได้รายงานในเบื้องต้นเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อสังเกตรด้วยตาพบว่ากรณีที่ให้กำลังไมโครเวฟสูงสุด ด้วยแมกนีตรอนสองตัวจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านในคุณภาพดี กล่าวคือมีสีดำสนิทเพราะผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ด้วยเหตุผลนี้จึงใช้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของแข็งและของเหลวในชุดการทดลองนี้เป็นตัวแทน เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ โดย ถ่านชีวภาพ และน้ำมันชีวภาพที่ได้จะถูกส่งไปทำการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางความร้อน (heating value) ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ซึ่งค่าคุณสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ทั้งสองสถานะสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์สถานะของแข็งและของเหลวที่ได้จากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส

Sample type and case	Gross heating value \pm SD	
	Calories/g	Joules/g
Bio-char	6,985.7 \pm 78.5	29,247.7 \pm 328.1
Bio-oil (75:25)	6,336.7 \pm 49.2	26,529.7 \pm 206.4
Bio-oil (50:50)	6,792.7 \pm 122.0	28,438.7 \pm 510.6
Bio-oil (25:75)	6,737.7 \pm 123.9	28,208.0 \pm 518.8

ของเหลวชีวภาพบางส่วนถูกส่งต่อไปเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันชีวภาพด้วยกระบวนการ GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectroscopy) เพื่อทำการตรวจสอบสารประกอบที่อยู่ภายใน ตารางที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสที่กำลังไมโครเวฟ 800 W

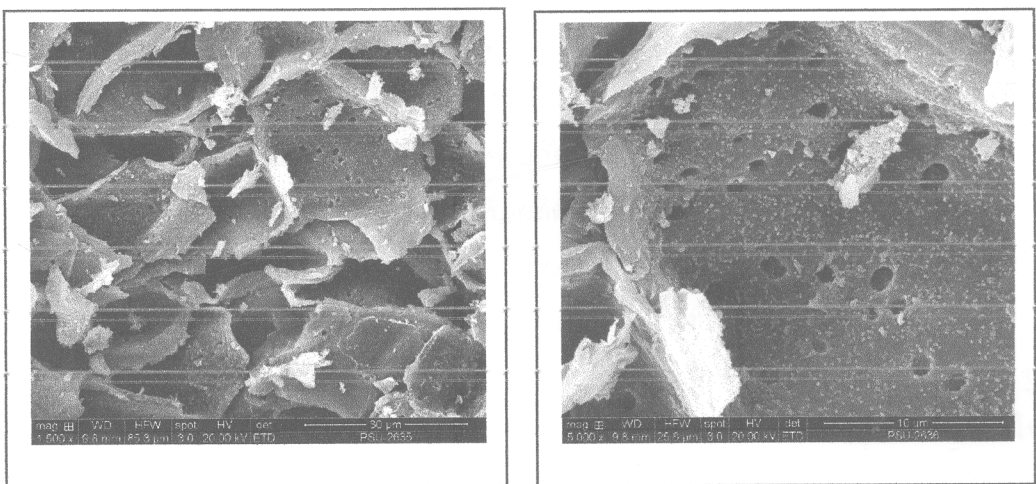
Chemical Compounds	OPS:AC, total MW power 800 W					
	75:25		50:50		25:75	
	Area%	SI*	Area%	SI*	Area%	SI*
Phenol	21.54	933	23.56	913	32.86	933
Phenol,2-methoxy	3.39	945	3.89	941	3.59	921
Phenol,3-methyl (m-Cresol)	1.11	922	2.00	935	2.61	964
Phenol,2,6-dimethoxy	2.33	862	0.59	812	1.99	865
Phenol,4-methyl (p-Cresol)	1.41	945	2.63	951	1.90	957
2-Methoxy-4-methyphenol	1.45	920	1.38	921	1.46	942

SI* = Similarity Index

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้จากวัสดุผสมในอัตราส่วนระหว่างกะลาปาล์มต่อถ่านกัมมันต์ที่ 75:25 จะให้ค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีวัสดุผสมในอัตราส่วนอื่นๆ เนื่องจากในกระบวนการนี้ใช้ความร้อนที่สูงถึง 700 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.4 กล่าวคือ เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพแล้ว พบว่าสารเคมีในกลุ่ม phenolic มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่น ที่ใช้ความร้อนต่ำกว่า โดยสารเคมีในกลุ่มนี้เป็นสารเคมีที่ใช้เป็น

เชื้อเพลิงที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิลเช่นเดียวกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสมีศักยภาพในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ ในการใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิล แต่จำเป็นต้องทำการปรับปรุงกระบวนการ และหาอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สารเคมีที่มีประโยชน์ต่อไป

ลักษณะสัณฐานพื้นผิว (surface morphology) ของผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพถูกนำไปวิเคราะห์โดยการถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งจากการพิจารณาจะพบเห็นความเป็นรูพรุนเล็กๆ (micro-pores) และโครงสร้างพื้นผิวที่ซับซ้อน ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบของถ่านชีวภาพที่เป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไพโรไลซิสที่ใช้แหล่งความร้อนแบบดั้งเดิม (Salema, et al., 2011) เนื่องจากการให้พลังงานด้วยไมโครเวฟเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heating) โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากด้านในวัสดุและส่งผ่านมายังด้านนอกของวัสดุอีกครั้ง ทำให้เกิดความสม่ำเสมอของความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง



รูปที่ 4.17 ลักษณะสัณฐานพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 1,500x (รูปซ้ายมือ) และ 5,000x (รูปขวามือ)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ระบบไมโครเวฟไพโรไลซิสแบบกระบวนการผลิตต่อครั้ง ร่วมกับโหมตกระตุ้น ถูกออกแบบ ทำการทดลอง และพบข้อจำกัดของระบบที่ทำการสร้างขึ้น จึงได้ทำการปรับปรุงแก้ไขดังที่เสนอในรายงาน จนวิธีการสุดท้ายจึงเป็นแบบที่ไม่มีโหมตกระตุ้นหรือเรียกว่าวัสดุหยุดนิ่ง (fixed bed) ซึ่งไม่เป็นปัญหาต่อกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสแต่อย่างใด เนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริกที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานไมโครเวฟเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนสามารถใช้ได้เป็นอย่างดีความร้อนจึงกระจายได้อย่างทั่วถึงภายในวัสดุทดลอง นอกจากนี้แล้วระบบถูกออกแบบให้สามารถใช้พลังงานไมโครเวฟได้สูงขึ้นโดยใช้แหล่งกำเนิดพลังงานไมโครเวฟ (แมกนีตรอน) ราคาถูกที่หาซื้อได้ทั่วไป (commercial grade) มาต่อร่วมกันสองตัว เมื่อทำการทดลองไพโรไลซิสแล้วพบว่าระบบที่ได้ทำการสร้างขึ้นมีศักยภาพในการทำความร้อนได้สูง

อัตราส่วนผสมของวัสดุทดลอง กล่าวคือวัสดุชีวมวลต่อถ่านกัมมันต์มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนผสม 75:25 50:50 และ 25:75 จะให้อุณหภูมิสูงไปหาค่าตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิที่ทำได้สูงสุดคือ 700 องศาเซลเซียส ด้วยกำลังไมโครเวฟสูงสุดที่ 800 วัตต์ และใช้แมกนีตรอนสองตัวร่วมกัน โดยที่อัตราผลผลิตในแต่ละสถานะจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิสูงจะให้อัตราผลผลิตในสถานะของเหลวและก๊าซในอัตราส่วนที่สูง น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสมีศักยภาพในการใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตสารเคมีหรือใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนฟอสซิลได้เนื่องจากมีองค์ประกอบของสารเคมีในกลุ่ม phenolic แต่อุณหภูมิในกระบวนการมีความสำคัญอย่างยิ่งในการลดหรือเพิ่มของสารเคมีในกลุ่มนี้ นอกจากนี้แล้วผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งที่ได้คือถ่านชีวภาพเมื่อนำไปวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนพบว่าให้ค่าพลังงานความร้อนออกมาในปริมาณ 29,200 จูลต่อกรัม และให้โครงสร้างพื้นฐานพื้นผิวที่ดีเนื่องจากมีรูพรุนเล็กๆ ที่สูง เหมาะกับการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงเป็นแหล่งพลังงานความร้อนหรือในอุตสาหกรรมทางด้านการกรอง การดูดซับ หรือการกระตุ้นที่ใช้ถ่านกัมมันต์ โดยใช้ถ่านชีวภาพเหล่านี้แทนได้

เอกสารอ้างอิง

- Abubakar, Z., Salema, A. A. and Ani, F. N. 2013. A new technique to pyrolyse biomass in a microwave system: Effect of stirrer speed. *Bioresource Technology*. 128, 578-585.
- Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials. 14 Feb 2011. InTech, 752.
- Antal, M. J. and Grønli, M. 2003. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production†. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 42, 1619-1640.
- Atwater, J. E. and Wheeler, R. R. 2004. Microwave permittivity and dielectric relaxation of a high surface area activated carbon. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. 79, 125-129.
- Bridgwater, A. V. and Peacocke, G. V. C. 2000. Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 4, 1-73.
- Budarin, V. L., Clark, J. H., Lanigan, B. A., Shuttleworth, P., Breeden, S. W., Wilson, A. J., Macquarrie, D. J., Milkowski, K., Jones, J., Bridgeman, T. and Ross, A. 2009. The preparation of high-grade bio-oils through the controlled, low temperature microwave activation of wheat straw. *Bioresource Technology*. 100, 6064-6068.
- Chen, M., Wang, J., Zhang, M., Chen, M., Zhu, X., Min, F. and Tan, Z. 2008. Catalytic effects of eight inorganic additives on pyrolysis of pine wood sawdust by microwave heating. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 82, 145-150.
- Dufour, A., Girods, P., Masson, E., Rogaume, Y. and Zoulalian, A. 2009. Synthesis gas production by biomass pyrolysis: Effect of reactor temperature on product distribution. *International Journal of Hydrogen Energy*. 34, 1726-1734.
- Kim, T., Lee, J. and Lee, K.-H. 2014. Microwave heating of carbon-based solid materials. *Carbon Letter*. 15, 15-24.

Menéndez, J. A., Arenillas, A., Fidalgo, B., Fernández, Y., Zubizarreta, L., Calvo, E. G. and Bermúdez, J. M. 2010. Microwave heating processes involving carbon materials. *Fuel Processing Technology*. 91, 1-8.

Meredith, R. J. and Institution of Electrical, E. 1998. *Engineers' handbook of industrial microwave heating*, Institution of Electrical Engineers, London. 19-51.

Miura, M., Kaga, H., Sakurai, A., Kakuchi, T. and Takahashi, K. 2004. Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 71, 187-199.

Office of Agricultural Economics. (3/Dec/2012). from http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=12073

Office of agricultural extension and development region 5, Songkhla. (3/Dec/2012). from <http://www.sdoae.doae.go.th/coconut.php>

Salema, A. A. and Ani, F. N. 2011. Microwave induced pyrolysis of oil palm biomass. *Bioresource Technology*. 102, 3388-3395.

Suratthani Oil Palm Research Center. (3/Dec/2012). from http://www.doa.go.th/palm/pdf/statistics_palmoil/notic1.pdf

Wang, X., Chen, H., Luo, K., Shao, J. and Yang, H. 2008. The Influence of Microwave Drying on Biomass Pyrolysis. *Energy & Fuels*. 22, 67-74.

Zhao, X., Wang, M., Liu, H., Li, L., Ma, C. and Song, Z. 2012. A microwave reactor for characterization of pyrolyzed biomass. *Bioresource Technology*. 104, 673-678.

Zhao, X., Zhang, J., Song, Z., Liu, H., Li, L. and Ma, C. 2011. Microwave pyrolysis of straw bale and energy balance analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 92, 43-49.

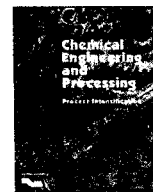
Zlotorzynski, A. 1995. The Application of Microwave Radiation to Analytical and Environmental Chemistry. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 25, 43-76.

ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

กระบวนการไมโครเวฟโพโรไลซิสมักมีศักยภาพที่สูงในการเปลี่ยนขยะชีวมวลทั้งหลายเพื่อให้เกิดประโยชน์ในด้านพลังงานทดแทนหรือเป็นสารเคมีตั้งต้น แต่สิ่งสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการคือการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการให้ได้อย่างเหมาะสม เพราะอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่จะกำหนดคุณภาพหรือคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับจากกระบวนการ ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมระบบจ่ายกำลังไมโครเวฟเพื่อให้เป็นแบบป้อนกลับ (feed back control) ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุผสมภายในเตาปฏิกรณ์ควอทซ์ แล้วทำการป้อนกลับเพื่อควบคุมกำลังงานไมโครเวฟต่อไป อีกประการคือ อัตราส่วนผสมของวัสดุทดลองที่เป็นส่วนผสมระหว่างกะลาปาล์มต่อถ่านกัมมันต์จำเป็นต้องศึกษาเพื่อหาจุดเหมาะสมในอัตราส่วนผสมที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สูงที่สุด

ภาคผนวก

บทความที่ตีพิมพ์แล้ว



Scaled-up reactor for microwave induced pyrolysis of oil palm shell



Yutthapong Pianroj^{a,*}, Saysunee Jumrat^a, Warit Werapun^a, Seppo Karrila^a,
Chakrit Tongurai^b

^a Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University Suratthani Campus, Muang, Suratthani, Thailand

^b Department of Chemical Engineering, Prince of Songkla University Hatyai Campus, Hat-Yai, Songkhla, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 November 2015

Received in revised form 6 May 2016

Accepted 9 May 2016

Available online 10 May 2016

Keywords:

Microwave induced pyrolysis

Oil palm shell

Scale-up microwave reactor

ABSTRACT

We designed and implemented bench-scale equipment for the microwave pyrolysis of biomass, and tested its effects on oil palm shell (OPS). The design uses the interference of two MW sources to increase the electric field intensity, based on model predictions by finite elements simulations. The MW pyrolysis experiments were done varying the mixture ratio of OPS and activated carbon (75:25, 50:50, or 25:75 by weight), the MW power (450 or 800 W), and the use of MW source magnetrons (left, right, or both). The pyrolysis temperature depended on the varied experimental parameters. The highest temperature and the highest yields of liquid bio-oil and gas were obtained with the 75:25 mixture treated with 800 W total power using both magnetrons. The end-products were analyzed with bomb calorimeter, GC–MS, and the solid residue with SEM. The results demonstrate that the bench-scale equipment is suited for experimental work on the pyrolysis of biomass (OPS).

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The biggest issues of the 21st century include the world's population growth and the increasing energy consumption. Some countries are less vulnerable to negative effects, but all countries can be impacted by the human energy use that also grows with the standard of living. However, the energy production dominantly relies on fossil fuels, and by the end of the 21st century the global energy use might be similar over each 10–20 year period as the total use from the dawn of civilization up to now by all of mankind [1]. We have to consider the energy reserves and alternative fuels to satisfy such energy demands. Biomass is a natural renewable alternative that could reduce the impacts of these issues, potentially by replacing some use of fossil fuels in such manner that also limits environmental impacts.

Thailand is an agriculturally strong country, with favorable climate for rapid growth of crops, in a sense a kitchen of the world that also exports food products. The raw materials come from aquaculture and agriculture, the latter products including rice, corn, sugar cane, coconut, and oil palm. Oil palm plantations have flourished in southern Thailand, and the Agricultural Research and Development Agency (Public Organization; ARDA) has reported at the end of year 2010 its palm oil production as 9,229,573 tons.

Thus, southern Thailand has much palm oil related industry producing palm oil traditionally by crushing, refining, and fractionation processes, but also in alternative ways. The crushing of fruit bunches provides crude palm oil and crude palm kernel oil, while oil palm fiber and oil palm shell (OPS) are residuals from this process. These are examples of abundant streams of biomass that are largely waste or at least low-cost, and that are renewable and reliable sources of fairly homogeneous biomass in Thailand.

The thermo-chemical process named pyrolysis takes place when oxygen is absent or at least lacking for full combustion, and can generate useful end-products including bio-char, bio-oil, and syngas. During pyrolysis the large hydrocarbon molecules decompose into smaller ones. This process can upgrade biomass to end-products that are solids, liquids and gases with higher energy densities per unit mass (high heating values). The solid bio-char can directly be used as a solid fuel, and alternatively it can be used as adsorbent activated carbon (AC) in purification applications; moreover, it can be used for soil improvement. As for the bio-oil and the gases, they can be used as fuels or refined to higher value fuels and chemicals.

Microwave (MW) heating is based on the dielectric heating of a material when subjected to microwaves. Thus, all materials do not have the appropriate dielectric properties to be good MW absorbers [2–7]. In fact, biomass tends to have poor dielectric properties, so that carbonaceous materials such as char, activated carbon, graphite, etc. are commonly mixed with biomass to make it a better MW absorber. The advantages of MW heating consist of

* Corresponding author.

E-mail addresses: yutthapong.p@psu.ac.th, yutt_r@yahoo.com (Y. Pianroj).

volumetric heating, allowing large-sized feedstock, product quality benefits from uniformity of heating, enhanced chemical activity, and time and energy savings due to high thermal efficiency [8,9]. There are several prior studies on the experimental MW pyrolysis of various materials, including Chen et al. [10] and Huang et al. [11] that pyrolysed pine wood sawdust and rice straw, respectively, both in nitrogen atmosphere, while Dominguez et al. [12] used MW to pyrolyse coffee hulls in helium atmosphere. Oil palm biomass [13,14] was pyrolysed with MW heating so that nitrogen flushing of the reactor got particular attention. A good example of MW experiments and techniques is Abubakar et al. [15], in which the inert nitrogen gas was introduced at the top of the reactor, while vapor was condensed by a condensing unit at the bottom of the reactor. This arrangement helps avoid bio-oil deposition in the experimental equipment.

However, household MW units have been used in these prior studies, although with a quartz reactor inside the cavity. This approach has some important limitations. First, it is very difficult to find a quartz reactor of such shape and size that it would well match the household MW oven. The quartz reactor then restricts that sample or batch size. Further, the maximum MW power tends to be around 800–1000 W. Finally, the electromagnetic wave pattern inside an MW cavity is typically a superposition of several standing waves or modes, as acknowledged in the terms “multi-mode MW cavity” or “multi-mode resonant cavity”. A single standing wave would give a highly inhomogeneous temperature distribution in the heated sample, while a multi-mode cavity can be designed to provide more uniform heating. In several recent studies the uniformity of temperature distribution has been pursued by using simulations during the design phase of experimental equipment [16,17].

To address these limitations of prior studies, we designed a MW cavity with waveguides from two microwave sources (magnetrons) using finite elements software to model and predict the electromagnetic fields. The expectation was that this would increase the achievable bio-mass temperatures, while adding magnetrons is the lowest cost alternative to increase microwave power. The two magnetrons used in this study were commercial grade. Another way to increase the bio-mass temperature is to increase the output power of the magnetron. The design is simpler than with two magnetrons, but the cost is higher and the options to pursue uniformity of heating remain limited: we decided in favor of two magnetrons. A one-liter commercial quartz beaker was targeted as the reactor, to be accommodated by the design. After construction of the equipment, 400 g samples of various OPS and AC mixtures were treated in the reactor. The temperature profiles during heating were monitored by type-K thermocouples, and product yields as well as bio-char and bio-oil quality were characterized. The quality parameters included chemical composition and heating value, and a SEM assessment was done for the biochar.

2. Materials and methods

2.1. Materials

In this study, the biomass used was oil palm shell (OPS) received from the Thaksin Palm Oil Mill located in Punpin, Suratthani province, Thailand. OPS samples were sent to the Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University Hatyai Campus, for proximate analysis (Thermogravimetric Analyzer, TGA7, Perkin Elmer, USA) and for ultimate analysis (CHNS-O Analyzer, CF Instrument Flash EA 1112 Series, Thermo Quest, Italy), with results shown in Tables 1 and 2. Next, the OPS was ground roughly to 0.5 cm size and then dried in an oven at 140 °C for 30 min. Its moisture content after drying was around 8.5 wt%. Because

Table 1
Proximate analysis of oil palm shell (OPS).

Sample	Weight (%)			
	Moisture	Volatile Matter	Fix Carbon	Ash
Palm shell	11.393	65.760	19.730	3.117

Table 2
Ultimate analysis of the oil palm shell (OPS) material used.

Sample	Parameter	Instrument/method	Unit	Result ± SD
Palm shell	Nitrogen (N)	CHNS/O Analyzer	%	0.32 ± 0.01
	Carbon (C)	CHNS/O Analyzer	%	45.65 ± 0.26
	Hydrogen (H)	CHNS/O Analyzer	%	5.49 ± 0.06
	Sulphur (S)	CHNS/O Analyzer	%	Not Detected
	Oxygen (O)	CHNS/O Analyzer	%	36.59 ± 0.36

biomass with low moisture content is a poor microwave absorber, commercial grade water treatment activated carbon (AC, based on coconut shell) was mixed in with the OPS [18–20]. The AC has high dielectric loss factor of about 0.35–0.83 [3] also reported as 0.22–2.95 [21]. Other advantages of AC, causing it to be selected for our experiments, include that it is a common material, inexpensive, easy to find, and easily available in various textures, sizes, and forms.

2.2. Experimental set-up

Mostly microwave induced pyrolysis has been studied with domestic microwave ovens, modified for the experiments. However, finding a quartz reactor that matches the dimensions of a domestic microwave oven is difficult, and the biomass sample sizes are severely limited. Thus, in the current study the microwave cavity was specifically designed to address these problems. It was designed to accommodate a quartz reactor with a cylindrical shape of diameter 10.7 cm, height 14.0 cm, and capacity 1.0 l. For a multimode standing wave the rectangular shape had inner dimensions 20 cm, 22 cm, and 32 cm height. The MW cavity was designed to have two microwave sources (magnetrons), and the interference of standing waves inside the cavity was used to improve MW power delivery. Thus, the two rectangular waveguides operated in TE₀₁ mode, and each had the dimensions 8 cm, 10 cm, and 4 cm height. They were placed at opposite sides of the cavity with some asymmetry [22–24], as illustrated in the schematic diagram of the MW pyrolysis system in Fig. 1. These magnetrons taken from domestic microwave ovens operated at 2450 MHz frequency and were rated for 800 W each. They were connected to an MW power supply providing a pulsed electric signal, generated by a high voltage transformer to double voltage, a high voltage capacitor, and a high voltage diode that cuts the signal. The microwave power could be selected from 180, 300, 450, and 800 W, and the timer had 1–90 min range. The temperature of the mixture was measured by a type-K OMEGA thermocouple with a junction type ungrounded probe. It offers electrical isolation of 1.5 M Ω at 500 Vdc in all diameters, so it is suitable for a harsh microwave environment. Moreover, the thermocouple was grounded to avoid arcing when the microwave was operated. This thermocouple was connected to a temperature read-out and a data logger, providing 0.5 °C accuracy.

The governing equation for the electric field (E) is shown in Eq. (1), and this was numerically solved with the Finite Element Method (FEM) software COMSOL MultiPhysics™, using the features in RF Modules/Electromagnetic Waves/Harmonic Propagation. The simulation results for the selected design are shown in

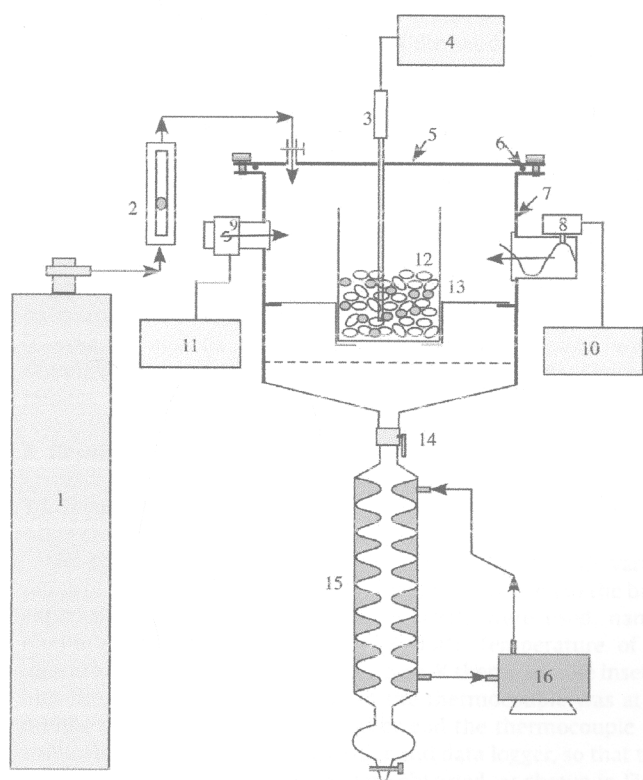


Fig. 1. Schematic diagram of the MW pyrolysis system: (1) nitrogen gas, (2) rotameter, (3) thermocouple, (4) temperature display and data logger, (5) MW cavity lid, (6) rubber lid seal, (7) MW cavity, (8) right magnetron, (9) left magnetron, (10) MW power supply for right magnetron, (11) MW power supply for left magnetron, (12) sample mixture of biomass and AC, (13) quartz reactor, (14) entrance valve, (15) condensing unit, and (16) cooling water pump.

Fig. 2. The FEM mesh for this solution had 27,371 elements and the direct (UMFPACK) linear system solver was used.

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

Here, μ_r is the relative permeability [H/m], j is the imaginary unit, σ is the conductivity [Siemen], ω is the angular frequency [rad/s], ϵ_r is the relative permittivity, and ϵ_0 is the permittivity of free space [F/m].

Then, to confirm the density of electric field inside the cavity, the integral of normalized electric field (normE_rfw) was computed inside the cavity. It is found to equal 207.63 V m^{-2} . For the cases of using only the left magnetron (only the right magnetron) at maximum power, the result was 135.05 V m^{-2} (132.50 V m^{-2}). It should be noted that this simulation focused on the standing MW pattern inside the cavity, to confirm that the design achieved its purpose. Thus, simulation including sample mixture was not of immediate interest and was not done.

2.3. Method

In this experiment, the mixture ratios of OPS to AC were set at 25:75, 50:50, and 75:25 by weight. The total weight of the mixture sample was fixed at 400 g. Before microwave exposure, 99.96% pure nitrogen gas was supplied to the cavity with a 10 LPM flow rate for around 10 min. While the microwave irradiation was on, the nitrogen gas was continuously supplied at the same flow-rate to maintain an inert atmosphere, and to prevent any possible explosion hazard. The microwave power 450 W and the irradiation time 30 min were used throughout the experiments. The designed system with two magnetrons provided the alternatives to channel the 450 W microwave power from magnetron1, magnetron2, or jointly from both of them. As volatile materials were evaporated from the sample, nitrogen was supplied from the top of the cavity to push the gases out at its bottom side. The condensing unit, made of borosilicate glass and water-cooled to 6–8 °C, was placed at the

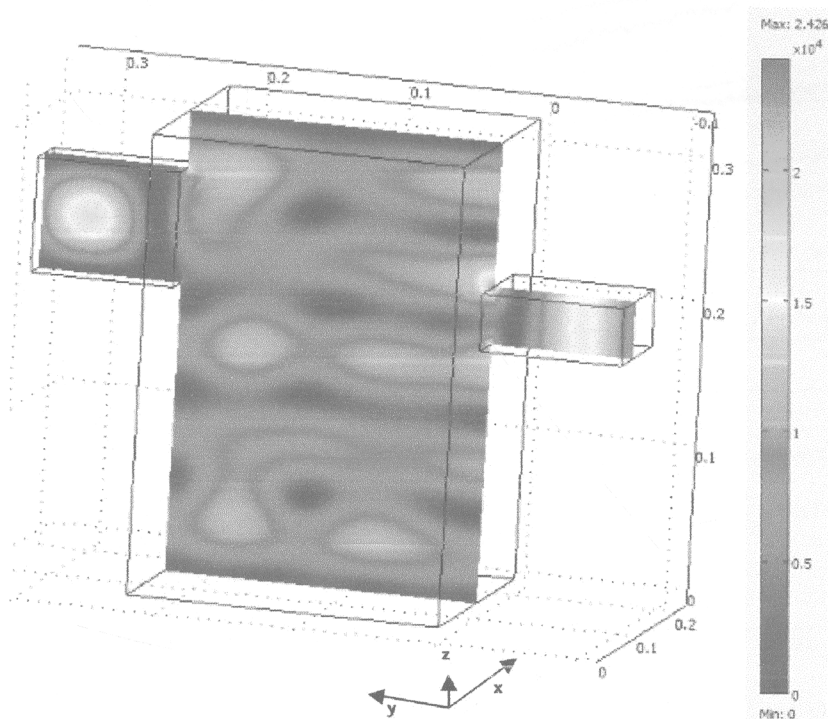


Fig. 2. The normalized electric field (V/m) patterns inside the microwave cavity.

exit to condense the vapor into bio-oil (liquid phase). At the end of each experiment, the total bio-oil and the solid char residue were weighed using a digital balance, to record the yields of these products. It should be noted that there were some losses in the gas phase; the yields might be improved by a different design. Further experiments were done by otherwise similar procedures, but the microwave power was increased to 800 W. In the collected yield the main products were bio-oil and bio-char that were characterized as follows. The bio-oil was analyzed using a Gas Chromatograph–Mass Spectrometer (GC–MS, Trance GC Ultra/ISQ MS, Thermo Scientific Inc., USA). The bio-char was analyzed for its heating value by the IKA Calorimeter System C5000 control (Germany), and its surface morphology was assessed with a Scanning Electron Microscope (SEM, Quanta400-FEI, Czech Republic).

3. Results and discussion

3.1. Temperature profiles

As described in the previous section, mixtures with various ratios of OPS to AC at the total 400 g weight were used in the batch experiments. Two microwave power levels were used, namely medium (450 W) and maximum (800 W). Temperature of the mixture sample was measured by a type-K thermocouple inserted into the MW cavity, and the tip of the thermocouple was at the middle of the sample. From its other end the thermocouple was connected to the temperature reader and data logger, so that time profiles of sample temperature were obtained, as shown in Fig. 3.

In Fig. 3, the same line style indicates similar use of the magnetrons (mixture ratio can vary). The mixture ratios OPS:AC at 75:25 (dot), 50:50 (dash), and 25:75 (line) gave comparatively high

temperatures because the AC is a good microwave absorber. As the AC in the mixture receives the MW power, it transfers this as heat immediately to the OPS by using interfacial polarization, called Maxwell-Wagner-Sillars or MWS polarization [3,25,26]. When AC alone was heated by MW, the temperature ramped up from room temperature to 100 °C in 300 s, as shown in Fig. 4. The same figure shows the case of OPS only, where the temperature increased quickly in 400 s due to initial moisture and volatile components, but then leveled off at 290 °C. Clearly a single mixture component alone (only AC or only OPS) could not reach temperatures beyond 300 °C, while pyrolysis requires temperature beyond 400 °C [13], and these were reached with the mixtures in Fig. 3. Moreover, MW irradiation causes dielectric heating which depends on the dielectric properties of the material. In the case [19], researchers studied the complex dielectric constant (ϵ^*) of a high surface area activated carbon from coconut shell. In their study, the complex dielectric constant was given as a function of the MW frequency as follows:

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega) \quad (2)$$

where,

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{2} \left[1 - \frac{\sinh(\beta \ln \omega \tau)}{\cosh(\beta \ln \omega \tau) + \cos\left(\frac{\beta \pi}{2}\right)} \right],$$

$$\epsilon''(\omega) = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \sin\left(\frac{\beta \pi}{2}\right)}{2 \left[\cosh(\beta \ln \omega \tau) + \cos\left(\frac{\beta \pi}{2}\right) \right]},$$

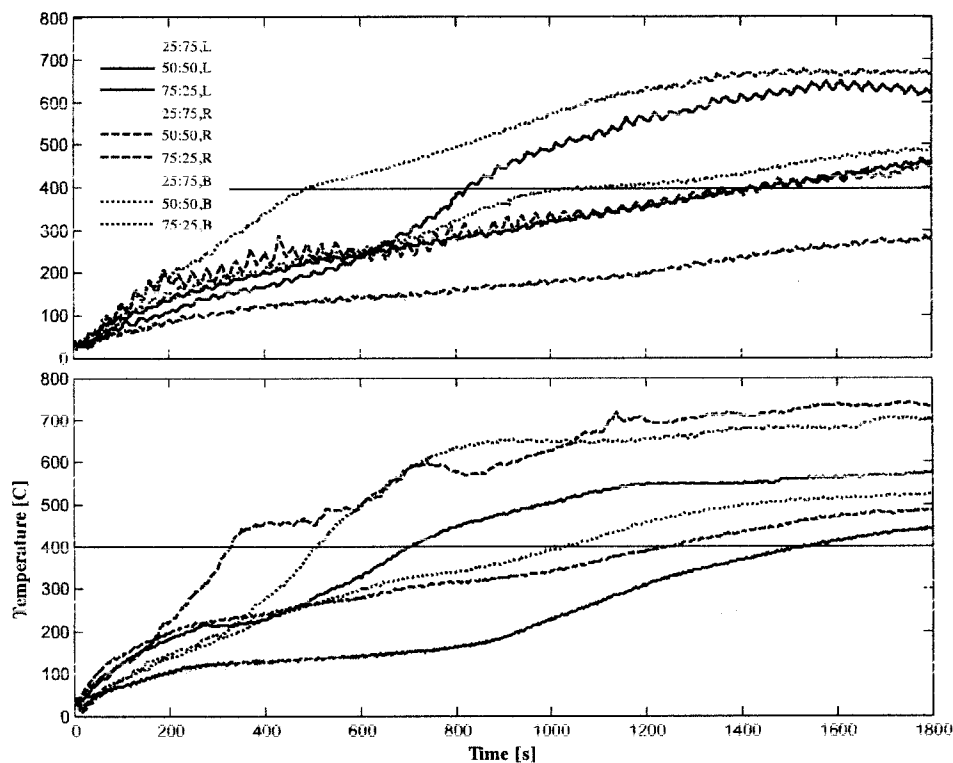


Fig. 3. Temperature profiles plotted versus microwave exposure time. The top panel is for medium microwave power (450 W) and the bottom one for the highest microwave power (800 W). The legend indicates the mass ratio OPS:AC. L is the left magnetron (magnetron1) in Fig. 1. R is the right magnetron (magnetron2) in Fig. 1, and B indicates that both magnetrons were used.

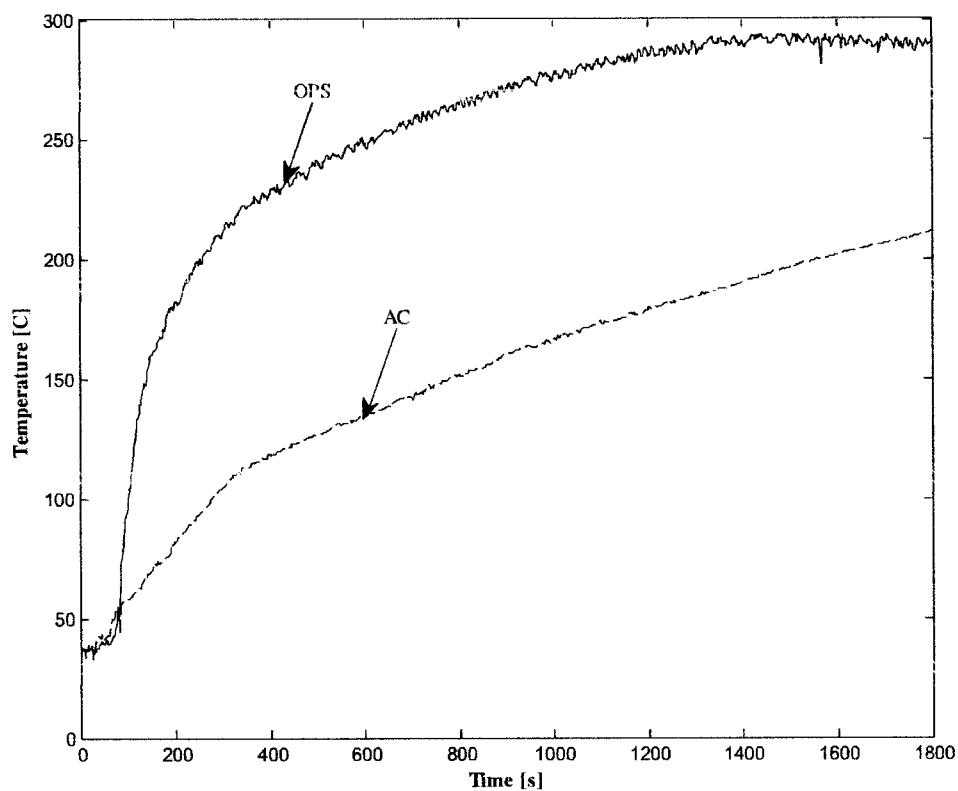


Fig. 4. Time profiles of sample temperature for OPS alone and AC alone, when heated by MW at 800W.

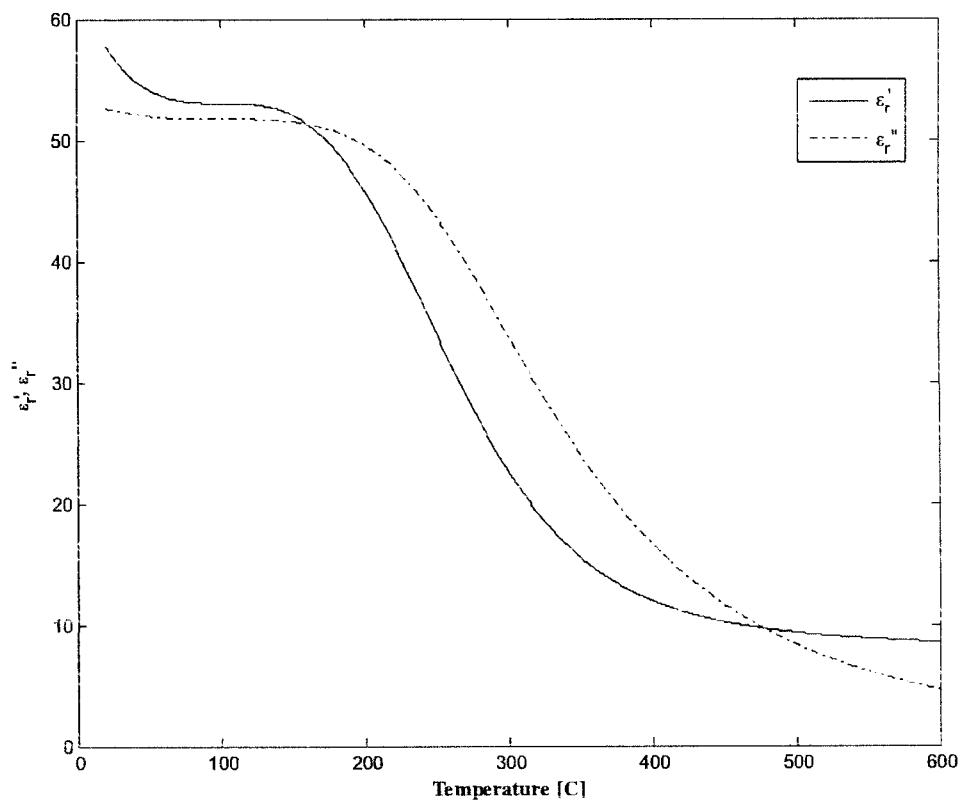


Fig. 5. The relative dielectric constant (ϵ'_1) and the relative dielectric loss factor (ϵ''_1) of active charcoal (AC) as functions of temperature, for the MW frequency 2.45 GHz.

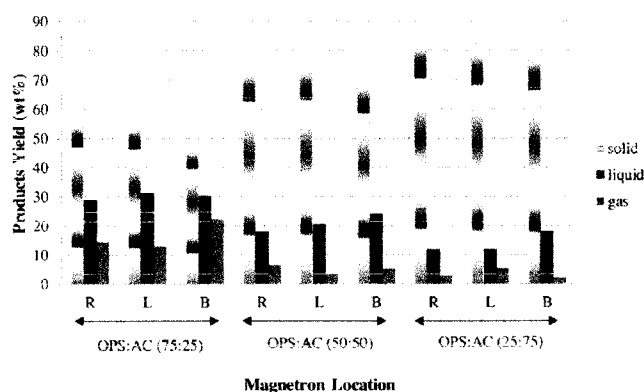


Fig. 6. The end-product yields of pyrolysis at 800 W MW power, across the various mixture ratios and magnetron configurations.

Here, ϵ' is the real part of the dielectric constant (a.k.a. dielectric constant), ϵ'' is the imaginary part of the dielectric constant (a.k.a. dielectric loss factor), ω is the angular frequency [rad/s] ($\omega = 2\pi f$; f is MW frequency = 2.45 GHz), $\beta = 0.945$, $\epsilon_s = 1.097 \times 10^{-11}$, $\epsilon_\infty = 8.0$, and τ is the relaxation time that depends on the temperature $T(^{\circ}\text{C})$ [$\times 10^{-11}$ s; $\tau = 1.48 \times 10^{-6}T^3 - 4.48 \times 10^{-4}T^2 + 0.0452T + 6.92$] [21]. The numerical values of all complex permittivities can be calculated as dimensionless relative permittivities or relative dielectric constants ($\epsilon_r = \epsilon^*/\epsilon_0$), where the complex permittivity is divided by the permittivity of free space ($\epsilon_0 = 8.84 \times 10^{-12}$ F/m). The relative dielectric constant and the relative dielectric loss factor depend not only on the MW frequency, but also on the temperature. Their values for the AC are plotted as functions of temperature with the MW frequency fixed at 2.45 GHz, in Fig. 5. Clearly, around 200 °C both relative dielectric constants decrease rapidly, indicating that the AC will lose its good MW absorption as temperature increases past this point. It is for this reason that the MW absorber AC alone cannot reach high temperatures, and since the biomass needs an added MW absorber at the lower temperatures, there is some optimal mixture ratio that needs to be determined experimentally.

In Fig. 3, the color indicates the mixture ratio (but magnetron can be Left, Right, or Both). A comparison of the top and the bottom panels shows the unsurprising effect of MW power on temperature profiles. At a fixed MW power level there was no significant

difference between the left and the right magnetron, although the magnetron mounting location could have had an effect. When using both magnetrons the temperature reached 400 °C – a requirement for pyrolysis – in all cases except one, namely the case with mixture ratio 25:75 (OPS:AC) at 450 W MW power. This was probably due to localized heating without efficient heat transfer to the OPS, as reported in prior studies [15,27]. This indicates the synergistic effect the OPS component had on absorption by the AC component: the mixtures absorbed better than either component alone. Moreover, the combination of two magnetrons gave higher temperatures in the sample than those achieved in the prior studies [13] and [15] with similar sample material.

3.2. Product yields and quality characteristics

The three main products from any pyrolysis process are the solid phase or bio-char, the liquid phase or bio-oil, and the gas phase or syngas. The goal of this study was to maximize the yield of bio-oil, although this may be specific to the run procedures and the apparatus used. In Fig. 6 the yields are shown for the three main products, across experiments run at 800 W of MW power. The use of either single magnetron gave similar results, but the use of both magnetrons gave significantly increased liquid and gas phase yields, apparently due to the comparatively high temperatures. In general, liquid and gas phases yields are higher with MW pyrolysis than with conventional pyrolysis [3]. Also, the OPS:AC mixture ratio 75:25 had the highest bio-oil yield, followed by the 50:50 and the 25:75 ratios in this order. The mixture ratio 75:25 may be near optimal, with the high absorption of MW power heating the biomass to reach temperatures up to 700 °C (see also the bottom panel of Fig. 3). Only the bio-char from this near optimal operating point was analyzed, while the bio-oils were assessed across the cases with both magnetrons. The process conditions and product distribution are compared to prior studies (Salema and Ani [13], and Abubakar et al. [15]) in Table 3. The main differences in the process configurations are in employing a stirrer, and in employing two magnetrons. The results suggest that the yield of bio-oil was significantly influenced by employing a stirrer, by the ratio of biomass to MW absorber, and by MW power.

3.2.1. Bomb calorimeter

As mentioned in the previous section, only the bio-char from the best experimental case for bio-oil production was sent to bomb calorimeter determination of the heating value. The heating value of the bio-char in this current study equals to the highest value

Table 3
A summary tabulation comparing the current study to two prior studies in terms of the process conditions and the product distribution.

Process conditions	Salema et al.	Abubakar et al.	This study
Size of OPS, its moisture content (wt%)	1–100 mm, 8–10 wt%	1.4 mm, 8.5 wt%	5 mm, 8.5 wt%
Type and size of MW absorber (MW abs)	Char from oil palm shell, 100–300 μm	Char from coconut based, 3 mm	Activated carbon from coconut shell, 1 mm
MW source (magnetron specifications)	1 magnetron, 1000W, 2.45 GHz	1 magnetron, 800W, 2.45 GHz	2 magnetrons, 800W, 2.45 GHz per magnetron
MW cavity	Multi-mode household cavity	Multi-mode household cavity	Multi-mode modified cavity
Reactor type (diameter/meter, height/meter)	Fluidized bed quartz glass (0.10, 0.15)	Quartz glass (0.10, 0.15)	Quartz (0.10, 0.14)
Exposure time	1–90 min	30 min	30 min
Blend ratio (biomass):(MW abs)	80:20, 67:33, 50:50	80:20, 67:33, 57:43	75:25, 50:50, 25:75
Total initial sample weight	–	–	400 g
N ₂ flow rate	10 LPM	7 LPM	10 LPM
Stirrer speed (rpm)	–	50, 100, 150	–
*Product distribution	Salema et al.	Abubakar et al.	This study
%Char	70	38	47
%Bio-oil	10	27	30
%Gas	20	38	23

* Specific cases representing each study were selected for comparison of the product distribution. These cases had the minimum (MW abs) in each study; blend ratio was 80:20 for Salema et al., 80:20 with stirrer speed 50 rpm for Abubakar et al.; and 75:25 using both magnetrons for the current study.

Table 4

The heating values of bio-char and bio-oil, as determined in a bomb calorimeter.

Sample type and case	Gross heating value \pm SD (Joules/g)
Bio-char	29,247.7 \pm 328.1
Bio-oil (75:25)	26,529.7 \pm 206.4
Bio-oil (50:50)	28,438.7 \pm 510.6
Bio-oil (25:75)	28,208.0 \pm 518.8

achieved in a prior study [15]. Moreover, three samples of bio-oil, for the “B”-cases in Fig. 6, were also sent to bomb calorimeter determinations with results shown in Table 4. The heating value was lowest for the bio-oil in the 75:25 case, because of the high temperatures that reached up to 700 °C. It has been found that the energy content decreases with temperature [27]. Too high temperatures are no longer suitable for pyrolysis when making valuable bio-oil, because of thermal degradation affecting some chemical compounds. This will be discussed further in the next section, in connection with the GC-MS analysis results.

3.2.2. GC-MS

The chemical compositions of the bio-oils from various mixture ratios, pyrolyzed similarly with both magnetrons used for the total 800 W MW power, were analyzed by gas chromatography (GC) and mass spectroscopy (MS) with results summarized in Table 5. It was found that these bio-oils have potential for upgrading them to value-added fuels, or to replace fossil fuel based phenols. However, with increasing pyrolysis temperature some phenolic contents decreased, as did the heating value (see previous section). The same tendency is reported in [15], which found around 400–450 °C as suitable temperatures to produce the highest peak areas representing phenol content.

Table 5
Chemical compounds in bio-oil obtained from pyrolysis of various raw material mixtures with MW power set at 800 W.

Chemical Compounds	OPS:AC, total MW power 800 W					
	75:25		50:50		25:75	
	Peak area%	SI*	Peak area%	SI*	Peak area%	SI*
Phenol	21.54	933	23.56	913	32.86	933
Phenol,2-methoxy	3.39	945	3.89	941	3.59	921
Phenol,3-methyl (m-Cresol)	1.11	922	2.00	935	2.61	964
Phenol,2,6-dimethoxy	2.33	862	0.59	812	1.99	865
Phenol,4-methyl (p-Cresol)	1.41	945	2.63	951	1.90	957
2-Methoxy-4-methylphenol	1.45	920	1.38	921	1.46	942

SI* = Similarity Index.

3.2.3. SEM

The surface morphology of bio-char was assessed by scanning electron microscopy (SEM) imaging, for the experimental case with highest liquid yield. The representative images in Fig. 7 show many micro-pores and a structure with high specific surface. This is an advantage of bio-char from MW pyrolysis when compared to bio-char from conventional pyrolysis; the latter has large deep cracks [13]. Since MW heating is volumetric and heat is generated inside the bulk material (OPS), the heating is fairly uniform. In contrast, conventional heating is based on diffusion of heat from the outer surfaces inwards, and the large temperature differences cause thermal stresses and cracking of the material.

4. Conclusions

Bench-scale microwave (MW) pyrolysis equipment with two magnetrons was designed, constructed, and tested in pyrolysis experiments of oil palm shells (OPS). The two magnetrons gave significantly higher pyrolysis temperatures when used in combination than when used singly, at the same total power level. The OPS was mixed with active charcoal (AC) in mass ratios 75:25, 50:50, and 25:75 to improve MW absorption. The temperatures achieved depended strongly on the mixture ratio, showing synergistic effects of the mixture components. The highest temperature observed was around 700 °C for the mixture ratio 75:25 with both magnetrons used at sum total 800 W power. The yields of end-products also depended on the pyrolysis parameters, probably through temperature. Higher temperatures gave higher yields of liquid and gas phases, and for select cases these products were characterized for their properties. The solid bio-char had heating value of about 29,200 J/g and its surface morphology was

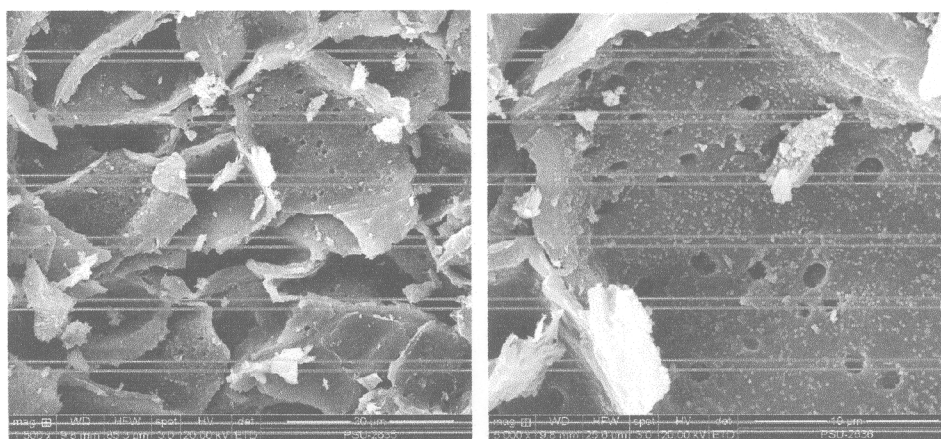


Fig. 7. Surface morphology of bio-char from MW pyrolysis, with the SEM magnification 1500 \times (left), and 5000 \times (right).

assessed from SEM images. The char surfaces had many micropores with an absence of any cracks. The bio-oils were degraded at too high pyrolysis temperatures, with loss of heating value and changes in chemical composition.

The results indicate that renewable OPS waste could be converted to various fuels by a simple pyrolysis process. Further, the difference between single and two magnetrons configurations suggests that a properly designed experimental setup will give significantly different results from those obtained with a consumer microwave oven.

Acknowledgements

This work was supported by the Research and Development Office (RDO), Prince of Songkla University (PSU) under contact number SIT70492S, and by local research funding from PSU Suratthani Campus. We thank Mr. Jirayus Jindakul and Mr. Sakkarin Pinphet for executing the experiments.

References

- [1] G.M. McCracken, P.E. Stott, *Fusion: The Energy of the Universe*, Elsevier Academic Press, Burlington, MA, 2005.
- [2] R.J. Meredith, E. Institution of Electrical Engineers, *Handbook of Industrial Microwave Heating*, Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
- [3] J.A. Menéndez, A. Arenillas, B. Fidalgo, Y. Fernández, L. Zubizarreta, E.G. Calvo, J. M. Bermúdez, Microwave heating processes involving carbon materials, *Fuel Process. Technol.* 91 (2010) 1–8.
- [4] K.E. Haque, Microwave energy for mineral treatment processes—a brief review, *Int. J. Miner. Process* 57 (1999) 1–24.
- [5] D.A. Jones, T.P. Lelyveld, S.D. Mavrofidis, S.W. Kingman, N.J. Miles, Microwave heating applications in environmental engineering—a review, *Resour. Conserv. Recy.* 34 (2002) 75–90.
- [6] A.C. Metaxas, *Foundations of Electroheat: A Unified Approach*, Wiley, 1996.
- [7] M. Mehdizadeh, *Microwave/RF Applicators and Probes for Material Heating, Sensing, and Plasma Generation: A Design Guide*, Elsevier Science, 2009.
- [8] Y. Fernandez, A. Arenillas, J.A. Menendez, *Microwave Heating Applied to Pyrolysis*, InTech, 2011.
- [9] D. Neves, H. Thunman, A. Matos, L. Tarelho, A. Gómez-Barea, Characterization and prediction of biomass pyrolysis products, *Prog. Energ. Combust.* 37 (2011) 611–630.
- [10] M. Chen, J. Wang, M. Zhang, M. Chen, X. Zhu, F. Min, Z. Tan, Catalytic effects of eight inorganic additives on pyrolysis of pine wood sawdust by microwave heating, *J. Anal. Appl. Pyrol.* 82 (2008) 145–150.
- [11] Y.F. Huang, W.H. Kuan, S.L. Lo, C.F. Lin, Total recovery of resources and energy from rice straw using microwave-induced pyrolysis, *Bioresour. Technol.* 99 (2008) 8252–8258.
- [12] A. Domínguez, J.A. Menéndez, Y. Fernández, J.J. Pis, J.M.V. Nabais, P.J.M. Carrott, M.M.L.R. Carrott, Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of a hydrogen rich fuel gas, *J. Anal. Appl. Pyrol.* 79 (2007) 128–135.
- [13] A.A. Salema, F.N. Ani, Microwave induced pyrolysis of oil palm biomass, *Bioresour. Technol.* 102 (2011) 3388–3395.
- [14] A.A. Salema, F.N. Ani, Microwave-assisted pyrolysis of oil palm shell biomass using an overhead stirrer, *J. Anal. Appl. Pyrol.* 96 (2012) 162–172.
- [15] Z. Abubakar, A.A. Salema, F.N. Ani, A new technique to pyrolyse biomass in a microwave system: effect of stirrer speed, *Bioresour. Technol.* 128 (2013) 578–585.
- [16] G.S.J. Sturm, M.D. Verweij, T. van Gerven, A.I. Stankiewicz, G.D. Stefanidis, On the effect of resonant microwave fields on temperature distribution in time and space, *Int. J. Heat. Mass Transfer* 55 (2012) 3800–3811.
- [17] D. Stefanidis Georgios, N. Muñoz Alexander, S.J. Sturm Guido, A. Stankiewicz, A helicopter view of microwave application to chemical processes: reactions, separations, and equipment concepts, *Rev. Chem. Eng.* 30 (2014) 233.
- [18] J.A. Menéndez, M. Inguanzo, J.J. Pis, Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge, *Water Res.* 36 (2002) 3261–3264.
- [19] T.J. Appleton, R.I. Colder, S.W. Kingman, I.S. Lowndes, A.G. Read, Microwave technology for energy-efficient processing of waste, *Appl. Energy* 81 (2005) 85–113.
- [20] A. Domínguez, Y. Fernández, B. Fidalgo, J.J. Pis, J.A. Menéndez, Bio-syngas production with low concentrations of CO₂ and CH₄ from microwave-induced pyrolysis of wet and dried sewage sludge, *Chemosphere* 70 (2008) 397–403.
- [21] J.E. Atwater, R.R. Wheeler, Microwave permittivity and dielectric relaxation of a high surface area activated carbon, *Appl. Phys. A Mater.* 79 (2004) 125–129.
- [22] T.V.C.T. Chan, H.C. Reader, *Understanding Microwave Heating Cavities*, Artech House, 2000.
- [23] K. Jeni, M. Yapa, P. Rattanadecho, Design and analysis of the commercialized drier processing using a combined unsymmetrical double-feed microwave and vacuum system, *Chem. Eng. Process. Process Intens.* 49 (2010) 389–395.
- [24] W. Jindarat, P. Rattanadecho, S. Vongpradubchai, Y. Pianroj, Analysis of energy consumption in drying process of non-hygroscopic porous packed bed using a combined multi-feed microwave-convective air and continuous belt system (CMCB), *Dry Technol.* 29 (2011) 926–938.
- [25] T. Kim, J. Lee, K.-H. Lee, Microwave heating of carbon-based solid materials, *Carbon Lett.* 15 (2014) 15–24.
- [26] A. Zlotorzynski, The application of microwave radiation to analytical and environmental chemistry, *Crit. Rev. Anal. Chem.* 25 (1995) 43–76.
- [27] A. Domínguez, J.A. Menéndez, Y. Fernández, J.J. Pis, J.M.V. Nabais, P.J.M. Carrott, M.M.L.R. Carrott, Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of a hydrogen rich fuel gas, *J. Anal. Appl. Pyrol.* 79 (2007) 128–135.

assessed from SEM images. The char surfaces had many micro-pores with an absence of any cracks. The bio-oils were degraded at too high pyrolysis temperatures, with loss of heating value and changes in chemical composition.

The results indicate that renewable OPS waste could be converted to various fuels by a simple pyrolysis process. Further, the difference between single and two magnetrons configurations suggests that a properly designed experimental setup will give significantly different results from those obtained with a consumer microwave oven.

Acknowledgements

This work was supported by the Research and Development Office (RDO), Prince of Songkla University (PSU) under contact number SIT70492S, and by local research funding from PSU Suratthani Campus. We thank Mr. Jirayus Jindakul and Mr. Sakkarin Pinphet for executing the experiments.

References

- [1] G.M. McCracken, P.E. Stott, *Fusion: The Energy of the Universe*, Elsevier Academic Press, Burlington, MA, 2005.
- [2] R.J. Meredith, E. Institution of Electrical Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating, Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
- [3] J.A. Menéndez, A. Arenillas, B. Fidalgo, Y. Fernández, L. Zubizarreta, E.G. Calvo, J. M. Bermúdez, Microwave heating processes involving carbon materials, *Fuel Process. Technol.* 91 (2010) 1–8.
- [4] K.E. Haque, Microwave energy for mineral treatment processes—a brief review, *Int. J. Miner. Process* 57 (1999) 1–24.
- [5] D.A. Jones, T.P. Lelyveld, S.D. Mavrofidis, S.W. Kingman, N.J. Miles, Microwave heating applications in environmental engineering—a review, *Resour. Conserv. Recy.* 34 (2002) 75–90.
- [6] A.C. Metaxas, *Foundations of Electroheat: A Unified Approach*, Wiley, 1996.
- [7] M. Mehdizadeh, *Microwave/RF Applicators and Probes for Material Heating, Sensing, and Plasma Generation: A Design Guide*, Elsevier Science, 2009.
- [8] Y. Fernandez, A. Arenillas, J.A. Menendez, *Microwave Heating Applied to Pyrolysis*, InTech, 2011.
- [9] D. Neves, H. Thunman, A. Matos, L. Tarelho, A. Gómez-Barea, Characterization and prediction of biomass pyrolysis products, *Prog. Energ. Combust.* 37 (2011) 611–630.
- [10] M. Chen, J. Wang, M. Zhang, M. Chen, X. Zhu, F. Min, Z. Tan, Catalytic effects of eight inorganic additives on pyrolysis of pine wood sawdust by microwave heating, *J. Anal. Appl. Pyrol.* 82 (2008) 145–150.
- [11] Y.F. Huang, W.H. Kuan, S.L. Lo, C.F. Lin, Total recovery of resources and energy from rice straw using microwave-induced pyrolysis, *Bioresour. Technol.* 99 (2008) 8252–8258.
- [12] A. Domínguez, J.A. Menéndez, Y. Fernández, J.J. Pis, J.M.V. Nabais, P.J.M. Carrott, M.M.L.R. Carrott, Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of a hydrogen rich fuel gas, *J. Anal. Appl. Pyrol.* 79 (2007) 128–135.
- [13] A.A. Salema, F.N. Ani, Microwave induced pyrolysis of oil palm biomass, *Bioresour. Technol.* 102 (2011) 3388–3395.
- [14] A.A. Salema, F.N. Ani, Microwave-assisted pyrolysis of oil palm shell biomass using an overhead stirrer, *J. Anal. Appl. Pyrol.* 96 (2012) 162–172.
- [15] Z. Abubakar, A.A. Salema, F.N. Ani, A new technique to pyrolyse biomass in a microwave system: effect of stirrer speed, *Bioresour. Technol.* 128 (2013) 578–585.
- [16] G.S.J. Sturm, M.D. Verweij, T. van Gerven, A.I. Stankiewicz, G.D. Stefanidis, On the effect of resonant microwave fields on temperature distribution in time and space, *Int. J. Heat. Mass Transfer* 55 (2012) 3800–3811.
- [17] D. Stefanidis Georgios, N. Muñoz Alexander, S.J. Sturm Guido, A. Stankiewicz, A helicopter view of microwave application to chemical processes: reactions, separations, and equipment concepts, *Rev. Chem. Eng.* 30 (2014) 233.
- [18] J.A. Menéndez, M. Inguanzo, J.J. Pis, Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge, *Water Res.* 36 (2002) 3261–3264.
- [19] T.J. Appleton, R.I. Colder, S.W. Kingman, I.S. Lowndes, A.G. Read, Microwave technology for energy-efficient processing of waste, *Appl. Energy* 81 (2005) 85–113.
- [20] A. Domínguez, Y. Fernández, B. Fidalgo, J.J. Pis, J.A. Menéndez, Bio-syngas production with low concentrations of CO₂ and CH₄ from microwave-induced pyrolysis of wet and dried sewage sludge, *Chemosphere* 70 (2008) 397–403.
- [21] J.E. Atwater, R.R. Wheeler, Microwave permittivity and dielectric relaxation of a high surface area activated carbon, *Appl. Phys. A Mater.* 79 (2004) 125–129.
- [22] T.V.C.T. Chan, H.C. Reader, *Understanding Microwave Heating Cavities*, Artech House, 2000.
- [23] K. Jeni, M. Yapa, P. Rattanadecho, Design and analysis of the commercialized drier processing using a combined unsymmetrical double-feed microwave and vacuum system, *Chem. Eng. Process. Process Intens.* 49 (2010) 389–395.
- [24] W. Jindarat, P. Rattanadecho, S. Vongpradubchai, Y. Pianroj, Analysis of energy consumption in drying process of non-hygroscopic porous packed bed using a combined multi-feed microwave-convective air and continuous belt system (CMCB), *Dry Technol.* 29 (2011) 926–938.
- [25] T. Kim, J. Lee, K.-H. Lee, Microwave heating of carbon-based solid materials, *Carbon Lett.* 15 (2014) 15–24.
- [26] A. Zlotorzynski, The application of microwave radiation to analytical and environmental chemistry, *Crit. Rev. Anal. Chem.* 25 (1995) 43–76.
- [27] A. Domínguez, J.A. Menéndez, Y. Fernández, J.J. Pis, J.M.V. Nabais, P.J.M. Carrott, M.M.L.R. Carrott, Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of a hydrogen rich fuel gas, *J. Anal. Appl. Pyrol.* 79 (2007) 128–135.