



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การแปรรูปทางความร้อนเหนียวนำด้วยไมโครเวฟของวัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โพลีเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้า

โดย

รศ.ดร.ดวงดาว อัจจงค์ และคณะ

พฤษภาคม 2552

โครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การแปรสภาพทางความร้อนเหนียวนำด้วยไมโครเวฟของวัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวไนลแอซีเตตโคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้า

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. รศ.ดร.ดวงดาว อัจจงค์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. อ.ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. นายคณิต สูงประสิทธิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชุดโครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

รายงานสำหรับผู้บริหาร (Executive summary)

ชื่อโครงการ การแปรรูปทางความร้อนเหนียวนำด้วยไมโครเวฟของวัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิล
แอซีเตตโคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้า
Microwave-induced Thermal Conversion of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer/
Natural Rubber Composite from Shoe Sole Scrap

ชื่อหัวหน้าโครงการ

ชื่อ-สกุล รศ.ดร.ดวงดาว อางองค์

หน่วยงาน ภาควิชาวัสดุศาสตร์

ที่อยู่ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน
กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์.....0-2218-5559..... E-mail addressduangdao.a@chula.ac.th

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-สกุล ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล

หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ที่อยู่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน
กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์.....02-218-6689..... E-mail addressviboon.sr@chula.ac.th

นักศึกษาผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-สกุล นายคณิต สูงประสิทธิ์

หน่วยงาน ภาควิชาวัสดุศาสตร์

ที่อยู่ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน
กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์.....-..... E-mail addressKapanda_soong@hotmail.com

ระยะเวลาดำเนินการ.....20.....เดือน ตั้งแต่วันที่.....11 ตุลาคม 2550.....ถึงวันที่.....31 พฤษภาคม 2552

ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญ

งานวิจัยนี้ดำเนินการแปรสภาพเศษวัสดุเหลือทิ้งคือเศษยางพั่นรองทำให้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง โดยกระบวนการไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชันภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยอาศัยความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อนของวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์มาใช้ในการไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชันวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำซึ่งไม่สามารถทำให้ร้อนได้โดยคลื่นไมโครเวฟคือ เศษยางพั่นรองเท้าแตะที่อยู่ในรูปวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติและเอทิลีนไวนิลแอลซีเตตโคพอลิเมอร์ เพื่อเป็นการลดขยะที่เหลือจากอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์ในด้านของพลังงาน ลดมลภาวะแวดล้อม และต้นทุนในการจัดเก็บขยะ รวมทั้งเป็นระบบที่สามารถพัฒนาไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ในทุกขนาด

วัตถุประสงค์

เพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเศษยางพั่นรองเท้าแตะโดยใช้กระบวนการสลายตัวทางความร้อนด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ไพโรไลซิส” และภายใต้บรรยากาศที่จำกัดก๊าซออกซิเจนที่เรียกว่า “แก๊สซิฟิเคชัน”

ผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน และธาตุองค์ประกอบของเศษยางพั่นรองเท้า เอทิลีนไวนิลแอลซีเตตโคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติ (EVA/NR) พบว่า EVA/NR มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 57.6 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่า 500 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ EVA/NR เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์

ในส่วนของการแปรสภาพทางความร้อนนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบระบบการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ 2 ระบบ ได้แก่เตาปฏิกรณ์ระบบไมโครเวฟ และเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า โดยทำการศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพทางความร้อนโดยการเหนี่ยวนำไมโครเวฟ ณ กำลังของไมโครเวฟ ก๊าซพา และสัดส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ที่แตกต่างกัน ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์มีค่าสูงขึ้นเมื่อกำลังของไมโครเวฟมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออัตราส่วนระหว่างก๊าซพา Ar:O₂ เท่ากับ 99:1 หรือภายใต้สภาวะการเกิดแก๊สซิฟิเคชันสามารถผลิตก๊าซได้ในปริมาณที่สูงกว่าที่อัตราส่วน Ar:O₂ เท่ากับ 100:0 หรือภายใต้สภาวะการเกิดไพโรไลซิส อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ชนิดของก๊าซที่เกิดขึ้นพบว่าการแปรสภาพทางความร้อนจากทั้งสองสภาวะสามารถผลิตก๊าซได้คล้ายคลึงกัน อาทิ H₂, CO₂, CH₄, และ ก๊าซไฮโดรคาร์บอน แต่ในปริมาณที่ต่างกันโดยปริมาณของก๊าซแต่ละชนิดนั้นพบว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณของก๊าซที่ผลิตได้นั้นคือมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อกำลังของไมโครเวฟและปริมาณของออกซิเจน

ในระบบมีค่าที่สูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันพบว่าผลของอัตราส่วนระหว่าง SiC : EVA/NR นั้นยังไม่ใช่ที่ชัดเจนนักเนื่องจากข้อจำกัดของตัวกำเนิดคลื่นการให้ความร้อนโดยไม่โครเวฟที่ยังไม่มีความสม่ำเสมอ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าพบว่าเตาปฏิกรณ์ระบบไมโครเวฟสามารถผลิตก๊าซได้ในปริมาณที่มากกว่า โดยเฉพาะปริมาณของ H_2 , CO_2 , และ CH_4 นั้นพบว่ามีค่าที่มากกว่าอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วน Ar: O_2 99:1 ที่มีการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันขึ้น ทั้งนี้คาดว่าเนื่องมาจากการที่ระบบไมโครเวฟนั้นมีความเหมาะสมหรือช่วยให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันได้ดีกว่านั่นเอง

สรุปผลการวิจัย

1. EVA/NR ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 57.6 และสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 °C ซึ่งมีความเหมาะสมที่นำมาผลิตเป็นก๊าซเชื้อเพลิง
2. เมื่อกำลังของไมโครเวฟและสัดส่วนของก๊าซออกซิเจนมีค่าที่สูงมากขึ้นสามารถผลิตก๊าซ H_2 , CO_2 , CH_4 , และ ไฮโดรคาร์บอน ได้ในปริมาณที่สูงขึ้น
3. เตาปฏิกรณ์ระบบไมโครเวฟมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซได้ดีกว่าเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนที่อัตราส่วนระหว่าง Ar: O_2 เท่ากับ 99:1 ทั้งนี้คาดว่าเนื่องมาจากการที่ระบบไมโครเวฟนั้นมีความเหมาะสมหรือช่วยให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันได้ดีกว่า
4. ผลของอัตราส่วนของ SiC : EVA/NR นั้นพบว่ายังไม่ใช่ที่ชัดเจนนักเนื่องจากข้อจำกัดของตัวกำเนิดคลื่นการให้ความร้อนโดยไม่โครเวฟที่ยังไม่มีความสม่ำเสมอ

ข้อเสนอแนะ

1. เตาไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองควรเป็นระบบที่ให้คลื่นแบบ multimode ซึ่งสามารถผลิตคลื่นไมโครเวฟที่มีความสม่ำเสมอได้ดีกว่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นแบบ single mode
2. ควรออกแบบให้ระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟสามารถวัดอุณหภูมิได้ง่ายและถูกต้องมากขึ้นซึ่งคณะผู้วิจัยแนะนำให้วัดอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ด้วยไพโรมิเตอร์
3. ควรทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งในรูปของแข็ง และของเหลว เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

1. บทความในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่มีค่า impact factor และ/หรือที่อยู่ในฐานข้อมูล

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	ก
สารบัญรูป.....	ข
สารบัญตาราง.....	จ
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	1
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	2
บทที่ 1 บทนำ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (EVA).....	5
2.2 หลักการทั่วไปเกี่ยวกับการให้ความร้อนโดยการใช้ไมโครเวฟ.....	6
2.3 กระบวนการเคมีเชิงความร้อน (Thermochemical process).....	10
2.4 การแปรสภาพทางความร้อนด้วยไมโครเวฟ.....	14
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	16
3.1 วัสดุ.....	16
3.2 เครื่องมือ.....	16
3.3 เครื่องทดสอบ.....	18
3.4 วิธีการทดลอง.....	20
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....	26
4.1 การออกแบบระบบเตาปฏิกรณ์.....	26
4.2 การสอบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้วัดก๊าซ (Gas Chromatography).....	28
กับก๊าซมาตรฐาน	
4.3 ธาตุองค์ประกอบ และสมบัติทางความร้อนของ EVA/NR.....	29
4.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพทางความร้อน.....	31
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน.....	53
บรรณานุกรม.....	55

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเอทิลีนไวนิลแอซีเตตโคพอลิเมอร์.....	5
รูปที่ 2.2 ช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการทำงาน.....	6
รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบการให้ความร้อนโดยการใช้ไมโครเวฟ และอ่างน้ำมัน	7
รูปที่ 2.4 แสดงกลไกการเกิดความร้อนโดยไมโครเวฟ จากการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอน..... และ การเหนี่ยวนำไดโพล	8
รูปที่ 2.5 การตอบสนองของวัสดุต่อไมโครเวฟ A: ทะลุผ่าน, B สะท้อนกลับ, C..... และD: ดูดซับ (after Sutton, 1989)	9
รูปที่ 2.6 การแก๊สซิฟิเคชันรูปแบบต่างๆ.....	12
รูปที่ 3.1 เครื่อง Gas Chromatography; Varian CP-3800.....	18
รูปที่ 3.2 TGA ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น รุ่น TGA/SDTA 851.....	19
รูปที่ 3.3 Elemental analyzer ยี่ห้อ FISON รุ่น NA-2000.....	19
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลองโดยรวมในงานวิจัยนี้.....	20
รูปที่ 3.5 เครื่องบด MING LEE STONG CRUSHER.....	22
รูปที่ 3.6 การผสมเศษยางพื้นรองเท้า (EVA/NR) ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC)..... และเส้นใยควอตซ์ (quartz wool) ในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์	22
รูปที่ 3.7 ระบบการแปรสภาพทางความร้อนโดยการเหนี่ยวนำไมโครเวฟ.....	23
รูปที่ 3.8 ระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า.....	24
รูปที่ 4.1 แสดงการไหลของก๊าซอาร์กอน และแอริซีโร ผ่าน Mass flow controller.....	26
รูปที่ 4.2 แสดงการดัดแปลงเครื่องไมโครเวฟ.....	27
รูปที่ 4.3 แสดงเตาไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง.....	28
รูปที่ 4.4 แสดงช่วงเวลาและการตอบสนองของ Hydrocarbon.....	29
รูปที่ 4.5 การสลายตัวทางความร้อนของ EVA/NR ภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน.....	31
รูปที่ 4.6 การสลายตัวของ EVA/NR โดยการกำจัดกรดแอซิดิก และเกิดเป็นพันธะคู่.....	31
รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วน Ar: O ₂ ในก๊าซพา 100:0..... อัตราส่วน EVA/NR: SiC 1:1	35
รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วน Ar: O ₂ ในก๊าซพา 99:1..... อัตราส่วน EVA/NR:SiC 1:1	35

หน้า

รูปที่ 4.9 การตอบสนองต่อไฮโดรคาร์บอนที่อัตราส่วน EVA/NR: SiC 1:1.....	39
ระหว่างอัตราส่วน Ar:O ₂ ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO ₂)	
รูปที่ 4.10 การตอบสนองต่อไฮโดรคาร์บอนของเครื่อง Gas Chromatography.....	39
อัตราส่วน Ar:O ₂ ในก๊าซพา 100:0 อัตราส่วนระหว่าง EVA/NR: SiC 1:1	
รูปที่ 4.11 การตอบสนองต่อไฮโดรคาร์บอนของเครื่อง Gas Chromatography.....	40
อัตราส่วน Ar:O ₂ ในก๊าซพา 99:1 อัตราส่วนระหว่าง EVA/NR: SiC 1:1	
รูปที่ 4.12 การแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่.....	41
อัตราส่วนระหว่าง Ar:O ₂ 100:0	
รูปที่ 4.13 การแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่.....	41
อัตราส่วนระหว่าง Ar:O ₂ 99:1	
รูปที่ 4.14 การตอบสนองต่อไฮโดรคาร์บอนของเครื่อง Gas Chromatography.....	41
อัตราส่วน Ar:O ₂ ในก๊าซพา 100:0	
รูปที่ 4.15 การตอบสนองต่อไฮโดรคาร์บอนของเครื่อง Gas Chromatography.....	42
อัตราส่วน Ar:O ₂ ในก๊าซพา 99:1	
รูปที่ 4.16 น้ำหนักของก๊าซไฮโดรเจนที่กำลังของไมโครเวฟต่างๆระหว่าง.....	43
อัตราส่วน Ar:O ₂ ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO ₂)	
รูปที่ 4.17 น้ำหนักของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่กำลังของไมโครเวฟต่างๆระหว่าง.....	43
อัตราส่วน Ar:O ₂ ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO ₂)	
รูปที่ 4.18 น้ำหนักของก๊าซมีเทนที่กำลังของไมโครเวฟต่างๆระหว่างอัตราส่วน Ar:O ₂	44
ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO ₂)	
รูปที่ 4.19 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่กำลังของไมโครเวฟ 110, 330, และ 550 วัตต์	46
รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้า.....	47
(a) และไมโครเวฟ (b) จากผลการศึกษาของ A. Domínguez และคณะ	
รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งระบบการให้ความร้อนโดยไม่โครเวฟ.....	48
และเตาไฟฟ้าที่อัตราส่วน Ar:O ₂ 100:0	
รูปที่ 4.22 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งระบบการให้ความร้อนโดยไม่โครเวฟ.....	48
และเตาไฟฟ้าที่อัตราส่วน Ar:O ₂ 99:1	
รูปที่ 4.23 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการแปรสภาพทางความร้อนที่.....	49
อัตราส่วน EVA/NR:SiC 2:1 ที่อัตราส่วน Ar:O ₂ 100:0	

หน้า

รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการแปรสภาพทางความร้อนที่อัตราส่วน EVA/NR:SiC 2:1 ที่อัตราส่วน Ar:O ₂ 99:1	50
รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการแปรสภาพทางความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า เปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วน Ar:O ₂ 100:0 และ 99:1	50
รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และก๊าซที่อัตราส่วน EVA/NR :SiC เท่ากับ (a) 1:1 และ (b) 2:1 ภายใต้อัตราส่วนระหว่าง Ar:O ₂ 100:0	51
รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และก๊าซที่อัตราส่วน EVA/NR :SiC เท่ากับ (a) 1:1 และ (b) 2:1 ภายใต้อัตราส่วนระหว่าง Ar:O ₂ 99:1	52

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนของก๊าซที่มีในถังก๊าซมาตรฐาน.....	17
ตารางที่ 4.1 แสดงความเข้มข้นโดยปริมาตร และพื้นที่ใต้กราฟของ C ₁ -C ₂ , C ₃ , C ₄ , และ C ₅	29
ตารางที่ 4.2 วัตถุประสงค์ประกอบของ EVA/NR.....	30
ตารางที่ 4.3 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ (% โดยน้ำหนัก) ที่อัตราส่วน ระหว่าง Ar:O ₂ เท่ากับ 100:0 ทั้งระบบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ และการใช้เตาไฟฟ้า.....	32
ตารางที่ 4.4 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ (% โดยน้ำหนัก) ที่..... อัตราส่วนระหว่าง Ar:O ₂ เท่ากับ 99:1 ทั้งระบบการให้ความร้อนโดยใช้ ไมโครเวฟ และการใช้เตาไฟฟ้า.....	33
ตารางที่ 4.5 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลสเศษหนังเทียมโดย O. Yilmaz และคณะ [13].....	33
ตารางที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งการให้ ความร้อนแบบใช้เตาไฟฟ้า และการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟของ สไลด์น้ำเสียโดย A. Domínguez และคณะ.....	34
ตารางที่ 4.7 ปริมาณของก๊าซ H ₂ (× 10 ⁻⁴ กรัม) ที่อัตราส่วนของ EVA/SiC 1:1.....	37
ตารางที่ 4.8 ปริมาณของก๊าซ CO ₂ (× 10 ⁻⁴ กรัม) ที่อัตราส่วนของ EVA/SiC 1:1.....	37
ตารางที่ 4.9 ปริมาณของ H ₂ , CO ₂ , และ CH ₄ จากการแปรสภาพทางความร้อนของ สไลด์น้ำเสียโดยการใช้ระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟที่อุณหภูมิต่างกัน จากงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะ.....	38
ตารางที่ 4.10 ร้อยละโดยปริมาตรของ H ₂ , CO ₂ , และ CH ₄ จากการแปรสภาพ ทางความร้อนสไลด์ของน้ำเสียโดยการใช้ระบบการให้ความร้อน โดยเตาไฟฟ้าอุณหภูมิต่างกัน จากงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะ.....	38
ตารางที่ 4.11 ปริมาณของก๊าซ CH ₄ (× 10 ⁻⁴ กรัม) ที่อัตราส่วนของ EVA/SiC 1:1.....	45
ตารางที่ 4.12 ปริมาตรของ H ₂ , CO ₂ , และ CH ₄ เปรียบเทียบระหว่างระบบการ ให้ความร้อนโดยไมโครเวฟและเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิเดียวกัน จากงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะ.....	45

ตารางที่ 4.13 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ จากการ.....	50
แปรสภาพทางความร้อนจากระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้าที่ 700 °C	

บทคัดย่อ

การไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชันของพอลิเมอร์เชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้าได้รับการแปรสภาพให้กลายเป็นเชื้อเพลิงโดยอาศัยความร้อนที่ได้จากการเหนี่ยวนำไมโครเวฟโดยใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นตัวช่วยในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อนโดยทำการเปรียบเทียบกับการใช้เตาปฏิกรณ์แบบพลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ในการแปรสภาพด้วยเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟอยู่ในช่วง 250-1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟนั้นใช้เวลาเพียง เล็กน้อยในการทำให้อุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิที่ต้องการซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินี้ขึ้นอยู่กับกำลังของคลื่นไมโครเวฟ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการแปรสภาพภายใต้สภาวะของบรรยากาศที่แตกต่างกัน 2 บรรยากาศคือที่ 100% ก๊าซอาร์กอน (ไพโรไลซิส) และ 99% ก๊าซอาร์กอน/1% ก๊าซออกซิเจน (แก๊สซิฟิเคชัน) นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลของพลังงานของคลื่นไมโครเวฟและปริมาณของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีต่อชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่เตรียมได้

จากการศึกษาพบว่า การแปรสภาพทางความร้อนภายใต้บรรยากาศที่มีก๊าซออกซิเจนหรือโดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้นจะสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้มากกว่ากระบวนการไพโรไลซิส เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟและเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าพบว่า การให้ความร้อนโดยใช้พลังงานคลื่นไมโครเวฟนั้นจะให้ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นก๊าซสูงกว่าในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งนั้นจะพบได้สูงกว่าในระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า โดยที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซนั้นจะมีปริมาณที่สูงขึ้นเมื่อกำลังของคลื่นไมโครเวฟมีค่ามากขึ้นโดยผลิตภัณฑ์หลักคือ ก๊าซไฮโดรเจน (H_2), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สำหรับผลของซิลิกอนคาร์ไบด์นั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัดอันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการให้ความร้อนของไมโครเวฟ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟนั้นใช้เวลาน้อยกว่า มีประสิทธิภาพมากกว่าซึ่งมีความเหมาะสมในการแปรสภาพทางความร้อนขยะที่เป็นวัสดุพอลิเมอร์ให้กลายเป็นพลังงานทดแทน

Abstract

Pyrolysis and gasification processes were utilized in order to evaluate the feasibility on production of value added fuels from ethylene-vinyl acetate copolymer/natural rubber composite (EVA/NR) which is in form of shoe sole scrap. The heat for thermal conversion was supplied via novel microwave induced heating using silicon carbide (SiC) as microwave absorber. Similar experiments were also performed using conventional furnace to compare the effect of heating method. The pyrolysis/gasification temperature ranged from 250-1,000°C which could be reached within a few minutes for microwave. The reaction took place in 100%Ar and 99% Ar/1%O₂ atmosphere for pyrolysis and gasification, respectively. The influence of microwave power, reacting atmosphere, and amount of SiC on the characteristic of products was evaluated. Favorable conditions for producing high gas fraction with greater proportion of energy rich hydrocarbon and hydrogen were determined.

From the results, it was shown that thermal conversion under atmosphere that has oxygen can be generating higher content of H₂, CO₂, and light hydrocarbon than in 100% Ar atmosphere. More gas fraction was obtained from microwave heating than that of conventional furnace while solid product from the later technique was higher. Gas product from microwave heating increases with higher microwave power and contained mainly H₂, CO₂, and light hydrocarbon. The effect of silicon carbide ratio is not clearly because of limitation of microwave heating in this experiment. Compared with convention heating, microwave induced heating required significantly shorter times which resulted in superior overall efficiency of the process, suitable for thermochemical conversion of this polymerics waste to more valuable fuels.

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบัน ขยะจากอุตสาหกรรมมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจซึ่งก่อให้เกิดปัญหาแก๊สเรือนกระจก ขยะพลาสติกและยางนั้นมีย่อยด้วยกันหลายรูปแบบไม่ว่าจะอยู่ในรูปของบรรจุภัณฑ์หรืออุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งเศษที่เหลือจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล่านี้จะเป็นแหล่งที่ทำให้กำเนิดขยะในปริมาณที่สูง โดยทั่วไปนั้นวิธีที่ใช้ในการกำจัดขยะเหล่านี้มีอยู่ 2 วิธีใหญ่ๆด้วยกันคือ การนำไปฝังกลบ และการเผาทิ้ง แต่วิธีดังกล่าวนี้ไม่เหมาะกับการจัดการขยะในระยะยาว นอกจากนี้การนำไปฝังกลบนั้นยังเป็นที่ต่อต้านจากชุมชนข้างเคียง และยังมีการปนเปื้อนไปสู่แหล่งน้ำข้างเคียงด้วย และเช่นเดียวกับการเผานั้นจะทำให้เกิดก๊าซพิษเช่น CO_2 SO_x NO_x และไดออกซิน (P. Connett, 2006)

กระบวนการผลิตยางพื้นรองเท้าจากยางธรรมชาติผสมเอทิลีนไวนิลแอซีเตตโคพอลิเมอร์ (EVA/NR) ที่อยู่ในรูปของวัสดุแข็งประกอบนั้นประกอบด้วยโครงสร้าง 3 ชั้น โดยชั้นบนและชั้นล่างจะมียางธรรมชาติอยู่ 70% และ เอทิลีนไวนิลแอซีเตตโคพอลิเมอร์ 30% ในขณะที่ชั้นกลางจะมีเอทิลีนไวนิลแอซีเตตโคพอลิเมอร์ 70% และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 30 % ซึ่งเมื่อผ่านการขึ้นรูป และตัดเป็นชิ้นส่วนรองเท้าแล้วพบว่ามีความพิเศษที่เหลือนจากการตัดเป็นจำนวนมากประมาณ 20% โดยน้ำหนักของชิ้นงานก่อนตัดซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองโดยสูญเปล่าและเนื่องจากขยะเหล่านี้ไม่เหมาะในการนำไปกำจัดโดยวิธีการเผาทิ้ง หรือการนำไปฝังกลบดังที่ได้กล่าวมาแล้วเนื่องจากอาจเกิดการปนเปื้อนของสารพิษกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการกำจัดขยะ หรือเศษยางเหล่านี้วิธีการหนึ่งก็คือการนำขยะชนิดนี้หรือขยะจากอุตสาหกรรมชนิดอื่นๆมาแปรสภาพให้อยู่ในรูปของพลังงานทดแทนโดยการทำให้เกิดเป็นสารโมเลกุลเล็กๆในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนหรือที่เรียกว่า “ไพโรไลซิส” หรือการทำให้เกิดการสลายตัวภายใต้บรรยากาศที่จำกัดก๊าซออกซิเจนที่เรียกว่า “แก๊สลิฟิเคชัน” ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นก๊าซสูงกว่าวิธีไพโรไลซิส (C. Badger, 2006) โดยชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถควบคุมได้โดยการปรับเปลี่ยนสภาวะที่ใช้เช่น อุณหภูมิ บรรยากาศ ชนิดของวัตถุดิบ และชนิดของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นสามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานตามธรรมชาติ หรือวัตถุดิบในอุตสาหกรรมได้

ระบบการให้ความร้อนในเตาปฏิกรณ์ที่ใช้กันทั่วไปนั้นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการแปรสภาพทางความร้อนจะได้มาจากการใช้ก๊าซ หรือเชื้อเพลิงอื่นๆ ซึ่งต้องการเวลานานในการเริ่มต้นและสิ้นสุดการให้ความร้อนนอกจากนี้จำเป็นจะต้องมีระบบการควบคุม การสำรองเชื้อเพลิง การระบายความร้อนที่ยุงยากซึ่งเหมาะกับโรงงานที่มีขนาดใหญ่และมีเงินลงทุนสูง นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์มีค่าที่ต่ำกว่าความร้อนที่ให้แก่ระบบอื่นเนื่องมาจากมีการสูญเสียความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นข้อจำกัดของประสิทธิภาพของเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้ ดังนั้นระบบการให้ความร้อนแบบเก่าจึงเป็นระบบที่ไม่คุ้มค่าในแง่ของพลังงาน ต้นทุน และสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นระบบการให้ความร้อนโดยการใช้คลื่นไมโครเวฟจึงเป็นระบบที่มีความน่าสนใจ มีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานไมโครเวฟแล้วถ่ายเทแก่วัสดุอีกต่อหนึ่งแต่การให้ความร้อนวิธีนี้มีข้อจำกัดอยู่ประการหนึ่งคือวัสดุนั้นต้องมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานจากไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุพอลิเมอร์รวมทั้ง EVA/NR นั้นไม่สามารถทำได้เนื่องจากมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำดังนั้นจึงต้องนำมาผสมกับวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง เช่นซิลิกอนคาร์ไบด์เพื่อให้สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อนได้ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสามารถทำให้อุณหภูมิของระบบสูงได้ถึง $1,000^{\circ}\text{C}$ ได้อย่างรวดเร็ว โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบได้โดยการปรับเปลี่ยนกำลังของไมโครเวฟ (E. Haque, 1999) โดยในระบบการให้ความร้อนแบบนี้ใช้เวลาที่น้อยกว่าในการทำให้อุณหภูมิสูงเพียงพอที่จะเกิดการสลายตัวของโมเลกุล นอกจากนี้การให้ความร้อนวิธีนี้ยังเป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากการที่ไมโครเวฟสามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเตาปฏิกรณ์และการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานไมโครเวฟนั้นเป็นการเปลี่ยนพลังงานที่มีประสิทธิภาพด้วยเช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาในทางปฏิบัติแล้วอุณหภูมิของระบบหลังจากปิดเครื่องแล้วนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วทำให้มีความร้อนตกค้างน้อยกว่าระบบการให้ความร้อนแบบทั่วไป

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนในการแปรรูปวัสดุโดยอาศัยความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อนของวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์มาใช้ในการไพโรไลซิสวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำซึ่งไม่สามารถทำให้ร้อนได้โดยคลื่นไมโครเวฟ เช่น ยางธรรมชาติ และเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปของวัสดุเชิงประกอบ เพื่อเป็นการลดขยะที่เหลือจากอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์ในด้านของพลังงาน ลดมลภาวะแวดล้อม และต้นทุนในการจัดเก็บขยะ รวมทั้งเป็นระบบที่สามารถพัฒนาไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ในทุกขนาด

วัตถุประสงค์

เพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเศษยางพาราองเท้าแตะโดยใช้กระบวนการสลายตัวทางความร้อนด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ไพโรไลซิส” และภายใต้บรรยากาศที่จำกัดก๊าซออกซิเจนที่เรียกว่า “แก๊สซิฟิเคชัน”

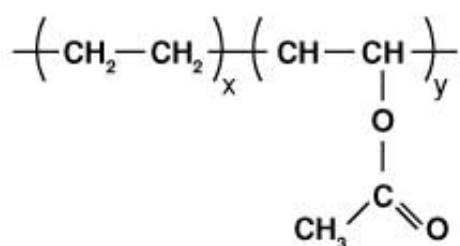
บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์ (EVA)

2.1.1 ข้อมูลเบื้องต้น

เอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) ได้มีการสังเคราะห์และจดสิทธิบัตรโดยบริษัท ICI ประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ.1930 โดยโครงสร้างของเอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์แสดงไว้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์

จากโครงสร้างจะเห็นได้ว่า EVA นั้นเป็นโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ เอทิลีน และไวนิลแอสีเตต ซึ่งโดยทั่วไปนั้น EVA จะมีไวนิลแอสีเตตในปริมาณตั้งแต่ 5-50% โดยน้ำหนัก แต่ถ้าปริมาณของไวนิลแอสีเตตต่ำกว่า 5% จะเรียกว่า “modified polyethylene” และถ้ามากกว่า 50% จะเรียกว่า “vinylacetate ethylene” (VAE) โดยสมบัติต่างๆของ EVA นี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของไวนิลแอสีเตตที่มีอยู่ในโครงสร้าง

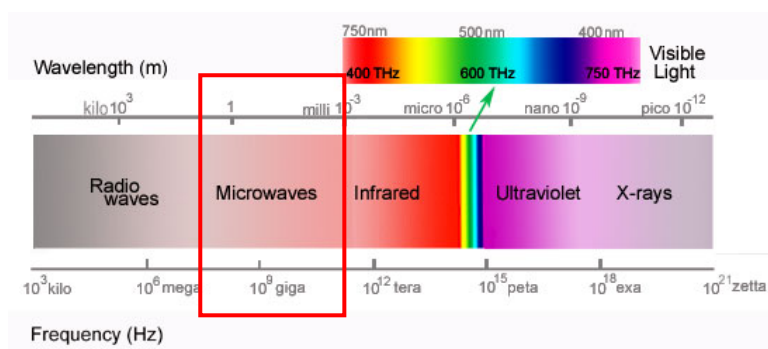
2.1.2 สมบัติทางความร้อนของเอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์

จากการศึกษาสมบัติหรือเสถียรภาพทางความร้อนของ EVA ด้วยเทคนิค thermogravimetric analysis หรือ TGA พบว่า EVA มีการสลายตัวทางความร้อนอยู่ 2 ขั้นตอนทั้งในบรรยากาศที่มีและไม่มีออกซิเจน (N. Angela, M. Mar Esperanza, and R. Font, 2003) โดยการสลายตัวในขั้นตอนแรกนั้นจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 300-380°C ซึ่งเป็นการสลายตัวของไวนิลแอสีเตตที่อยู่ในโครงสร้าง เกิดเป็นกรดแอสีติกหลุดออกมา และทำให้โครงสร้างของ EVA มีพันธะคู่เกิดขึ้น ส่วนการสลายตัวในขั้นตอนที่ 2 นั้นจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 380-450°C ซึ่งเป็นการสลายตัวของสายโซ่พอลิเอทิลีนที่เป็นสายโซ่หลัก

2.2 หลักการทั่วไปเกี่ยวกับการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ

2.2.1 ความรู้เบื้องต้น

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงความถี่อยู่ระหว่างคลื่นวิทยุและคลื่นอินฟราเรด โดยทั่วไปแล้วไมโครเวฟอยู่ในช่วงความถี่ 0.3-300 GHz หรือช่วงความยาวคลื่น 1 เมตร – 1 มิลลิเมตร โดยคลื่นไมโครเวฟนั้นจะเหมือนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั่วไปคือ สามารถเกิดการสะท้อน ทะลุผ่าน และถูกดูดซับได้ โดยพฤติกรรมเหล่านี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุเมื่อได้รับไมโครเวฟ เช่น พลาสติกพอลิเอทิลีนเมื่อได้รับไมโครเวฟจะไม่เกิดความร้อนขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน น้ำเมื่อได้รับไมโครเวฟจะเกิดความร้อนขึ้นซึ่งเราสามารถนำคุณสมบัติของน้ำที่สามารถร้อนได้นี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ที่เห็นได้ชัดที่สุดคือเครื่องไมโครเวฟที่ใช้กันอยู่ในครัวเรือนนั่นเอง โดยในรูปที่ 1 แสดงแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการใช้งานตามความถี่ต่างๆ



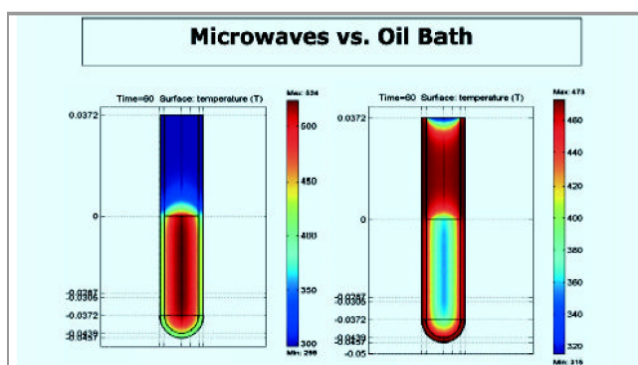
รูปที่ 2.2 ช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการใช้งาน

2.2.2 การเกิดความร้อนโดยไมโครเวฟ (Microwave Heating)

การนำไมโครเวฟมาใช้งานในด้านต่างๆ ได้มีการศึกษากันมาตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 เพื่อนำมาใช้เป็นเรดาร์ และต่อมาจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาในการนำมาให้ความร้อน

การให้ความร้อนโดยไมโครเวฟจัดเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (P. Connett, 2006) รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างระหว่างการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟกับการให้ความร้อนโดยใช้อ่างน้ำมัน (oil bath) จากรูปทางขวามือพบว่ามี ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผนังกับตรงกลางเนื่องจากผนังภายนอกนั้นจะได้รับความร้อนก่อนแล้วจึงแผ่ความร้อนต่อไปยังบริเวณภายในแต่การแผ่ความร้อนนี้ต้องขึ้นกับความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุซึ่งแตกต่างกันตามบริเวณที่ความร้อนแผ่ผ่านทำให้ความร้อนที่ได้ไม่มีความสม่ำเสมอ แต่ในทางกลับกันการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ (ซ้ายมือ) บริเวณตรงกลางจะเกิดความร้อนขึ้นก่อนแล้วจึงแผ่ความร้อนออกไปยังผนังเตา เนื่องมาจากวัสดุบริเวณตรงกลางนั้นสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ในขณะที่ผนังนั้นไม่สามารถที่จะเกิดความร้อนได้จึง

ได้รับความร้อนที่แผ่จากตรงกลางแทน ด้วยเหตุนี้ไมโครเวฟจึงเป็นการให้ความร้อนในเชิงปริมาณและมีความสม่ำเสมอมากกว่าการให้ความร้อนแบบทั่วไป



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ (ซ้าย) และอ่างน้ำมัน (ขวา)

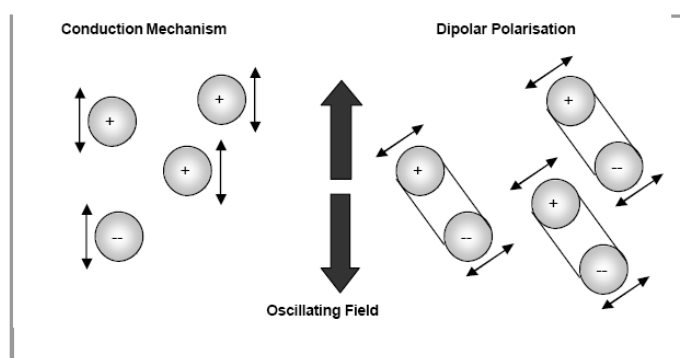
เตาไมโครเวฟที่ใช้กันอยู่ในครัวเรือนนั้นถูกกำหนดให้ใช้ในช่วงความถี่ 2.45 GHz เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกับการใช้งานด้านอื่นๆ เช่น ด้านการสื่อสาร เป็นต้น

การให้ความร้อนโดยไมโครเวฟนั้นมีข้อดีกว่าการให้ความร้อนแบบทั่วไปอยู่หลายอย่างด้วยกัน เนื่องมาจากการให้ความร้อนแบบทั่วไปนั้นอาศัยการแผ่ความร้อนจากแหล่งกำเนิดต่างๆ เช่น ขดลวดความร้อน เบลูไฟ ไอน้ำ เป็นต้น ซึ่งความร้อนเหล่านี้สามารถเกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนให้แก่ตัวกลางต่างๆ เช่น อากาศ น้ำ เป็นต้น และการแผ่ความร้อนนี้อาจถูกจำกัดด้วยสมบัติทางกายภาพของวัสดุ เช่น ความหนาแน่น ความเป็นเนื้อเดียวกัน ความจุความร้อน และการนำความร้อน ในขณะที่การใช้ไมโครเวฟนั้นเป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุโดยตรงโดยความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากโมเลกุลของวัสดุเอง จึงมีการสูญเสียความร้อนน้อยกว่า และสามารถควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นได้โดยการปรับกำลังของไมโครเวฟตามต้องการ ดังนั้นการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟจึงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ และมีความคุ้มค่าทางพลังงานอีกวิธีหนึ่ง โดยการเกิดความร้อนของวัสดุนั้นสามารถเกิดได้จากกลไกต่างๆ 3 รูปแบบดังนี้

- เกิดจากการเหนี่ยวนำไดโพล (dipolar polarization) ซึ่งเมื่อวัสดุได้รับไมโครเวฟนั้นอิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆ นิวเคลียสจะถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดเป็นไดโพลและเกิดการสั่นทำให้เกิดการขัดสีขึ้นระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นพลังงานความร้อนออกมาดังรูปที่ 2.4 (ขวา)
- เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระ (conduction) บนวัสดุเมื่อได้รับไมโครเวฟแล้วจะเกิดการเคลื่อนที่ไปบนผิวของวัสดุซึ่งการเคลื่อนที่นี้จะมีแรงต้านจากความต้านทานไฟฟ้าทำให้เกิดเป็นความร้อนออกมาเช่นกันดังรูปที่ 2.4 (ซ้าย)

- เกิดจากการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุขึ้นที่ผิวรอยต่อ (interfacial polarization) ของวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้า และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ที่แตกต่างกันทำให้เกิดการสะสมของประจุขึ้นเมื่อได้รับไมโครเวฟ ประจุเหล่านี้จะเคลื่อนตัวและเกิดความร้อนขึ้น

จากที่กล่าวมาแล้วเตาไมโครเวฟที่ใช้อยู่ในครัวเรือนทั่วไปนั้นใช้หลักการเหนี่ยวนำไดโพล จากโมเลกุลของน้ำที่มีความเป็นไดโพลอยู่แล้ว ในส่วนของวัสดุเซรามิกที่มีส่วนผสมของธาตุที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่เช่น สารประกอบคาร์ไบด์ จะใช้หลักการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนในการทำให้เกิดความร้อน อย่างไรก็ตามในบางวัสดุอาจเกิดได้ทั้งสองอย่างพร้อมกันขึ้นกับโมเลกุลและองค์ประกอบของวัสดุนั้นๆ



รูปที่ 2.4 แสดงกลไกการเกิดความร้อนโดยไมโครเวฟ (ซ้าย) การเหนี่ยวนำอิเล็กตรอน (ขวา) การเหนี่ยวนำไดโพล

วัสดุนั้นเมื่อได้รับไมโครเวฟแล้วจะมีการตอบสนองต่อไมโครเวฟที่แตกต่างกันซึ่งการตอบสนองนี้จะมีผลต่อการเกิดความร้อนด้วยเช่นกัน โดยสามารถแบ่งการตอบสนองนี้ออกเป็น 3 ประเภทด้วยกัน ดังรูปที่ 2.5 คือ

a. การสะท้อนกลับ (Reflection)

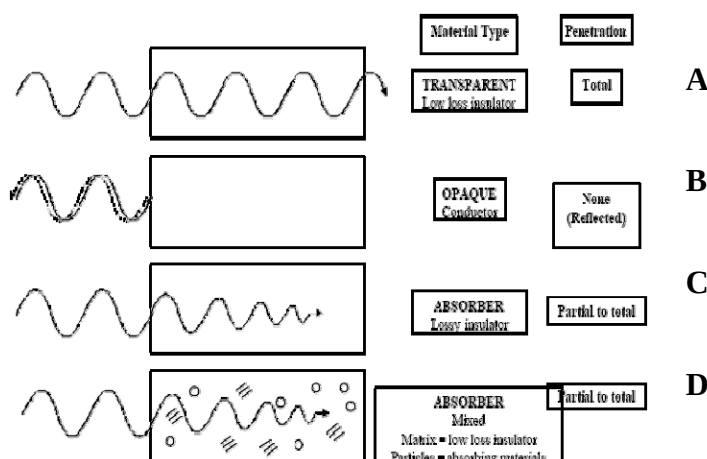
เมื่อวัสดุที่เป็นโลหะหรือที่มีส่วนผสมของโลหะได้รับไมโครเวฟ อิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่มากบนโลหะจะเกิดการเคลื่อนตัวและเกิดการหลุดออกมาภายนอกทำให้ไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านวัสดุนั้นได้จึงเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟ ส่งผลให้วัสดุนั้นไม่เกิดความร้อนขึ้นเนื่องจากไม่เกิดการเสียดทานระหว่างอิเล็กตรอนกับความต้านทานภายในของโลหะที่มีน้อยอยู่แล้ว

b. การทะลุผ่าน (Transmission)

จะเกิดเมื่อโมเลกุลของวัสดุนั้นไม่มีส่วนที่เป็นไดโพลหรือประจุที่สามารถตอบสนองต่อไมโครเวฟได้ หรือมีอยู่น้อย ก็จะไม่เกิดการสั่นหรือเคลื่อนตัวของโมเลกุลทำให้ไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านโดยที่ไม่มีความร้อนใดๆเกิดขึ้น วัสดุที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ กระดาษ ไม้ พลาสติกที่มีความเป็นขั้วต่ำ เป็นต้น

c. การดูดซับ (Absorption)

เมื่อวัสดุหรือองค์ประกอบของวัสดุนั้นมีส่วนที่เป็นไดโพล หรือประจุที่สามารถเกิดการสั่นหรือเคลื่อนตัวได้ด้วยไมโครเวฟ พลังงานไมโครเวฟที่ได้รับนี้จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของพลังงานจลน์เกิดการขัดสีและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนแทน เราเรียกวัดวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนได้ว่า “ตัวดูดซับไมโครเวฟ” วัสดุที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ ซิลิกอนคาร์ไบด์ น้ำ คาร์บอน พลาสติกที่มีความเป็นขั้วสูง เป็นต้น



รูปที่ 2.5 การตอบสนองของวัสดุต่อไมโครเวฟ A: ทะลุผ่าน, B สะท้อนกลับ, C และD: ดูดซับ

(after Sutton, 1989)

ความสามารถในการเกิดความร้อนของวัสดุโดยการใช้ไมโครเวฟนั้นถูกกำหนดโดยตัวแปรอยู่ 2 ตัวด้วยกันคือ Dielectric constant (ϵ') และ Dielectric loss factor (ϵ'') โดยค่า Dielectric constant หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนั้นจะบอกถึงความสามารถของวัสดุที่สามารถเกิดการสั่น หมุน ภายใต้อิทธิพลไฟฟ้า และค่า Dielectric loss factor แสดงถึงประสิทธิภาพของวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนโดยอัตราส่วนของ Dielectric constant ต่อ Dielectric loss factor คือค่า Dielectric loss tangent หรือ Dissipation factor ดังสมการที่ 2.1

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.1)$$

จากสมการที่แสดง หากวัสดุใดมีค่า Dielectric loss factor สูง จะสามารถเกิดความร้อนโดยไมโครเวฟได้ง่าย โดยทั่วไปแล้วพบว่า ไมโครเวฟจะมีอัตราการร้อนที่สูง และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนได้ดีถึง 80-85 %

ไมโครเวฟสามารถเกิดการสะท้อน แต่ไม่เกิดความร้อนขึ้นกับโลหะเนื่องจากเป็นวัสดุตัวนำ โดยโลหะนี้สามารถนำมาใช้เป็นตัวนำคลื่นไมโครเวฟในเตาไมโครเวฟได้ วัสดุที่ไมโครเวฟสามารถผ่านได้จะเรียกวัดชนิดนี้ว่าฉนวน โดยวัสดุที่เป็นฉนวนนี้ใช้เป็นตัวรองวัสดุในเตาไมโครเวฟเนื่องจากไม่สามารถร้อน

ได้ในไมโครเวฟ และวัสดุที่สามารถเกิดความร้อนได้โดยคลื่นไมโครเวฟจะเรียกว่า “วัสดุไดอิเล็กทริก” หรือ “ตัวดูดซับไมโครเวฟ” ประสิทธิภาพของการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟของวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductor) นั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติคือ ถ้าคุณสมบัติของวัสดุนั้นสูงพอจนสามารถตอบสนองต่อไมโครเวฟก็สามารถเกิดความร้อนขึ้นได้เช่นกัน แต่หากผลสมวัสดุที่มีค่า Dielectric loss factor ต่ำมาก ๆ สามารถแก้ไขได้โดยการผสมกับวัสดุที่สามารถร้อนได้ด้วยไมโครเวฟเช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ หรือ คาร์บอน โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนคือเมื่อวัสดุที่ตอบสนองต่อไมโครเวฟเกิดความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อนไปสู่วัสดุที่เป็นฉนวนต่ออีกทอดหนึ่ง

กล่าวโดยสรุปแล้วการให้ความร้อนโดยการใช้ไมโครเวฟมีความแตกต่างและเหนือกว่าการให้ความร้อนโดยทั่วไปดังนี้

- ให้ความร้อนโดยไม่ต้องสัมผัสกับวัสดุ
- เป็นการถ่ายเทพลังงานไม่ใช่การถ่ายเทความร้อน
- สามารถร้อนได้อย่างรวดเร็ว
- เป็นการให้ความร้อนที่เฉพาะเจาะจงกับวัสดุ
- เป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร
- เริ่มและหยุดกระบวนการได้รวดเร็ว
- เกิดความร้อนจากภายในของวัสดุ
- มีความปลอดภัยสูง ควบคุมง่าย

2.3 กระบวนการเคมีเชิงความร้อน (Thermochemical process)

กระบวนการเคมีเชิงความร้อนหรือการแปรสภาพทางความร้อนเป็นการทำให้วัสดุเกิดการสลายตัวออกเป็นสารโมเลกุลเล็ก ๆ ที่อุณหภูมิสูงโดยสารที่เกิดจากการแตกตัวของวัสดุนี้มีหลายรูปแบบทั้งของแข็งของเหลว และก๊าซ โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ขึ้นกับสภาวะที่ใช้ในการทำให้เกิดการแตกตัวโดยตัวแปรที่สำคัญในการแตกสลายของวัสดุคือปริมาณออกซิเจน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งกระบวนการทางเคมีความร้อนตามปริมาณของออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยาได้เป็น 3 แบบ ด้วยกันคือ การเผาไหม้สมบูรณ์ การเกิดแก๊ซซิฟิเคชัน และการไพโรไลซิส

2.3.1 การเผาไหม้สมบูรณ์ (Combustion)

การเผาไหม้สมบูรณ์เป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการแตกตัวของสารที่อุณหภูมิสูงโดยการให้ออกซิเจนในปริมาณที่มากเกินพอซึ่งเป็นวิธีการทั่วไปที่ใช้ในการเผาถ่านหินเพื่อผลิตไฟฟ้า โดยในกรณีของเชื้อเพลิงแข็งนั้นจะเกิดกระบวนการเผาไหม้ 4 ขั้นตอนได้แก่

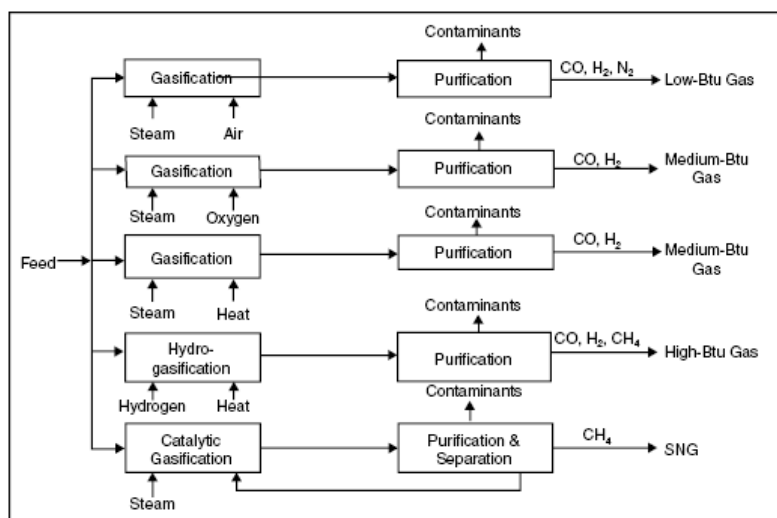
- a) การเกิดความร้อน เมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนจะเกิดการสะสมความร้อนภายในวัสดุเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ
- b) การทำให้แห้ง เมื่อพลังงานความร้อนที่มีค่ามากพอที่จะทำให้น้ำที่อยู่ในวัสดุเริ่มเกิดการระเหยออกไป
- c) การเผาไหม้ เมื่อน้ำออกไปจากวัสดุแล้วและอุณหภูมิสูงพอ วัสดุจะเริ่มเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์โดยการเกิดออกซิเดชันกับออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาทั้งน้ำของแข็ง ของเหลว และก๊าซต่างๆ การเผาไหม้จะเกิดไปเรื่อยๆจนสารที่สามารถระเหยออกไปหมด จนเหลือแต่ถ่านชาร์ที่ประกอบด้วยคาร์บอนและสารอนินทรีย์
- d) การเผาไหม้ของถ่านชาร์ เป็นการเผาไหม้ของคาร์บอนโดยเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นก๊าซ CO_2 , CO จนสุดท้ายจะเหลือเพียงสารอนินทรีย์ หรือที่เรียกว่า “เถ้า” (ash) นั้นเอง

2.3.2 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิสคือการแตกสลายของโมเลกุลด้วยพลังงานความร้อนภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน โดยการแตกสลายนี้จะเกิดจากการขาดออกจากกันของโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็กโดยชนิดและความหลากหลายของผลิตภัณฑ์จะขึ้นกับพลังงานพันธะ ณ ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งการไพโรไลซิสจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายมากตั้งแต่ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อในแวดวงอุตสาหกรรม หรือสามารถใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานเช่น การนำขยะพลาสติกมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสให้เกิดเป็นสารตั้งต้นเพื่อนำกลับมาใช้ในการผลิตต่อไป

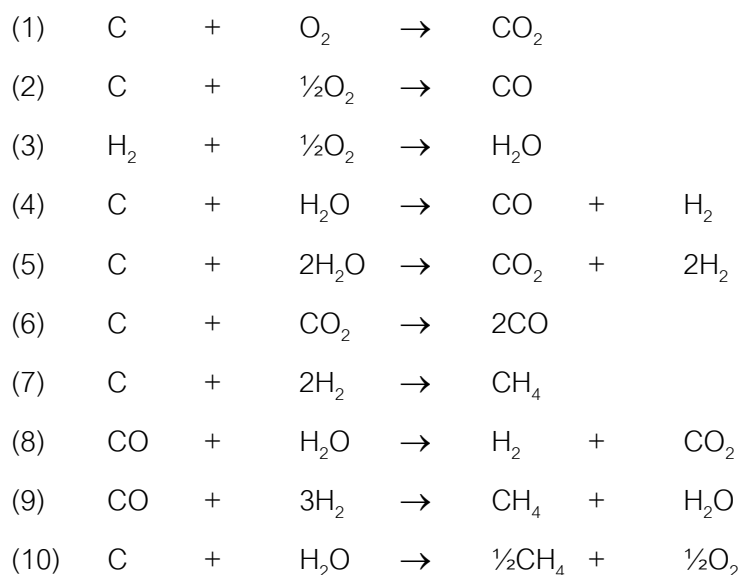
2.3.3 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

แก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสารประกอบคาร์บอนไปเป็นก๊าซสังเคราะห์ (Synthetic gas หรือ Combustible gas) เช่น H_2 , CO , CO_2 และ CH_4 โดยการเกิดออกซิเดชันเพียงบางส่วน of วัสดุโดยจะมีการจำกัดปริมาณของออกซิเจนที่ให้แก่ระบบซึ่งออกซิเจนที่ให้แก่ระบบนั้นจะประมาณ 35% ของปริมาณออกซิเจนที่ใช้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ (combustion) กระบวนการนี้จะประกอบไปด้วยปฏิกิริยาของคาร์บอนกับ อากาศ ออกซิเจน ไอน้ำ CO_2 หรือสารประกอบของก๊าซต่างๆที่อุณหภูมิประมาณ 700°C ($1,300^\circ\text{F}$) หรืออาจใช้ที่อุณหภูมิที่สูงกว่านี้เพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ก๊าซเพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าหรือเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การแก๊สซิฟิเคชันรูปแบบต่างๆ

แก๊สซิฟิเคชันเป็นการเกิดออกซิเดชันเพียงบางส่วนของวัสดุซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเกิดได้หลากหลาย เช่น คาร์บอนที่อยู่ในวัตถุดิบทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในระบบ หรือเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซผลิตภัณฑ์ด้วยกันเอง ดังสมการต่อไปนี้



จากสมการจะเห็นว่าออกซิเจนที่ให้แก่ระบบจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ (1) - (3) โดยความร้อนที่ได้จะนำไปใช้ในการทำให้วัสดุแห้ง เกิดการแตกของพันธะเคมี ความร้อนและผลิตภัณฑ์ที่ได้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ (4)-(10) ต่อไปโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ปฏิกิริยาที่ (4) และ (5) เป็นปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำและก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นปฏิกิริยาทั่วไปที่เกิดในแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ

- ปฏิกริยาที่ (6) เรียกว่าปฏิกริยา *Boudourd reaction* เป็นปฏิกริยาดูดความร้อนที่เกิดขึ้นได้ช้ากว่าปฏิกริยาการเผาไหม้ในปฏิกริยาที่ (1)
- ปฏิกริยาที่ (7) เรียกว่า *Hydro-gasification* ซึ่งเป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นได้ช้า เว้นแต่ใช้ความดันที่สูงขึ้น
- ปฏิกริยาที่ (8) เรียกว่า *Water-gas shift reaction* ซึ่งเป็นปฏิกริยาที่สำคัญในการผลิตไฮโดรเจน
- ปฏิกริยาที่ (9) เรียกว่า *Methanation reaction* เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นได้ช้าถ้าไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา
- ปฏิกริยาที่ (10) เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเกิดขึ้นได้ช้ากว่าปฏิกริยาที่ (4) และ (5) มากหากไม่ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา

นอกจากก๊าซ (อากาศ ออกซิเจน ไอน้ำ) อุณหภูมิ และความดันที่ให้แก่ระบบแก๊สซิฟิเคชันแล้วยังมีตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมี ความร้อนที่ได้ และการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- องค์ประกอบของวัตถุดิบ
- การเตรียมวัตถุดิบ และลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบ
- อัตราการให้ความร้อนแก่เตาปฏิกรณ์
- เวลาที่ใช้
- ระบบของเตาปฏิกรณ์เช่น
 - ระบบป้อนวัตถุดิบ (แบบแห้ง หรือ เปียก)
 - อัตราเร็วลมที่ใช้
 - การกำจัดสารอนินทรีย์
 - ระบบการให้ความร้อน
 - ระบบการแยกและทำให้อากาศสะอาด

2.4. การแปรสภาพทางความร้อนด้วยไมโครเวฟ

ในส่วนของการสลายตัวทางความร้อนของเอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์นั้นมีการศึกษาของ A. Marcilla A. Gómez และ S. Menargues (A. Marcilla, A. Gómez, S. Menargues, 2005) ซึ่งได้ทำการศึกษาก๊าซที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ และ FT-IR โดยพบว่าเอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์เกิดการสลายตัว 2 ขั้น โดยการสลายตัวในขั้นตอนแรกนั้นจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 320°C ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ด้วย FT-IR พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวในขั้นตอนนี้ได้แก่กรดแอซิดิก คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจากการสลายตัวดังกล่าวทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่มีพันธะคู่ขึ้นบนสายโซ่หลัก ในส่วนของการสลายตัวขั้นที่สองนั้นจะเป็นการสลายตัวของสายโซ่หลักที่อุณหภูมิประมาณ 420°C ซึ่งก๊าซที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นก๊าซประเภท อัลเคน อัลซีน และสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการแปรสภาพทางความร้อนโดยการเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟมีการพัฒนาอย่างเป็นรูปธรรมครั้งแรกในปี 2001 โดย C. Ludlow-Parafox and H. A. Chase (C. Ludlow-Parafox and H. A. Chase, 2001) ซึ่งได้ทำการศึกษากาโรไลซิสเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่เคลือบอยู่บนแผ่นอลูมิเนียมจากเศษหลอดยาสีฟันโดยพบว่ากระบวนการนั้นไม่มีความแตกต่างจากวิธีการที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ การให้ความร้อนโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้า แต่มีข้อดีที่เหนือกว่าคือไม่จำเป็นต้องผ่านการแยกแผ่นอลูมิเนียมก่อนการไพโรไลซิส ซึ่งกระบวนการทั่วไปนั้นจะต้องผ่านการแยกก่อน ทำให้ประหยัดเวลาและยังได้อลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูงและสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลับคืนมาด้วย นอกจากนี้ยังมีการไพโรไลซิสโดยการเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟกับวัสดุอื่นๆ เช่น ยางรถยนต์ คลอโรฟลูออโรมีเทน เพนตะคลอโรฟีนอล ถ่านหิน และขยะจากครัวเรือน (J. Scheirs, W. Kaminsky, 2006).

ในปี 2002 J.A. Menéndez, M. Inguanzo และ J.J. Pis (J.A. Menéndez, M. Inguanzo, and J.J. Pis, 2002) ได้นำเทคนิคการเหนี่ยวนำไมโครเวฟมาใช้ในการไพโรไลซิสสัจฉน้ำเสียจากอุตสาหกรรมโดยใช้ถ่านชาร์เป็นตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟโดยพบว่าสามารถทำให้ระบบมีอุณหภูมิในการไพโรไลซิสสูงถึง 900°C และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเตาปฏิกรณ์แบบทั่วไปพบว่าการเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟใช้เวลาและพลังงานที่น้อยกว่าที่ระดับการไพโรไลซิสเท่ากัน

ในปีต่อมา A. Domínguez และคณะ (A. Domínguez et al, 2003) ได้ทำการศึกษาของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสสัจฉน้ำเสียที่ผสมกับตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟด้วยเทคนิค GC-MS โดยพบว่าของเหลวที่ได้นั้น ประกอบด้วย *n*-alkanes, 1-alkenes และสารประกอบอะโรมาติก แต่ไม่พบสาร polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่จะสามารถตรวจพบสาร PAHs ในของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยใช้ระบบการให้ความร้อนแบบทั่วไป

สองปีต่อมา A. Domínguez และคณะ (A. Domínguez *et al*, 2005) ได้ทำการศึกษาน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสสลายตัวของขยะระหว่างกาให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำไมโครเวฟกับวิธีการใช้เตาไฟฟ้าแบบทั่วไปซึ่งพบว่าชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นไม่แตกต่างกันแต่ปริมาณของผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ก๊าซของเหลว ของแข็ง จะแตกต่างกันออกไป โดยการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟนั้นใช้เวลาที่น้อยกว่าและน้ำมันที่ได้นั้นจะได้จะมีสารประกอบที่เป็นอะลิฟาติก และสารประกอบของออกซิเจนที่สูงกว่า

ในกรณีของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซนั้นได้มีการศึกษาโดย J.A. Menéndez และคณะ (J.A. Menéndez *et al*, 2004) ในปี 2004 ซึ่งได้ทำการศึกษากาไพโรไลซิสสลายของน้ำเสีย 4 ชนิดที่แตกต่างกันโดยการเหนี่ยวนำไมโครเวฟเปรียบเทียบกับเตาปฏิกรณ์แบบทั่วไปโดยพบว่าผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้นั้นมีปริมาณของแก๊สไฮโดรคาร์บอน แก๊สไฮโดรเจนที่สูงกว่าที่ได้จากเตาปฏิกรณ์แบบทั่วไป

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุ

3.1.1 วัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้า

- วัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติ (EVA/NR) จากเศษยางพื้นรองเท้าได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผลิตรองเท้าแต่ละภายในประเทศ โดยโครงสร้างของยางพื้นรองเท้าประกอบไปด้วยชั้น 3 ชั้น โดยชั้นบนและล่างสุดมีส่วนประกอบของยางธรรมชาติ (NR) 70% และเอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) 30% ส่วนชั้นกลางนั้นประกอบด้วย EVA 70% และ LDPE 30%

3.1.2 ซิลิกอนคาร์ไบด์

- ซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาด 16 mesh ที่ใช้เป็นตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

3.1.3 ก๊าซพา

- ก๊าซอาร์กอน และแอร์ซีโร (purified air) ที่ใช้เป็นก๊าซพาได้สั่งซื้อจาก บริษัท ไทย อินดัสเตรียล จำกัด (มหาชน)

3.1.4 ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane, DCM)

- ไดคลอโรมีเทน (เกรดสำหรับวิเคราะห์) ใช้สำหรับล้างและสกัดของเหลวที่ได้จากการทดลอง ได้สั่งซื้อจาก บริษัท แล็บสแกนเอเชีย (ประเทศไทย) จำกัด

3.2 เครื่องมือ

3.2.1 เตาไมโครเวฟ

- เตาไมโครเวฟที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเป็นของบริษัทพานาโซนิค รุ่น NN-S674MF ซึ่งจะนำมาทำการดัดแปลงเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

3.2.2 หลอดแก้วควอทซ์

- หลอดแก้วควอทซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 13 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 9 มม. สำหรับใช้เป็นเตาปฏิกรณ์

3.2.3 เทอร์โมคัปเปิล ชนิดอาร์ (R-type thermocouple)

- เทอร์โมคัปเปิล ชนิดอาร์ ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิระหว่างการเกิดการแปรสภาพทางความร้อนในหลอดแก้วควอทซ์

3.2.4 ถังเก็บก๊าซ

- ถังเก็บก๊าซที่มีวาล์วเปิด-ปิดได้ขนาด 300 ซม.³ ใช้สำหรับเก็บก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.2.5 เส้นใยควอตซ์

- เส้นใยควอตซ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-20 ไมโครเมตร ใช้สำหรับรองรับวัตถุดิบในการแปรสภาพทางความร้อนและยังช่วยในการกรองก๊าซและฝุ่นละอองก่อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์

3.2.6 เครื่องควบคุมการไหลของก๊าซ

- เครื่องควบคุมการไหลของก๊าซ (AALBORC[®]) สำหรับควบคุมการไหลของก๊าซได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

3.2.7 ก๊าซมาตรฐาน

- ก๊าซมาตรฐานอยู่ในรูปของก๊าซผสมที่มีสัดส่วนขององค์ประกอบโดยปริมาตรดังตารางที่ 3.1 เพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบชนิดของก๊าซที่ได้จากการแปรสภาพทางความร้อน

ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนของก๊าซที่มีในถังก๊าซมาตรฐาน

ชนิด	ร้อยละโดยปริมาตร	ชนิด	ร้อยละโดยปริมาตร
Methane (C ₁)	5	1-Butene (C ₄)	10
Ethane (C ₂)	10	cis-2-Butene (C ₄)	5
Ethylene (C ₂)	1	Isopentane (C ₅)	2
Propane (C ₃)	5	n-Pentane (C ₅)	1
Propylene (C ₃)	1	CO ₂	5
Isobutane (C ₄)	10	H ₂	15
n-Butane (C ₄)	5	CO	5
trans-2-Butene (C ₄)	5	N ₂	15

3.3 เครื่องทดสอบ

3.3.1 Gas Chromatography

- ใช้ทดสอบหาปริมาณและเปรียบเทียบชนิดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซที่ได้จากการแปรรูปทางความร้อนกับก๊าซมาตรฐานด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Varian CP-3800) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้ตัววิเคราะห์ Thermal Conductivity Detector (TCD) และ Flame Ionization Detector (FID) โดยใช้คอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มม. ยาว 30 ม. และภายในเคลือบด้วย dimethyl polysiloxane 95%



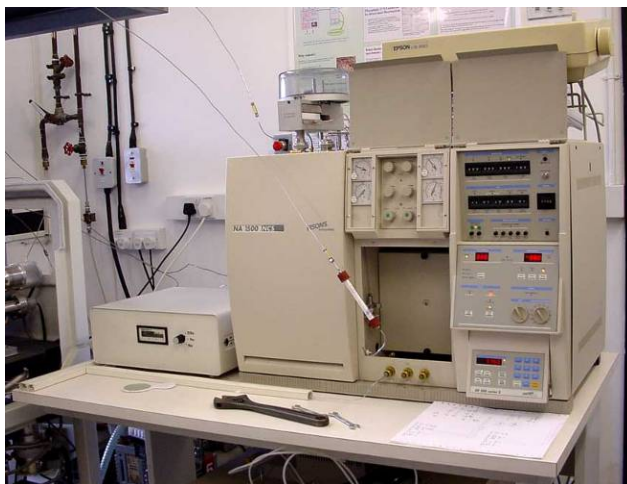
รูปที่ 3.1 เครื่อง Gas Chromatography; Varian CP-3800

3.3.2 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและธาตุองค์ประกอบของ EVA/NR

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (EVA/NR) ดำเนินการโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermogravimetric analysis, TGA) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO TGA รุ่น TGA/SDTA 851 (รูปที่ 3.2) ด้วยการทำให้ EVA/NR เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศเฉื่อยที่อัตราการไหล 20 มล./นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัว 60-600 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 20 °C/นาที จากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกประมวลผลและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม STAR version 8.1 ในส่วนของการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบนั้นได้ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Elemental Analyzer FISON model NA-2000 (รูปที่ 3.3) โดยทำให้ EVA/NR เกิดการสลายตัวได้เป็นก๊าซจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และ ไนโตรเจน (N) โดยในส่วนของออกซิเจน (O) นั้นทำการคำนวณจากส่วนต่างของร้อยละโดยน้ำหนัก



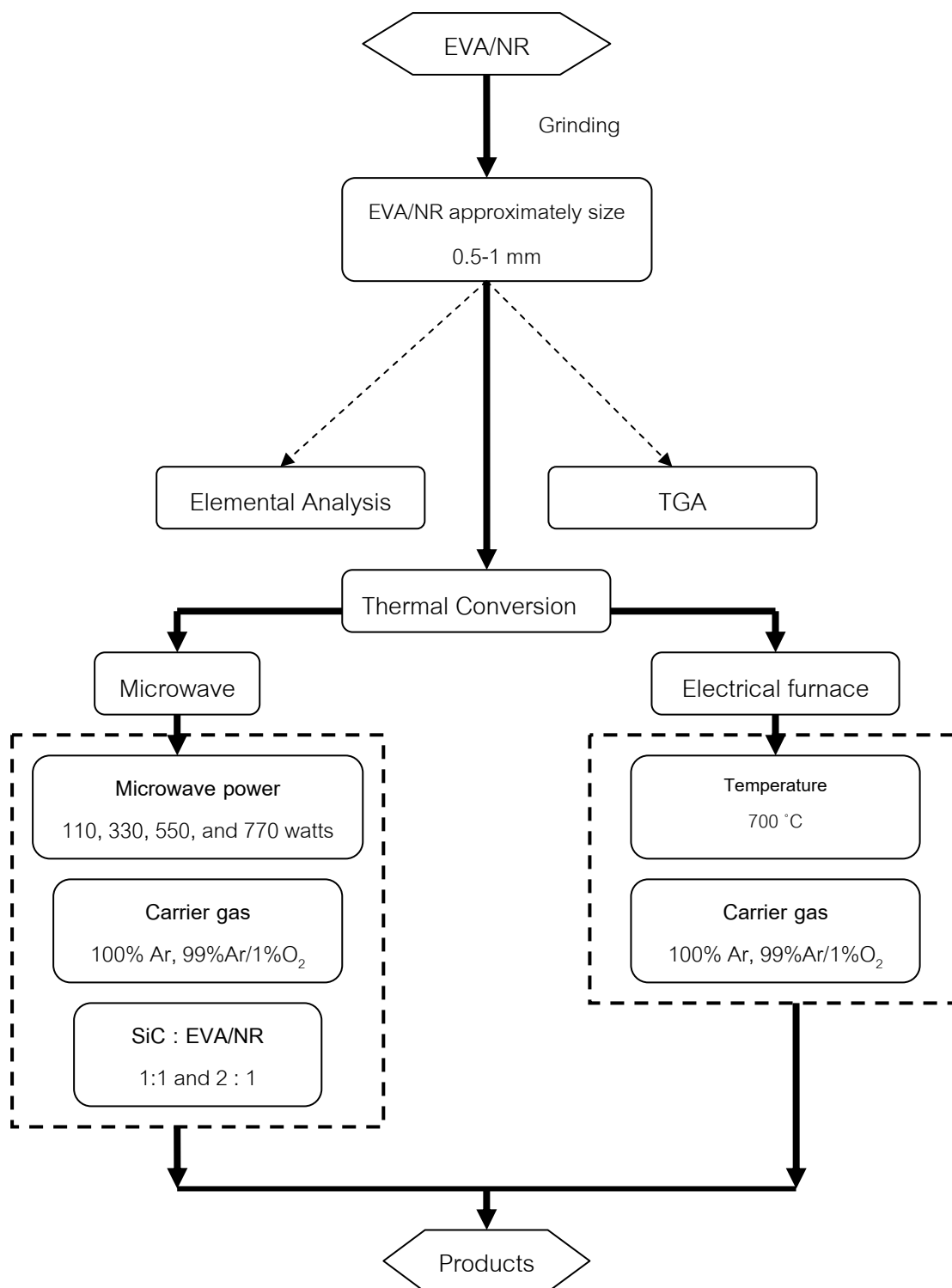
รูปที่ 3.2 TGA ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น รุ่น TGA/SDTA 851

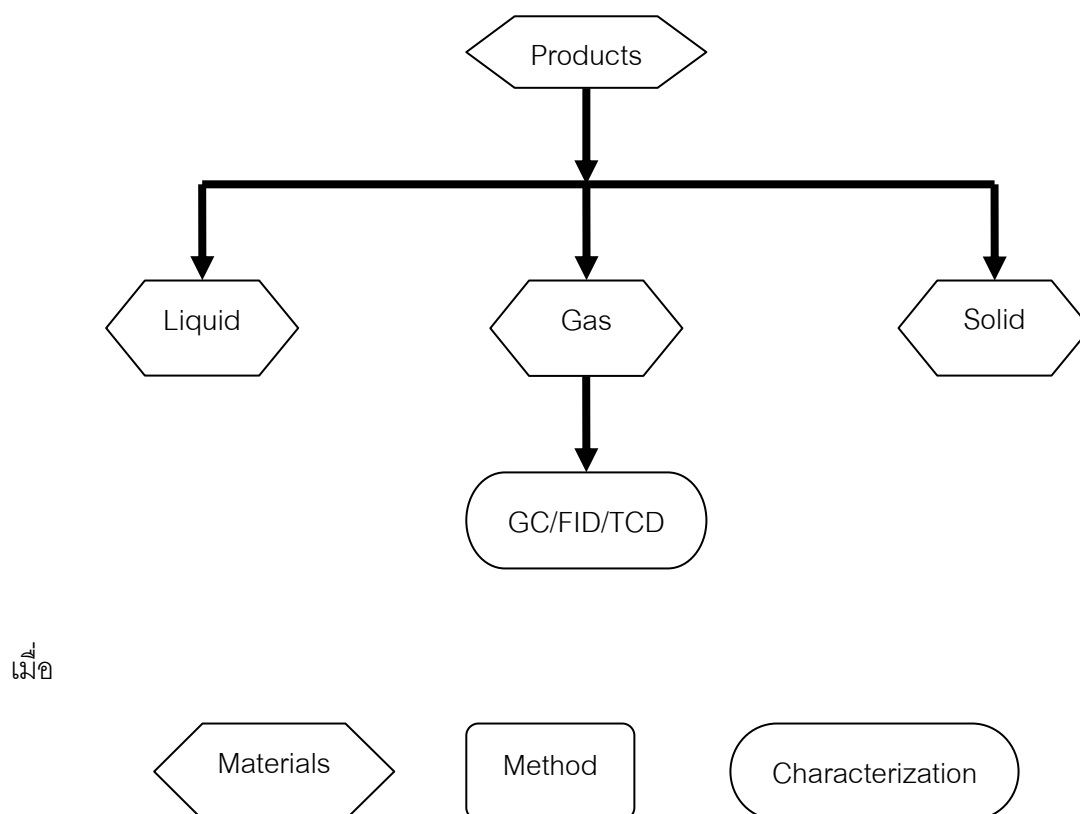


รูปที่ 3.3 Elemental analyzer ยี่ห้อ FISIONS รุ่น รุ่น NA-2000

3.4 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองในงานวิจัยนี้จะดำเนินการภายใต้ลำดับขั้นตอนดังรูปที่ 3.4 ซึ่งประกอบด้วยการเตรียมวัตถุดิบ และการออกแบบระบบและดัดแปลงระบบเตาปฏิกรณ์ที่จะใช้ในการแปรสภาพทางความร้อน การเปรียบเทียบก๊าซมาตรฐาน การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและธาตุองค์ประกอบของวัตถุดิบ และการแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟและเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า





รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลองโดยรวมในงานวิจัยนี้

3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

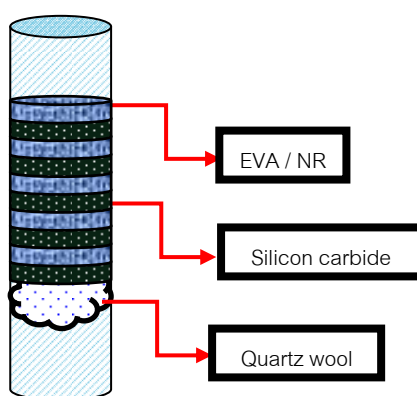
นำเศษยางพื้นรองเท้าที่ใช้ในการทดลองไปบดให้มีขนาด 0.5-1 มม. เพื่อสะดวกในการทดลองด้วยเครื่องบด MING LEE STRONG CRUSHER ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมวิทยาศาสตร์บริการดังรูปที่ 3.5 จากนั้นเศษยางพื้นรองเท้าที่บดแล้วจะถูกนำไปวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) และ นำไปวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Elemental analysis) ด้วยเครื่อง CHON analyzer ต่อไป



รูปที่ 3.5 เครื่องบด MING LEE STONG CRUSHER

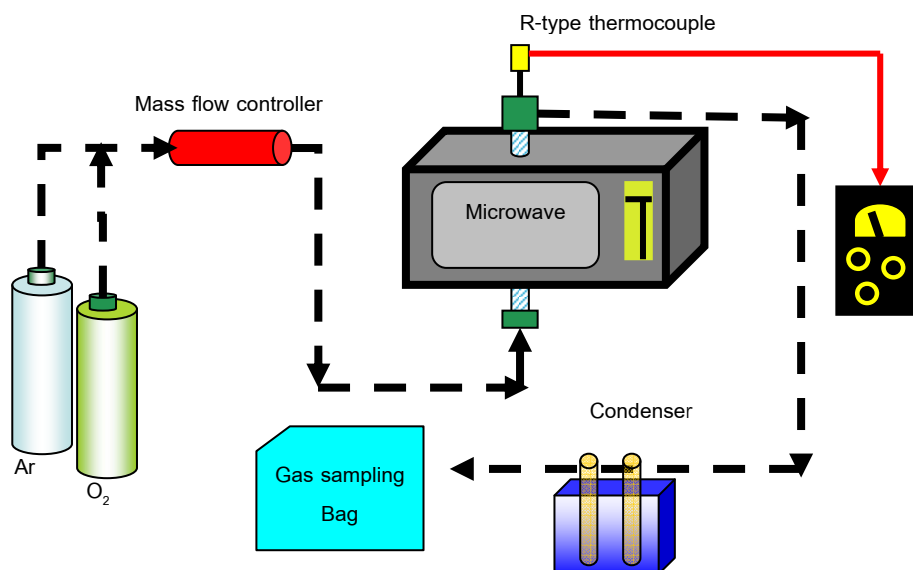
3.4.2 การเตรียมระบบการแปรสภาพทางความร้อน

ก่อนทำการทดลองเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการบดแล้วจะถูกผสมให้อยู่ร่วมกับซิลิกอนคาร์ไบด์ในลักษณะที่เป็นชั้นๆแบบแซนวิชเพื่อกระจายลักษณะการให้ความร้อน (heat profile) ให้มีความสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การผสมเศษยางพื้นรองเท้า (EVA/NR) ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) และเส้นใยควอตซ์ (quartz wool) ในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์

การแปรสภาพทางความร้อนที่ดำเนินการนี้เป็นการแปรสภาพทางความร้อนในชั้นตอนเดียว โดยจะใส่เตาปฏิกรณ์ที่ควอตซ์เข้าไปสู่ภายในเตาไมโครเวฟในตำแหน่งศูนย์กลางของเตาจากนั้นทำการต่อระบบก๊าซพาทางด้านล่าง ต่อเทอร์โมคัปเปิลและทางออกของก๊าซทางด้านบนดังรูปที่ 3.7 จากนั้นจะต่อท่อซิลิโคนและคอนเดนเซอร์เพื่อเก็บของเหลวที่ได้ โดยในส่วนของก๊าซที่ได้จะถูกเก็บในถุงเก็บก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.7 ระบบการแปรสภาพทางความร้อนโดยการเหนี่ยวนำไมโครเวฟ

สำหรับปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพนั้นจะคำนวณตามสมการที่ (3.1)-(3.5) โดยของแข็งที่เหลือจากกระบวนการซึ่งอยู่ในเตาปฏิกรณ์ควอร์ตซ์จะถูกชั่งน้ำหนัก ในขณะที่ของเหลวที่ได้จากการทดลองซึ่งเก็บอยู่ในคอนเดนเซอร์จะถูกชะล้างออกมาด้วย dichloromethane (DCM) จากนั้นเมื่อ DCM ระเหยออกหมดจะทำการชั่งน้ำหนักที่ได้ ส่วนสัดส่วนของก๊าซซึ่งอยู่ในถุงเก็บก๊าซจะคำนวณโดยอาศัยผลต่างของน้ำหนักตามสมการ

$$\text{น้ำหนักของก๊าซและของเหลว} = W_{\text{ก่อน}} - W_{\text{หลัง}} \quad (3.1)$$

$$\text{น้ำหนักของก๊าซ} = W_{\text{ก๊าซ}} = (W_{\text{ก่อน}} - W_{\text{หลัง}}) - W_{\text{ของเหลว}} \quad (3.2)$$

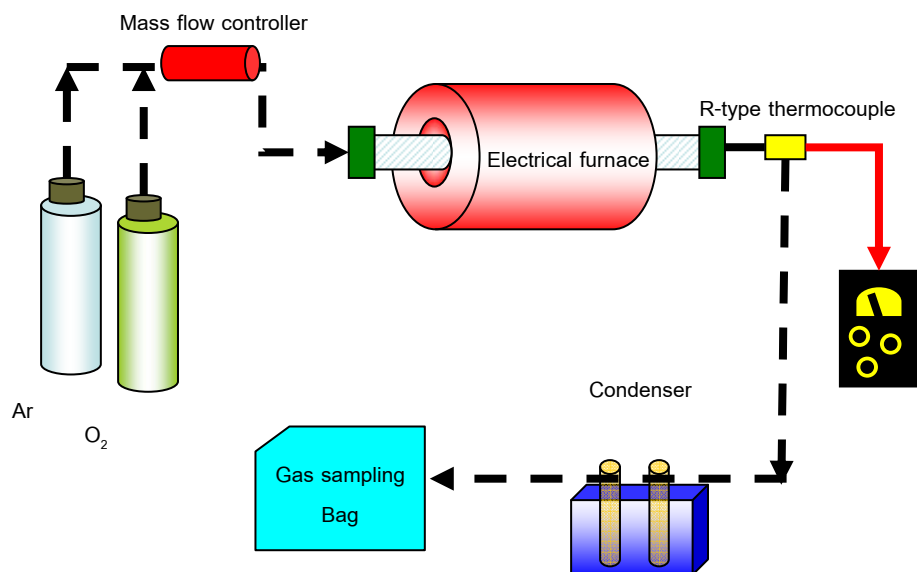
$$\text{ร้อยละของแข็ง} = (W_{\text{ของแข็ง}} / W_{\text{ก่อน}}) \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{ร้อยละของของเหลว} = (W_{\text{ของเหลว}} / W_{\text{ก่อน}}) \times 100 \quad (3.4)$$

$$\text{ร้อยละของก๊าซ} = (W_{\text{ก๊าซ}} / W_{\text{ก่อน}}) \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ	$W_{\text{ก่อน}}$	=	น้ำหนักของ EVA/NR ก่อนการทดลอง
	$W_{\text{หลัง}}$	=	น้ำหนักของ EVA/NR หลังการทดลอง = $W_{\text{ของแข็ง}}$
	$W_{\text{ของเหลว}}$	=	น้ำหนักของของเหลว
	$W_{\text{ก๊าซ}}$	=	น้ำหนักของก๊าซ

และเพื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบการให้ความร้อนทั่วไปได้ทำการติดตั้งระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700°C ดังรูปที่ 3.8 โดยการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเหมือนกันกับการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ



รูปที่ 3.8 ระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า

3.4.3 การเปรียบเทียบก๊าซมาตรฐาน

ในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซนั้นคาดว่าจะประกอบด้วยก๊าซชนิดต่างๆ อาทิ CO_2 , CO , H_2 , และ ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นเพื่อทำการเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของก๊าซที่ได้จากการทดลองจึงต้องทำการเปรียบเทียบกับก๊าซมาตรฐานโดยการฉีดก๊าซที่จะทำการวิเคราะห์เข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) แล้วจึงเปรียบเทียบโครมาโตแกรม (Chromatogram) ของก๊าซที่ผลิตได้กับโครมาโตแกรมของก๊าซมาตรฐานโดยใช้สภาวะในการทดสอบเดียวกันดังนี้

Injector	=	35°C คงที่ไว้ 5 นาที
คอลัมน์	=	50°C คงที่ไว้ 5 นาที
		75°C คงที่ไว้ 15 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 15°C/นาที
		100°C คงที่ไว้ 10 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที
อัตราการไหล	=	4 $\text{cm}^3/\text{นาที}$

จากนั้นนำพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากก๊าซมาตรฐานในช่วงของ H_2 , CO_2 และก๊าซไฮโดรคาร์บอน (C_1 - C_2 , C_3 , C_4 , C_5) มาเปรียบเทียบกับปริมาณของก๊าซที่ผลิตได้

3.4.4 การแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ

ในส่วนของการแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟนั้นได้ดำเนินการภายในแก้วควอตซ์ที่ได้ออกแบบไว้ในช่วงแรกที่กำลังของไมโครเวฟ 110, 330, และ 550 วัตต์ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง $\text{Ar}:\text{O}_2$ ในก๊าซพาเท่ากับ 100:0 และ 99:1 อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง $\text{SiC}:\text{EVA/NR}$ เท่ากับ

1:1 และ 2:1 โดย SiC นี้ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับไมโครเวฟ และแผ่ความร้อนไปถึง EVA/NR ต่อไปอีกทอดหนึ่ง โดยใช้เวลาในการทดลองทั้งหมด 6 นาที ภายหลังจากสิ้นสุดระยะเวลาในการแปรสภาพทางความร้อนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ จะถูกชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาสัดส่วนเปรียบเทียบกับน้ำหนักของ EVA/NR เริ่มต้นที่ใช้ในการแปรสภาพทางความร้อนซึ่งในแต่ละการทดลองจะใช้น้ำหนักประมาณ 5 กรัม สำหรับในส่วนของการประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ จะวิเคราะห์หาในเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ที่สภาวะดังต่อไปนี้

Injector	=	35°C คงที่ไว้ 5 นาที
คอลัมน์	=	50°C คงที่ไว้ 5 นาที
		75°C คงที่ไว้ 15 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 15°C/นาที
		100°C คงที่ไว้ 10 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที
อัตราการไหล	=	4 ซม ³ /นาที

จากนั้นนำพื้นที่ใต้กราฟของก๊าซที่ผลิตได้ มาเปรียบเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟของก๊าซมาตรฐานที่ได้ทำการทดสอบไว้แล้ว (H₂, CO₂ และก๊าซไฮโดรคาร์บอน C₁-C₂, C₃, C₄, C₅) เพื่อวิเคราะห์ชนิด และปริมาณ เป็นความเข้มข้นโดยปริมาตรของก๊าซชนิดนั้นๆ

3.4.5 การแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

การแปรสภาพทางความร้อนโดยใช้เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้านั้นได้ดำเนินการเพื่อเปรียบเทียบกับระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ โดยได้ดำเนินการที่อุณหภูมิ 700 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เตาไฟฟ้าที่ได้จัดทำมาสามารถดำเนินการได้ และมีค่าที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ได้จากระบบเตาไมโครเวฟที่กำลัง 330 วัตต์ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง Ar:O₂ ในก๊าซพาเท่ากับ 100:0 และ 99:1 โดยในการทดลองนั้นได้ทำการเปิดระบบขดลวดให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 700 °C ก่อน จากนั้นจึงนำแก้วควอตซ์ที่ภายในบรรจุ EVA/NR อยู่เข้าไปภายในเพื่อจำลองการเกิดการแปรสภาพทางความร้อนแบบเร็วซึ่งเป็นการเกิดลักษณะเดียวกันในเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ ในส่วนของผลิตภัณฑ์นั้นได้ดำเนินการวิเคราะห์ และทดสอบเช่นเดียวกันกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ ดังที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.4.4

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 การออกแบบระบบเตาปฏิกรณ์

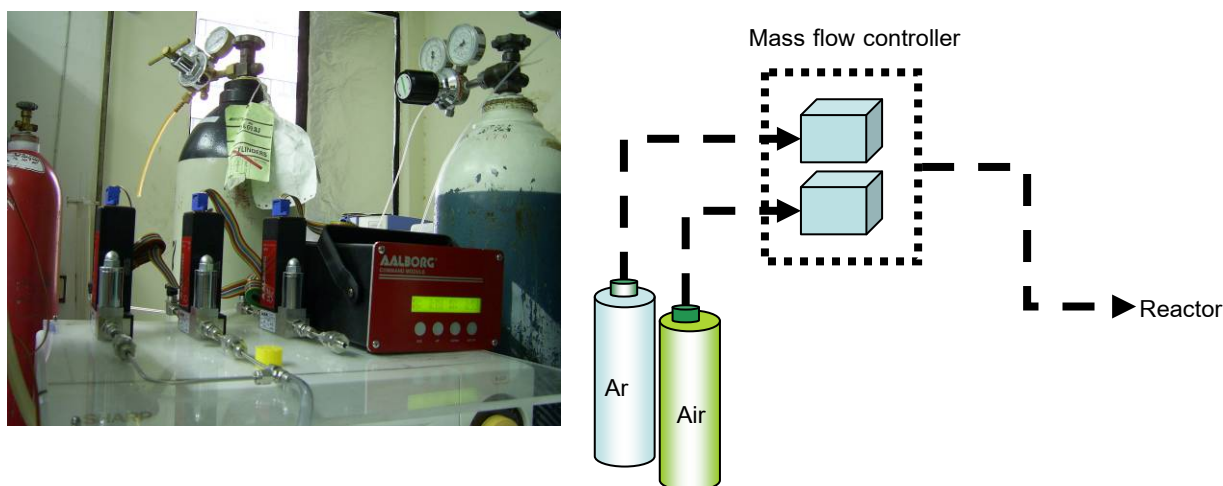
เนื่องจากระบบเตาปฏิกรณ์ที่จะใช้ในการทดลองนี้นั้นต้องการที่จะให้เป็นระบบปิดที่ก๊าซพาวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ อยู่ในระบบที่มีทางออกทางเดียวกัน การออกแบบระบบจึงต้องเป็นระบบที่คำนึงถึงการรั่วของก๊าซ ความปลอดภัย ความง่ายในการจัดหา และความสะดวกในการดำเนินการเป็นหลัก

4.1.1 ระบบทางเดินของก๊าซ

4.1.1.1 ก๊าซพา

ก๊าซพาที่ใช้เป็นก๊าซอาร์กอน และก๊าซแอร์ซีไรว์ (อากาศที่มีความสะอาด) เนื่องจากก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซที่มีความเฉื่อยจึงปลอดภัย และไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นในระบบได้ อีกทั้งยังไม่รบกวนกับการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography ที่ใช้ TCD detector (ซึ่งในกรณีของ Nitrogen นั้นอาจเกิดสัญญาณรบกวน) ส่วนแอร์ซีไรว์นั้นก็เป็นก๊าซที่มีความสะอาดและปลอดภัยเนื่องจากเป็นเพียงอากาศ ดังนั้นก๊าซทั้ง 2 ชนิดจึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นก๊าซพาให้กับระบบที่มีความร้อนและความดันเกิดขึ้น

ในส่วนของการควบคุมการไหลของก๊าซนั้นใช้เครื่องควบคุมการไหลของก๊าซ (Mass flow controller) ของ AALBORG® ที่สามารถควบคุมการไหลของก๊าซได้พร้อมกัน 3 ชนิด (3 channels) ซึ่งระบบการควบคุมการไหลของก๊าซได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการไหลของก๊าซอาร์กอน และแอร์ซีไรว์ ผ่าน Mass flow controller

4.1.1.2 สายก๊าซและข้อต่อ

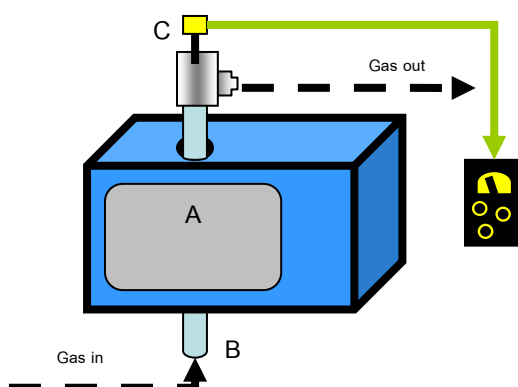
เนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นก๊าซ ดังนั้นข้อต่อและวาล์วที่ใช้จึงต้องเป็นข้อต่อที่ทำมาจากสแตนเลสและทองเหลือง ที่มีความหนาแน่นและมีความคงทน ในส่วนของท่อก๊าซนั้นใช้ท่อสแตนเลสในส่วนที่ติดตั้งอย่างถาวร และใช้ท่อซิลิโคนในส่วนที่ต้องมีการถอดเข้า-ออกอยู่เป็นประจำ

4.1.1.3 การเก็บผลิตภัณฑ์

เมื่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจากเตาปฏิกรณ์แล้ว จะมีทั้งก๊าซ และไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งต้องใช้ condenser เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้เกิดการควบแน่นตกลงมา ซึ่ง condenser ที่ใช้นั้นเป็นสายซิลิโคนที่แช่อยู่ในอ่างน้ำแข็ง ซึ่งจะทำให้การหาปริมาณของเหลวเหล่านี้โดยใช้ Dichloromethane ล้างออกมาจากสายซิลิโคน ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซจะเก็บใส่ถุงที่มีวาล์วเปิดปิดเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป และสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของแข็งที่อยู่ในหลอดแก้วควอซต์จะทำการชั่งน้ำหนักเมื่อเสร็จสิ้นการแปรสภาพทางความร้อน

4.1.2 การดัดแปลงเครื่องไมโครเวฟ

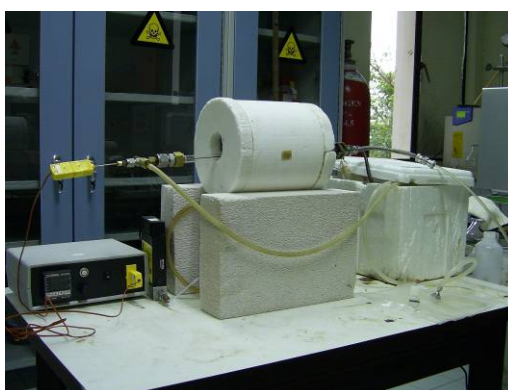
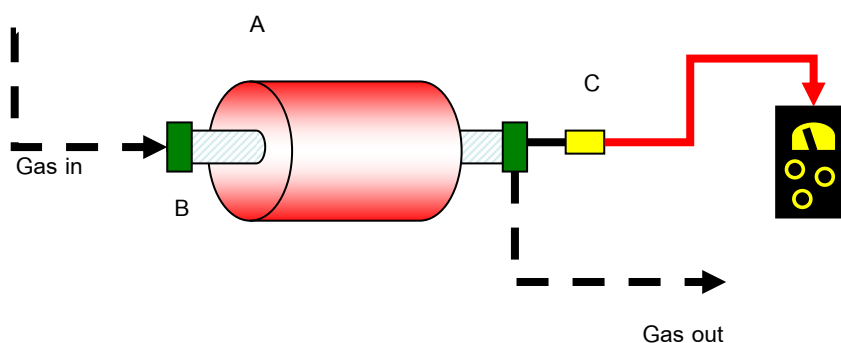
เครื่องไมโครเวฟที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดไมโครเวฟนั้นเป็นเตาไมโครเวฟที่ใช้ตามครัวเรือนทั่วไปซึ่งยังไม่สามารถใช้งานได้ทันทีจึงต้องมีการดัดแปลงให้มีความเหมาะสมและสะดวกต่อการดำเนินงาน ซึ่งเนื่องจากเตาปฏิกรณ์ที่ใช้นั้นทำมาจากหลอดแก้วควอซต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 13 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 9 มม. ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ออกแบบให้เครื่องไมโครเวฟและหลอดแก้วควอซต์อยู่ในแนวที่ตั้งฉากกันดังรูปที่ 4.2 โดยให้ทางเข้าของก๊าซนั้นอยู่ทางด้านล่าง และมีทางออกอยู่ทางด้านบน ซึ่งมีข้อต่อ 3 ทางสำหรับหลอดแก้วควอซต์ เทอร์โมคัปเปิล และเป็นทางออกก๊าซเข้าสู่ condenser



รูปที่ 4.2 แสดงการดัดแปลงเครื่องไมโครเวฟโดย A) เครื่องไมโครเวฟ B) หลอดแก้วควอซต์ C) เทอร์โมคัปเปิล

4.1.3 ระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า

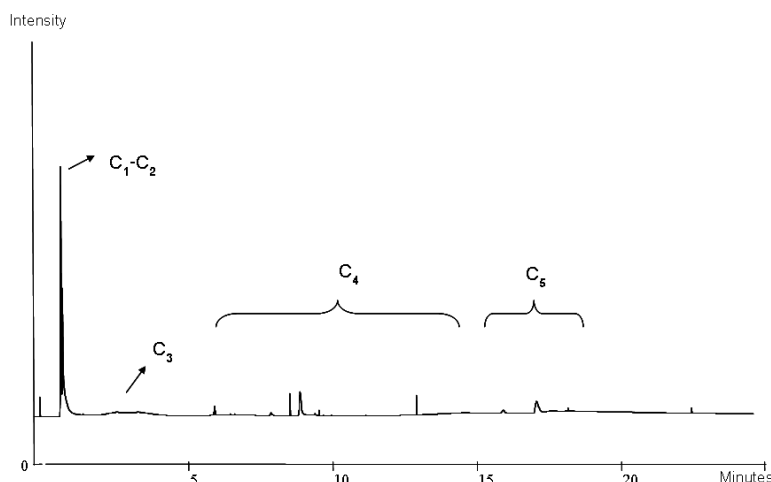
ระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้าใช้เตาปฏิกรณ์แบบ Horizontal fixed bed reactor ซึ่งมีระบบทางเดินของก๊าซคล้ายคลึงกับการใช้ระบบไมโครเวฟ ซึ่งเตาไฟฟ้าได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงเตาไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง A) เตาไฟฟ้า B) หลอดแก้วควอตซ์ C) เทอร์โมคัปเปิล

4.2 การสอบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้วัดก๊าซ (Gas Chromatography) กับก๊าซมาตรฐาน

การสอบเทียบก๊าซมาตรฐานกับก๊าซโครมาโตกราฟีนั้นขณะนี้ดำเนินการวัด CO_2 , H_2 , CH_4 , และไฮโดรคาร์บอน $\text{C}_1\text{-C}_5$ แต่ไม่สามารถวัด CO ได้เนื่องจากการตอบสนองต่อเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยังไม่เป็นที่ชัดเจน ซึ่งช่วงเวลา และการตอบสนองต่อเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ของไฮโดรคาร์บอน $\text{C}_1\text{-C}_5$ แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงช่วงเวลาและการตอบสนองของ Hydrocarbon

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า C_1-C_2 นั้นจะมี peak ที่ใกล้เคียงกันมากจึงไม่สามารถที่จะบอกตำแหน่งที่แน่นอนได้ แต่ C_3 , C_4 , และ C_5 สามารถบอกตำแหน่งที่แน่นอนได้ ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นโดยปริมาตรซึ่งจะได้นำมาเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่จะเก็บได้ในอนาคต ซึ่งความเข้มข้นโดยปริมาตร และพื้นที่ใต้กราฟของ C_1-C_2 , C_3 , C_4 , และ C_5 ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงความเข้มข้นโดยปริมาตร และพื้นที่ใต้กราฟของ C_1-C_2 , C_3 , C_4 , และ C_5

Species	Peak area	%Vol
C_1-C_2	3,491,466	16
C_3	67,228	6
C_4	511,820	35
C_5	450,403	3

4.3 ธาตุองค์ประกอบ และสมบัติทางความร้อนของ EVA/NR

4.3.1 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของ EVA/NR

จากการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง Elemental Analyzer ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.2 พบว่า EVA/NR นั้นมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ คาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน ตามลำดับ ซึ่งจากการที่มีปริมาณของคาร์บอน และไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงนี้ แสดงว่าวัสดุนั้นสามารถที่จะเกิดการแปรสภาพทางความร้อน และแตกตัวเป็นก๊าซ หรือ สารประกอบโมเลกุลเล็กๆ ได้แก่ CO , H_2 , และ C_xH_y (C_1-C_5) ซึ่งสารเหล่านี้เมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic reaction) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายไม่ว่าในแง่ของการนำไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์เพื่อทดแทนการเชื้อเพลิงปิโตรเลียม และถ่านหิน หรือการนำ

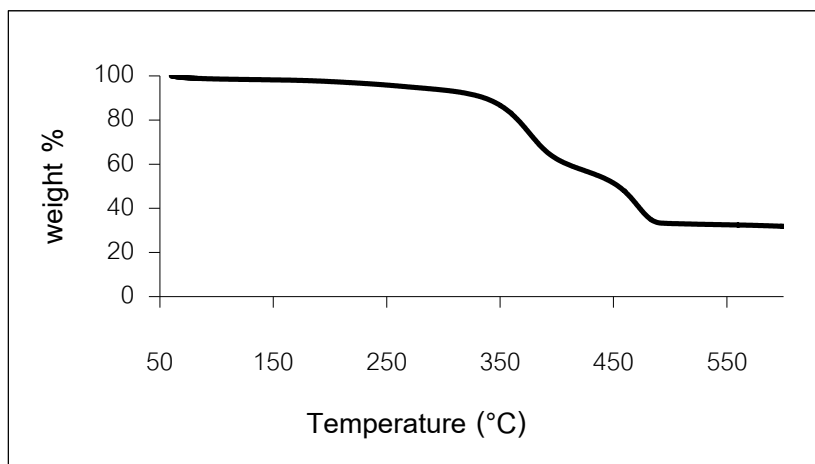
กลับไปสังเคราะห์เป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆต่อไป นอกจากนี้ยังพบว่าใน EVA/NR นั้นมีปริมาณของซัลเฟอร์ และไนโตรเจน ที่ต่ำมากซึ่งแสดงว่าเมื่อ EVA/NR นี้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะเกิดก๊าซ SO_x และ NO_x ซึ่งเป็นก๊าซที่เป็นพิษในปริมาณที่ต่ำจึงไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อปล่อยออกสู่ภายนอก

ตารางที่ 4.2 ธาตุองค์ประกอบของ EVA/NR

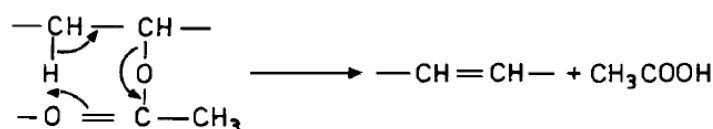
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
C	57.6
H	8.3
N	1.3
O	32.7

4.3.2 สมบัติทางความร้อนของ EVA/NR

การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของ EVA/NR นั้นใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) โดยการทำให้ EVA/NR นั้นเกิดการสลายตัวภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพาที่อัตราการไหล 20 ml/min อุณหภูมิ 60-600 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 20 °C/min จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า EVA/NR นั้นจะเกิดการสลายตัว 2 ขั้นตอน โดยการสลายตัวในขั้นแรกเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 300-360°C โดยพบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักจาก 91% เหลือ 58% ซึ่งการสลายตัวในขั้นแรกนี้คาดว่าเกิดจากการที่ส่วนของไวนิลเอซีเตตในสายโซ่โมเลกุลเกิดการปลดปล่อยกรดแอซิดิกออกมา และเกิดเป็นพันธะคู่ขึ้นบนสายโซ่โมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งพันธะคู่นี้เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้นก็จะเกิดการสลายตัวได้ต่อไป ซึ่งผลการทดลองนี้คล้ายกับงานวิจัยของ N. Gupta และคณะ (N. Gupta et al., 1999) ที่ศึกษาการสลายตัวของ EVA ที่ใช้ในทางการค้าและพบช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของ EVA ที่อุณหภูมิประมาณ 250-350 °C ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับที่ศึกษาได้ สำหรับในส่วนของการเกิดการสลายตัวในขั้นที่สองนั้นพบว่าเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 400-500 °C โดยมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักลดลงจาก 56% เหลือ 33 % ซึ่งเป็นการเกิดการสลายตัวของโครงสร้างที่มีพันธะคู่ที่เกิดจากการสลายตัวในขั้นตอนแรก และจากโครงสร้างส่วนที่เป็นเอทิลีนบนสายโซ่หลัก แต่จากการศึกษาของ N. Gupta นั้นพบอุณหภูมิการสลายตัวในขั้นที่สองนี้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเล็กน้อยคือที่ 350-450 °C ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ EVA/NR ที่ใช้ในการศึกษานี้บางส่วนของโมเลกุลถูกทำให้เกิดการเชื่อมขวางเพื่อเพิ่มสมบัติการใช้งาน ดังนั้นจึงส่งผลให้อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวมีค่าที่สูงกว่า EVA ที่ใช้ในทางการค้าทั่วไปที่ได้มีการเชื่อมขวางแต่อย่างใด ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า EVA/NR นั้นสามารถเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C นั้นเอง



รูปที่ 4.5 การสลายตัวทางความร้อนของ EVA/NR ภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน



รูปที่ 4.6 การสลายตัวของ EVA/NR โดยการกำจัดกรดแอซิดิก และเกิดเป็นพันธะคู่

4.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพทางความร้อน

การศึกษาการแปรสภาพทางความร้อนของ EVA/NR ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของกำลังไมโครเวฟ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง Ar:O₂ ในก๊าซพา และอัตราส่วนระหว่าง SiC:EVA/NR โดยจะทำการบรรจุ SiC ปริมาตร 1 และ 2 ml และ EVA/NR ปริมาตร 1 ml (อัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1 และ 2:1 ตามลำดับ) ลงในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์โดยจะทำการวางสลับกันไปเป็นชั้นๆโดยให้ความหนาเท่าๆกัน จากนั้นทำการแปรสภาพทางความร้อนเป็นเวลานาน 360 วินาที โดยทำการแบ่งเก็บตัวอย่างก๊าซออกเป็น 2 ช่วงด้วยกันคือช่วงแรกเป็นเวลา 0-180 วินาที และที่เวลา 181-360 วินาที ตัวอย่างก๊าซที่เก็บได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas Chromatography ด้วยตัวตรวจจับชนิด Thermal Conductivity Detector (TCD) เพื่อวิเคราะห์ก๊าซ CO₂, H₂ และ Flame Ionized Detector (FID) เพื่อวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณของก๊าซ CO₂, H₂, และ C_xH_y ในช่วง C₁-C₅ โดยทำการเปรียบเทียบกับก๊าซมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน ในส่วนของการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เป็น ของแข็ง ของเหลว และก๊าซนั้น จะใช้การชั่งน้ำหนักของของแข็ง และของเหลว จากนั้นจึงคำนวณหาปริมาณของก๊าซโดยอาศัยกฎทรงมวล ทั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้าควบคุมกันไปด้วย

4.4.1 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์

การแปรสภาพทางความร้อนของ EVA/NR ที่สภาวะต่างๆพบว่า EVA/NR นั้นสามารถเกิดการสลายตัวได้อย่างรวดเร็วภายใต้ระบบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ ซึ่งการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ แสดงไว้ดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 โดยพบว่าเมื่อกำลังของไมโครเวฟมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าที่เพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณของของแข็งมีค่าที่ลดลง ที่ทุกอัตราส่วนของก๊าซพา และอัตราส่วนระหว่าง EVA/NR: SiC ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้มีความสอดคล้องกันกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ดังแสดงในตารางที่ 4.5-4.6 ซึ่งการที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซเพิ่มมากขึ้น แต่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งลดลงนี้เนื่องมาจากการที่ของแข็งที่เกิดขึ้นในตอนแรกนั้นทำปฏิกิริยากับก๊าซผลิตภัณฑ์ และก๊าซพา ต่อเนื่องไปในระหว่างการทดลอง นอกจากนี้การที่กำลังของไมโครเวฟมีค่าที่สูงขึ้นนี้จะช่วยในการเร่งให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลได้ดีขึ้นจึงส่งผลให้ EVA/NR ส่วนใหญ่นั้นเกิดการแปรสภาพไปเป็นก๊าซในสัดส่วนที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์อื่น

ตารางที่ 4.3 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ (%) โดยน้ำหนัก) ที่อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ เท่ากับ 100:0 ทั้งระบบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ และการใช้เตาไฟฟ้า

SiC :EVA/NR	Microwave power (watts)	Solid	Oil	Gas
1:1	110	88.3	5.1	6.6
	330	32.3	36.5	31.2
	550	29.8	28.5	41.7
2:1	110	84.5	9.7	5.8
	330	44.1	24.9	31.0
	550	30.9	28.8	40.3
Electrical furnace		30.3	38.1	31.7

ตารางที่ 4.4 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ (%) โดยน้ำหนัก) ที่อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ เท่ากับ 99:1 ทั้งระบบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ และการใช้เตาไฟฟ้า

SiC :EVA/NR	Microwave power (watts)	Solid	Oil	Gas
1:1	110	64.7	15.8	19.5
	330	30.0	21.4	48.6
	550	23.4	23.2	53.4
2:1	110	78.3	13.9	7.8
	330	33.4	16.5	50.1
	550	33.7	17.5	48.8
<i>Electrical furnace</i>		31.2	25.9	42.9

ตารางที่ 4.5 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลสเศษหนังเทียมโดย O. Yilmaz และคณะ (O. Yilmaz et al., 2007)

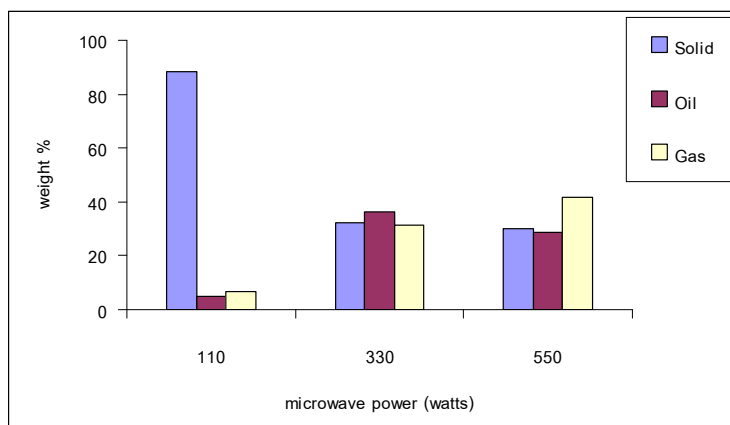
	Temperature (°C)	
	450	600
<i>Char</i>	44.5	38.1
<i>Oil + Aqueous</i>	32.0	28.9
<i>Gas</i>	17.8	23.6

ตารางที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งการให้ความร้อนแบบใช้เตาไฟฟ้า และการให้ความร้อนโดยไม่โครเวฟของสลัดจ์น้ำเสียโดย A. Domínguez และคณะ (A. Domínguez et al., 2006)

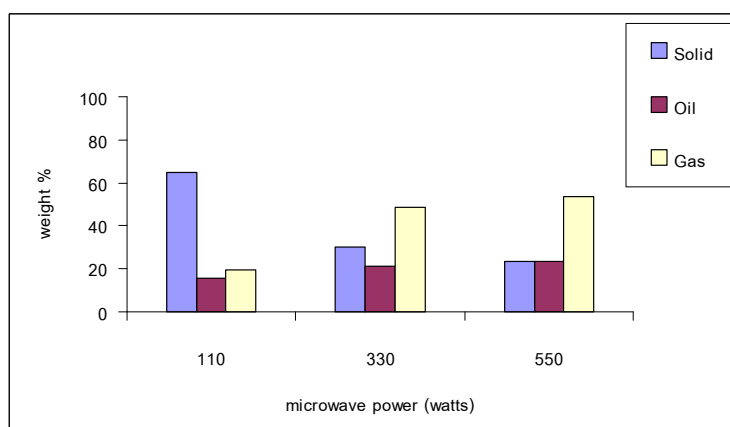
	Temperature		
	500°C	800°C	1000°C
Microwave heating			
<i>Solid</i>	30.2	25.5	22.7
<i>Oil</i>	7.9	9.2	8.6
<i>Gas</i>	61.9	65.3	68.7
Electrical furnace			
<i>Solid</i>	29.2	25.3	24.1
<i>Oil</i>	13.6	11.8	11.3
<i>Gas</i>	57.2	62.9	64.6

ปริมาณในการเกิดก๊าซ CO_2 , CO , H_2 , และ C_xH_y ($\text{C}_1\text{-C}_5$) นั้นเป็นสิ่งที่สำคัญที่สามารถสะท้อนถึงลักษณะของการแปรสภาพทางความร้อน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ข้างต้นตามที่กล่าวมานั้นจะขึ้นกับตัวแปรหลักๆ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และบรรยากาศที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา กลไกในการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์จากวัสดุนั้นส่วนใหญ่พบว่าจะเกิดจากการแตกตัวของสายโซ่หลักของวัสดุทั้งการแตกตัวแบบ Random Chain Scission และ Depolymerization หรืออาจเกิดเนื่องมาจากก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของปฏิกิริยาสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง เช่นเกิดปฏิกิริยาด้วยกันเองระหว่างก๊าซผลิตภัณฑ์ เกิดปฏิกิริยากับก๊าซพา และเกิดปฏิกิริยากับของแข็งหรือของเหลว เป็นต้น ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [6, 9, 11, 13, 14, 15, 16] และตารางที่ 4.6 นั้นต่างแสดงผลของการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ไปในทิศทางเดียวกันนั่นคือ สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซนั้นมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นในขณะที่ของแข็ง และของเหลวมีค่าที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแปรสภาพมีค่าที่สูงขึ้นนั้นแสดงว่าภายใต้สภาวะที่มีการให้อุณหภูมิ และอัตราการให้ความร้อนที่สูงจะช่วยในการส่งเสริมการเกิดก๊าซได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับข้อสรุปจากงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะ (A. Domínguez et al. 2006) ที่กล่าวว่าที่อัตราการให้ความร้อนที่สูง ณ อุณหภูมิที่สูงกว่า 650 °C จะช่วยส่งเสริมการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อดำเนินการแปรสภาพทางความร้อนด้วยไมโครเวฟ อุณหภูมิจะมีค่าที่สูงขึ้นตามกำลังของไมโครเวฟที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อกำลังของไมโครเวฟสูงขึ้นจะทำให้ประจุ หรืออิเล็กตรอนอิสระบน SiC นั้นสามารถที่จะเกิดการสั่น และเคลื่อนที่ได้มากยิ่งขึ้นจึงสามารถ

เกิดการเสียดสีกันระหว่างประจุเหล่านี้กับความต้านทานภายในของ SiC เอง ซึ่งการสั่นที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ ทำให้สามารถเกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็วสูงกว่าระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า และความร้อนเหล่านี้จะแผ่ให้กับวัสดุอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกันทำให้วัสดุนั้นเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว และเฉียบพลัน จากที่กล่าวมาทำให้ที่กำลังของไมโครเวฟเท่ากับ 550 วัตต์ สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้ในปริมาณที่สูงกว่าที่กำลังไมโครเวฟ 330 และ 110 วัตต์ ที่ทุกอัตราส่วนของก๊าซพาดังแสดงในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8



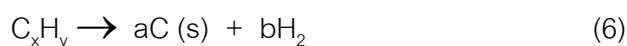
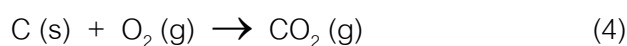
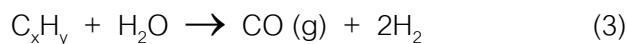
รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วน Ar: O₂ ในก๊าซพา 100:0 อัตราส่วน EVA/NR: SiC 1:1



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วน Ar: O₂ ในก๊าซพา 99:1 อัตราส่วน EVA/NR: SiC 1:1

ในส่วนขององค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์นั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ CO₂, H₂ และ C_xH_y ในช่วง C₁-C₅ เท่านั้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับผลงานวิจัยของ A. Marcilla และคณะ (Marcilla et al., 2005) นั่นคือผลการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าที่สภาวะการทดลองภายใต้อัตราส่วนของ Ar:O₂ ในก๊าซพา 99:1 สามารถผลิตก๊าซ H₂ ได้ในปริมาณที่สูงกว่าอัตราส่วน 100:0 (ตารางที่ 4.7) ทั้งนี้เนื่องมาจากที่สภาวะดังกล่าวมีออกซิเจนอยู่ในระบบซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ EVA/NR ซึ่งเป็นการแปรสภาพทางความร้อนในรูปแบบของการเกิดแก๊สซิฟิเคชันที่มีความสามารถในการผลิตก๊าซ H₂

ได้ดีกว่าสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นของกำลังของไมโครเวฟจาก 110-550 วัตต์ พบว่าปริมาณการเกิด CO_2 มีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อกำลังของไมโครเวฟมีค่าที่เพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 4.8 โดยผลที่ได้เป็นไปในทางตรงกันข้ามกับงานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมาซึ่งใช้ไมโครเวฟเช่นกัน [11, 14, 17] ดังตารางที่ 4.9 และ 4.10 ซึ่งพบว่าเมื่อกำลังของไมโครเวฟหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ปริมาณของ CO_2 มีค่าที่ลดลง ทั้งนี้คาดว่าเนื่องมาจากการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟงานวิจัยนี้นั้นเป็นการให้ความร้อนที่มีความรวดเร็วมากประกอบกับการที่ EVA/NR มีออกซิเจนอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ดังนั้น CO_2 จึงสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็วและสามารถออกไปสู่ภายนอกระบบได้ภายในเวลาอันสั้นทำให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับบรรยากาศ ของแข็ง และก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าที่น้อยลง หรือสามารถกล่าวได้ว่าอัตราในการเกิด CO_2 มีค่าที่สูงกว่าอัตราในการใช้ CO_2 ในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอน และสารประกอบคาร์บอนในปฏิกิริยาที่ (1) และ (2) นั่นเอง สมการที่ (1)-(6)แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว



ตารางที่ 4.7 ปริมาณของก๊าซ H_2 ($\times 10^{-4}$ กรัม) ที่อัตราส่วนของ EVA/SiC 1:1

Microwave power (watts)	Weight (g)	
	Ar	Ar/O ₂
110	0.00	0.03
330	0.25	1.10
550	61.12	190.77
Electrical furnace	0.02	0.02

ตารางที่ 4.8 ปริมาณของก๊าซ CO_2 ($\times 10^{-4}$ กรัม) ที่อัตราส่วนของ EVA/SiC 1:1

Microwave power (watts)	Weight (g)	
	Ar	Ar/O ₂
110	24.64	25.76
330	55.05	93.52
550	121.40	215.65
Electrical furnace	128.20	106.40

การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของไฮโดรคาร์บอนนั้นใช้เทคนิค Gas Chromatography โดยใช้ตัวตรวจจับ Flame Ionized Detector (FID) ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณการเกิดไฮโดรคาร์บอนนั้นมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นตามกำลังของไมโครเวฟที่สูงมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งที่ กำลังของไมโครเวฟเท่ากับ 110 วัตต์ นั้นพบว่าปริมาณของไฮโดรคาร์บอนที่ได้นั้นมีปริมาณที่ต่ำมากแต่เมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟเป็น 330 และ 550 วัตต์ แล้ว พบว่าปริมาณของไฮโดรคาร์บอนนั้นมีค่าที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนทั้งนี้เนื่องมาจากที่อุณหภูมิที่สูงนี้สามารถเกิดการแตกตัวของ EVA/NR ได้ดียิ่งขึ้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ ในก๊าซพบว่าที่อัตราส่วนเท่ากับ 99:1 นั้นสามารถผลิตไฮโดรคาร์บอนได้ในปริมาณที่สูงกว่าเนื่องมาจากการที่ออกซิเจนที่เพิ่มเข้าไปในระบบนั้นสามารถเร่งการแตกตัวโดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ EVA/NR นั้นเอง

รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 แสดงโครมาโทแกรมของก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่วิเคราะห์ได้จากก๊าซผลิตภัณฑ์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วน Ar:O₂ ในก๊าซพาทีกำลังของไมโครเวฟ 110 วัตต์พบว่าที่

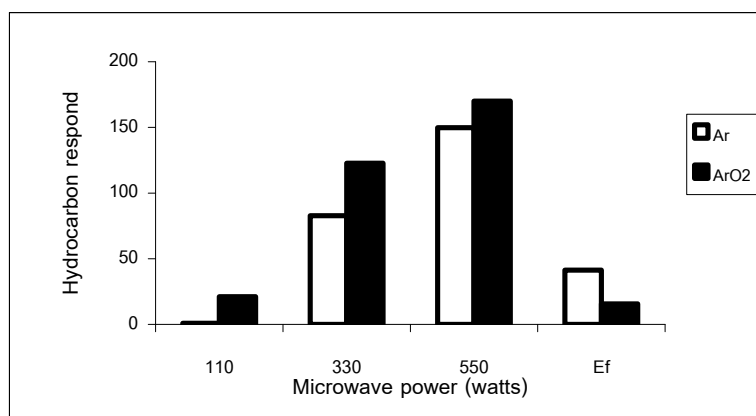
อัตราส่วน Ar:O₂ 99:1 (การแปรสภาพทางความร้อนแบบแก๊สซิฟิเคชัน) สามารถผลิตไฮโดรคาร์บอนได้ดีกว่าที่อัตราส่วน 100:0 และเมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟเป็น 330 และ 550 วัตต์ ปริมาณของไฮโดรคาร์บอนก็มีค่าที่สูงมากขึ้นตามไปด้วย หรือสามารถกล่าวได้ว่าระบบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟนั้นสามารถผลิตก๊าซไฮโดรคาร์บอนได้ในปริมาณที่สูงขึ้นตามกำลังของไมโครเวฟ และมีปริมาณที่สูงกว่าจากที่ผลิตได้จากระบบการให้ความร้อนโดยการให้เตาไฟฟ้า นอกจากนี้พบว่าที่กำลังของไมโครเวฟเท่ากับ 110 วัตต์ที่อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ ในก๊าซพา 100:0 พบว่าปริมาณของไฮโดรคาร์บอนนั้นมีปริมาณที่ต่ำมากทั้งนี้เนื่องมาจากที่กำลังของไมโครเวฟ 110 วัตต์นั้นไม่สามารถทำให้เกิดความร้อนที่สูงพอจนทำให้ EVA/NR เกิดการสลายตัวได้

ตารางที่ 4.9 ปริมาณของ H₂, CO₂, และ CH₄ จากการแปรสภาพทางความร้อนของสไลด์จ้ำน้ำเสีย โดยการใช้ระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน จากงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะ (A. Domínguez et al., 2006)

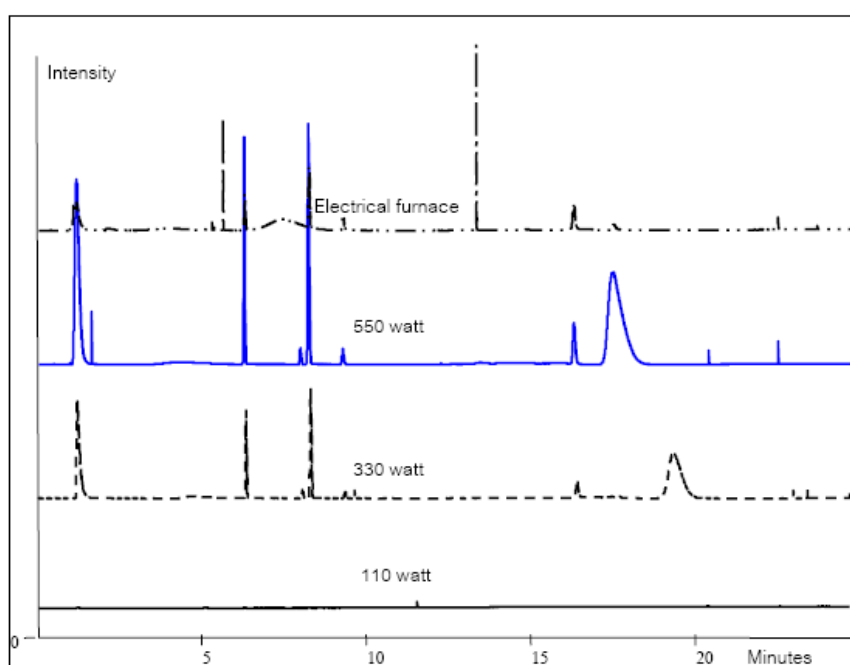
	Temperature (°C)		
	500	800	1,000
H ₂	35.6	38.2	40
CO ₂	28.4	22.7	17.7
CH ₄	7.25	7.13	6.74

ตารางที่ 4.10 ร้อยละโดยปริมาตรของ H₂, CO₂, และ CH₄ จากการแปรสภาพทางความร้อนสไลด์จ้ำของน้ำเสียโดยการใช้ระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้าอุณหภูมิต่าง ๆ กัน จากงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะ (A. Domínguez et al., 2006)

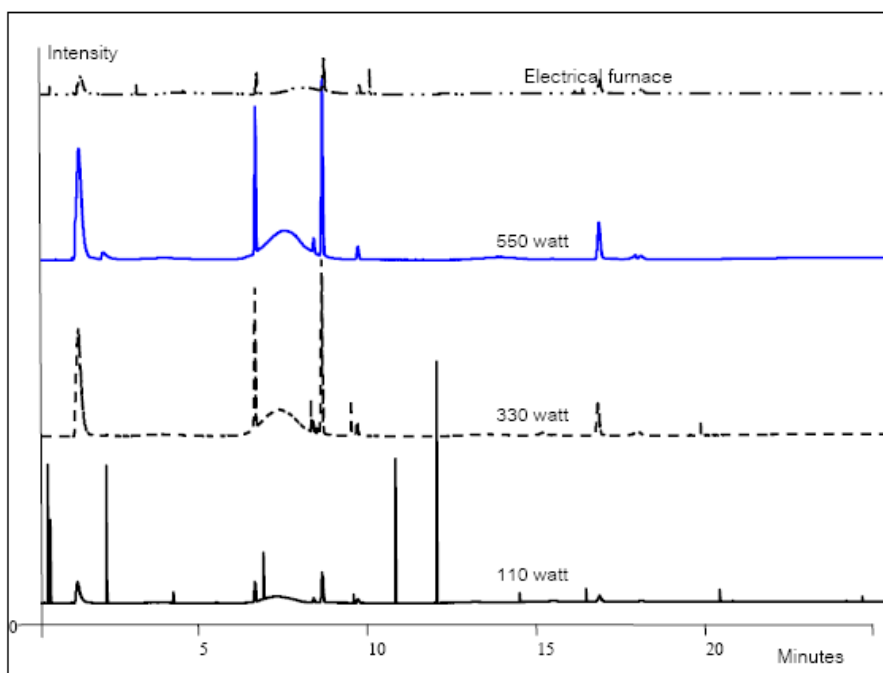
	Temperature		
	500 °C	800 °C	1,000 °C
H ₂	9.3	25.8	29.9
CO ₂	56.6	39.1	32.0
CH ₄	11.3	10.9	10.7



รูปที่ 4.9 การตอบสนองต่อไฮโดรคาร์บอนที่อัตราส่วน EVA/NR: SiC 1:1 ระหว่างอัตราส่วน Ar:O₂ ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO₂)

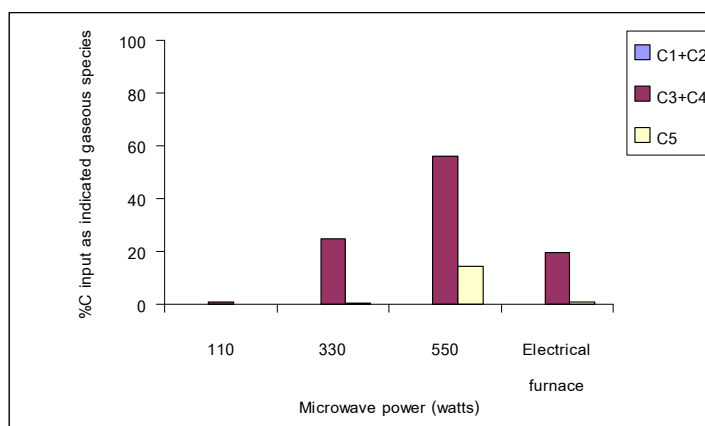


รูปที่ 4.10 การตอบสนองต่อไฮโดรคาร์บอนของเครื่อง Gas Chromatography อัตราส่วน Ar:O₂ ในก๊าซพา 100:0 อัตราส่วนระหว่าง EVA/NR: SiC 1:1

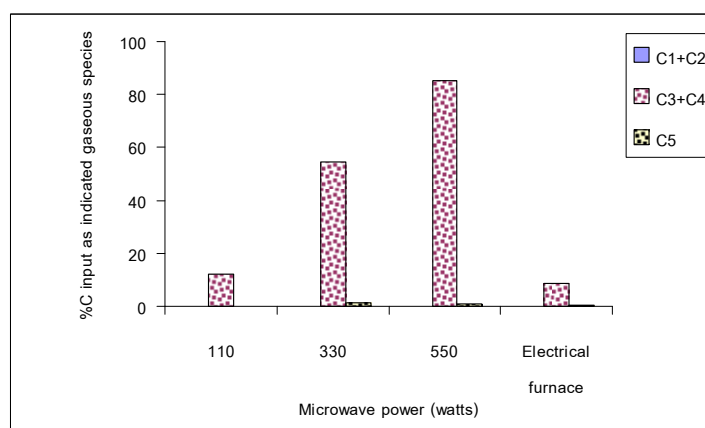


รูปที่ 4.11 การตอบสนองต่อไฮโดรคาร์บอนของเครื่อง Gas Chromatography อัตราส่วน Ar:O₂ ในก๊าซพา 99:1 อัตราส่วนระหว่าง EVA/NR: SiC 1:1

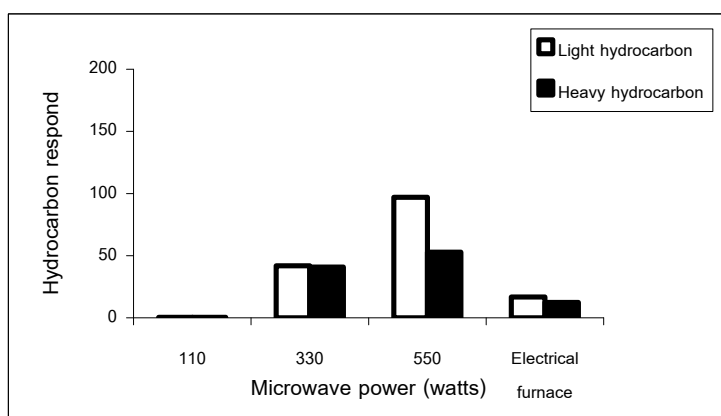
รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 แสดงการแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นไฮโดรคาร์บอน C₁-C₅ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในช่วง C₃+C₄ นั้นมีปริมาณที่สูงที่สุดที่ทุกกำลังของไมโครเวฟ อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ และทุกระบบการให้ความร้อน ซึ่งเป็นผลมาจากการแตกตัวแบบ depolymerization ซึ่งเป็นการแตกตัวของ EVA/NR ออกเป็นหน่วยย่อยๆหรือโมโนเมอร์ ปริมาณของ C₅ พบในปริมาณที่รองลงมา และ C₁+C₂ นั้นพบว่ามีปริมาณที่ต่ำที่สุดซึ่งคาดว่าเกิดจากการแตกตัวแบบส่มของ EVA/NR นั้นเอง ระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟสามารถผลิตไฮโดรคาร์บอนได้ในปริมาณที่สูงกว่าระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า เมื่อพิจารณาที่กำลังของไมโครเวฟ 550 วัตต์ อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ 100:0 (การแปรสภาพแบบไพโรไลซิส) การแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นไฮโดรคาร์บอน C₃+C₄ และ C₅ เท่ากับ 56% และ 14% ตามลำดับ แต่เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ ในก๊าซพา 99:1 (การแปรสภาพแบบแก๊สซิฟิเคชัน) พบว่าการแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นไฮโดรคาร์บอน C₃+C₄ และ C₅ เปลี่ยนไปเป็น 85% และ 0.7% ตามลำดับซึ่งปริมาณของ C₃+C₄ ที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนนี้เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของ EVA/NR และ C₅ ที่เกิดการแตกตัวออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงเช่น C₃+C₄ นั้นเองซึ่งปริมาณของ C₃+C₄ ที่สูงขึ้นนี้สามารถพบได้ที่ทุกสภาวะของระบบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ และมีผลที่ชัดเจนกว่าเมื่อเทียบกับระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า



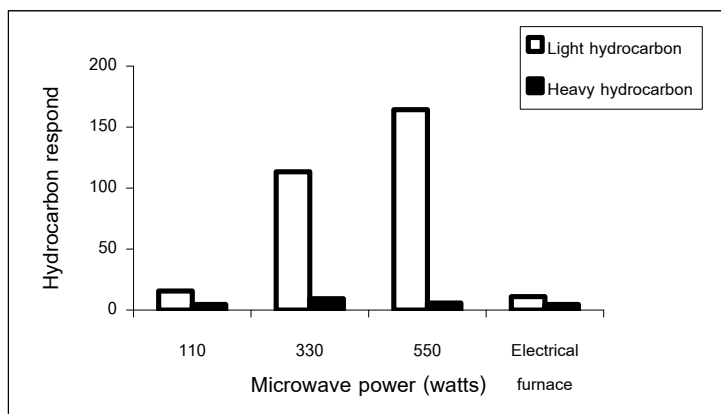
รูปที่ 4.12 การแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ 100:0



รูปที่ 4.13 การแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ 99:1



รูปที่ 4.14 การตอบสนองต่อไฮโดรคาร์บอนของเครื่อง Gas Chromatography อัตราส่วน Ar:O₂ ในก๊าซพา 100:0

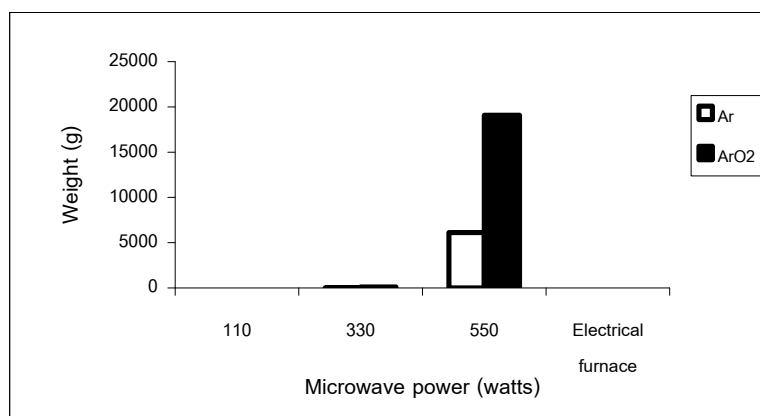


รูปที่ 4.15 การตอบสนองต่อไฮโดรคาร์บอนของเครื่อง Gas Chromatography อัตราส่วน Ar:O₂ ในก๊าซพา 99:1

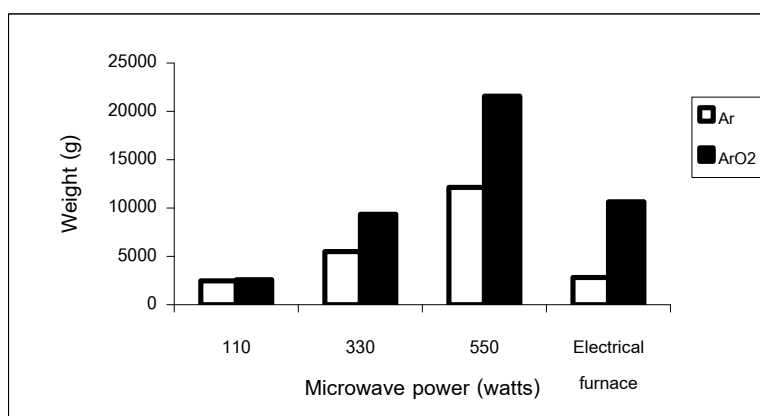
จากรูปที่ 4.14 ทั้งที่กำลังของไมโครเวฟ 110 และ 330 วัตต์ และ ระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้าพบว่าปริมาณของ ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก (light hydrocarbon, C₁-C₃) และไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ (heavy hydrocarbon, C₄-C₅) นั้นมีปริมาณที่ไม่แตกต่างกันมากนักแต่ที่กำลังของไมโครเวฟเท่ากับ 550 วัตต์ พบว่าปริมาณของไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กนั้นมีปริมาณที่สูงมากขึ้น และปริมาณของไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ก็มีปริมาณที่ลดลงชัดเจน นอกจากนี้ที่อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ 99:1 (รูปที่ 4.15) พบว่ามีปริมาณของไฮโดรคาร์บอนที่สูงกว่าที่อัตราส่วน Ar:O₂ 100:0 ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่โมเลกุลของ EVA/NR และของแข็งที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยานั้นเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยเฉพาะไฮโดรคาร์บอน (รูปที่ 4.9) อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันดังสมการที่ (3), (4) และ (6)

การแตกตัวออกของไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่กลายเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กนั้นสามารถเห็นได้ชัดเจนที่อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ 99:1 ซึ่งการแตกตัวนี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากสองกระบวนการด้วยกันกระบวนการแรกคือ ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ที่เกิดจากการแตกตัวของ EVA/NR นั้นมีเวลาและอุณหภูมิที่เพียงพอในการแตกตัวมากขึ้นทำให้ได้ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง (สามารถพบได้ที่กำลังของไมโครเวฟ 330, 550 วัตต์ และระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า) ส่วนกระบวนการที่สองนั้นเกิดจากการที่ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเช่น CO₂, CO, H₂ และ CH₄ ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ไปเหนี่ยวนำและทำให้ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่เกิดการแตกตัวต่อไปได้ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กได้อีกเช่นเดียวกัน นอกจากนี้การที่มีออกซิเจนอยู่ในระบบนั้นจะช่วยส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่จากปฏิกิริยาที่ (2) และ (3) ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการที่ปริมาณของ H₂, CO₂, และ CH₄ ดังแสดงในรูปที่ 4.16, 4.17, และ 4.18 ตามลำดับ ที่ปริมาณของก๊าซดังกล่าวมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่กำลังของไมโครเวฟ 550 วัตต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่กำลังของ

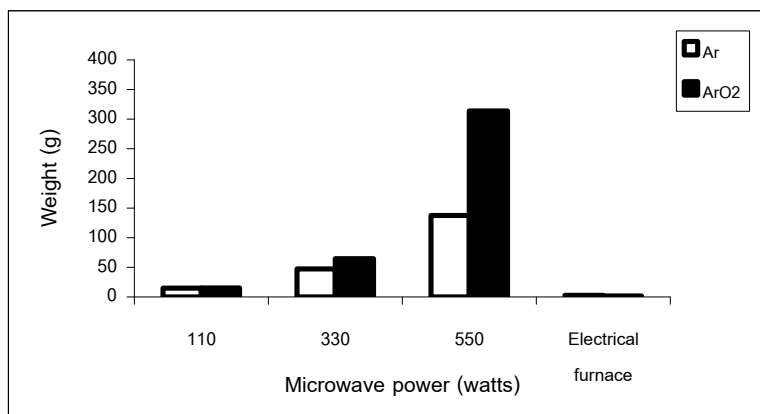
ไมโครเวฟนั้นสามารถให้อุณหภูมิที่สูงเพียงพอต่อการแตกตัวของ EVA/NR และไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ให้กลายเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ดังกล่าวซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนที่อัตราส่วนของ $\text{Ar}:\text{O}_2$ 99:1



รูปที่ 4.16 น้ำหนักของก๊าซไฮโดรเจนที่กำลังของไมโครเวฟต่างๆระหว่างอัตราส่วน $\text{Ar}:\text{O}_2$ ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO_2)



รูปที่ 4.17 น้ำหนักของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่กำลังของไมโครเวฟต่างๆระหว่างอัตราส่วน $\text{Ar}:\text{O}_2$ ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO_2)



รูปที่ 4.18 น้ำหนักของก๊าซมีเทนที่กำลังของไมโครเวฟต่างๆระหว่างอัตราส่วน Ar:O₂ ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO₂)

จากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนของ Ar:O₂ 99:1 นั้นพบว่ามีปริมาณของ CO₂ นั้นมีปริมาณที่สูงขึ้นตามกำลังของไมโครเวฟทั้งนี้เนื่องมาจากการที่มี O₂ อยู่ในระบบนั้นจะช่วยในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซีพีเคชั่นดังปฏิกิริยาที่ (4) ในอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าปฏิกิริยาที่ (1) และ ปฏิกิริยาที่ (2) นอกจากนี้ระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟนั้นพบว่าสามารถผลิต H₂ จากการทำปฏิกิริยาของ CO₂ และ CH₄ ได้ในปริมาณที่สูงกว่าระบบการให้ความร้อนโดยการใช้เตาไฟฟ้ารวมทั้งปริมาณของ CO₂ และ CH₄ ที่เกิดจากกระบวนการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟก็สูงกว่าระบบการให้ความร้อนโดยการใช้เตาไฟฟ้าเช่นกัน (ตารางที่ 4.7, 4.8, และ 4.11) ซึ่งผลของระบบการให้ความร้อนต่อปริมาณ CO₂ ในการทดลองที่ได้นี้มีความแตกต่างออกไปจากงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะ (A. Domínguez et al., 2006) แต่ไม่พบความแตกต่างต่อปริมาณของ H₂ (ตารางที่ 4.12) ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้เนื่องมาจากกระบวนการให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบไมโครเวฟ และเตาไฟฟ้านั้นมีความแตกต่างกัน ในกรณีของระบบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟนั้น EVA/NR และ SiC นั้นจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นโดยตรงทำให้อุณหภูมิของ EVA/NR และ SiC นั้นมีค่าที่สูงกว่าบริเวณโดยรอบทำให้ CO₂ ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วขึ้นนั้นมีเวลา และ อุณหภูมิที่ไม่เพียงพอในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซอื่นๆที่อยู่โดยรอบ แต่ในทางกลับกันระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้านั้นความร้อนที่เกิดขึ้นแก่ EVA/NR และ SiC นั้นอาศัยหลักการแผ่รังสีความร้อนทำให้ CO₂ ที่เกิดขึ้นนั้นมีเวลาและอุณหภูมิที่เพียงพอในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซที่ว่องไวอื่นๆ ส่งผลให้ปริมาณของ CO₂ ที่ได้นั้นมีค่าที่ลดลง

ตารางที่ 4.11 ปริมาณของก๊าซ CH_4 ($\times 10^{-4}$ กรัม) ที่อัตราส่วนของ EVA/SiC 1:1

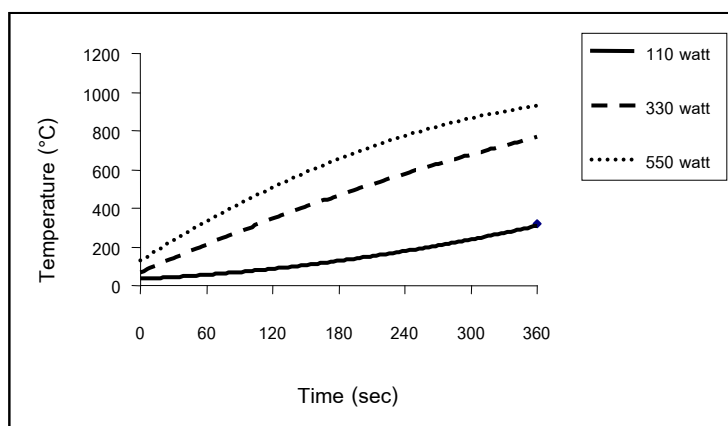
Microwave power (watts)	Weight (g)	
	Ar	Ar/O ₂
110	0.15	0.15
330	0.47	0.65
550	1.37	3.14
Electrical furnace	0.03	0.02

ตารางที่ 4.12 ปริมาตรของ H_2 , CO_2 , และ CH_4 เปรียบเทียบระหว่างระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟและเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิเดียวกันจากงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะ [17]

	Microwave heating	Electrical furnace
H_2	38.0	29.0
CO_2	9.7	11.8
CH_4	4.4	18.4

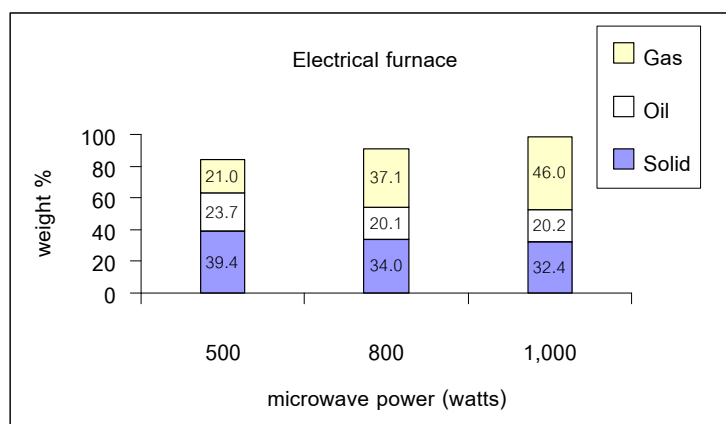
4.4.2 ผลของกำลังไมโครเวฟ

จากการทดลองพบว่าที่กำลังของไมโครเวฟ 330 และ 550 วัตต์ พบว่า EVA/NR ทั้งหมดนั้นเกิดการแปรสภาพไปอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ยกเว้นที่กำลังของไมโครเวฟ 110 วัตต์ EVA/NR ส่วนใหญ่นั้นยังไม่เกิดการสลายตัวเนื่องมาจากที่กำลังของไมโครเวฟ 110 วัตต์นั้นไม่สามารถเหนี่ยวนำให้ SiC นั้นเกิดความร้อนที่สูงมากพอที่ทำให้ EVA/NR นั้นเกิดการสลายตัวได้ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากระบบการเหนี่ยวนำไมโครเวฟที่กำลังของไมโครเวฟ 110, 330, และ 550 วัตต์ แสดงดังรูปที่ 4.19 แต่เนื่องจากเกิดประจุขึ้นระหว่างส่วนปลายของเทอร์โมคัปเปิลและ SiC ระหว่างดำเนินการทดลองดังนั้นอุณหภูมิที่ได้นี้จึงมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 50 °C และวิธีนี้จึงยังไม่เหมาะสมนักในการวัดอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ไปพร้อมกับดำเนินการทดลอง

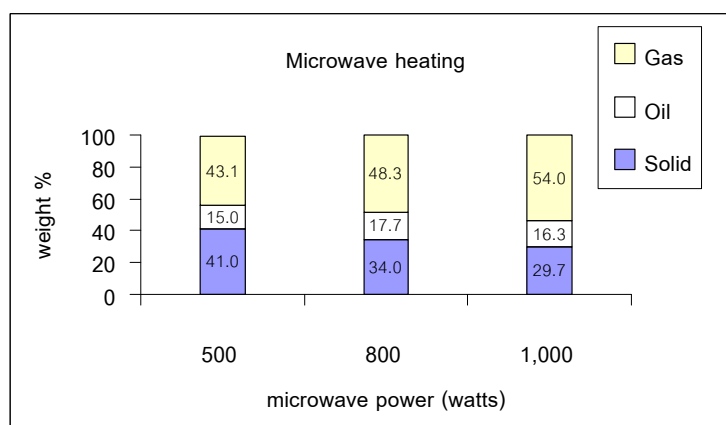


รูปที่ 4.19 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่กำลังของไมโครเวฟ 110, 330, และ 550 วัตต์

ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในจากการแปรสภาพทางความร้อนนั้นส่วนหนึ่งเกิดมาจากการสลายตัวของของเหลว และของแข็งที่อุณหภูมิสูงกับก๊าซที่มีความว่องไวสูงที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของปฏิกิริยา ที่ระบบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์นั้นมีอัตราการเกิดที่สูงโดยเฉพาะในช่วง 0-180 วินาทีแรกของการแปรสภาพ แต่ที่เวลา 181-360 วินาทีต่อมาปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้นพบว่ามีค่าที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำไมโครเวฟในช่วงเวลา 0-180 วินาที นั้นมีค่าที่สูงประมาณ 450-600 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่ EVA/NR สามารถเกิดการสลายตัวได้ ทำให้ EVA/NR นั้นเกิดการสลายตัวไปหมดตั้งแต่เวลาที่ 0-180 วินาที ปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ 181-360 วินาที จึงมีค่าที่ลดลง แต่ในทางกลับกันไม่พบความแตกต่างของก๊าซผลิตภัณฑ์ทั้งสองช่วงเวลานี้ที่กำลังของไมโครเวฟ 110 วัตต์ อันเนื่องมาจากมีอุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้ EVA/NR เกิดการสลายตัว นอกจากนี้ที่กำลังของไมโครเวฟที่สูงขึ้นนั้นยังช่วยส่งเสริมให้ของเหลวที่เกิดขึ้นเกิดการสลายตัวต่อไปทำให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซนั้นมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะ [14] ที่เปรียบเทียบระหว่างระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้าและไมโครเวฟต่อการกระจายตัวของของแข็งของเหลว และก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 4.20



(a)

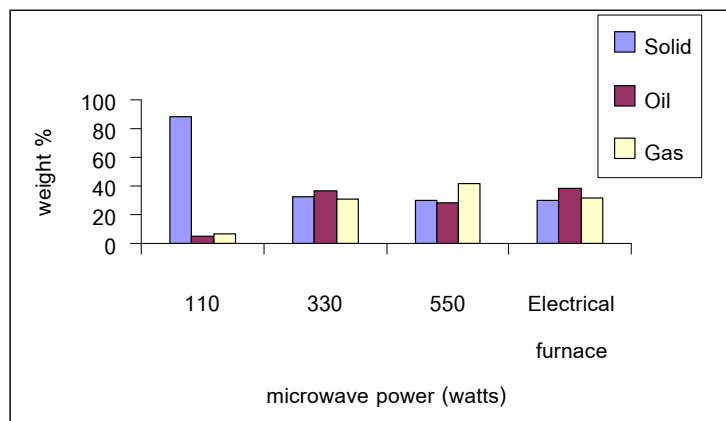


(b)

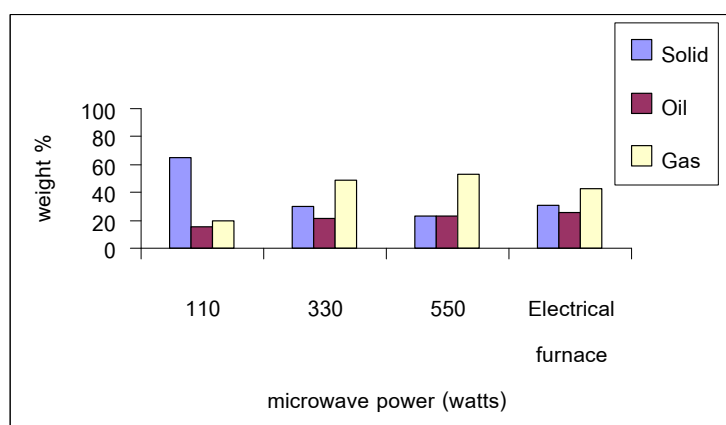
รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้า (a) และไมโครเวฟ (b) จากผลการศึกษาของ A. Domínguez และคณะ (A. Domínguez et al., 2006)

สำหรับในงานวิจัยนี้พบว่าปริมาณของของแข็ง และของเหลวที่ทุกสภาวะการทดลองมีค่าที่ลดลง ในขณะที่ปริมาณของก๊าซมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อกำลังของไมโครเวฟมีค่าที่มากขึ้นทั้งนี้ที่ กำลังของไมโครเวฟ 330 และ 550 วัตต์ พบว่าปริมาณของของเหลวและก๊าซนั้นมีสัดส่วนที่ไม่ต่างกันมากนักอาจเนื่องมาจากการที่ SiC นั้นเมื่อถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นโดยไมโครเวฟแล้วจะแผ่ความร้อนให้กับ EVA/NR ต่ออีกทอดหนึ่งซึ่งที่ กำลังของไมโครเวฟ 330 และ 550 วัตต์ นั้นอาจมีอัตราการแผ่ความร้อนของ SiC ในอัตราที่ใกล้เคียงกันซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดในการดูดซับไมโครเวฟ และการแผ่ความร้อนของ SiC นั้นเอง เมื่อพิจารณาสัดส่วนของก๊าซผลิตภัณฑ์ระหว่างการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟและเตาไฟฟ้าดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟนั้นมีสัดส่วนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่าระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้าโดยเฉพาะที่อัตราส่วน Ar:O₂ 99:1 ซึ่งปริมาณของก๊าซที่เพิ่มขึ้นนี้ส่วนใหญ่

เป็นผลมาจากการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ในของแข็ง แต่ผลของระบบการให้ความร้อนนี้ไม่มีผลหรือมีผลที่น้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของของเหลวที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ และเตาไฟฟ้าที่อัตราส่วน Ar:O₂ 100:0

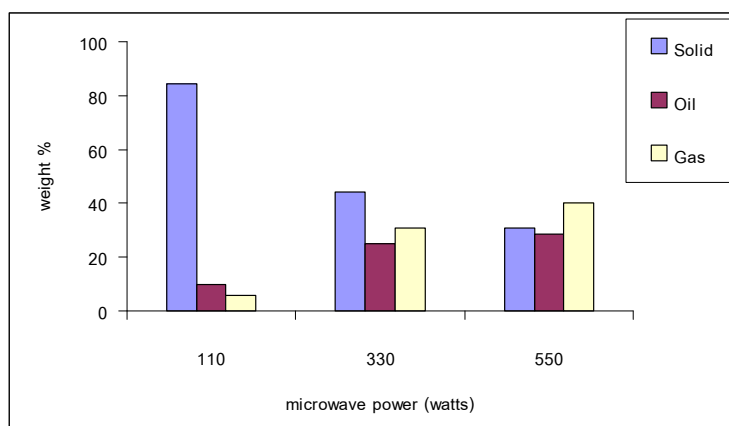


รูปที่ 4.22 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ และเตาไฟฟ้าที่อัตราส่วน Ar:O₂ 99:1

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ในรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 กับงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะในรูปที่ 4.20 พบว่ามีความสอดคล้องกันกล่าวคือที่อุณหภูมิในการแปรสภาพที่สูงขึ้นสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง และของเหลวจะมีค่าที่ลดลง แต่สัดส่วนของก๊าซนั้นจะมีค่าที่เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนของของแข็งทั้งระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ และเตาไฟฟ้านั้นพบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ปริมาณของของเหลวนั้นระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟนั้นจะมีสัดส่วนที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจน และระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟนั้นมีสัดส่วนของก๊าซที่สูงกว่าอย่างชัดเจนเช่นกัน

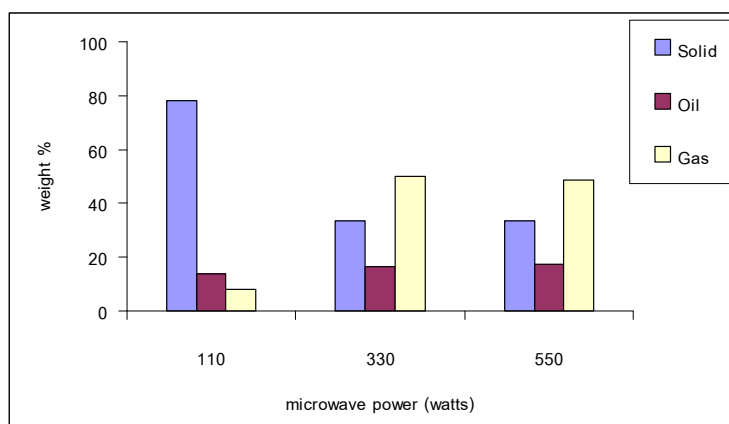
4.4.3 ผลของอัตราส่วน Ar:O₂ ในก๊าซพา

เมื่อพิจารณาอัตราส่วน Ar:O₂ ระหว่าง 100:0 และ 99:1 พบว่าที่อัตราส่วน 99:1 นั้นมีปริมาณของไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก และ H₂ ในปริมาณที่สูงกว่า ซึ่งปริมาณของไฮโดรคาร์บอนที่สูงขึ้นนี้เกิดเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันระหว่างของแข็ง ของเหลว และก๊าซที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินการทดลอง ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในระบบกับผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะทำให้เกิด CO₂, CO, และ H₂ มากยิ่งขึ้นซึ่งมีผลทำให้ปริมาณของของแข็ง และของเหลวลดลงหรือมีค่าที่ต่ำกว่าอัตราส่วน Ar:O₂ 100:0 (เปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.7-4.8 และรูปที่ 4.23-4.24) สำหรับเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เกิดได้ไม่ดีนักในเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าซึ่งเห็นได้ชัดเจน (รูปที่ 4.25) จากปริมาณของแข็งที่ไม่ต่างกันมากนักระหว่างอัตราส่วน 100:0 และ 99:1 แต่ความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ของทั้งสองอัตราส่วนนี้จะเห็นได้ชัดเจนจากปริมาณของเหลว และก๊าซดังตารางที่ 4.13 และที่อัตราส่วน Ar:O₂ 99:1 นั้นพบว่าปริมาณของ H₂ และ CO₂ นั้นมีปริมาณที่สูงกว่าที่อัตราส่วน Ar:O₂ 100:0 ซึ่งจากงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะ (A. Domínguez et al., 2006) ได้ให้ความเห็นว่าระบบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟนั้นสามารถช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซที่ว่องไวที่เกิดในตอนแรกของปฏิกิริยากับของแข็งนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ดีกว่าระบบการให้ความร้อนโดยการใช้เตาไฟฟ้านั้นก็คือปฏิกิริยาที่ (2) และ (6) นั้นสามารถเกิดได้ดีนั่นเอง ในส่วนของระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้านั้นสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และก๊าซนั้นพบว่าเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟนั่นคือผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซที่อัตราส่วน Ar:O₂ 99:1 นั้นมีค่าที่สูงกว่า (รูปที่ 4.25) ด้วยเหตุผลเดียวกันกับที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

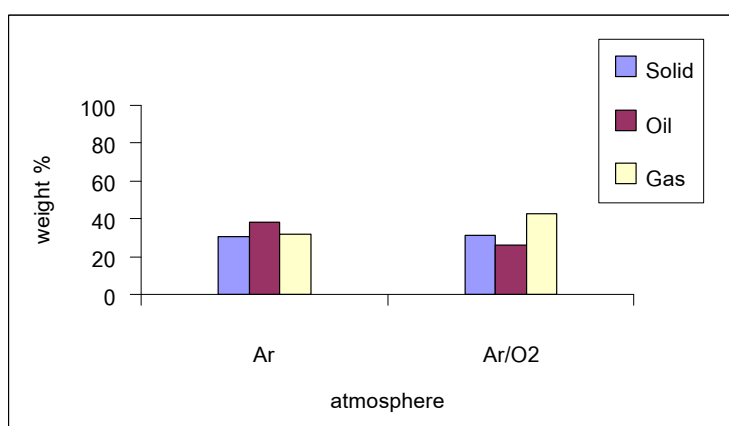


รูปที่ 4.23 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการแปรสภาพทางความร้อนที่อัตราส่วน

EVA/NR:SiC 2:1 ที่อัตราส่วน Ar:O₂ 100:0



รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการแปรสภาพทางความร้อนที่อัตราส่วน EVA/NR:SiC 2:1 ที่อัตราส่วน Ar:O₂ 99:1



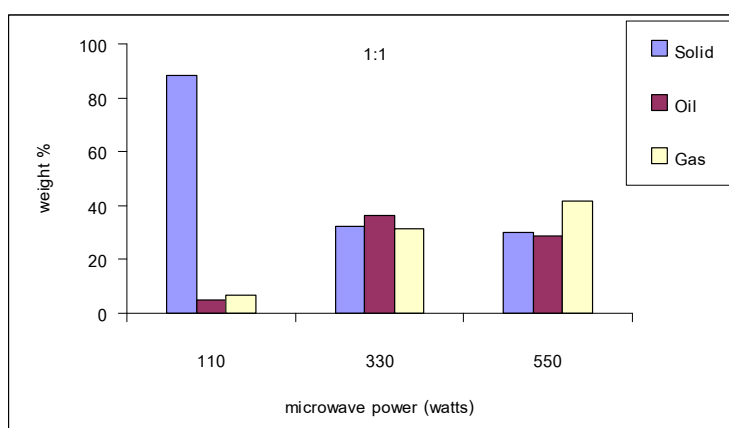
รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการแปรสภาพทางความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า เปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วน Ar:O₂ 100:0 และ 99:1

ตารางที่ 4.13 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ จากการแปรสภาพทางความร้อนจากระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้าที่ 700 °C

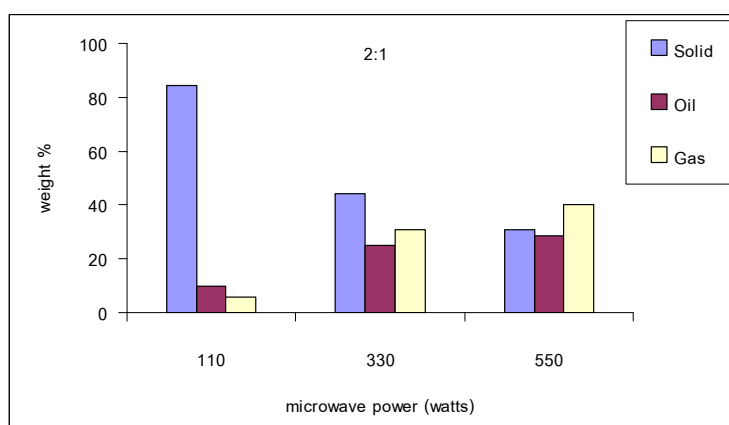
Atmosphere	Weight %		
	Solid	Oil	Gas
Ar	30.3	38.1	31.7
Ar/O ₂	31.2	25.9	42.9

4.4.4 ผลของอัตราส่วน EVA/NR :SiC

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง EVA/NR :SiC ที่อัตราส่วนต่างๆกันนั้นพบว่าผลของอัตราส่วนนี้ต่อการแปรสภาพทางความร้อนนั้นยังไม่มีเป็นที่ชัดเจนนักดังรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 ซึ่งในกรณีของอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 นั้นพบว่าปริมาณส่วนใหญ่ของ EVA/NR และ SiC ที่ผสมกันอยู่นั้นอยู่ในบริเวณที่สามารถรับไมโครเวฟได้ดีแต่ในกรณีของอัตราส่วน 2:1 นั้นพบในภายหลังว่าประมาณ 20% โดยปริมาตรของ EVA/NR และ SiC ที่ผสมกันอยู่นั้นอยู่ภายนอกบริเวณที่ไม่โครเวฟไม่สามารถแผ่ไปถึงทำให้มีความร้อนที่ไม่เพียงพอในการแปรสภาพทางความร้อนซึ่งสังเกตได้จากปริมาณของแข็งที่เหลือจากการแปรสภาพทางความร้อนที่อัตราส่วนระหว่าง EVA/NR :SiC เท่ากับ 2:1 โดยเฉพาะที่อัตราส่วน Ar:O₂ 100:0 ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวจึงควรมีการจัดหาแหล่งกำเนิดไมโครเวฟที่ให้คลื่นรังสีที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าแหล่งกำเนิดที่ใช้อยู่ในงานวิจัยนี้เพื่อให้สามารถศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวได้ดียิ่งขึ้น

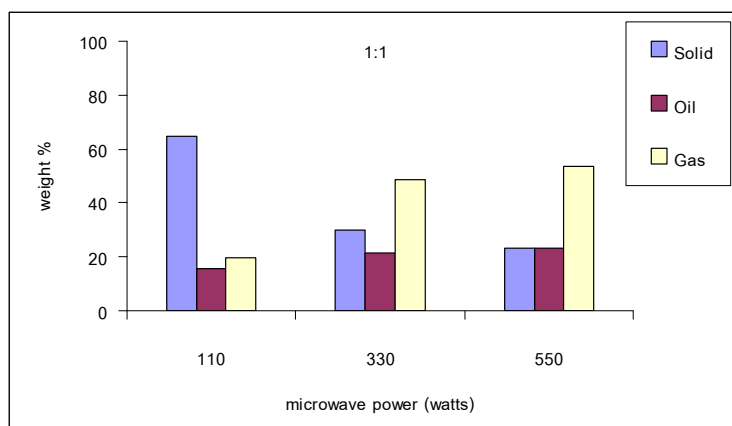


(a)

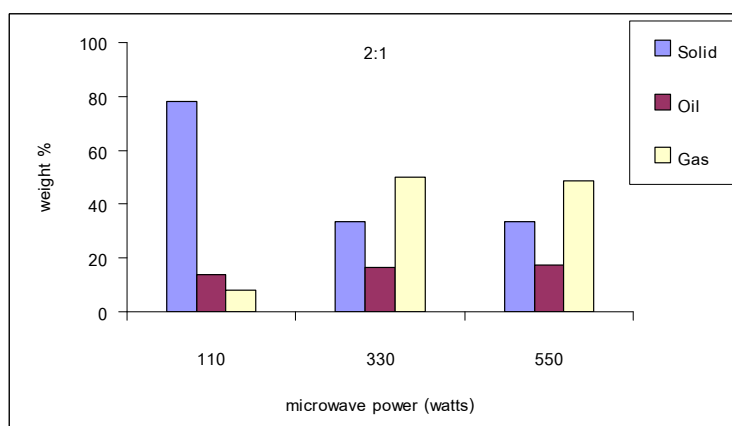


(b)

รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และก๊าซที่อัตราส่วน EVA/NR :SiC เท่ากับ (a) 1:1 และ (b) 2:1 ภายใต้อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ 100:0



(a)



(b)

รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และก๊าซที่อัตราส่วน EVA/NR :SiC เท่ากับ (a) 1:1 และ (b) 2:1 ภายใต้อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ 99:1

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 การดัดแปลงเตาปฏิกรณ์

- สามารถจัดหาวัสดุ สารเคมี และอุปกรณ์ต่างๆที่จะใช้ในการทดลองได้ครบถ้วน
- ออกแบบระบบเตาปฏิกรณ์ทั้งสองรูปแบบ
 - i. ระบบการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำไมโครเวฟใช้เตาไมโครเวฟของบริษัทพานาโซนิคที่มีระบบ Inverter เพื่อให้ไมโครเวฟมีความสม่ำเสมอตลอดเวลาการทดลอง
 - ii. ระบบการให้ความร้อนโดยการใส่เตาไฟฟ้าใช้เตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งแนวนอน Horizontal fixed bed reactor โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิคงที่ 700 °C
- ดัดแปลงระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟพร้อมติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ อาทิ ท่อก๊าซโดยการใช้ท่อสแตนเลสควบคู่ไปกับการใช้ท่อซิลิโคน อุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซ ถังเก็บก๊าซเทอร์โมคัปเปิล โดยในส่วนของ การควบคุมอัตราการไหลของก๊าซนั้นได้ใช้ระบบการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซโดยการควบคุมมวลการไหล (Mass Flow Controller) ที่สามารถเลือกชนิดของก๊าซที่ไหลผ่านได้ทั้งก๊าซอาร์กอน และแอริซีไว์
- ติดตั้งระบบท่อก๊าซสำหรับเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าซึ่งมีรูปแบบคล้ายกับระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ

5.3 การแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ

- จากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบพบว่าปริมาณคาร์บอน 57.6% โดยน้ำหนักซึ่งมีความเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่า 500 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ EVA/NR เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์
- เมื่อดำเนินการที่สภาวะต่างๆพบว่าความสามารถในการผลิตก๊าซของเตาปฏิกรณ์ระบบไมโครเวฟจะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อกำลังของไมโครเวฟมีค่าที่สูงขึ้น และเมื่ออัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ เท่ากับ 99:1 นั้นสามารถผลิตก๊าซได้ในปริมาณที่สูงกว่าที่อัตราส่วน 100:0 โดยในส่วนของปริมาณของ H₂, CO₂, CH₄, และ ไฮโดรคาร์บอนนั้นพบว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณของก๊าซที่ผลิตได้นั้นคือมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อกำลังของไมโครเวฟ และปริมาณของออกซิเจนในระบบมีค่าที่สูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันผลของอัตราส่วนของ SiC : EVA/NR นั้นพบว่ายังไม่เป็นที่ชัดเจนนักเนื่องจากข้อจำกัดของตัวกำเนิดคลื่นการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟที่ยังไม่มีความสม่ำเสมอ

5.3 เปรียบเทียบระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ และเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

- เมื่อดำเนินการแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟที่กำลังของไมโครเวฟ 550 วัตต์พบว่า สามารถผลิตก๊าซได้ในปริมาณที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ความสามารถในการผลิตก๊าซ H_2 , CO_2 , และ CH_4 นั้นพบว่ามีค่าที่น้อยกว่าอย่างชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วน $Ar:O_2$ 99:1 ที่มีการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันขึ้น ทั้งนี้คาดว่าเนื่องมาจากการที่ระบบไมโครเวฟนั้นมีความเหมาะสมหรือช่วยให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันได้ดีกว่านั่นเอง

ข้อเสนอแนะ

ควรทำการจัดหาเครื่องไมโครเวฟที่สามารถให้คลื่นที่มีความสม่ำเสมอได้ตลอดการทดลองเพื่อให้สามารถศึกษาผลของอัตราส่วนของ SiC ได้สมบูรณ์ขึ้น นอกจากนี้ควรพัฒนาระบบการป้อนวัตถุดิบให้สามารถป้อนได้อย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถพัฒนาใช้กับระบบพลาสมาไดซ์เบดซึ่งเป็นระบบที่สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บรรณานุกรม

- P. Connett. Municipal waste incineration: A poor solution for the twenty first century.
Available from: <http://www.mindfully.org> [2006].
- C. Badger. An overview of fast pyrolysis. Georgia bioenergy conference Tifton.
Available from: <http://www.gabioenergy.org> [2006].
- E. Haque. Microwave energy for mineral treatment process-brief review. *Int. J. Miner.* **1999**, 57, 1-24.
- N. Angela, M. Mar Esperanza, and R. Font. Comparison between product yields in the pyrolysis and combustion of different refuse. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. **2003**, 68-69, 577-598.
- A. Marcilla, A. Gómez, S. Menargues. TG/FTIR study of the thermal pyrolysis of EVA copolymers. *J Anal. Appl. Pyrolysis*. **2005**, 74, 224-230.
- C. Ludlow-Parafox and H. A. Chase. Microwave –Induced Pyrolysis of Plastic Wastes. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2001**, 40, 4749-4756.
- J. Scheirs, W. Kaminsky. Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics : Converting waste plastics into diesel and other fuels. John Wiley. **2006**.
- J.A. Menéndez, M. Inganzo, J.J. Pis. Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge. *Water Research*. **2002**, 36, 3261-3264.
- A. Domínguez *et al.* Gas chromatographic-mass spectrometric study of the oil fractions produced by microwave-assisted pyrolysis of different sewage sludges. *Journal of Chromatography A*. **2003**, 1012, 193-206.
- A. Domínguez *et al.* Investigations into the characteristics of oils produced from microwave pyrolysis of sewage sludge. *Fuel Processing Technology*. **2005**, 86, 1007-1020.
- J.A. Menéndez *et al.* Microwave pyrolysis of sewage sludge: analysis of the gas fraction. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. **2004**, 71, 657-667.
- N. Gupta *et al.*, "Thermal characterization of vinyl acetate-ethylene copolymers," *Journal of Thermal analysis and calorimetry*. **1999**, 58, 509-515.
- O. Yilmaz *et al.*, "Conversion of leather wastes to useful products," *Resources, Conversion and Recycling*. **2007**, 49, 436-448

- A. Domínguez et al., "Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of hydrogen rich fuel gas," J. Anal. Appl. Pyrolysis. **2006** doi:10.1016/j.jaap.2006.08.003.
- Marcilla et al., "MS study the gases evolved in the pyrolysis of ethylene-vinyl acetate copolymers comparison between thermal and catalytic processes," J. Anal. Appl. Pyrolysis. **2005**, 74, 393-400.
- A. E. Pütün et al., "Bio-oil from olive oil industry wastes: Pyrolysis of olive residue under different condition," Fuel Processing Technology. **2005**, 87, 25-32.
- A. Domínguez et al. Production of bio-fuels by high temperature pyrolysis of sewage sludge using conventional and microwave heating. Bioresource Technology. **2006**, 97, 1185-1193.

ภาคผนวก

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ได้ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์

เพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเศษยางพาราองเท้าและโดยใช้กระบวนการสลายตัวทางความร้อนด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ไพโรไลซิส” และภายใต้บรรยากาศที่จำกัดก๊าซออกซิเจนที่เรียกว่า “แก๊สซิฟิเคชัน”

ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือนที่มีกิจกรรม และการงาน							ผลที่ได้รับ
	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18	19-20	
1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←→ ←-----→							ทราบข้อมูลเบื้องต้น สามารถวางแผนจัดซื้อวัสดุ และออกแบบระบบ
2. จัดหาวัสดุ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	←→ ←-----→							วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
3. ออกแบบระบบเตาปฏิกรณ์ และวัสดุอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดลอง	←→ ←-----→							แผนงานในการดัดแปลงเตาไมโครเวฟ
4. ดัดแปลงเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ พร้อมติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ อาทิ ท่อก๊าซ อุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซ ถังเก็บก๊าซ เทอร์โมคัปเปิล เป็นต้น		←→ ←-----→						เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ ที่พร้อมติดตั้งระบบท่อก๊าซ
5. ติดตั้งระบบท่อก๊าซ และระบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า		←→ ←-----→						เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟต้นแบบที่พร้อมใช้ในการทดลอง
6. สอบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้วัดก๊าซผลิตภัณฑ์กับสารมาตรฐาน		←→ ←-----→						กราฟมาตรฐานที่ใช้คำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซที่ได้
7. วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและธาตุองค์ประกอบของ EVA/NR			←→ ←-----→					กำหนดสภาวะเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง
8. ดำเนินการแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟที่ภาวะต่างๆ ได้แก่ กำลังของคลื่นไมโครเวฟ ชนิดของก๊าซพา และอัตราส่วนของสารดูดซับคลื่นไมโครเวฟ			←→ ←-----→					ชนิด และปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ
9. ดำเนินการแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า			←→ ←-----→					ชนิด และปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า
10. วิเคราะห์การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิง			←→ ←-----→					ทราบผลของสภาวะในการทดลองต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้
11. วิเคราะห์ชนิด และปริมาณของ ก๊าซเชื้อเพลิงที่เตรียมได้จากเตาปฏิกรณ์ทั้งสองแบบ				←→ ←-----→				ความสามารถในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่เตาปฏิกรณ์แต่ละชนิดสามารถผลิตได้
12. เปรียบเทียบประสิทธิภาพ และความแตกต่างของเตาปฏิกรณ์ทั้งสองที่มีต่อผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่เตรียมได้					←→ ←-----→			ประสิทธิภาพของเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟเทียบกับเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า
จัดทำรายงานสมบูรณ์ปิดโครงการ						←→ ←-----→		รายงานฉบับสมบูรณ์

การแปรสภาพทางความร้อนเหนียวนำด้วยไมโครเวฟของวัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิล แอสีเตตโคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้า

รศ.ดร.ดวงดาว อาจงค์¹, ผศ.ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล², และ คณิต สูงประสิทธิ์¹

¹ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ

² ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่
เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

การไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชันของพอลิเมอร์เชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้าได้รับการแปรสภาพให้กลายเป็นเชื้อเพลิงโดยอาศัยความร้อนที่ได้จากการเหนียวนำไมโครเวฟโดยใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นตัวช่วยในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อนโดยทำการเปรียบเทียบกับ การใช้เตาปฏิกรณ์แบบพลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อน พบว่าระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟนั้นใช้เวลาเพียงเล็กน้อยในการทำให้อุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิที่ต้องการซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินี้ขึ้นอยู่กับกำลังของคลื่นไมโครเวฟ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการแปรสภาพภายใต้สภาวะของบรรยากาศที่แตกต่างกัน 2 บรรยากาศคือที่ 100% แก๊สอาร์กอน (ไพโรไลซิส) และ 99% แก๊สอาร์กอน/1% แก๊สออกซิเจน (แก๊สซิฟิเคชัน) นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลของพลังงานของคลื่นไมโครเวฟและปริมาณของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีต่อชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่เตรียมได้

จากการศึกษาพบว่า การแปรสภาพทางความร้อนภายใต้บรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจนหรือโดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้นจะสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ ไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้มากกว่ากระบวนการไพโรไลซิส เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟและเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าพบว่า การให้ความร้อนโดยใช้พลังงานคลื่นไมโครเวฟนั้นจะให้ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นแก๊สสูงกว่าในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งนั้นจะพบได้สูงกว่าในระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า โดยที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สนั้นจะมีปริมาณที่สูงขึ้นเมื่อกำลังของคลื่นไมโครเวฟมีค่ามากขึ้นโดยผลิตภัณฑ์หลักคือ แก๊สไฮโดรเจน (H_2), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ ไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สำหรับผลของซิลิกอนคาร์ไบด์นั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัดอันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการให้ความร้อนของไมโครเวฟ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟนั้นใช้เวลาน้อยกว่า มีประสิทธิภาพมากกว่าซึ่งมีความเหมาะสมในการแปรสภาพทางความร้อนขยะที่เป็นวัสดุพอลิเมอร์ให้กลายเป็นพลังงานทดแทน

คำสำคัญ: ไมโครเวฟ, ยางธรรมชาติ, ไพโรไลซิส, แก๊สซิฟิเคชัน, เอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์

คำนำ

ในปัจจุบัน ขยะจากอุตสาหกรรมมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจซึ่งก่อให้เกิดปัญหาแก่สิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปนั้นวิธีที่ใช้ในการกำจัดขยะเหล่านี้มีอยู่ 2 วิธีใหญ่ๆด้วยกันคือ การนำไปฝังกลบ และการเผาทิ้ง แต่วิธีดังกล่าวนั้นไม่เหมาะกับการจัดการขยะในระยะยาวเนื่องจากอาจเกิดการปนเปื้อนของสารพิษกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการกำจัดขยะ หรือเศษยางเหล่านี้วิธีการหนึ่งก็คือการนำขยะชนิดนี้ หรือขยะจากอุตสาหกรรมชนิดอื่นๆมาแปรสภาพให้อยู่ในรูปของพลังงานทดแทนโดยการทำให้เกิดเป็นสารโมเลกุลเล็กๆในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนหรือที่เรียกว่า “ไพโรไลซิส” หรือการทำให้เกิดการสลายตัวภายใต้บรรยากาศที่จำกัดแก๊สออกซิเจนที่เรียกว่า “แก๊สซิฟิเคชัน” ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นแก๊สสูงกว่าวิธีไพโรไลซิส ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนในการแปรสภาพวัสดุโดยอาศัยความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อนของวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์มาใช้ในการไพโรไลซิสวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำซึ่งไม่สามารถทำให้อุ่นได้

โดยคลื่นไมโครเวฟ เช่น ยางธรรมชาติ และเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปของวัสดุเชิงประกอบ เพื่อเป็นการลดขยะที่เหลือจากอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์ในด้านของพลังงาน ลดมลภาวะแวดล้อม และต้นทุนในการจัดเก็บขยะ รวมทั้งเป็นระบบที่สามารถพัฒนาไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ในทุกขนาด

วัตถุประสงค์

เพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเศษยางพื้รองเท้าและโดยใช้กระบวนการสลายตัวทางความร้อนด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ไพโรไลซิส” และภายใต้บรรยากาศที่จำกัดก๊าซออกซิเจนที่เรียกว่า “แก๊สซิฟิเคชัน”

วิธีการวิจัย

1. วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้

1.1 วัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้รองเท้า

- วัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติ (EVA/NR) จากเศษยางพื้รองเท้าได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผลิตรองเท้าและภายในประเทศ

1.2 ซิลิกอนคาร์ไบด์

- ซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาด 16 mesh ที่ใช้เป็นตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

1.3 ก๊าซพา

- ก๊าซอาร์กอน และแอร์ซีโร (purified air) ที่ใช้เป็นก๊าซพาได้สั่งซื้อจาก บริษัท ไทยอินดัสเทรียล จำกัด (มหาชน)

1.4 ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane, DCM)

- ไดคลอโรมีเทน (เกรดสำหรับวิเคราะห์) ใช้สำหรับล้างและสกัดของเหลวที่ได้จากการทดลอง ได้สั่งซื้อจาก บริษัท แล็บสแกนเอเชีย (ประเทศไทย) จำกัด

2. เครื่องมือ

2.1 เตาไมโครเวฟ

- เตาไมโครเวฟที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเป็นของบริษัทพานาโซนิค รุ่น NN-S674MF ซึ่งจะนำมาทำการดัดแปลงเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

2.2 แก้วควอตซ์

- หลอดแก้วควอตซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 13 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 9 มม. สำหรับใช้เป็นเตาปฏิกรณ์

2.3 เทอร์โมคัปเปิล ชนิดอาร์ (R-type thermocouple)

- เทอร์โมคัปเปิล ชนิดอาร์ ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิระหว่างการเกิดการแปรสภาพทางความร้อนในหลอดแก้วควอตซ์

2.4 ถังเก็บก๊าซ

- ถังเก็บก๊าซที่มีวาล์วเปิด-ปิดได้ขนาด 300 ซม.³ ใช้สำหรับเก็บก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

2.5 เส้นใยควอตซ์

- เส้นใยควอตซ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-20 ไมโครเมตร ใช้สำหรับรองรับวัตถุดิบในการแปรสภาพทางความร้อนและยังช่วยในการกรองก๊าซและฝุ่นละอองก่อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์

2.6 เครื่องควบคุมการไหลของก๊าซ

- เครื่องควบคุมการไหลของก๊าซ (AALBORC®) สำหรับควบคุมการไหลของก๊าซได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

2.7 ก๊าซมาตรฐาน

- ก๊าซมาตรฐานอยู่ในรูปของก๊าซผสมที่มีสัดส่วนขององค์ประกอบโดยปริมาตร เพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบชนิดของก๊าซที่ได้จากการแปรสภาพทางความร้อน

3. เครื่องทดสอบ

3.1 Gas Chromatography

ใช้ทดสอบหาปริมาณและเปรียบเทียบชนิดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซที่ได้จากการแปรสภาพทางความร้อนกับก๊าซมาตรฐานด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Varian CP-3800) โดยใช้ตัววิเคราะห์ Thermal Conductivity Detector (TCD) และ Flame Ionization Detector (FID) โดยใช้คอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มม. ยาว 30 ม. และภายในเคลือบด้วย dimethyl polysiloxane 95%

3.2 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและธาตุองค์ประกอบของ EVA/NR

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (EVA/NR) ดำเนินการโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermogravimetric analysis, TGA) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO TGA รุ่น TGA/SDTA 851 ด้วยการทำให้ EVA/NR เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศเฉื่อยที่อัตราการไหล 20 มล./นาที่ อุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัว 60-600 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 20 °C/นาที่ ในส่วนของการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบนั้นได้ทำการทดสอบด้วยเครื่องElemental Analyzer FISON model NA-2000 โดยทำให้ EVA/NR เกิดการสลายตัวได้เป็นก๊าซจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และ ไนโตรเจน (N) โดยในส่วนของออกซิเจน (O) นั้นทำการคำนวณจากส่วนต่างของร้อยละโดยน้ำหนัก

4. วิธีการทดลอง

4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำเศษยางพื้นรองเท้าที่ใช้ในการทดลองไปบดให้มีขนาด 0.5-1 มม. ด้วยเครื่องบด MING LEE STRONG CRUSHER ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมวิทยาศาสตร์บริการตั้ง จากนั้นเศษยางพื้นรองเท้าที่บดแล้วจะถูกนำไปวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) และ นำไปวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Elemental analysis) ด้วยเครื่อง CHON analyzer ต่อไป

4.2 การเตรียมระบบการแปรสภาพทางความร้อน

ก่อนทำการทดลองเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการบดแล้วจะถูกผสมให้อยู่ร่วมกับซิลิกอนคาร์ไบด์ในลักษณะที่เป็นชั้นๆแบบแซนด์วิชเพื่อกระจายลักษณะการให้ความร้อน (heat profile) ให้มีความสม่ำเสมอ

ในส่วนของ การแปรสภาพทางความร้อนที่ดำเนินการนี้เป็นการแปรสภาพทางความร้อนในขั้นตอนเดียว ก๊าซที่ได้จะถูกเก็บในถุงเก็บก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการซึ่งอยู่ในเตาปฏิกรณ์ควอร์ตซ์จะถูกชั่งน้ำหนักในขณะที่ของเหลวที่ได้จากการทดลองซึ่งเก็บอยู่ในคอนเดนเซอร์จะถูกชะล้างออกมาด้วย dichloromethane (DCM) จากนั้นเมื่อ DCM ระเหยออกหมดจะทำการชั่งน้ำหนักที่ได้ ส่วนสัดส่วนของก๊าซซึ่งอยู่ในถุงเก็บก๊าซจะคำนวณโดยอาศัยผลต่างของน้ำหนัก และเพื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบการให้ความร้อนทั่วไปได้ทำการติดตั้งระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700°C โดยการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะทำเช่นเดียวกันกับการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ

4.3 การเปรียบเทียบก๊าซมาตรฐาน

ในส่วนของการผลิตก๊าซที่เป็นก๊าซนั้นคาดว่าจะประกอบด้วยก๊าซชนิดต่างๆ อาทิ CO_2 , CO , H_2 , และ ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นเพื่อทำการเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของก๊าซที่ได้จากการทดลองจึงต้องทำการเปรียบเทียบกับก๊าซมาตรฐานโดยการฉีดก๊าซที่จะทำการวิเคราะห์เข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) แล้วจึงเปรียบเทียบโครมาโตแกรม (Chromatogram) ของก๊าซที่ผลิตได้กับโครมาโตแกรมของก๊าซมาตรฐานโดยใช้สภาวะในการทดสอบเดียวกันดังนี้

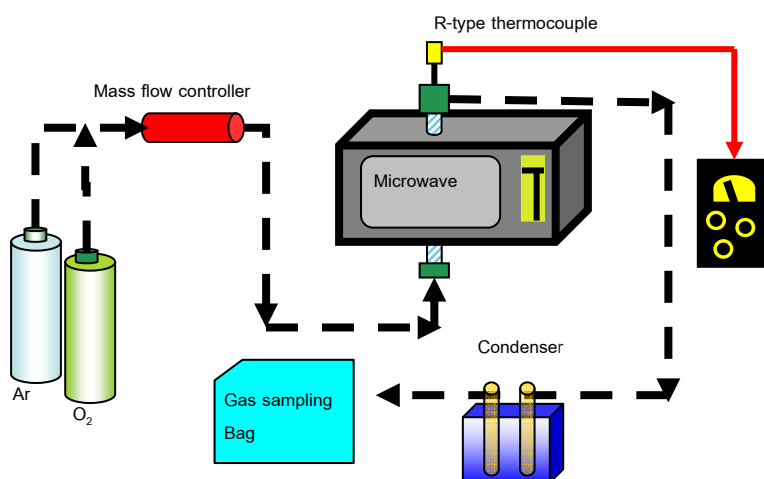
Injector	=	35°C คงที่ไว้ 5 นาที
คอลัมน์	=	50°C คงที่ไว้ 5 นาที
		75°C คงที่ไว้ 15 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 15°C/นาที
		100°C คงที่ไว้ 10 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที
อัตราการไหล	=	4 cm^3 /นาที

จากนั้นนำพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากก๊าซมาตรฐานในช่วงของ H_2 , CO_2 และก๊าซไฮโดรคาร์บอน (C_1 - C_2 , C_3 , C_4 , C_5) มาเปรียบเทียบกับปริมาณของก๊าซที่ผลิตได้

4.4 การแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ

ในส่วนของการแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ (ดังรูปที่ 1) ได้ดำเนินการภายในแก้วควอตซ์ที่ได้ออกแบบไว้ในช่วงแรก ที่กำลังของไมโครเวฟ 110, 330, และ 550 วัตต์ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง $\text{Ar}:\text{O}_2$ ในก๊าซพาเท่ากับ 100:0 และ 99:1 อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง $\text{SiC}:\text{EVA/NR}$ เท่ากับ 1:1 และ 2:1 โดย SiC นี้ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับไมโครเวฟ และแผ่ความร้อนไปถึง EVA/NR ต่อไปอีกทอดหนึ่ง โดยใช้เวลาในการทดลองทั้งหมด 6 นาที สำหรับในส่วนของการประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ จะวิเคราะห์หาในเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ต่อไป

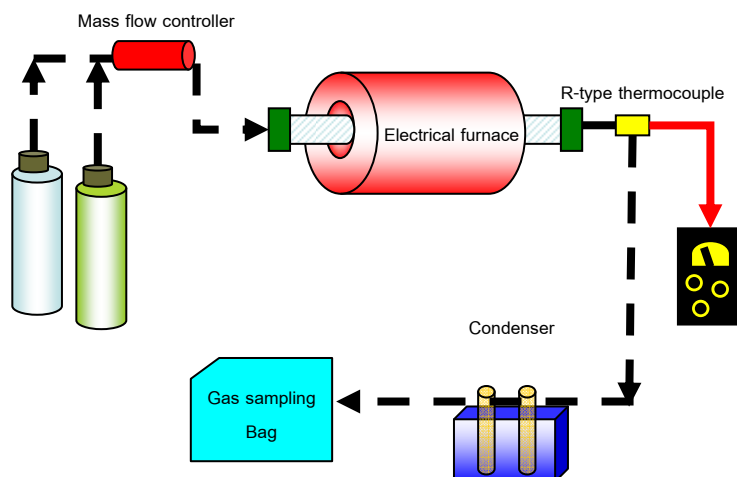
จากนั้นนำพื้นที่ใต้กราฟของก๊าซที่ผลิตได้ มาเปรียบเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟของก๊าซมาตรฐานที่ได้ทำการทดสอบไว้แล้ว (H_2 , CO_2 และก๊าซไฮโดรคาร์บอน C_1 - C_2 , C_3 , C_4 , C_5) เพื่อวิเคราะห์ชนิด และปริมาณเป็นความเข้มข้นโดยปริมาตรของก๊าซชนิดนั้นๆ



รูปที่ 1 ระบบการแปรสภาพทางความร้อนโดยการเหนี่ยวนำไมโครเวฟ

4.5 การแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

การแปรสภาพทางความร้อนโดยใช้เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า (ดังรูป 2) นั้นได้ดำเนินการเพื่อเปรียบเทียบกับระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ โดยได้ดำเนินการที่อุณหภูมิ 700 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เตาไฟฟ้าที่ได้จัดหาสามารถดำเนินการได้ และมีค่าที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ได้จากระบบเตาไมโครเวฟที่กำลัง 330 วัตต์ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง Ar:O₂ ในก๊าซพาเท่ากับ 100:0 และ 99:1 โดยในการทดลองนั้นได้ทำการเปิดระบบขดลวดให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 700 °C ก่อน จากนั้นจึงนำแก้วควอตซ์ที่ภายในบรรจุ EVA/NR อยู่เข้าไปภายในเพื่อจำลองการเกิดการแปรสภาพทางความร้อนแบบเร็วซึ่งเป็นการเกิดลักษณะเดียวกันในเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ ในส่วนของผลิตภัณฑ์นั้นได้ดำเนินการวิเคราะห์ และทดสอบเช่นเดียวกันกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ ดังที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.4



รูปที่ 2 ระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า

5. ผลการทดลอง

5.1 ธาตุองค์ประกอบ และสมบัติทางความร้อนของ EVA/NR

5.1.1 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของ EVA/NR

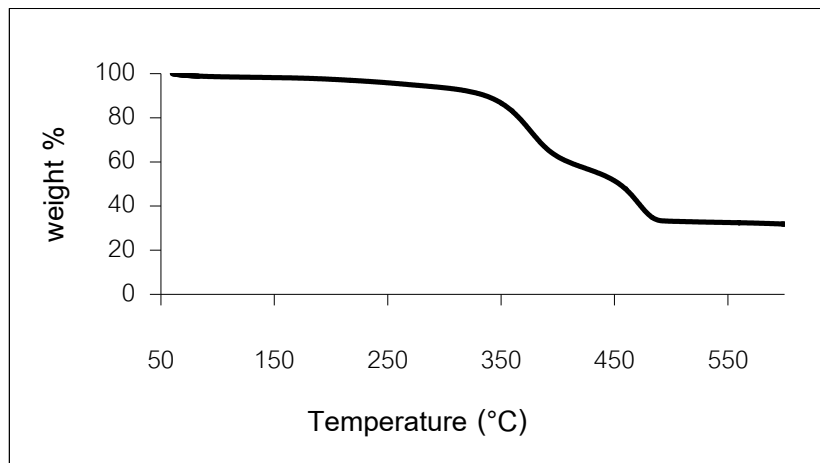
จากการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง Elemental Analyzer ผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 1 พบว่า EVA/NR นั้นมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ คาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน ตามลำดับ แสดงว่าสามารถที่จะเกิดการแปรสภาพทางความร้อน และแตกตัวเป็นก๊าซ หรือสารประกอบโมเลกุลเล็กๆ ได้แก่ CO, H₂, และ C_xH_y (C₁-C₅) ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายไม่ว่าในแง่ของการนำไปเป็นเชื้อเพลิง หรือการนำกลับไปสังเคราะห์เป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆต่อไป นอกจากนี้ยังพบว่าใน EVA/NR นั้นมีปริมาณของซัลเฟอร์ และไนโตรเจน ที่ต่ำมากซึ่งแสดงว่าเมื่อ EVA/NR นี้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะเกิดก๊าซ SO_x และ NO_x ซึ่งเป็นก๊าซที่เป็นพิษในปริมาณที่ต่ำจึงไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อปล่อยออกสู่ภายนอก

ตารางที่ 1 ธาตุองค์ประกอบของ EVA/NR

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
C	57.6
H	8.3
N	1.3
O	32.7

5.1.2 สมบัติทางความร้อนของ EVA/NR

การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของ EVA/NR นั้นใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) ที่อุณหภูมิ 60-600 °C ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า EVA/NR นั้นจะเกิดการสลายตัว 2 ขั้นตอน โดยการสลายตัวในขั้นแรกเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 300-360°C ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่ส่วนของไวนิลแอซีเตตในสายโซ่โมเลกุลเกิดการปลดปล่อยกรดแอซิดิกออกมา และเกิดเป็นพันธะคู่ขึ้นบนสายโซ่โมเลกุล ซึ่งผลการทดลองนี้คล้ายกับงานวิจัยของ N. Gupta และคณะ (N. Gupta et al., 1999)[1] ที่พบช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของ EVA ที่อุณหภูมิประมาณ 250-350 °C ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับที่ศึกษาได้ สำหรับในส่วนของการเกิดการสลายตัวในขั้นที่สองนั้นพบว่าเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 400-500 °C ซึ่งเป็นการเกิดการสลายตัวของโครงสร้างที่มีพันธะคู่ที่เกิดจากการสลายตัวในขั้นตอนแรก แต่จากการศึกษาของ N. Gupta นั้นพบอุณหภูมิการสลายตัวในขั้นที่สองนี้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเล็กน้อยคือที่ 350-450 °C ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ EVA/NR ที่ใช้ในการศึกษานี้ บางส่วนของโมเลกุลถูกทำให้เกิดการเชื่อมขวางเพื่อเพิ่มสมบัติด้านการใช้งาน ดังนั้นจากการทดลองจะเห็นได้ว่า EVA/NR นั้นสามารถเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C นั้นเอง



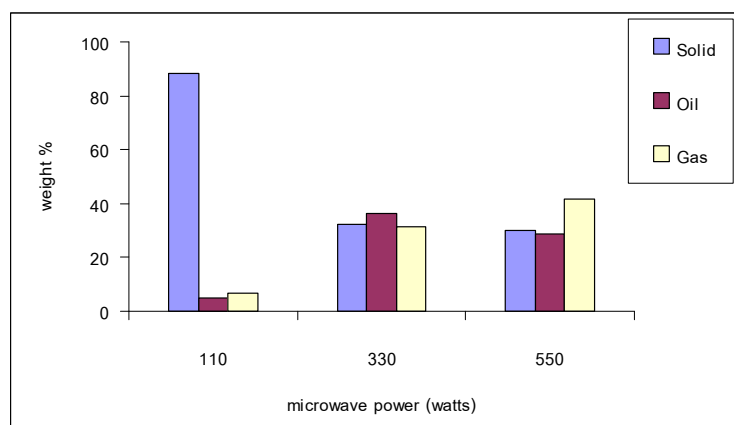
รูปที่ 3 การสลายตัวทางความร้อนของ EVA/NR ภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน

5.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพทางความร้อน

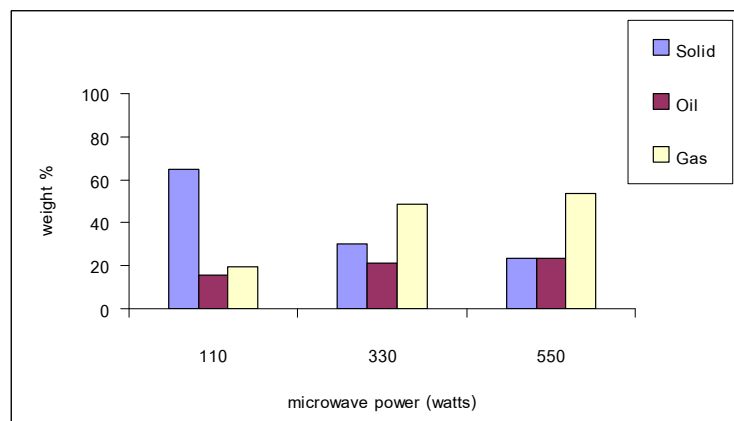
การศึกษาการแปรสภาพทางความร้อนของ EVA/NR ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของกำลังไมโครเวฟ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง Ar:O₂ ในก๊าซพา และอัตราส่วนระหว่าง SiC:EVA/NR โดยจะทำการบรรจุ SiC ปริมาตร 1 และ 2 ml และ EVA/NR ปริมาตร 1 ml (อัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1 และ 2:1 ตามลำดับ) จากนั้นทำการแปรสภาพทางความร้อนเป็นเวลานาน 360 ทั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้าควบคู่กันไปด้วย

5.2.1 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์

การแปรสภาพทางความร้อนของ EVA/NR ที่สภาวะต่างๆพบว่า EVA/NR นั้นสามารถเกิดการสลายตัวได้อย่างรวดเร็วภายใต้ระบบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ ซึ่งการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ แสดงไว้ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 โดยพบว่าเมื่อกำลังของไมโครเวฟมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าที่เพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณของของแข็งมีค่าที่ลดลง ที่ทุกอัตราส่วนของก๊าซพา และอัตราส่วนระหว่าง EVA/NR: SiC เนื่องมาจากการที่ของแข็งที่เกิดขึ้นในตอนแรกนั้นทำปฏิกิริยากับก๊าซผลิตภัณฑ์ และก๊าซพา ต่อเนื่องไปในระหว่าง การทดลอง นอกจากนี้การที่ กำลังของไมโครเวฟมีค่าที่สูงขึ้นนี้จะช่วยในการเร่งให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลได้ดีขึ้น



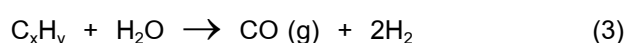
รูปที่ 4 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วน Ar: O₂ ในก๊าซพา 100:0 อัตราส่วน EVA/NR: SiC 1:1

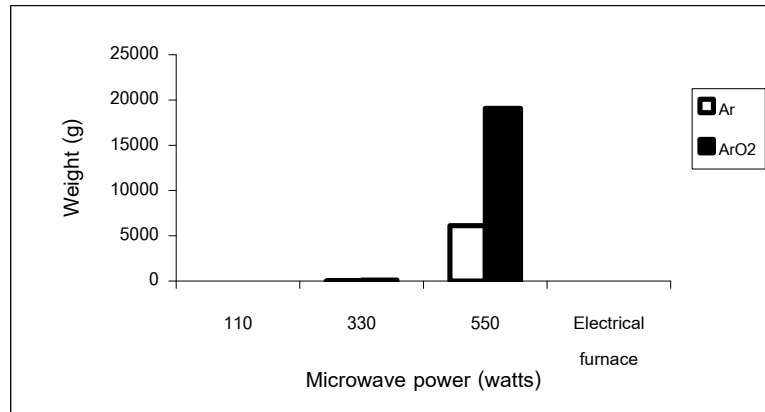
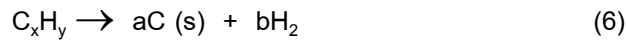
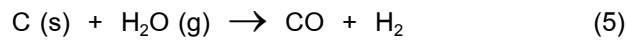
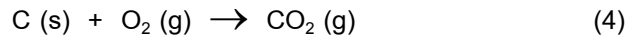


รูปที่ 5 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วน Ar: O₂ ในก๊าซพา 99:1 อัตราส่วน EVA/NR: SiC 1:1

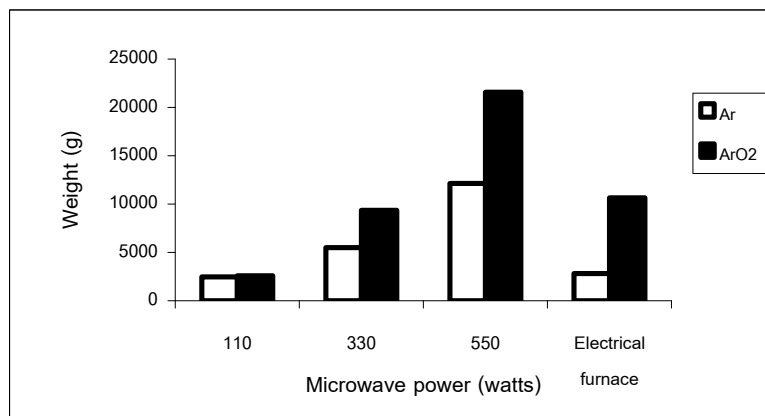
ปริมาณในการเกิดก๊าซ CO₂, CO, H₂, และ C_xH_y (C₁-C₅) นั้นเป็นสิ่งที่สำคัญที่สามารถสะท้อนถึงลักษณะของการแปรสภาพทางความร้อน ซึ่งจะขึ้นกับ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และบรรยากาศที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา กลไกในการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์จากวัสดุนั้นส่วนใหญ่พบว่าจะเกิดจากการแตกตัวของสายโซ่หลักของวัสดุทั้งการแตกตัวแบบ Random Chain Scission และ Depolymerization หรืออาจเกิดเนื่องมาจากก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของปฏิกิริยาสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] นั้นต่างแสดงผลไปในทิศทางเดียวกันนั่นคือ สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซนั้นมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นในขณะที่ของแข็ง และของเหลวมีค่าที่น้อยลง

ในส่วนขององค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์นั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ CO₂, H₂ และ C_xH_y ในช่วง C₁-C₅ เท่านั้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับผลงานวิจัยของ A. Marcilla และคณะ (Marcilla et al., 2005) [7] นั่นคือที่สภาวะการทดลองภายใต้อัตราส่วนของ Ar:O₂ ในก๊าซพา 99:1 สามารถผลิตก๊าซ H₂ ได้ในปริมาณที่สูงกว่าอัตราส่วน 100:0 (รูปที่ 6) ทั้งนี้เนื่องมาจากที่สภาวะดังกล่าวมีออกซิเจนอยู่ในระบบซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันที่มีความสามารถในการผลิตก๊าซ H₂ ได้ดีกว่าสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นของกำลังของไมโครเวฟจาก 110-550 วัตต์ พบว่าปริมาณการเกิด CO₂ มีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อกำลังของไมโครเวฟมีค่าที่เพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 7 ทั้งนี้คาดว่าเนื่องมาจากการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟงานวิจัยนี้นั้นเป็นการให้ความร้อนที่มีความรวดเร็วมากประกอบกับการที่ EVA/NR มีออกซิเจนอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างสูงดังนั้น CO₂ จึงสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็วทำให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาในระบบมีค่าที่น้อยลง หรือสามารถกล่าวได้ว่าอัตราในการเกิด CO₂ มีค่าที่สูงกว่าอัตราในการใช้ CO₂ ในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอน และสารประกอบคาร์บอนในปฏิกิริยาที่ (1) และ (2) นั้นเอง สมการที่ (1)-(6)แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว



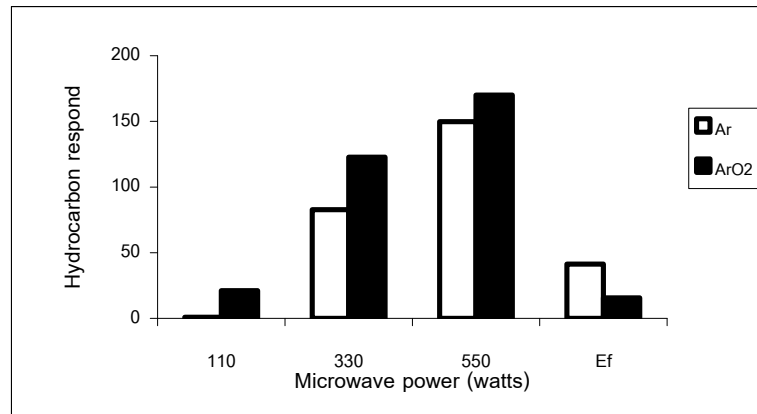


รูปที่ 6 น้ำหนักของ H_2 ที่กำลังของไมโครเวฟต่างๆระหว่างอัตราส่วน $\text{Ar}:\text{O}_2$ ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO_2)



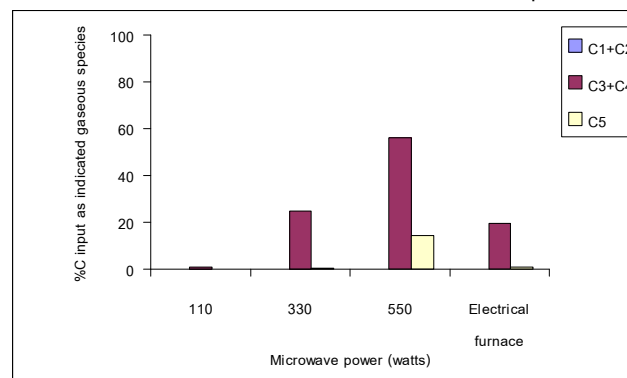
รูปที่ 7 น้ำหนักของ CO_2 ที่กำลังของไมโครเวฟต่างๆระหว่างอัตราส่วน $\text{Ar}:\text{O}_2$ ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO_2)

การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของไฮโดรคาร์บอนนั้นใช้เทคนิค Gas Chromatography พบว่าปริมาณการเกิดไฮโดรคาร์บอนนั้นมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นตามกำลังของไมโครเวฟที่สูงมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8 และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนระหว่าง $\text{Ar}:\text{O}_2$ ในก๊าซพาพบว่าที่อัตราส่วนเท่ากับ 99:1 นั้นสามารถผลิตไฮโดรคาร์บอนได้ในปริมาณที่สูงกว่าเนื่องมาจากการที่ออกซิเจนที่เพิ่มเข้าไปในระบบนั้นสามารถเร่งการแตกตัวโดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ EVA/NR นั้นเอง

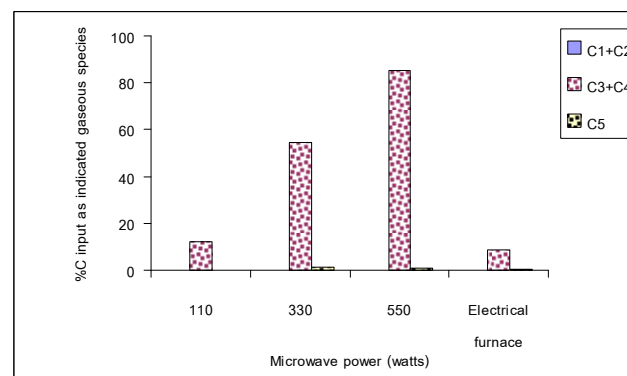


รูปที่ 8 การตอบสนองต่อไฮโดรคาร์บอนที่อัตราส่วน EVA/NR: SiC 1:1 ระหว่างอัตราส่วน Ar:O₂ ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO₂)

รูปที่ 9 และรูปที่ 10 แสดงการแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นไฮโดรคาร์บอน C₁-C₅ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในช่วง C₃+C₄ นั้นมีปริมาณที่สูงที่สุดที่ทุกกำลังของไมโครเวฟ อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ และทุกระบบการให้ความร้อน ซึ่งเป็นผลมาจากการแตกตัวแบบ depolymerization ระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟสามารถผลิตไฮโดรคาร์บอนได้ในปริมาณที่สูงกว่าระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า เมื่อพิจารณาที่กำลังของไมโครเวฟ 550 วัตต์ อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ 100:0 (การแปรสภาพแบบไพโรไลซิส) การแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นไฮโดรคาร์บอน C₃+C₄ และ C₅ เท่ากับ 56% และ 14% ตามลำดับ แต่เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ ในก๊าซพา 99:1 (การแปรสภาพแบบแก๊สซิฟิเคชัน) พบว่าการแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นไฮโดรคาร์บอน C₃+C₄ และ C₅ เปลี่ยนไปเป็น 85% และ 0.7% ตามลำดับซึ่งปริมาณของ C₃+C₄ ที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนนี้เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของ EVA/NR และ C₅ ที่เกิดการแตกตัวออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงเช่น C₃+C₄ นั้นเอง



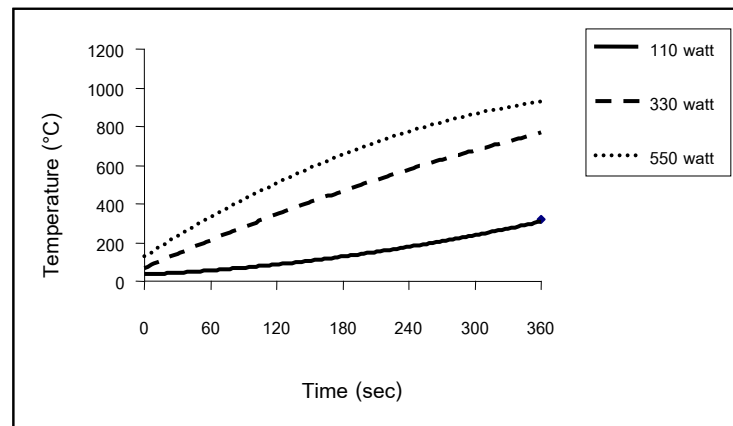
รูปที่ 9 การแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ 100:0



รูปที่ 10 การแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ 99:1

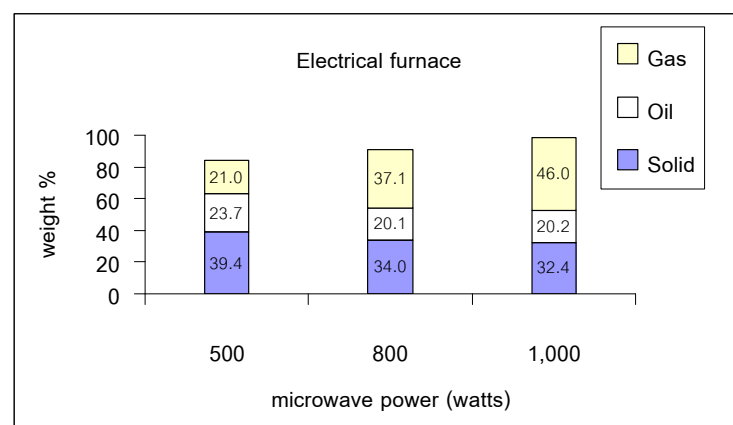
5.2.2 ผลของกำลังไมโครเวฟ

จากการทดลองพบว่าที่กำลังของไมโครเวฟ 330 และ 550 วัตต์ พบว่า EVA/NR ทั้งหมดนั้นเกิดการแปรสภาพไปอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ยกเว้นที่กำลังของไมโครเวฟ 110 วัตต์ EVA/NR ส่วนใหญ่นั้นยังไม่เกิดการสลายตัว อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากระบบการเหนี่ยวนำไมโครเวฟที่กำลังของไมโครเวฟ 110, 330, และ 550 วัตต์ แสดงดังรูปที่ 11 แต่เนื่องจากเกิดประจุขึ้นระหว่างส่วนปลายของเทอร์โมคัปเปิลและ SiC ระหว่างดำเนินการทดลองดังนั้นอุณหภูมิที่ได้นี้จึงมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 50 °C และวิธีนี้จึงยังไม่เหมาะสมนักในการวัดอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ไปพร้อมกับการดำเนินการทดลอง

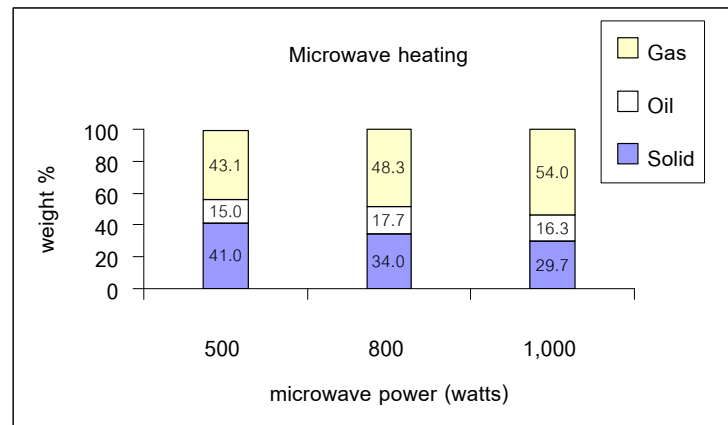


รูปที่ 11 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่กำลังของไมโครเวฟ 110, 330, และ 550 วัตต์

ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในจากการแปรสภาพทางความร้อนนั้นส่วนหนึ่งเกิดมาจากการสลายตัวของของเหลว และของแข็งที่อุณหภูมิสูงกับก๊าซที่มีความว่องไวสูงที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของ นอกจากนี้ที่กำลังของไมโครเวฟที่สูงขึ้นนั้นยังช่วยส่งเสริมให้ของเหลวที่เกิดขึ้นเกิดการสลายตัวต่อไปทำให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซนั้นมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะ [9] ที่เปรียบเทียบระหว่างระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้าและไมโครเวฟต่อการกระจายตัวของของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 12



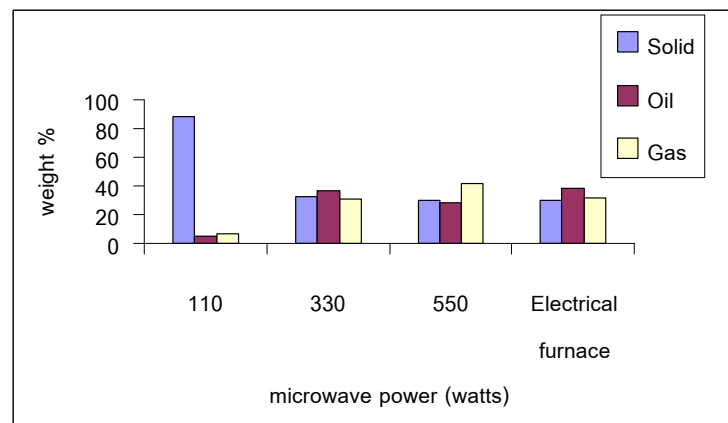
(a)



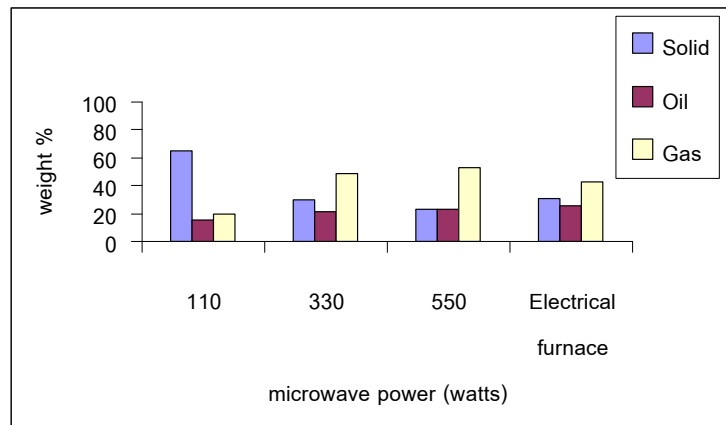
(b)

รูปที่ 12 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้า (a) และไมโครเวฟ (b) จากผลการศึกษาของ A. Domínguez และคณะ (A. Domínguez et al., 2006) [9]

สำหรับในงานวิจัยนี้พบว่าปริมาณของของแข็ง และของเหลวที่ทุกสภาวะการทดลองมีค่าที่ลดลงในขณะที่ปริมาณของก๊าซมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อกำลังของไมโครเวฟมีค่าที่มากขึ้นทั้งนี้ที่ กำลังของไมโครเวฟ 330 และ 550 วัตต์ พบว่าปริมาณของของเหลวและก๊าซนั้นมีสัดส่วนที่ไม่ต่างกันมากนักอาจเนื่องมาจากการที่ SiC นั้นเมื่อถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นโดยไมโครเวฟแล้วจะแผ่ความร้อนให้กับ EVA/NR ต่ออีกทอดหนึ่งซึ่งที่ กำลังของไมโครเวฟ 330 และ 550 วัตต์ นั้นอาจมีอัตราการแผ่ความร้อนของ SiC ในอัตราที่ใกล้เคียงกันซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดในการดูดซับไมโครเวฟ และการแผ่ความร้อนของ SiC นั้นเอง เมื่อพิจารณาสัดส่วนของก๊าซผลิตภัณฑ์ระหว่างการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟและเตาไฟฟ้าดังรูปที่ 13 และ รูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟนั้นมีสัดส่วนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่าระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้าโดยเฉพาะที่อัตราส่วน Ar:O₂ 99:1 ซึ่งปริมาณของก๊าซที่เพิ่มขึ้นนี้ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ในของแข็ง แต่ผลของระบบการให้ความร้อนนี้ไม่มีผลหรือมีผลที่น้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของของเหลวที่เกิดขึ้น



รูปที่ 13 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ และเตาไฟฟ้าที่อัตราส่วน Ar:O₂ 100:0

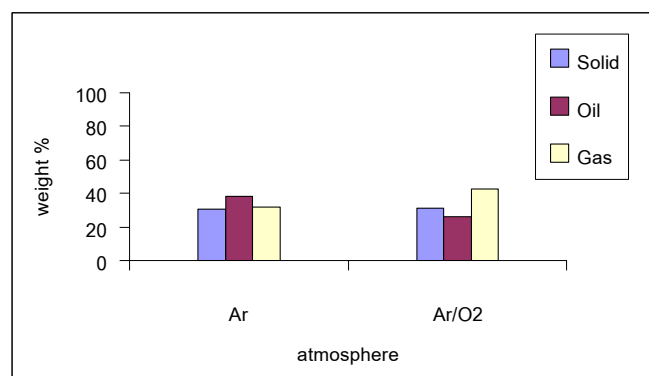


รูปที่ 14 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ และเตาไฟฟ้าที่อัตราส่วน Ar:O₂ 99:1

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ในรูปที่ 13 และรูปที่ 14 กับงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะในรูปที่ 12 พบว่ามีความสอดคล้องกันกล่าวคือที่อุณหภูมิในการแปรสภาพที่สูงขึ้นสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง และของเหลวจะมีค่าที่ลดลง แต่สัดส่วนของก๊าซนั้นจะมีค่าที่เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนของของแข็งทั้งระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ และเตาไฟฟ้านั้นพบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ปริมาณของของเหลวนั้นระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟนั้นจะมีสัดส่วนที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจน และระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟนั้นมีสัดส่วนของก๊าซที่สูงกว่าอย่างชัดเจนเช่นกัน

5.2.3 ผลของอัตราส่วน Ar:O₂ ในก๊าซพา

เมื่อพิจารณาอัตราส่วน Ar:O₂ ระหว่าง 100:0 และ 99:1 พบว่าที่อัตราส่วน 99:1 นั้นมีปริมาณของไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก และ H₂ ในปริมาณที่สูงกว่า ซึ่งปริมาณของไฮโดรคาร์บอนที่สูงขึ้นนี้เกิดเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟเคชั่นระหว่างของแข็ง ของเหลว และก๊าซที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินการทดลอง สำหรับเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เกิดได้ไม่ดีนักในเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าซึ่งเห็นได้ชัดเจน (รูปที่ 15) จากปริมาณของแข็งที่ไม่ต่างกันมากนักระหว่างอัตราส่วน 100:0 และ 99:1 แต่ความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ของทั้งสองอัตราส่วนนี้จะเห็นได้ชัดเจนจากปริมาณของเหลว และก๊าซดังตารางที่ 2 และที่อัตราส่วน Ar:O₂ 99:1 นั้นพบว่าปริมาณของ H₂ และ CO₂ นั้นมีปริมาณที่สูงกว่าที่อัตราส่วน Ar:O₂ 100:0 ซึ่งจากงานวิจัยของ A. Domínguez และคณะ (A. Domínguez et al., 2006) [6] ได้ให้ความเห็นว่าระบบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟนั้นสามารถช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซที่ว่องไวที่เกิดในตอนแรกของปฏิกิริยากับของแข็งนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ดีกว่าระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า



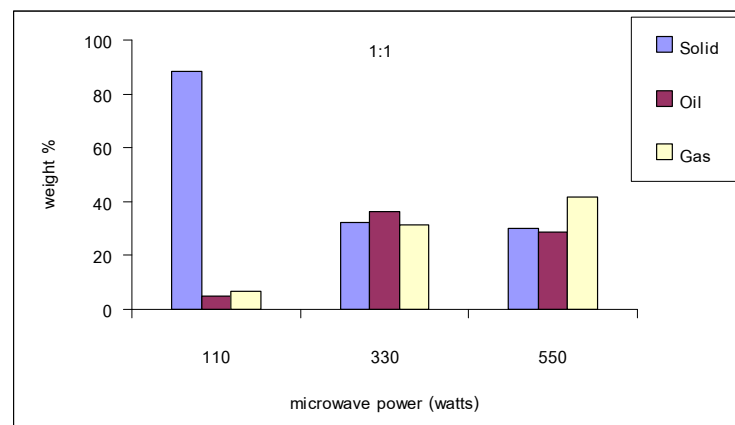
รูปที่ 15 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการแปรสภาพทางความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า เปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วน Ar:O₂ 100:0 และ 99:1

ตารางที่ 2 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ จากการแปรสภาพทางความร้อนจากระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้าที่ 700 °C

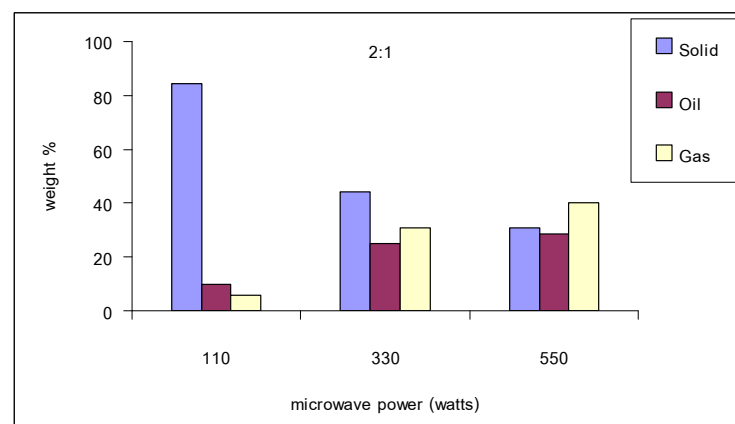
Atmosphere	Weight %		
	Solid	Oil	Gas
Ar	30.3	38.1	31.7
Ar/O ₂	31.2	25.9	42.9

4.4.4 ผลของอัตราส่วน EVA/NR :SiC

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง EVA/NR :SiC ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กันนั้นพบว่าผลของอัตราส่วนนี้ต่อการแปรสภาพทางความร้อนนั้นยังไม่เป็นที่ชัดเจนนักดังรูปที่ 16 และรูปที่ 17 ซึ่งในกรณีของอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 นั้นพบว่าปริมาณส่วนใหญ่ของ EVA/NR และ SiC ที่ผสมกันอยู่นั้นอยู่ในบริเวณที่สามารถรับไมโครเวฟได้ดีแต่ในกรณีของอัตราส่วน 2:1 นั้นพบในภายหลังว่าประมาณ 20% โดยปริมาตรของ EVA/NR และ SiC ที่ผสมกันอยู่นั้นอยู่นอกบริเวณที่ไม่โครเวฟไม่สามารถแผ่ไปถึงทำให้มีความร้อนที่ไม่เพียงพอในการแปรสภาพทางความร้อนซึ่งสังเกตได้จากปริมาณของแข็งที่เหลือจากการแปรสภาพทางความร้อนที่อัตราส่วนระหว่าง EVA/NR :SiC เท่ากับ 2:1 โดยเฉพาะที่อัตราส่วน Ar:O₂ 100:0 ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวจึงควรมีการจัดหาแหล่งกำเนิดไมโครเวฟที่ให้คลื่นรังสีที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าแหล่งกำเนิดที่ใช้อยู่ในงานวิจัยนี้เพื่อให้สามารถศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวได้ดียิ่งขึ้น

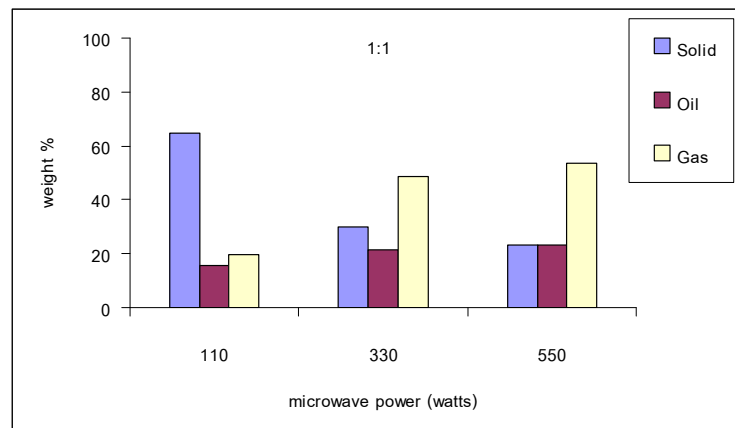


(a)

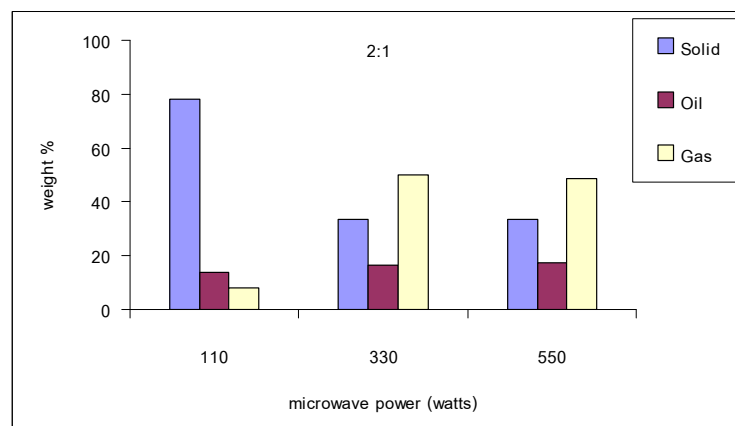


(b)

รูปที่ 16 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และก๊าซที่อัตราส่วน EVA/NR :SiC เท่ากับ (a) 1:1 และ (b) 2:1 ภายใต้อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ 100:0



(a)



(b)

รูปที่ 17 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และก๊าซที่อัตราส่วน EVA/NR :SiC เท่ากับ (a) 1:1 และ (b) 2:1 ภายใต้อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ 99:1

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน และธาตุองค์ประกอบของ EVA/NR พบว่ามีปริมาณคาร์บอน 57.6% โดยน้ำหนักซึ่งมีความเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่า 500 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ EVA/NR เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์

เมื่อทำการแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ระบบไมโครเวฟที่สภาวะต่างๆพบว่าความสามารถในการผลิตก๊าซของเตาปฏิกรณ์ระบบไมโครเวฟจะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อกำลังของไมโครเวฟมีค่าที่สูงขึ้น และเมื่ออัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ เท่ากับ 99:1 นั้นสามารถผลิตก๊าซได้ในปริมาณที่สูงกว่าที่อัตราส่วน 100:0 โดยในส่วนของปริมาณของ H₂, CO₂, CH₄, และ ไฮโดรคาร์บอนนั้นพบว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณของก๊าซที่ผลิตได้นั้นคือมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อกำลังของไมโครเวฟและปริมาณของออกซิเจนในระบบมีค่าที่สูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันผลของอัตราส่วนของ SiC : EVA/NR นั้นพบว่ายังไม่เป็นที่ชัดเจนนักเนื่องจากข้อจำกัดของตัวกำเนิดคลื่นการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟที่ยังไม่มีความสม่ำเสมอ และในกรณีของการแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟที่กำลังของไมโครเวฟ 550 วัตต์พบว่า สามารถผลิตก๊าซได้ในปริมาณที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ความสามารถในการผลิตก๊าซ H₂, CO₂, และ CH₄ นั้นพบว่ามีค่าที่น้อยกว่าอย่างชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วน Ar:O₂ 99:1 ที่มีการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันขึ้น ทั้งนี้คาดว่าเนื่องมาจากการที่ระบบไมโครเวฟนั้นมีความเหมาะสมหรือช่วยให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันได้ดีกว่านั่นเอง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถดำเนินการแล้วเสร็จลงได้ด้วยความรู้ความเข้าใจอย่างสูงของเจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดร.อรสา ขยันการ เจ้าหน้าที่กรมวิทยาศาสตร์บริการที่ได้ให้คำปรึกษาในเตรียมตัวอย่าง ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่สนับสนุนวัสดุ และอุปกรณ์ในงานวิจัย และขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Gupta et al., "Thermal characterization of vinyl acetate-ethylene copolymers," *Journal of Thermal analysis and calorimetry*. **1999**, 58, 509-515.
- [2] C. Ludlow-Parafox and H. A. Chase. Microwave –Induced Pyrolysis of Plastic Wastes. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2001**, 40, 4749-4756.
- [3] A. Domínguez et al. Gas chromatographic-mass spectrometric study of the oil fractions produced by microwave-assisted pyrolysis of different sewage sludges. *Journal of Chromatography A*. **2003**, 1012, 193-206.
- [4] J.A. Menéndez et al. Microwave pyrolysis of sewage sludge: analysis of the gas fraction. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. **2004**, 71, 657-667.
- [5] O. Yılmaz et al., "Conversion of leather wastes to useful products," *Resources, Conversion and Recycling*. **2007**, 49, 436-448
- [6] A. Domínguez et al., "Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of hydrogen rich fuel gas," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. **2006** doi:10.1016/j.jaap.2006.08.003.
- [7] Marcilla et al., "MS study the gases evolved in the pyrolysis of ethylene-vinyl acetate copolymers comparison between thermal and catalytic processes," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. **2005**, 74, 393-400.
- [8] A. E. Pütün et al., "Bio-oil from olive oil industry wastes: Pyrolysis of olive residue under different condition," *Fuel Processing Technology*. **2005**, 87, 25-32.
- [9] A. Domínguez et al. Production of bio-fuels by high temperature pyrolysis of sewage sludge using conventional and microwave heating. *Bioresource Technology*. **2006**, 97, 1185-1193.



การแปรสภาพทางความร้อนเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟของวัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอซีเตตโคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้า

Microwave-induced thermal conversion of Ethylene-Vinyl Acetate copolymer/Natural rubber composite from shoe sole scrap



รศ.ดร.ดวงดาว อาจองค์¹, อ.ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล², และ นายคณิต สูงประสิทธิ์¹

(ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.))

บทคัดย่อ

การไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชันของพอลิเมอร์เชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอซีเตตโคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้าได้รับการแปรสภาพให้กลายเป็นเชื้อเพลิงโดยอาศัยความร้อนที่ได้จากการเหนี่ยวนำไมโครเวฟโดยใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นตัวช่วยในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อนโดยการเปรียบเทียบกับการใช้เตาปฏิกรณ์แบบพลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อน พบว่าระบบที่ใช้ไนโตรเจนเพียงเล็กน้อยในการทำให้อุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิที่ต้องการ โดยในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการแปรสภาพภายใต้สภาวะของบรรยากาศที่แตกต่างกัน 2 บรรยากาศคือที่ 100% แก๊สอาร์กอน และ 99% แก๊สอาร์กอน/1% แก๊สออกซิเจน นอกจากนี้จะทำการศึกษาลักษณะของผลิตภัณฑ์ไมโครเวฟและปริมาณของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีต่อชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่เตรียมได้ จากการศึกษาพบว่า การแปรสภาพทางความร้อนภายใต้บรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจนนั้นจะสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้มากกว่า การให้ความร้อนโดยการใช้น้ำไมโครเวฟนั้นจะให้ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นแก๊สสูงกว่าแต่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งนั้นจะพบได้สูงกว่าในระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สนั้นจะมีปริมาณที่สูงขึ้นเมื่อกำลังของคลื่นไมโครเวฟมีค่ามากขึ้นโดยผลิตภัณฑ์หลักคือ H_2 , CO_2 และไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ผลของซิลิกอนคาร์ไบด์นั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัดอันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการให้ความร้อนของไมโครเวฟ เมื่อเปรียบเทียบกับ การให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้าพบว่าใช้เวลาน้อยกว่า มีประสิทธิภาพมากกว่าซึ่งมีความเหมาะสมในการแปรสภาพทางความร้อนขยะที่เป็นวัสดุพอลิเมอร์ให้กลายเป็นพลังงานทดแทน

คำนำ

กระบวนการผลิตยางพื้นรองเท้าจากยางธรรมชาติผสมเอทิลีนไวนิลแอซีเตตโคพอลิเมอร์(EVA/NR) ที่อยู่ในรูปของวัสดุเชิงประกอบนั้นพบว่ามีเศษที่เหลือจากการผลิตเป็นจำนวนมากซึ่งขยะเหล่านี้ไม่เหมาะในการนำไปกำจัดโดยวิธีการเผาทิ้ง หรือการนำไปฝังกลบ ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่นำขยะเหล่านี้มาทำการแปรสภาพให้อยู่ในรูปแบบของพลังงานด้วยการแปรสภาพทางความร้อน ซึ่งระบบการให้ความร้อนโดยการใช้น้ำไมโครเวฟเป็นระบบที่มีความน่าสนใจ มีประสิทธิภาพสูงในการแปรสภาพทางความร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนในการแปรสภาพวัสดุโดยอาศัยความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อนของ ซิลิกอนคาร์ไบด์มาใช้ในการแปรสภาพทางความร้อนวัสดุที่มีค่าซึ่งได้แก่ผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถทำให้อ่อนได้โดยคลื่นไมโครเวฟ เช่น ยางธรรมชาติ และเอทิลีนไวนิลแอซีเตตโคพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปของวัสดุเชิงประกอบ เพื่อเป็นการลดขยะที่เหลือจากอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์ในด้านของพลังงาน ลดมลภาวะแวดล้อม และต้นทุนในการจัดเก็บขยะ รวมทั้งเป็นระบบที่สามารถพัฒนาไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ในทุกขนาด

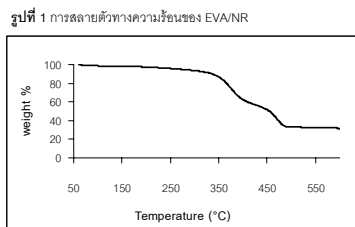
ผลการทดลอง

1. ธาตุองค์ประกอบ และสมบัติทางความร้อนของ EVA/NR

จากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบพบว่า EVA/NR นั้นมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ คาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 ซึ่งจากการที่มีปริมาณของ คาร์บอน และไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงนี้ ซึ่งสารเหล่านี้เมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic reaction) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายไม่ว่าในแง่ของการนำไปเป็นเชื้อเพลิง และจากการทดสอบด้วย TGA พบว่า EVA/NR นี้สามารถเกิดการสลายตัวได้สมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $500^\circ C$ ดังแสดงในรูปที่ 1

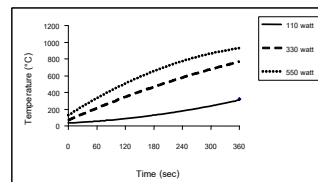
ตารางที่ 1 ธาตุองค์ประกอบของ EVA/NR

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
C	57.6
H	8.3
N	1.3
O	32.7



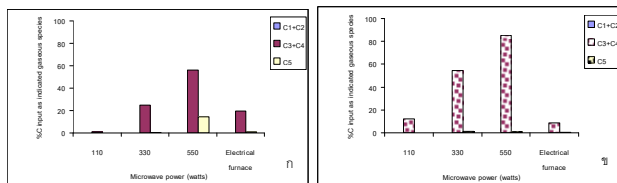
2. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพทางความร้อน

อุณหภูมิของการแปรสภาพทางความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นมีความสัมพันธ์กับกำลังของไมโครเวฟ นั่นคือค่าที่เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ และเตาไฟฟ้าพบว่าระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟนั้นมีสัดส่วนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่าระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้าโดยเฉพาะที่อัตราส่วน $Ar:O_2$ 99:1 (รูปที่ 3) ซึ่งปริมาณของก๊าซที่เพิ่มขึ้นนี้ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ในของแข็ง แต่ผลของระบบการให้ความร้อนนั้นไม่มีผลหรือมีผลที่น้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของของเหลวที่เกิดขึ้น

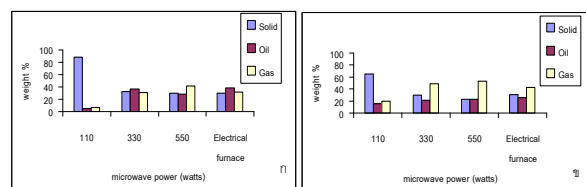


รูปที่ 2 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ กำลังของไมโครเวฟ 110, 330, และ 550 วัตต์

ปริมาณของไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในช่วง C_3+C_4 นั้นมีปริมาณที่สูงที่สุดที่ทุกสภาวะการทดลอง ระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟสามารถผลิตไฮโดรคาร์บอนได้ในปริมาณที่สูงกว่าระบบการให้ความร้อนโดยการใช้น้ำไมโครเวฟ ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดจากในรูปที่ 4 และที่สภาวะการเกิดแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าการแปรสภาพของคาร์บอน มีปริมาณของ C_3+C_4 ที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนและสามารถพบได้ชัดเจนกว่าที่ระบบการให้ความร้อนโดยการใช้น้ำไมโครเวฟ



รูปที่ 4 การแปรสภาพของคาร์บอนใน EVANR ไปเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอน ที่อัตราส่วนระหว่าง $Ar:O_2$ 100:0 (a) และ 99:1 (b)



รูปที่ 3 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ และเตาไฟฟ้าที่อัตราส่วน $Ar:O_2$ 100:0 (a) และ 99:1 (b)

สรุปผลการทดลอง

การแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ระบบไมโครเวฟพบว่าความสามารถในการผลิตก๊าซของเตาปฏิกรณ์ระบบไมโครเวฟจะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อกำลังของไมโครเวฟมีค่าที่สูงขึ้น และเมื่ออัตราส่วนระหว่าง $Ar:O_2$ เท่ากับ 99:1 นั้นสามารถผลิตก๊าซได้ในปริมาณที่สูงกว่าที่อัตราส่วน 100:0 แต่ในขณะเดียวกันผลของอัตราส่วนของ $SIC : EVA/NR$ นั้นพบว่ายังไม่เป็นที่ชัดเจนนัก เนื่องจากข้อจำกัดของตัวกำเนิดคลื่นการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟที่ยังไม่มีความสม่ำเสมอและระบบไมโครเวฟนั้นมีความเหมาะสมหรือช่วยให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันได้ดีกว่าระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้า

¹ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

² ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

คำชี้แจงต่อ ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ: รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2

โครงการวิจัยขนาดกลางเรื่อง ยางพารา (Medium Projects on Rubber; MPR) ปี 2550

โครงการ

“การแปรสภาพทางความร้อนเหนียวด้วยไมโครเวฟของวัสดุเชิงประกอบ
เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้า” (RDG5050098)

1. เป็นงานวิจัยที่เห็นแนวทางในการนำไปพัฒนาต่อยอดทางอุตสาหกรรม และมีผลดีในการ
รักษาสิ่งแวดล้อม นักวิจัยควรเพิ่มเติมข้อเสนอของงานวิจัยต่อยอด เพื่อให้มีผลที่สามารถนำไป
พิจารณา พัฒนาขยายการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงระดับอุตสาหกรรมเล็กๆได้ และควรพัฒนาการ
ขยาย Scale ซึ่งอาจเสนอกระทรวงอุตสาหกรรมเพื่อพิจารณาขยายผลงานวิจัยนี้
คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำหรับข้อเสนอแนะของคณะกรรมการ ในส่วนของข้อเสนอของงานวิจัยต่อยอดได้
เพิ่มเติมไว้แล้วในหัวข้อ “ข้อเสนอแนะ” ในบทที่ 5 ของรายงาน (หน้า 54)
2. ในส่วนการนำเสนอตาราง ภาพ และเนื้อหานั้น ควรจะจัดให้สอดคล้องกัน โดยเรียงลำดับ
สมมุติฐาน/เป้าหมาย ผลทำเป็นภาพ, ตาราง คำอธิบาย
ทางคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการแก้ไขเป็นที่เรียบร้อยแล้ว
3. ในบทที่ 5 สรุปผลการวิจัย ควรจะปรับเป็น 3 ส่วน คือ ดัดแปลงเตาปฏิกรณ์อย่างไร, ใช้
ไมโครเวฟแล้วได้ผลอย่างไร, เมื่อเปรียบเทียบกับเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าแล้วเป็นอย่างไร
ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขเป็นที่เรียบร้อยแล้วในบทที่ 5 ของรายงาน (หน้า 53)