

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. Inguanzo, 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

เพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเศษยางพั่นรองเท้าและโดยใช้กระบวนการสลายตัวทางความร้อนด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ไพโรไลซิส” และภายใต้บรรยากาศที่จำกัดก๊าซออกซิเจนที่เรียกว่า “แก๊สซิฟิเคชัน”

ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือนที่มีกิจกรรม และการทำงาน							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 ที่รอการติดตั้งระบบท่อก๊าซ
5. ติดตั้งระบบท่อก๊าซ และระบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า		 						เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟต้นแบบที่พร้อมใช้ในการทดลอง
6. สอบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้วัดก๊าซผลิตภัณฑ์กับมาตรฐาน		 						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 และความแตกต่างของเตาปฏิกรณ์ทั้งสอง ที่มีต่อผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่เตรียมได้						 		ประสิทธิภาพของเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟเทียบกับเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า
จัดทำรายงานสมบูรณ์/ปิดโครงการ						 		รายงานฉบับสมบูรณ์

แบบสรุปโครงการวิจัย

สัญญาเลขที่ RDG5050098

ชื่อโครงการ การแปรสภาพทางความร้อนเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟของวัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอซีเตต
โคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้า

หัวหน้าโครงการ รศ.ดร.ดวงดาว อัจจงค์ สถาบัน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทรศัพท์ 02-218-5595 โทรสาร 02-218-5561

E-mail address duangdao.a@chula.ac.th

ความสำคัญ/ความเป็นมา

พลังงานทดแทนจากขยะหรือวัสดุที่เหลือใช้ในอุตสาหกรรมเป็นที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นการลดปริมาณขยะรวมทั้งพลังงานที่ได้มานั้นมีหลายรูปแบบ ซึ่งการแปรสภาพทางความร้อนนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้โดยในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการแปรสภาพวัตถุดิบโดยอาศัยความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อนของวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์มาใช้ในการไฟโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชันวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำซึ่งไม่สามารถทำให้ร้อนได้โดยคลื่นไมโครเวฟ เช่น ยางธรรมชาติและเอทิลีนไวนิลแอซีเตตโคพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปของวัสดุเชิงประกอบ เพื่อเป็นการลดขยะที่เหลือจากอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์ในด้านของพลังงาน ลดมลภาวะแวดล้อม และต้นทุนในการจัดเก็บขยะ รวมทั้งเป็นระบบที่สามารถพัฒนาไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ในทุกขนาด

วัตถุประสงค์โครงการ

เพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเศษยางพื้นรองเท้าและโดยใช้กระบวนการสลายตัวทางความร้อนด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ไฟโรไลซิส” และภายใต้บรรยากาศที่จำกัดก๊าซออกซิเจนที่เรียกว่า “แก๊สซิฟิเคชัน”

ผลที่ได้รับ	บรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่	โดยทำให้
1. เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟต้นแบบที่สามารถดำเนินการแปรสภาพทางความร้อนเพื่อผลิตพลังงานทดแทน	1	สามารถดำเนินการแปรสภาพทางความร้อนของเศษยางพื้นรองเท้าได้
2. ก๊าซเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ คือ H_2 และไฮโดรคาร์บอน		ทราบสภาวะเบื้องต้นที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานทดแทนจากระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ อาทิ ผลของกำลัง ก๊าซพา และอัตราส่วนของซิลิกอนคาร์ไบด์

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- พัฒนาเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟต้นแบบที่สามารถวิจัยต่อไปเพื่อขยายขนาดตามต้องการ
- ทราบสภาวะของการทดลองเบื้องต้นต่อปริมาณ และชนิดของผลิตภัณฑ์ได้
- ทราบถึงความสัมพันธ์ และประสิทธิภาพของพลังงานไมโครเวฟ ก๊าซพา และสัดส่วนของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ ชนิด และปริมาณของก๊าซที่ได้

การประชาสัมพันธ์

- นำเสนอผลงานวิจัยในรูปแบบโปสเตอร์ ในงานประชุมวิชาการทางพาราแห่งชาติ “รวมพลังวิจัย ขับเคลื่อนเศรษฐกิจไทยอย่างยั่งยืน” วันที่ 5-6 มิถุนายน 2552 ณ ห้องพีนิกร อิมแพคเมืองทองธานี จ.นนทบุรี

การแปรสภาพทางความร้อนเหนียวหน้าด้วยไมโครเวฟของวัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิล แอซีเตตโคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้า

รศ.ดร.ดวงดาว อาจองค์¹, 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

การไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชันของพอลิเมอร์เชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอซีเตตโคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้าได้รับการแปรสภาพให้กลายเป็นเชื้อเพลิงโดยอาศัยความร้อนที่ได้จากการเหนียวหน้าไมโครเวฟโดยใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นตัวช่วยในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อนโดยทำการเปรียบเทียบกับการใช้เตาปฏิกรณ์แบบพลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อน พบว่าระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟนั้นใช้เวลาเพียงเล็กน้อยในการทำให้อุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิที่ต้องการซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินี้ขึ้นอยู่กับกำลังของคลื่นไมโครเวฟ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการแปรสภาพภายใต้สภาวะของบรรยากาศที่แตกต่างกัน 2 บรรยากาศคือที่ 100% ก๊าซอาร์กอน (ไพโรไลซิส) และ 99% ก๊าซอาร์กอน/1% ก๊าซออกซิเจน (แก๊สซิฟิเคชัน) นอกจากนี้ได้ทำการศึกษามวลของพลังงานของคลื่นไมโครเวฟและปริมาณของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีต่อชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่เตรียมได้

จากการศึกษาพบว่า การแปรสภาพทางความร้อนภายใต้บรรยากาศที่มีก๊าซออกซิเจนหรือโดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้นจะสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ ไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้มากกว่ากระบวนการไพโรไลซิส เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟและเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าพบว่า การให้ความร้อนโดยใช้พลังงานคลื่นไมโครเวฟนั้นจะให้ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นก๊าซสูงกว่าในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งนั้นจะพบได้สูงกว่าในระบบการให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า โดยที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซนั้นจะมีปริมาณที่สูงขึ้นเมื่อกำลังของคลื่นไมโครเวฟมีค่ามากขึ้นโดยผลิตภัณฑ์หลักคือ ก๊าซไฮโดรเจน (H_2), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ ไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สำหรับผลของซิลิกอนคาร์ไบด์นั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัดอันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการให้ความร้อนของไมโครเวฟ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟนั้นใช้เวลาน้อยกว่า มีประสิทธิภาพมากกว่าซึ่งมีความเหมาะสมในการแปรสภาพทางความร้อนขยะที่เป็นวัสดุพอลิเมอร์ให้กลายเป็นพลังงานทดแทน

คำสำคัญ: ไมโครเวฟ, ยางธรรมชาติ, ไพโรไลซิส, แก๊สซิฟิเคชัน, เอทิลีนไวนิลแอซีเตตโคพอลิเมอร์

คำนำ

ในปัจจุบัน ขยะจากอุตสาหกรรมมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจซึ่งก่อให้เกิดปัญหาแก่สิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปนั้นวิธีที่ใช้ในการกำจัดขยะเหล่านี้มีอยู่ 2 วิธีใหญ่ๆด้วยกันคือ การนำไปฝังกลบ และการเผาทั้งนี้วิธีดังกล่าวนั้นไม่เหมาะกับการจัดการขยะในระยะยาวเนื่องจากอาจเกิดการปนเปื้อนของสารพิษกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการกำจัดขยะ หรือเศษยางเหล่านี้วิธีการหนึ่งก็คือการนำขยะชนิดนี้ หรือขยะจากอุตสาหกรรมชนิดอื่นๆมาแปรสภาพให้อยู่ในรูปของพลังงานทดแทนโดยทำให้เกิดเป็นสารโมเลกุลเล็กๆในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนหรือที่เรียกว่า “ไพโรไลซิส” หรือการทำให้เกิดการสลายตัวภายใต้บรรยากาศที่จำกัดก๊าซออกซิเจนที่เรียกว่า “แก๊สซิฟิเคชัน” ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นก๊าซสูงกว่าวิธีไพโรไลซิส ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนในการแปรสภาพวัสดุโดยอาศัยความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อนของวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์มาใช้ในการไพโรไลซิสวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำซึ่งไม่สามารถทำให้อุ่นได้

โดยคลื่นไมโครเวฟ เช่น ยางธรรมชาติ และเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปของวัสดุเชิงประกอบ เพื่อเป็นการลดขยะที่เหลือจากอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์ในด้านของพลังงาน ลดมลภาวะแวดล้อม และต้นทุนในการจัดเก็บขยะ รวมทั้งเป็นระบบที่สามารถพัฒนาไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ในทุกขนาด

วัตถุประสงค์

เพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเศษยางพื้นรองเท้าและโดยใช้กระบวนการสลายตัวทางความร้อนด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ไพโรไลซิส” และภายใต้บรรยากาศที่จำกัดก๊าซออกซิเจนที่เรียกว่า “แก๊สลิฟิเคชั่น”

วิธีการวิจัย

1. วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้

- 1.1 วัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้า
 - วัสดุเชิงประกอบเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติ (EVA/NR) จากเศษยางพื้นรองเท้าได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผลิตรองเท้าและภายในประเทศ
- 1.2 ซิลิกอนคาร์ไบด์
 - ซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาด 16 mesh ที่ใช้เป็นตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
- 1.3 ก๊าซพา
 - ก๊าซอาร์กอน และแอร์ชีโร่ (purified air) ที่ใช้เป็นก๊าซพาได้สั่งซื้อจาก บริษัท ไทยอินดัสเตรียล 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 ถุงเก็บก๊าซ

- ถุงเก็บก๊าซที่มีวาล์วเปิด-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 ในส่วนของการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบนั้นได้ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Elemental 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 ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมวิทยาศาสตร์บริการ จากนั้นเศษยางพื้นรองเท้าที่บดแล้วจะถูกนำไปวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) และ นำไปวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Elemental analysis) ด้วยเครื่อง CHON analyzer ต่อไป

4.2 การเตรียมระบบการแปรสภาพทางความร้อน

ก่อนทำการทดลองเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการบดแล้วจะถูกผสมให้อยู่ร่วมกับซิลิกอนคาร์ไบด์ในลักษณะที่เป็นชั้นๆแบบแซนด์วิชเพื่อกระจายลักษณะการให้ความร้อน (heat profile) ให้มีความสม่ำเสมอ

ในส่วนของ การแปรสภาพทางความร้อนที่ดำเนินการนี้เป็นการแปรสภาพทางความร้อนในขั้นตอนเดียว ก๊าซที่ได้จะถูกเก็บในถุงเก็บก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการซึ่งอยู่ในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์จะถูกชั่งน้ำหนักในขณะที่ของเหลวที่ได้จากการทดลองซึ่งเก็บอยู่ในคอนเดนเซอร์จะถูกชะล้างออกมาด้วย dichloromethane (DCM) จากนั้นเมื่อ DCM ระเหยออกหมดจะทำการชั่งน้ำหนักที่ได้ ส่วนสัดส่วนของก๊าซซึ่งอยู่ในถุงเก็บก๊าซจะคำนวณโดยอาศัยผลต่างของน้ำหนัก และเพื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบการให้ความร้อนทั่วไปได้ทำการติดตั้งระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700°C โดยการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะทำเช่นเดียวกันกับการให้ความร้อนโดยไม่โคเวฟ

4.3 การเปรียบเทียบก๊าซมาตรฐาน

ในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซนั้นคาดว่าจะประกอบด้วยก๊าซชนิดต่างๆ อาทิ CO₂, CO, H₂, และ ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นเพื่อทำการเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของก๊าซที่ได้จากการทดลองจึงต้องทำการเปรียบเทียบกับก๊าซมาตรฐานโดยการฉีดก๊าซที่จะทำการวิเคราะห์เข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) แล้วจึงเปรียบเทียบโครมาโตแกรม (Chromatogram) ของก๊าซที่ผลิตได้กับโครมาโตแกรมของก๊าซมาตรฐานโดยใช้สภาวะในการทดสอบเดียวกันดังนี้

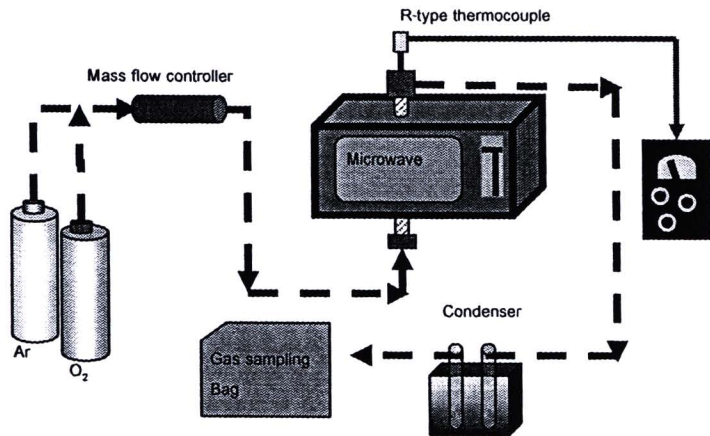
Injector	=	35°C คงที่ไว้ 5 นาที
คอลัมน์	=	50°C คงที่ไว้ 5 นาที
		75°C คงที่ไว้ 15 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 15°C/นาที
		100°C คงที่ไว้ 10 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที
อัตราการไหล	=	4 ซม ³ /นาที

จากนั้นนำพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากก๊าซมาตรฐานในช่วงของ H₂ CO₂ และก๊าซไฮโดรคาร์บอน (C₁-C₂, C₃, C₄, C₅) มาเปรียบเทียบกับปริมาณของก๊าซที่ผลิตได้

4.4 การแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ

ในส่วนของการแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ (ดังรูปที่ 1) ได้ดำเนินการภายในแก้วควอตซ์ที่ได้ออกแบบไว้ในช่วงแรก ที่กำลังของไมโครเวฟ 110, 330, และ 550 วัตต์ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง Ar:O₂ ในก๊าซพาเท่ากับ 100:0 และ 99:1 อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง SiC: EVA/NR เท่ากับ 1:1 และ 2:1 โดย SiC นี้ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับไมโครเวฟ และแผ่ความร้อนไปถึง EVA/NR ต่อไปอีกทอดหนึ่ง โดยใช้เวลาในการทดลองทั้งหมด 6 นาที สำหรับในส่วนของการประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ จะวิเคราะห์หาในเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ต่อไป

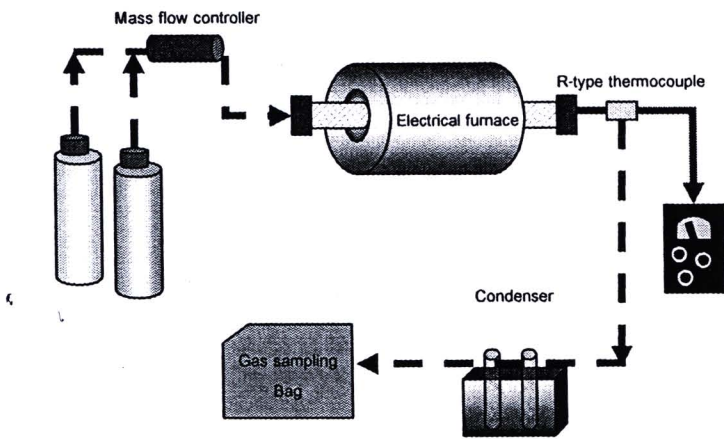
จากนั้นนำพื้นที่ใต้กราฟของก๊าซที่ผลิตได้ มาเปรียบเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟของก๊าซมาตรฐานที่ได้ทำการทดสอบไว้แล้ว (H₂, CO₂ และก๊าซไฮโดรคาร์บอน C₁-C₂, C₃, C₄, C₅) เพื่อวิเคราะห์ชนิด และปริมาณเป็นความเข้มข้นโดยปริมาตรของก๊าซชนิดนั้นๆ



รูปที่ 1 ระบบการแปรสภาพทางความร้อนโดยการเหนี่ยวนำไมโครเวฟ

4.5 การแปรสภาพทางความร้อนโดยเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

การแปรสภาพทางความร้อนโดยใช้เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า (ดังรูป 2) นั้นได้ดำเนินการเพื่อเปรียบเทียบเทียบกับระบบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ 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 ระบบการให้ความร้อนโดยการใช้อิเลไฟฟ้า

5. ผลการทดลอง

5.1 ธาตุองค์ประกอบ และสมบัติทางความร้อนของ EVA/NR

5.1.1 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของ EVA/NR

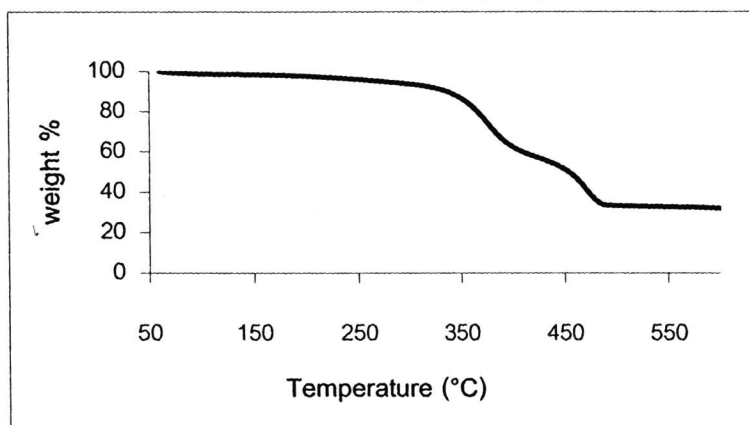
จากการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง Elemental Analyzer ผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 1 พบว่า EVA/NR นั้นมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ คาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน ตามลำดับ แสดงว่าสามารถที่จะเกิดการแปรสภาพทางความร้อน และแตกตัวเป็นก๊าซ หรือสารประกอบโมเลกุลเล็กๆ ได้แก่ CO, H₂, และ C_xH_y (C₁-C₅) ซึ่ง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายไม่ว่าในแง่ของการนำไปเป็นเชื้อเพลิง 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 ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่ส่วนของไวนิลแอซิดเตดในสายโซ่โมเลกุลเกิดการปลดปล่อยกรดแอซิดออกมา 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 ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า EVA/NR นั้นสามารถเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C นั้นเอง



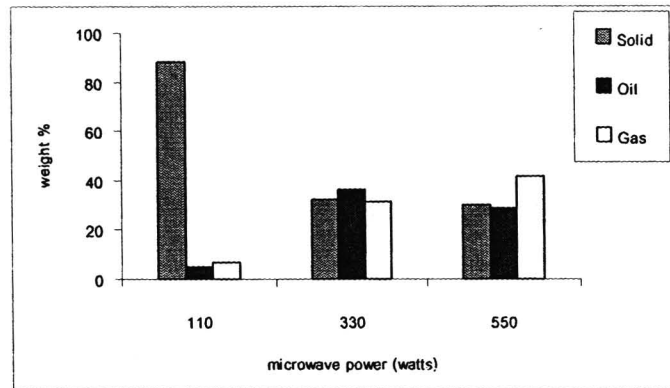
รูปที่ 3 การสลายตัวทางความร้อนของ EVA/NR ภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน

5.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพทางความร้อน

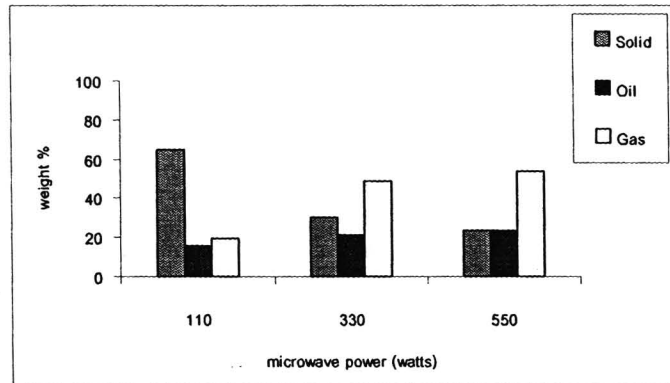
การศึกษาการแปรสภาพทางความร้อนของ EVA/NR ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของกำลังไมโครเวฟ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง $Ar:O_2$ ในก๊าซพา และอัตราส่วนระหว่าง $SiC:EVA/NR$ โดยจะทำการบรรจุ SiC ปริมาตร 1 และ 2 ml และ EVA/NR ปริมาตร 1 ml (อัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1 และ 2:1 ตามลำดับ) จากนั้นทำการแปรสภาพทางความร้อนเป็นเวลานาน 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 นอกจากนี้การที่กำลังของไมโครเวฟมีค่าที่สูงขึ้นนี้จะช่วยในการเร่งให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลได้ดีขึ้น



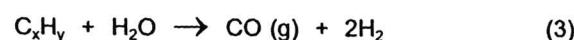
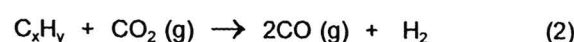
รูปที่ 4 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วน Ar: O₂ ในก๊าซพา 100:0 อัตราส่วน EVA/NR: SiC 1:1

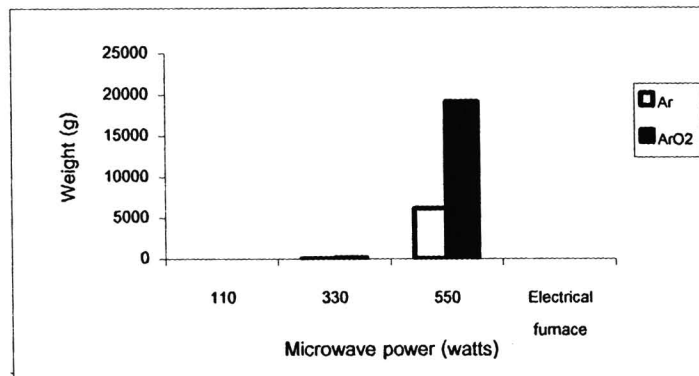
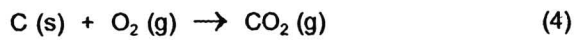


รูปที่ 5 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วน Ar: O₂ ในก๊าซพา 99:1 อัตราส่วน EVA/NR: SiC 1:1

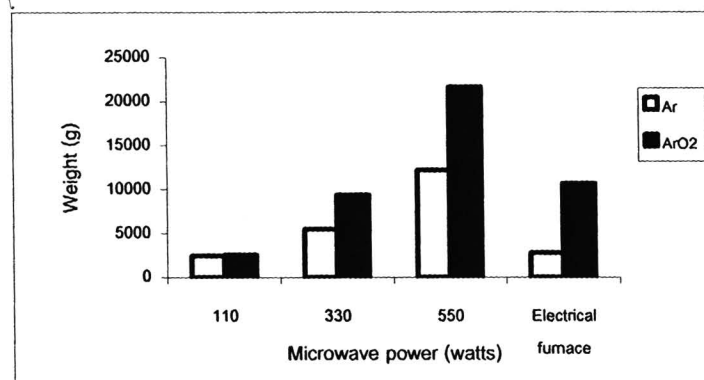
ปริมาณในการเกิดก๊าซ CO₂, CO, H₂, และ C_xH_y (C₁-C₅) นั้นเป็นสิ่งที่สำคัญที่สามารถสะท้อนถึงลักษณะของการแปรสภาพทางความร้อน ซึ่งจะขึ้นกับ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และบรรยากาศที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา กลไกในการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์จากวัสดุเหล่านั้นส่วนใหญ่พบว่าจะเกิดจากการแตกตัวของสายโซ่หลักของวัสดุทั้งการแตกตัวแบบ 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



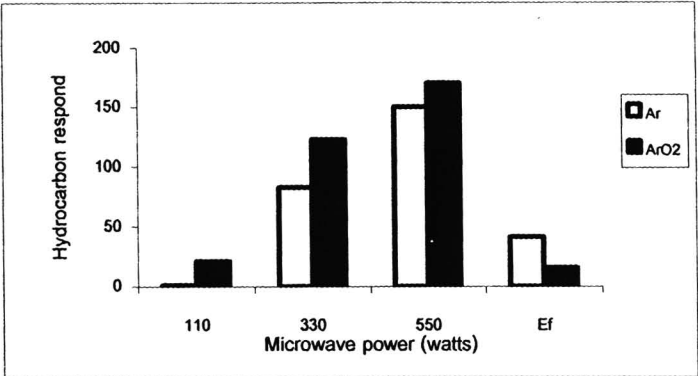


รูปที่ 6 น้ำหนักของ H_2 ที่กำลังของไมโครเวฟต่างๆระหว่างอัตราส่วน $\text{Ar}:\text{O}_2$ ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO_2)



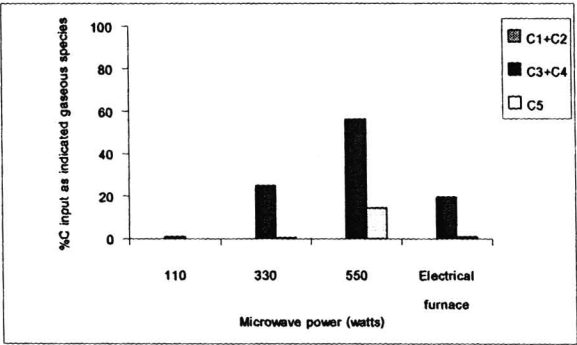
รูปที่ 7 น้ำหนักของ CO_2 ที่กำลังของไมโครเวฟต่างๆระหว่างอัตราส่วน $\text{Ar}:\text{O}_2$ ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO_2)

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

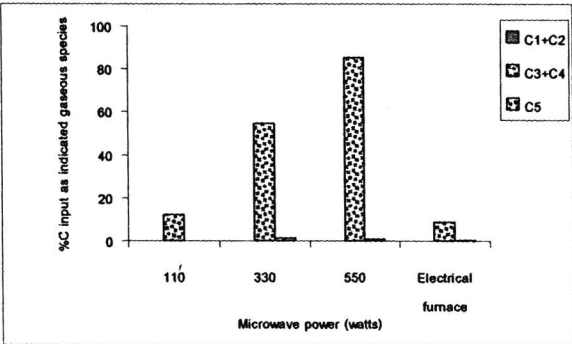


รูปที่ 8 การตอบสนองต่อไฮโดรคาร์บอนที่อัตราส่วน EVA/NR: SiC 1:1 ระหว่างอัตราส่วน Ar:O₂ ในก๊าซพา 100:0 (Ar) และ 99:1 (ArO₂)

รูปที่ 9 และรูปที่ 10 แสดงการแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นไฮโดรคาร์บอน C₁-C₅ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในช่วง C₃+C₄ นั้นมีปริมาณที่สูงที่สุดที่ทุกกำลังของไมโครเวฟ อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ และทุกระบบการให้ความร้อน ซึ่งเป็นผลมาจากการแตกตัวแบบ depolymerization ระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟสามารถผลิตไฮโดรคาร์บอนได้ในปริมาณที่สูงกว่าระบบการให้ความร้อนโดยการใช้เตาไฟฟ้า 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 นั่นเอง



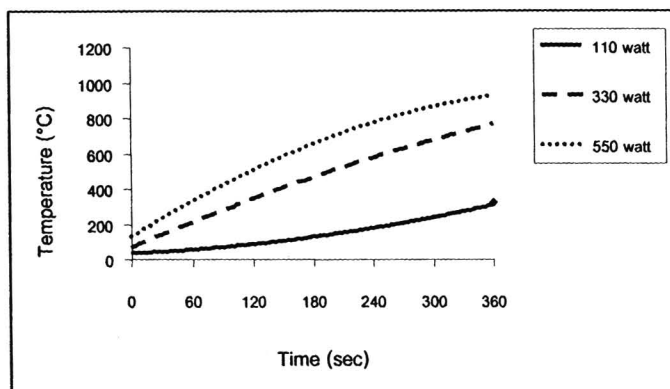
รูปที่ 9 การแปรสภาพของคาร์บอนใน EVA/NR ไปเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่อัตราส่วนระหว่าง Ar:O₂ 100:0



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

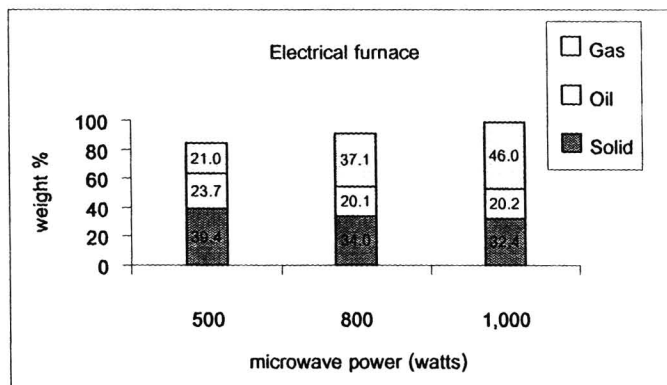
5.2.2 ผลของกำลังไมโครเวฟ

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

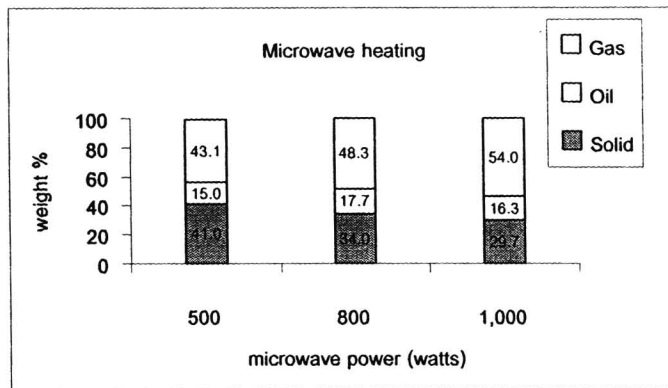


รูปที่ 11 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่กำลังของไมโครเวฟ 110, 330, และ 550 วัตต์

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



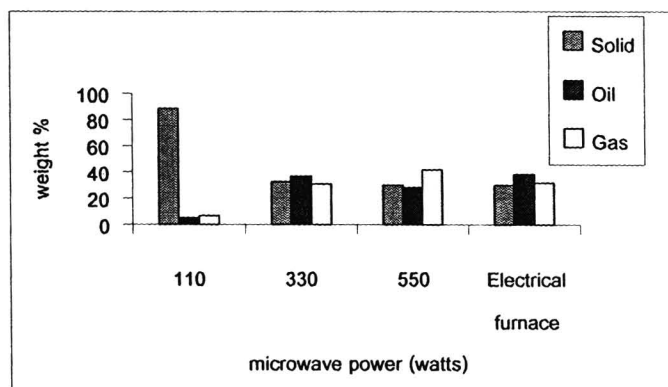
(a)



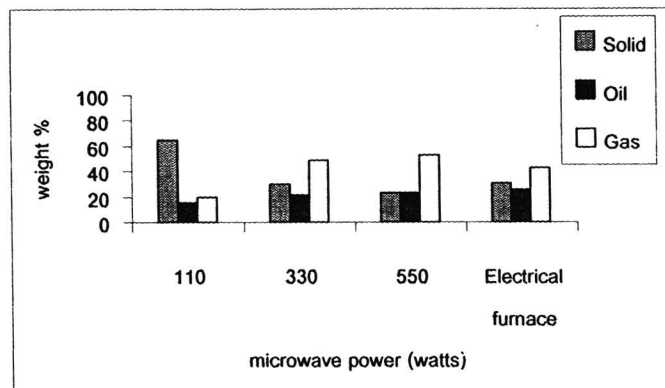
(b)

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

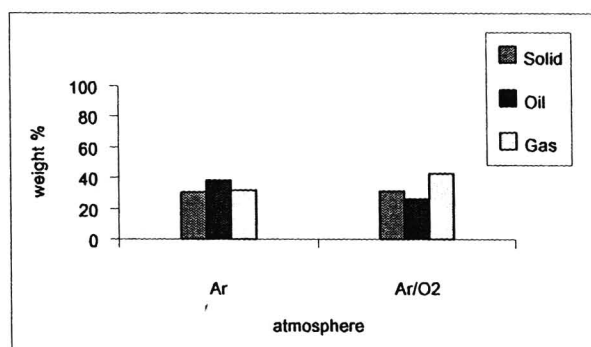


รูปที่ 14 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ และเตาไฟฟ้าที่อัตราส่วน Ar:O₂ 99:1

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

5.2.3 ผลของอัตราส่วน Ar:O₂ ในก๊าซพา

เมื่อพิจารณาอัตราส่วน Ar:O₂ ระหว่าง 100:0 และ 99:1 พบว่าที่อัตราส่วน 99:1 นั้นมีปริมาณของไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก และ H₂ ในปริมาณที่สูงกว่า ซึ่งปริมาณของไฮโดรคาร์บอนที่สูงขึ้นนี้เกิดเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันระหว่างของแข็ง ของเหลว และก๊าซที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินการทดลอง สำหรับเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เกิดได้ไม่ดัดนักในเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าซึ่งเห็นได้ชัดเจน (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] ได้ให้ความเห็นว่ระบบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟนั้นสามารถช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซที่ว่องไวที่เกิดในตอนแรกของปฏิกิริยากับของแข็งนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ดีกว่าระบบการให้ความร้อนโดยการใช้เตาไฟฟ้า



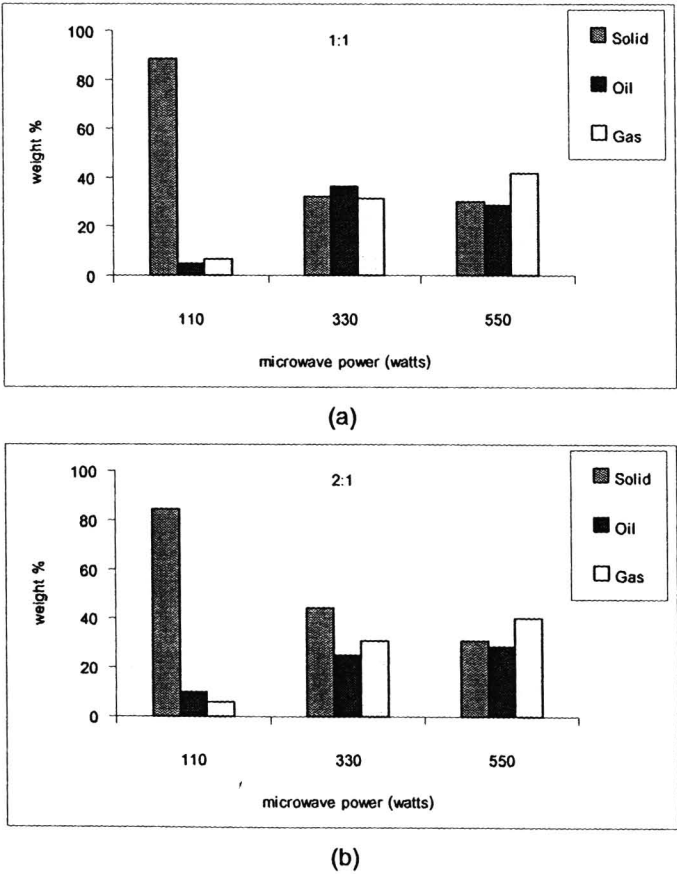
รูปที่ 15 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการแปรสภาพทางความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า เปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วน Ar:O₂ 100:0 และ 99:1

ตารางที่ 2 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ จากการแปรสภาพทางความร้อนจากระบบการให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้าที่ 700 °C

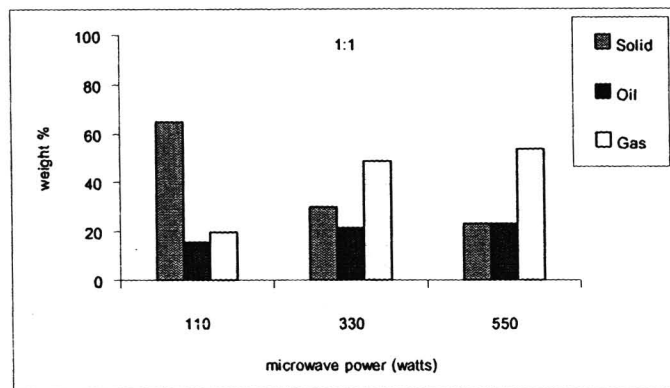
Atmosphere	Weight %		
	Solid	Oil	Gas
Ar	30.3	38.1	31.7
Ar/O ₂	31.2	25.9	42.9

4.4.4 ผลของอัตราส่วน EVA/NR :SiC

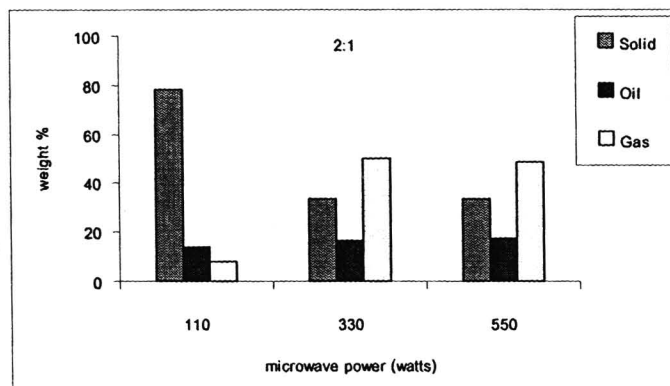
จากการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง EVA/NR :SiC ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กันนั้นพบว่าผลของอัตราส่วนนี้ต่อการแปรสภาพทางความร้อนนั้นยังไม่เป็นที่ชัดเจนนักดังรูปที่ 16 และรูปที่ 17 ซึ่งในกรณีของอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 นั้นพบว่าปริมาณส่วนใหญ่ของ EVA/NR และ SiC ที่ผสมกันอยู่นั้นอยู่ในบริเวณที่สามารถรับไมโครเวฟได้ดีแต่ในกรณีของอัตราส่วน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



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

งานวิจัยฉบับนี้สามารถดำเนินการแล้วเสร็จลงได้ด้วยความกรุณาอย่างสูงของเจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดร.อรสา ชัยนการ 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. Yilmaz 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.

คำชี้แจงต่อ ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ: รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2

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

โครงการ

“การแปรสภาพทางความร้อนเหนียวนำด้วยไมโครเวฟของวัสดุเชิงประกอบ
เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้า” (RDG5050098)

1. เป็นงานวิจัยที่เห็นแนวทางในการนำไปพัฒนาต่อยอดทางอุตสาหกรรม และมีผลดีในการ
รักษาสິงแวดล้อม 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)



