การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟไพโรไลซิสสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

สุขสันต์ อมรรักษา[1]* และ แอ๊ปเปิ้ล แจ่มจำรัส[2]

บทคัดย่อ

การแตกตัวโดยความร้อนภายใต้สภาพไร้ออกซิเจน (Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น เพื่อแตกตัวสารตั้งต้นซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลหนักให้เป็นให้เป็นสารผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบา ถึงแม้กระบวนการนี้จะมีประสิทธิภาพที่ดี แต่มีการสูญเสียพลังงานจำนวนมากระหว่างการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนผ่านตัวกลางต่างๆ ไปสู่สารตั้งต้นที่อยู่ภายในห้องปฏิกรณ์ การแตกตัวโดยความร้อนด้วยไมโครเวฟ (Microwave Pyrolysis) เป็นเทคนิคใหม่ที่มีข้อดีหลายประการเทียบกับกระบวนการแตกตัวโดยความร้อนแบบเดิม เทคนิคนี้มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายเทความร้อนอย่างจำเพาะเจาะจงเข้าสู่ตัวสารโดยตรงส่งผลให้ลดการใช้พลังงานลงประหยัดเวลาขึ้น นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่และลดการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งเกิดขึ้นในการแตกตัวโดยความร้อนแบบเดิมด้วย บทความนี้นำเสนอศักยภาพในการนำเอาเทคนิคไมโครเวฟไพโรไลซิสมาประยุกต์ใช้เพื่อแตกตัวสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

คำสำคัญ: ไมโครเวฟไพโรไลซิส ไพโรไลซิส อุตสาหกรรมปิโตรเคมี สารไฮโดรคาร์บอน

1 อาจารย์ บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

2 นักศึกษา บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 2928 อีเมล: suksuna@kmutnb.ac.th

รับเมื่อ 13 ธันวาคม 2554 ตอบรับเมื่อ 17 สิงหาคม 2555

Application of Microwave Pyrolysis for the Petrochemical Industry

Sūksun Amornraksa[1]* and Apple Jamjumras[2]

Abstract

Pyrolysis is a thermal conversion process with the absence of oxygen. It is widely used in the upstream petrochemical industry to break down long-chain hydrocarbon compounds into smaller molecules. Although the process is efficient, there is still a large amount of energy loss during the heat transfer from the heat source to the raw material in the reactor chamber. Microwave pyrolysis is a relatively new technique that provides many advantages over the conventional pyrolysis process. Microwave pyrolysis is a very efficient method in the selective heating of materials, as the energy can be transferred directly to the material. This results in less energy consumption, saves in process-time, and is more environmental friendly. In addition, it may create new products and reduce unwanted side reactions that normally occur in the conventional pyrolysis process. This paper explores the potential to apply the microwave pyrolysis technique to hydrocarbon cracking in the petrochemical industry.

Keyword: Microwave Pyrolysis, Pyrolysis, Petrochemical Industry, Hydrocarbons

1 Lecturer, The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

2 Student, The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

* Corresponding Author, 0-2555-2000 Ext. 2928, E-mail: suksuna@kmutnb.ac.th

Received 13 December 2011; Accepted 17 August 2012

1. บทนำ

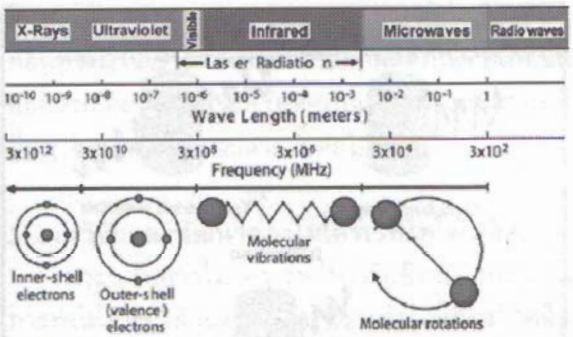
การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตเป็นเรื่องที่มีความสำคัญ เพราะนอกจากจะเป็นการช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย ดังนั้นการหาเทคโนโลยีใหม่ที่มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานมากขึ้นสำหรับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ จึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพการณ์ปัจจุบัน

อุตสาหกรรมปิโตรเคมีเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญของประเทศ มีมูลค่ามหาศาล และมีการแข่งขันสูงทั้งในประเทศและนานาชาติ ผลผลิตของอุตสาหกรรมดังกล่าวเป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่สำคัญของอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ เช่น พลาสติกชนิดต่างๆ ชิ้นส่วนรถยนต์ และอื่นๆ ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งในการผลิตคือพลังงาน ซึ่งเป็นต้นทุนการผลิตที่สำคัญที่สุดตัวหนึ่งถัดจากต้นทุนวัตถุดิบ เนื่องจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น ซึ่งทำการผลิตสารโอเลฟินส์ (Olefins) และสารอะโรเมติกส์ (Aromatics) อันเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่สำคัญของอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

กระบวนการผลิตที่สำคัญที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้นคือกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนภายใต้สภาพไร้ออกซิเจนหรือที่เรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) โดยความร้อนที่ใช้ในกระบวนการนี้จะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 800-1,000 องศาเซลเซียส สำหรับวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ วัตถุดิบตั้งต้นที่เป็นก๊าซ เช่น แอลพีจี อีเทน โพรเพน และอีกประเภทหนึ่งคือ วัตถุดิบตั้งต้นที่เป็นของเหลว ได้แก่แนฟทาและคอนเดนเสท ในบางกรณีเราสามารถนำวัตถุดิบตั้งต้นทั้ง 2 ประเภทมาป้อนร่วมกันได้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ในกระบวนการนี้วัตถุดิบตั้งต้นจะถูกป้อนเข้าไปในเตาเผา (Cracking Furnace) ผ่านท่อ (Furnace Tube) ซึ่งทำจากโลหะผสมพิเศษสามารถทนความร้อนได้สูงมาก โดยวัตถุดิบตั้งต้นจะวิ่งผ่านท่อเข้าทางส่วนบนของเตาเผาจากบนลงล่าง และรับความร้อนจากก๊าซร้อนซึ่งมาจากส่วนล่างของเตาเผา เราเรียกบริเวณส่วนบนของเตาเผานี้ว่าบริเวณคอนเวคชัน (Convection Zone) เนื่องจากกลไกหลักในการถ่ายเทความร้อนในบริเวณนี้คือการพาความร้อน (Convection Heat Transfer) จากนั้นวัตถุดิบตั้งต้นจะวิ่งลงสู่บริเวณส่วนล่างของเตาเผาที่เรียกว่าบริเวณเรเดียน (Radiant Zone) ในบริเวณนี้วัตถุดิบตั้งต้นจะรับความร้อนจากหัวเผาที่ถูกติดตั้งอยู่รอบๆ ทั้งที่ผนังเตา (Wall Burner) และที่พื้นเตา (Heart Burner) ซึ่งกลไกหลักในการถ่ายเทความร้อนในบริเวณนี้คือการแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

ผลิตภัณฑ์หลักที่สำคัญที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสนี้ ประกอบด้วย เอทิลีน (Ethylene) โพรพิลีน (Propylene) และสารผสมกลุ่มซีโฟร์ (Mixed C4) เอทิลีนเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่สำคัญที่สุดของอุตสาหกรรม ปิโตรเคมี สามารถนำไปเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตเป็นเม็ดพลาสติกและเคมีภัณฑ์ชนิดต่างๆ มากมาย เช่น LDPE HDPE PVC และ Ethylene Glycol เป็นต้น ในขณะที่โพรพิลีนสามารถนำไปผลิตเป็นเม็ดพลาสติกและเคมีภัณฑ์อื่นๆ เช่น PP Acrylonitrile และ Cumene ส่วนสารผสมกลุ่มซีโฟร์นั้นสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตเป็นสารเพิ่มค่าออกเทนในเชื้อเพลิงรถยนต์ (MTBE) และยางกึ่งสังเคราะห์ชนิดต่างๆ ได้

ในกระบวนการไพโรไลซิส ความร้อนจากแหล่งกำเนิดจะถูกถ่ายเทไปสู่วัสดุได้ทั้งสิ้น 3 แบบ คือ การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) การพาความร้อน (Convection Heat Transfer) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer) ในทางปฏิบัติไม่ว่าจะมีการถ่ายเทพลังงานความร้อนในรูปแบบใดก็ตาม จะมีการสูญเสียพลังงานความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อมเสมอ ทำให้ประสิทธิภาพทางด้านพลังงาน (Energy Efficiency) ของกระบวนการลดลง นอกจากนี้ เมื่อความร้อนจากแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนมากขึ้น



รูปที่ 1 ภาพแสดงสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่างๆ [1]

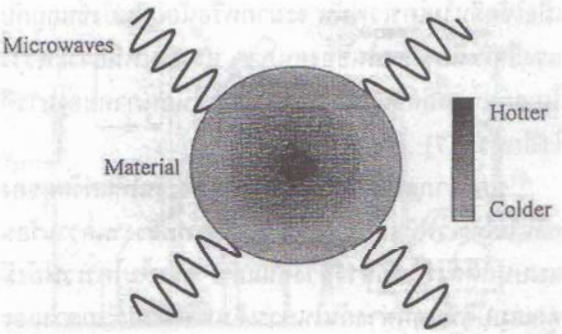
มีความพยายามในการค้นคว้าวิธีการใหม่ๆ ที่สามารถถ่ายเทพลังงานให้แก่วัสดุหรือสารตั้งต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อลดการสูญเสียพลังงานลง จากการวิจัยพบว่าไมโครเวฟเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีศักยภาพในการแก้ไขปัญหานี้ได้ [1] โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส เราเรียกเทคนิคนี้ว่า ไมโครเวฟไพโรไลซิส (Microwave Pyrolysis)

บทความนี้นำเสนอข้อมูลพื้นฐานของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ความก้าวหน้าของงานวิจัยและพัฒนาต่างๆ ตลอดจนข้อจำกัดและทิศทางในอนาคต ที่เกี่ยวข้องกับการนำไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

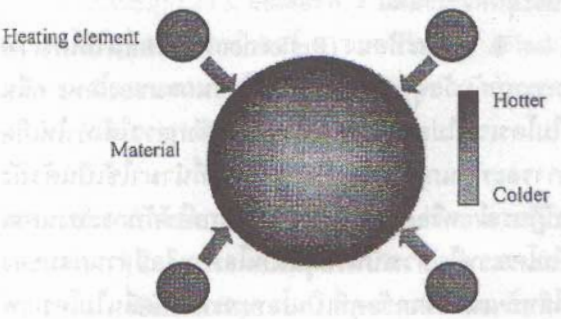
2. พื้นฐานของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีสมบัติเดินทางเป็นเส้นตรงและเคลื่อนที่ในอากาศด้วยความเร็วเท่ากับแสงอยู่ในช่วงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟระหว่าง 300 เมกกะเฮิรตซ์ ถึง 300 กิกะเฮิรตซ์ หรือในช่วงความยาวคลื่น 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เมตร [1],[2] ดังแสดงได้ในรูปที่ 1

ปัจจุบันมีการนำเอาเทคโนโลยีไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุและสารต่างๆ ในธุรกิจและในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น การประกอบอาหาร การสังเคราะห์สารเคมี การอบแห้งอาหารและชิ้นงานต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 2 ภาพแสดงการกระจายความร้อนภายในเนื้อของวัสดุเมื่อให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ [6]



รูปที่ 3 ภาพแสดงการกระจายความร้อนภายในเนื้อของวัสดุเมื่อให้ความร้อนด้วยวิธีทั่วไป [6]

หลักการทำงานพื้นฐานของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (Microwave Heating) คือ โครงสร้างโมเลกุลของวัสดุหลายๆ ชนิด สามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้แตกต่างกัน คลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำและก่อให้เกิดการกระตุ้นของสารที่สามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ ทำให้โมเลกุลของสารนั้นเกิดการสั่นและการเสียดสีกันจนกระทั่งภายในเนื้อสารเกิดความร้อนสูงขึ้น [3]-[5] ดังแสดงในรูปที่ 2

กระบวนการนี้แตกต่างจากการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไป ที่ความร้อนจากแหล่งกำเนิดจะเดินทางผ่านตัวกลางต่างๆ ในรูปแบบของการนำความร้อน การพาความร้อน หรือการแผ่รังสีความร้อน ก่อนที่จะไปถึงยังตัววัสดุที่ต้องการรับความร้อน จากนั้นความร้อนจึงถ่ายเทเข้าสู่ภายในของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3

การสั่นสะเทือนของโมเลกุลของวัสดุหรือสารหลายชนิด

เมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟนั้น จะมากหรือน้อยนั้นยังขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวภายในของอนุภาค แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ตลอดจนแรงต้านทานภายในอนุภาคของสารที่ใช้อีกด้วย [7]

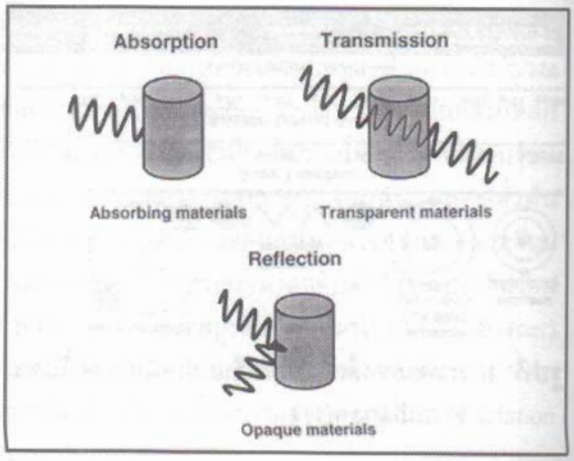
นอกจากสมบัติในการถ่ายเทพลังงานให้แก่วัสดุของคลื่นไมโครเวฟที่แตกต่างจากการถ่ายเทพลังงานความร้อนแบบปกติดังที่ได้กล่าวข้างต้นแล้ว คลื่นไมโครเวฟยังมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในการเดินทางผ่านตัวกลางและวัสดุต่างๆ อยู่อีก 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งทั้ง 3 รูปแบบดังกล่าวจะมีผลต่อการนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้งานคือ

1. การสะท้อน (Reflection) เมื่อคลื่นไมโครเวฟกระทบกับวัสดุที่เป็นโลหะหรือมีส่วนผสมของโลหะ คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านวัสดุดังกล่าวได้ ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวถังปฏิกรณ์ หรือสารที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการไมโครเวฟไม่ควรเป็นวัสดุที่เป็นโลหะหรือมีส่วนผสมของโลหะ เนื่องจากวัสดุที่เป็นโลหะจะทำให้คลื่นไมโครเวฟเกิดการสะท้อนกลับและทำให้ตัวแมกนิตรอนเสื่อมเร็ว ทำให้อายุการใช้งานของเตาไมโครเวฟสั้นลง รวมถึงสิ้นเปลืองพลังงานอีกด้วย

2. การส่งผ่าน (Transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถส่งทะลุผ่านวัสดุที่เป็นสารที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น แก้ว กระดาษ ไม้ เซรามิกส์และพลาสติกได้ เพราะภาชนะดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของโลหะ จึงเป็นวัสดุที่ใช้ได้ดีกับเตาไมโครเวฟและยังช่วยให้คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านไปได้ง่ายอีกด้วย

3. การดูดซึม (Absorption) วัสดุบางชนิดมีความสามารถในการดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ และเมื่อโมเลกุลของวัสดุนั้นดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้ว จะทำให้สารนั้นร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว และอีกนัยหนึ่งเมื่อโมเลกุลของสารนั้นดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้วจะสลายตัวเป็นความร้อนในทันทีและไม่สะสมในสารนั้นๆ

โดยสมบัติดังกล่าวข้างต้นของคลื่นไมโครเวฟเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการเลือกประเภทของวัสดุหรือสารที่จะนำมาใช้ในกระบวนการให้ความร้อนด้วย



รูปที่ 4 ปฏิกิริยาของคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุประเภทต่างๆ *[8]*

ไมโครเวฟ รวมถึงเป็นข้อควรระวังในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ และอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ ที่จะนำมาใช้กับตัวเครื่องไมโครเวฟ เพื่อไม่ให้กระทบต่อระบบการทำงานไม่สิ้นเปลืองพลังงาน และเพื่อได้ประสิทธิภาพสูงสุด รวมถึงการคำนึงถึงความปลอดภัยเมื่อใช้งานอีกด้วย

จากหลักการทำงานดังกล่าวข้างต้น ทำให้การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟใช้เวลาในการเกิดสั้นกว่าและสูญเสียความร้อนน้อยกว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบเดิมที่ความร้อนจะต้องสูญเสียไปกับการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบต่างๆ ทำให้ช่วยประหยัดเวลา ประหยัดพลังงาน และช่วยลดต้นทุนการผลิต อีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่ช่วยปรับปรุงและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น หรือช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างไปจากการแตกตัวของสารโดยการใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบเดิมอีกด้วย [9]

สำหรับหลักการของกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนภายใต้สภาพไร้ออกซิเจน หรือที่เรียกว่าไพโรไลซิสนั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้วัตถุดิบหรือสารตั้งต้นเกิดการแตกตัวกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง สำหรับในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีนั้น กระบวนการไพโรไลซิสนิยมถูกนำมาใช้ในการแตกตัววัตถุดิบตั้งต้นที่เป็นสารไฮโดร-คาร์บอน (Hydrocarbons) ชนิดต่างๆ ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น เอทิลีน (Ethylene)

โพรพิลีน (Propylene) รวมถึงผลิตภัณฑ์ข้างเคียงอื่นๆ ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่กระบวนการแยกผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกจากกัน เพื่อนำไปใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีอื่นๆ ในอุตสาหกรรมปลายน้ำต่อไป

3. งานวิจัยและพัฒนาของไมโครเวฟไพโรไลซิส

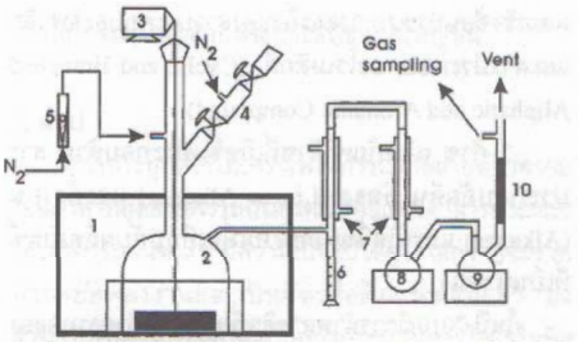
กระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสเป็นกระบวนการทำให้สารตั้งต้นแตกตัวด้วยความร้อนที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟ เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการนำมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี สารตั้งต้นหลากหลายประเภทสามารถถูกนำมาใช้ในกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสได้ เช่น สารชีวมวลและกากของเสีย เป็นต้น ซึ่งสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เป็นสารอีกประเภทหนึ่งที่มีความน่าสนใจใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีมูลค่าสูงขึ้น ซึ่งงานวิจัยทางด้านนี้ได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังตัวอย่างงานวิจัยที่จะได้กล่าวถึงต่อไปนี้

ในปี 1997 Onoe และคณะ [10] ทำการศึกษาการสังเคราะห์อะเซทิลีน (Acetylene) แบบจำเพาะเจาะจงจากสารตั้งต้นมีเทน (CH_4) โดยใช้ไมโครเวฟไพโรไลซิส การทดลองนี้ใช้กำลังของไมโครเวฟในช่วง 50-250 วัตต์ และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 วินาที ที่ความถี่ของไมโครเวฟ 2.45 กิกะเฮิรตส์ ผลการศึกษาพบว่าได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นอะเซทิลีนมากกว่า 90% นอกจากนี้ยังได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นอีเทนและ เอทิลีนอีก 6% โดยค่าความจำเพาะเจาะจง (Selectivity) ของการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเปลี่ยนไปตามกำลังของไมโครเวฟที่ใช้ ซึ่งแสดงผลตามตารางที่ 1

ในปี 2001 Ludlow-Palafox และ Chase [11] ทำการศึกษากระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสกับพลาสติกที่ใช้แล้ว โดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลองดังแสดงไว้รูปที่ 5

ขยะพลาสติกที่นำมาทดลองคือโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-density Polyethylene, HDPE) และแผ่นโพลิเมอร์และอลูมิเนียมหลายชนิด (Aluminum/Polymer Laminates) โดยใช้เครื่องไมโครเวฟที่มีกำลังสูงสุดที่ 5 กิโลวัตต์ และอุณหภูมิที่ใช้ทดลองอยู่ในช่วง 500-700 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองสามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. น้ำมัน (Oil/Wax) โดย 81-93% ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้น ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรง (Linear Hydrocarbon) อัลคีน (Alkenes) อัลเคน (Alkanes) และไดอันคีน (Dialkanes) ส่วนที่เหลือเป็นสาร



รูปที่ 5 กระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสโดยใช้พลาสติกที่ใช้แล้วเป็นสารตั้งต้น [11] โดย 1. เตาไมโครเวฟ 2. ถังปฏิกรณ์ 3. มอเตอร์ 4. วาล์ลควบคุมก๊าซเฉื่อย (N_2) 5. โรตามิเตอร์ 6. ขวดปริมาตร (Flask) 7. คอนเดนเซอร์ 8,9. ตัวดักจับก๊าซ 10. ตัวกรองละออง [11]

ตารางที่ 1 กำลังของไมโครเวฟที่มีผลต่อค่าคอนเวอร์ชัน (Conversion) และค่าความ จำเพาะเจาะจง (Selectivity) ของการเกิดผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ [10]

Power	Final pressure	Conversion	Selectivity (%)					
(W)	(kPa)	(%)	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	C_3H_8	C_3H_6	Other
10	4.5	7.0	25.5	31.9	41.9	0.3	0.1	0.3
30	4.6	22.4	10.7	21.4	66.5	0.3	0.1	1.0
50	4.6	50.3	2.4	6.3	90.2	0.2	tri.	0.9
100	4.7	69.2	1.2	4.2	92.5	0.3	0.1	1.3
150	4.9	81.3	0.6	2.9	95.1	0.3	0.1	1.0
200	4.9	90.0	0.5	2.5	95.9	0.2	tri.	0.9
250	4.9	91.2	0.4	2.4	95.2	0.2	tri.	1.8
300	5.2	93.8	0.2	2.2	84.8	0.2	tri.	12.6
350	5.2	95.1	0.1	0.4	75.3	0.2	tri.	24.0

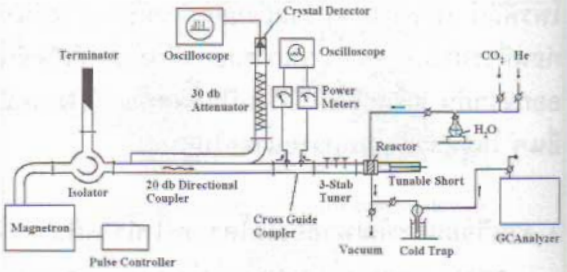
ผสมเชิงซ้อนประเภทวงและกิ่งของสารประกอบอะลิฟาติกและสารประกอบ อะโรเมติกส์ (Cyclic and Branched Aliphatic and Aromatic Compound)

2. ก๊าซ ผลิตภัณฑ์ก๊าซที่เกิดขึ้นประกอบด้วย สารประกอบอัลคีนโซ่ตรง (Linear Alkenes) และอัลเคน (Alkanes) และเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน

ในปี 2010 มีการนำพลาสติกที่ใช้แล้วมาทำการทดลองคล้ายกับการทดลองดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่องค์ประกอบหลักของพลาสติกที่ใช้แล้วจะเป็นโพลิสไตรีน (Polystyrene) [12] ไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองสามารถผลิตกำลังได้สูงสุดที่ 700 วัตต์ และอุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 1,100-1,200 องศาเซลเซียส ความถี่ที่ใช้คือ 2,450 เมกกะเฮิรตซ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสัดส่วนเป็นของเหลว 80% โดยมีองค์ประกอบหลักเป็น สารอะโรเมติกส์หลายวง (Polycyclic Aromatic) และ สารอะโรเมติกส์ประเภทวงอิ่มตัว (Condense Ring Aromatic Compound) เป็นก๊าซ 15% และของแข็ง 5%

นอกจากนี้ในข้อมูลสิทธิบัตร (Patent) ได้มีการกล่าวถึงกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสโดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยเช่นกัน และยังใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการด้วยเช่น การนำเฮกเซน (Hexane) มาทำการแตกตัวด้วยกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) [13]-[15] ความถี่ของไมโครเวฟที่ใช้คือ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังไมโครเวฟถูกปรับเปลี่ยนในช่วง 100-800 วัตต์ ข้อมูลในสิทธิบัตรระบุว่าเฮกเซนสามารถแตกตัวได้ไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) อะเซทิลีน (C_2H_2) และเอทิลีน (C_2H_2) กล่าวโดยสรุปได้ว่าไมโครเวฟไพโรไลซิสและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สามารถช่วยในการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังได้ผลิตภัณฑ์ที่มูลค่าเพิ่มมากขึ้น

นอกเหนือจากเฮกเซนแล้ว สารประกอบไฮโดร-คาร์บอนชนิดอื่นๆ ยังได้ถูกนำมาศึกษาทดลองในกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสด้วย ตัวอย่างเช่น Tanner และ



รูปที่ 6 กระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสโดยใช้เบนซีน (Benzene) เป็นสารตั้งต้น [18]

คณะ [16] ทำการศึกษากระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสด้วยสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่มคาร์บอนอะตอม 1-4 (C1-C4 hydrocarbons) ไซโคลเดกเคน (Cyclodecane) และ เฮกซาเดกเคน (Hexadecane) และมีการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทดลองที่อุณหภูมิ 1,000-1,500 องศาเคลวิน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีองค์ประกอบหลักเป็นไฮโดรเจนและก๊าซไฮโดรคาร์บอนชนิดเบาต่างๆ เช่น มีเทน อะเซทิลีน เอทิลีน อีเทน โพรพิลีน โพรเพน เป็นต้น ในส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นเป็นสารในกลุ่มโอเลฟินส์ (Liquid Olefins)

เบนซีน (Benzene) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทอะโรเมติกส์อีกชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ศึกษาในกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส โดย Bamwenda และคณะ [17],[18] ได้ทดลองร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นนิกเกิล และใช้กำลังของไมโครเวฟในช่วง 1.4-2.8 กิโลวัตต์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ 545 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 10-25 นาที โดยมีอุปกรณ์และแผนภาพการทดลองดังแสดงในรูปที่ 6

ผลการทดลองที่ได้พบว่า การทำไมโครเวฟไพโรไลซิสของเบนซีน (Benzene) ได้อะเซทิลีนเป็นผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่มากกว่ากระบวนการดั้งเดิมและไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเหมือนกับกระบวนการทั่วไปอีกด้วย

จากการศึกษาและงานวิจัยเกี่ยวกับไมโครเวฟไพโรไลซิสดังที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมดข้างต้น จะเห็นได้ว่าการนำเอากระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสมาประยุกต์ใช้ในการเปลี่ยนรูปสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ แทน

กระบวนให้ความร้อนแบบไพโรไลซิสที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป มีความน่าสนใจและเป็นไปได้ นอกจากจะสามารถช่วยประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้นกว่าวิธีการเดิม รวมถึงอาจจะช่วยก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่น่าสนใจอีกด้วย

4. ข้อจำกัดและทิศทางการพัฒนาในอนาคต

ถึงแม้ว่า การใช้ไมโครเวฟในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนหรือกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่ข้อจำกัดยังคงมีอยู่หลายประการ เช่น การสร้างหรือการออกแบบตัวระบบให้มีขนาดใหญ่เป็นไปได้ยาก เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องเทคโนโลยี [19] ทำให้ยังไม่สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงข้อจำกัดในเรื่องความปลอดภัยในการใช้งานคลื่นไมโครเวฟ โดยเฉพาะอันตรายจากการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ ฉะนั้นจึงต้องทำการศึกษาถึงอันตรายจากย่านความถี่คลื่นไมโครเวฟเพื่อจะได้ป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายในขณะใช้งานจริง

นอกจากนี้ในการทดลองระบบไมโครเวฟสำหรับการให้ความร้อนโดยทั่วไปยังมีข้อจำกัดอยู่ว่าวัสดุที่นำมาทดลองมีปริมาณไม่มากนักและอยู่ในสภาพหยุดนิ่ง (Fixed Materials) การที่วัสดุหยุดนิ่งนั้น ทำให้การกระจายตัวของคลื่นหรือความร้อนไม่สม่ำเสมอ ก่อให้เกิดโซนร้อน (Hot Spot Zone) และโซนเย็น (Cold Zone) ขึ้นบนวัสดุส่งผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์อีกด้วย

สำหรับทิศทางในการพัฒนานั้นควรจะมุ่งเน้นในเรื่องของการพัฒนาอุปกรณ์ให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงในอุตสาหกรรมและมีประสิทธิภาพ [19], [20] เช่นการวิจัยและการพัฒนาเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟเป็นลักษณะหลายโหมด (Multi-mode) เนื่องจากกระบวนการนี้ทำคลื่นเกิดการกระจายตัวหรือกระจายความร้อนเข้าสู่วัสดุได้ดี ตลอดจนการควบคุมตำแหน่งของการกระจายตัวที่ดีของความร้อนภายในวัสดุทั้งกรณีที่วัสดุหยุดนิ่งและเคลื่อนที่ อีกทั้งยังต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของความปลอดภัยในการใช้คลื่นไมโครเวฟในปริมาณที่มากขึ้นเมื่ออุปกรณ์ที่ใช้ได้ถูกพัฒนาให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

5. สรุป

การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการแยกสลายด้วยความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เพื่อแตกตัวสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่างๆ มีความเป็นไปได้สูง นอกจากจะช่วยประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังสามารถให้ผลิตภัณฑ์ได้มากกว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบเดิมอีกด้วย ถึงแม้มีข้อจำกัดอยู่บ้างแต่จากศักยภาพของกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส ทำให้มีการพัฒนาและวิจัยอย่างต่อเนื่อง เชื่อว่าในอนาคตจะสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดจนแก้ไขปรับปรุงข้อจำกัดต่างๆ ลงได้จนกระทั่งได้กระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสที่สามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้อย่างแท้จริงและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นอย่างแน่นอน

เอกสารอ้างอิง

[1] B. L. Hayes, *Microwave Synthesis: Chemistry at the Speed of Light,* Matthews, NC: CEM Publishing, 2002.

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

[3] S. Mutyala, C. Fairbridge, J. R. J. Paré, J. M. R. Bélanger, S. Ng, and R. Hawkins, "Microwave applications to oil sands and petroleum: a review," *Fuel Processing Technology*, vol. 91, pp. 127–135, 2010.

[4] T. J. Appleton, R. I. Colder, S. W. Kingman, and A. G. Read, "Microwave technology for energy-efficient processing of waste," *Applied Energy*, vol. 81, pp. 85-113, 2005.

[5] G. Majetich and R. Hicks, "The use of microwave heating to promote organics reactions," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic*

–*Energy*, vol. 30, pp. 27-45, 1995.

[6] Y. Fernańdez, A. Arenillas, and J. A. Menéndez, "Microwave heating applied to pyrolysis," in *Advances in Induction and Microwave Heating and Organic Material*. S. Grundas, Ed. Rijeka, Croatia: In Teach, 2011, pp. 723-752.

[7] A. Loupy, L. Perreus, M. Liagre, K. Burle, and M. Moneuse, "Reactivity and selectivity under microwaves in organic chemistry: relation with medium effects and reaction mechanisms," *Pure Appl. Chem.*, vol. 73, pp. 161-166, 2001.

[8] M. Gupta and E. W. W. Leong, *Microwaves and Metals*, Singapore: John Wiley & Sons (Asia), 2007.

[9] A. Domı´nguez, J. A. Menendez, J. J. Pis, Y. Fernaéndeza, J. M. V. Nabais, and M. M. L. R. Carrott, "Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of a hydrogen rich fuel gas," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 79, pp. 128-135, 2007.

[10] K. Onoe, A. Fujie, T. Yamaguchi, and Y. Hatano, "Selective synthesis of acetylene from methane by microwave plasma reactions," *Fuel*, vol. 76, No. 3, pp. 281-282, 1997.

[11] C. Ludlow-Palafox and H. A. Chase, "Microwave-induced pyrolysis of plastic wastes," *Ind. Eng. Chem.* Res., vol. 40, pp. 4749-4756, 2001.

[12] Z.Hussain, K.M.Khan, and K.Hussain, "Microwave-metal interaction pyrolysis of polystyrene," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 89, pp. 39-43, 2010.

[13] D. D. Tanner and Q. Ding, "Catalytic microwave conversion of gaseous hydrocarbons," U.S. Patent 5 972 175, Oct. 26, 1999.

[14] P. T. Fanson , H. Hirata, M. Ibe, S. L. Suib, and Y. C. Son, "Process using microwave energy and catalyst to crack hydrocarbons," U.S. Patent 0 251 557 A1, Nov. 9, 2006.

[15] K. I. Kasin, "Microwave gasification, pyrolysis and recycling of waste and other organic materials," U.S. Patent 0 000 938 A1, Jan. 1, 2009.

[16] D. D. Tanner, P. Kandanarachchi, Q. Ding, H. Shao, D. Vizitiu, and J. A. Franz, "The catalytic conversion of c1-cn hydrocarbons to olefins and hydrogen: microwave-assisted C-C and C-H bond activation," *Energy & Fuels*, vol. 15, pp. 197-204, 2001.

[17] G. Bamwenda, M. C. Depew, and J. K. S. Wan, "Acetylene from benzene: a novel and selective microwave assisted cracking synthesis," *Res. Chem. Intermed.*, vol.19, no.6, pp. 553-564, 1993.

[18] G. Bamwenda, M. C. Depew, and J. K. S. Wan, "Microwave induced catalytic reactions of carbon dioxide and water: mimicry of photosynthesis," *Res. Chem. Intermed.*, vol. 16, pp. 241-255, 1991.

[19] K. G. Ayappa, H. T. Davis, G. Crapiste, E. A. Davis, and J. Gordon, "Microwave heating: an evaluation of power formulations," *Chemical Engineering Science Journal*, vol. 46, pp. 1005-1016, 1991.

[20] Linn High Therm (2011, Dec. 9). *Microwave Continuous Belt Heater MDBT 55 640/200 /13530*. [Online]. Available: http://www.linn-high-therm.de/microwave-continuous-belt-heater- mdbt-55-640/200/13530.html