

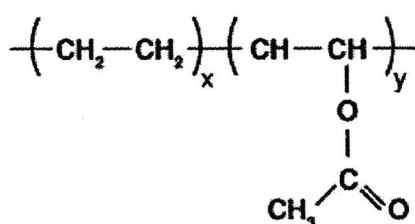
บทที่ 2

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

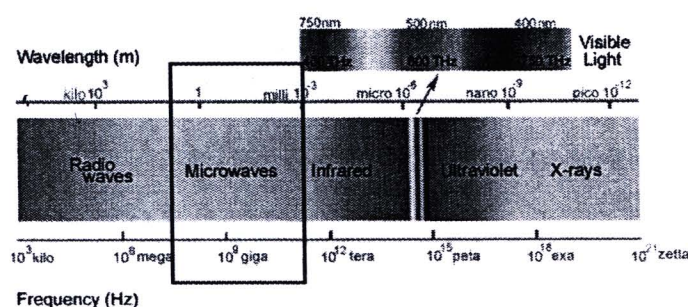
2.1.2 สมบัติทางความร้อนของเอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์

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



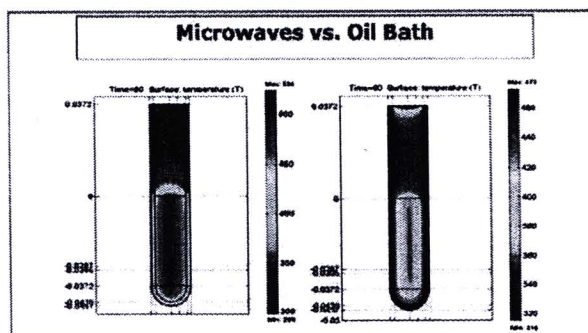
รูปที่ 2.2 ช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการใช้งาน

2.2.2 การเกิดความร้อนโดยไมโครเวฟ (Microwave Heating)

การนำไมโครเวฟมาใช้งานในด้านต่างๆ ได้มีการศึกษากันมาตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 เพื่อนำมาใช้เป็นเรดาร์ และต่อมาจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาในการนำมาให้ความร้อน

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

ได้รับความร้อนที่แผ่จากตรงกลางแทน ด้วยเหตุนี้ไมโครเวฟจึงเป็นการให้ความร้อนในเชิงปริมาตรและมีความสม่ำเสมอมากกว่าการให้ความร้อนแบบทั่วไป



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ (ซ้าย) และอ่างน้ำมัน (ขวา)

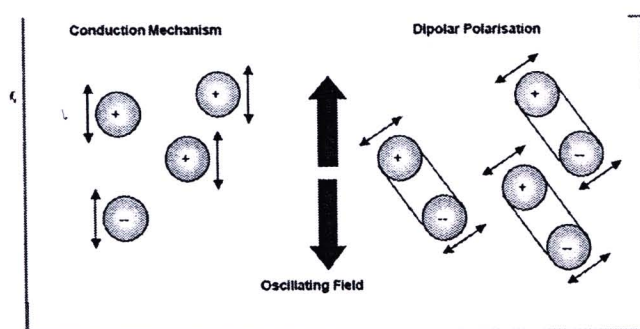
เตาไมโครเวฟที่ใช้กันอยู่ในครัวเรือนนั้นถูกกำหนดให้ใช้ในช่วงความถี่ 2.45 GHz เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกับการใช้งานด้านอื่นๆ เช่น ด้านการสื่อสาร เป็นต้น

การให้ความร้อนโดยไมโครเวฟนั้นมีข้อดีกว่าการให้ความร้อนแบบทั่วไปอยู่หลายอย่างด้วยกัน เนื่องมาจากการให้ความร้อนแบบทั่วไปนั้นอาศัยการแผ่ความร้อนจากแหล่งกำเนิดต่างๆ เช่น ขดลวดความร้อน เบลวไฟ ไอน้ำ เป็นต้น ซึ่งความร้อนเหล่านี้มันอาจเกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนให้แก่ตัวกลางต่างๆ เช่น อากาศ น้ำ เป็นต้น และการแผ่ความร้อนนี้อาจถูกจำกัดด้วยสมบัติทางกายภาพของวัสดุ เช่น ความหนาแน่น ความเป็นเนื้อเดียวกัน ความจุความร้อน และการนำความร้อน ในขณะที่การใช้ไมโครเวฟนั้นเป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุโดยตรงโดยความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากโมเลกุลของวัสดุเอง จึงมีการสูญเสียความร้อนน้อยกว่า และสามารถควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นได้โดยการปรับกำลังของไมโครเวฟตามต้องการ ดังนั้นการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟจึงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ และมีความคุ้มค่าทางพลังงานอีกวิธีหนึ่ง โดยการเกิดความร้อนของวัสดุนั้นสามารถเกิดได้จากกลไกต่างๆ 3 รูปแบบ ดังนี้

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

- เกิดจากการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุชั้นที่ผิวรอยต่อ (interfacial polarization) ของวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้า และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ที่แตกต่างกันทำให้เกิดการสะสมของประจุชั้นเมื่อได้รับไมโครเวฟ 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)

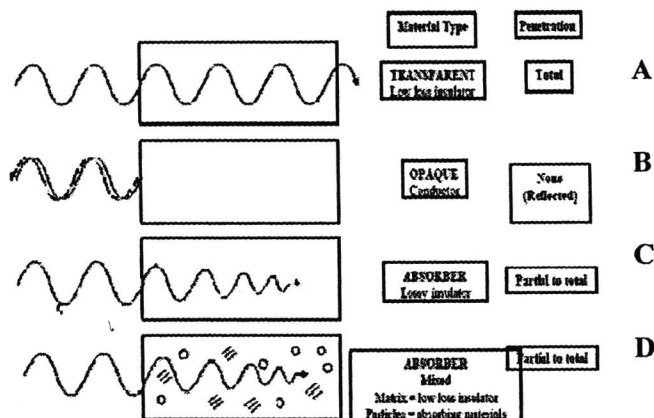
เมื่อวัสดุที่เป็นโลหะหรือที่มีส่วนผสมของโลหะได้รับไมโครเวฟ อิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่มากบนโลหะจะเกิดการเคลื่อนตัวและเกิดการหลุดออกมาภายนอกทำให้ไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านวัสดุนั้นได้จึงเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟ ส่งผลให้วัสดุนั้นไม่เกิดความร้อนขึ้นเนื่องจากไม่เกิดการเสียดทานระหว่างอิเล็กตรอนกับความต้านทานภายในของโลหะที่มีน้อยอยู่แล้ว

b. การทะลุผ่าน (Transmission)

จะเกิดเมื่อโมเลกุลของวัสดุนั้นไม่มีส่วนที่เป็นไดโพลหรือประจุที่สามารถตอบสนองต่อไมโครเวฟได้ หรือมีอยู่น้อย ก็จะไม่เกิดการสั่นหรือเคลื่อนตัวของโมเลกุลทำให้ไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านโดยที่ไม่มีความร้อนใดๆเกิดขึ้น วัสดุที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ กระดาษ ไม้ พลาสติกที่มีความเป็นฉนวน เป็นต้น

c. การดูดซับ (Absorption)

เมื่อวัสดุหรือองค์ประกอบของวัสดุนั้นมีส่วนที่เป็นไดโพล หรือประจุที่สามารถเกิดการสั่นหรือเคลื่อนตัวได้ด้วยไมโครเวฟ พลังงานไมโครเวฟที่ได้รับนี้จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของพลังงานจลน์เกิดการขัดสีและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนแทน เราเรียกวัดที่วัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนได้ว่า “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 โดยวัสดุที่เป็นฉนวนนี้ให้เป็นตัวรองวัสดุในเตาไมโครเวฟเนื่องจากไม่สามารถร้อน

ได้ในไมโครเวฟ และวัสดุที่สามารถเกิดความร้อนได้โดยคลื่นไมโครเวฟจะเรียกว่า “วัสดุไดอิเล็กทริก” หรือ “ตัวดูดซับไมโครเวฟ” ประสิทธิภาพของการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟของวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductor) นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิคือ ถ้าอุณหภูมิของวัสดุนั้นสูงพอจนสามารถตอบสนองต่อไมโครเวฟก็สามารถเกิดความร้อนขึ้นได้เช่นกัน แต่หากผสมวัสดุที่มีค่า Dielectric loss factor ต่ำมากๆ สามารถแก้ไขได้โดยการผสมกับวัสดุที่สามารถร้อนได้ด้วยไมโครเวฟเช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ หรือ คาร์บอน โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนคือเมื่อวัสดุที่ตอบสนองต่อไมโครเวฟเกิดความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อนไปสู่วัสดุที่เป็นฉนวนต่ออีกทอดหนึ่ง

กล่าวโดยสรุปแล้วการให้ความร้อนโดยการใช้ไมโครเวฟมีความแตกต่างและเหนือกว่าการให้ความร้อนโดยทั่วไปดังนี้

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

2.3 กระบวนการเคมีเชิงความร้อน (Thermochemical process)

กระบวนการเคมีเชิงความร้อนหรือการแปรสภาพทางความร้อนเป็นการทำให้วัสดุเกิดการสลายตัวออกเป็นสารโมเลกุลเล็กๆ ที่อุณหภูมิสูงโดยสารที่เกิดจากการแตกตัวของวัสดุนี้นับหลายรูปแบบทั้งของแข็งของเหลว และก๊าซ โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ขึ้นกับสภาวะที่ใช้ในการทำให้เกิดการแตกตัวโดยตัวแปรที่สำคัญในการแตกสลายของวัสดุคือปริมาณออกซิเจน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งกระบวนการทางเคมีความร้อนตามปริมาณของออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยาได้เป็น 3 แบบ ด้วยกันคือ การเผาไหม้สมบูรณ์ การเกิดแก๊สซิฟิเคชัน และการไพโรไลซิส

2.3.1 การเผาไหม้สมบูรณ์ (Combustion)

การเผาไหม้สมบูรณ์เป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการแตกตัวของสารที่อุณหภูมิสูงโดยการให้ออกซิเจนในปริมาณที่มากเกินไปซึ่งเป็นการทั่วไปที่ใช้ในการเผาถ่านหินเพื่อผลิตไฟฟ้า โดยในกรณีของเชื้อเพลิงแข็งนั้นจะเกิดกระบวนการเผาไหม้ 4 ขั้นตอนได้แก่

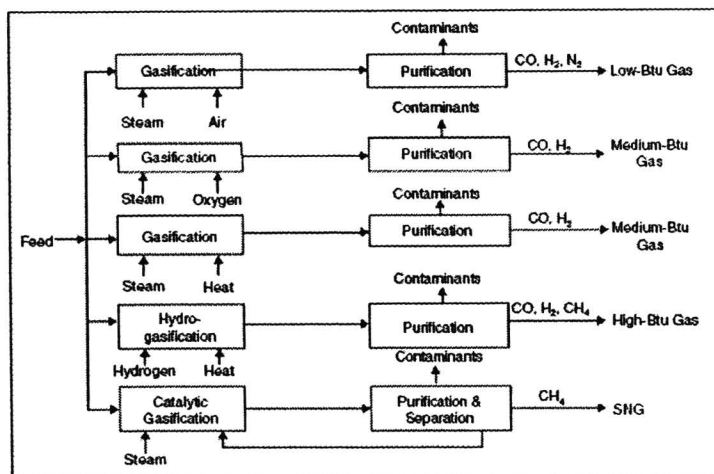
- a) การเกิดความร้อน เมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนจะเกิดการสะสมความร้อนภายในวัสดุเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ
- b) การทำให้แห้ง เมื่อพลังงานความร้อนที่มีค่ามากพอที่จะทำให้ น้ำที่อยู่ในวัสดุเริ่มเกิดการระเหยออกไป
- c) การเผาไหม้ เมื่อน้ำออกไปจากวัสดุแล้วและอุณหภูมิสูงพอ วัสดุจะเริ่มเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์โดยการเกิดออกซิเดชันกับออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาทั้งน้ำ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซต่างๆ การเผาไหม้นี้จะเกิดไปเรื่อยๆจนสารที่สามารถระเหยออกไปหมด จนเหลือแต่ถ่านชาร์ที่ประกอบด้วยคาร์บอนและสารอนินทรีย์
- d) การเผาไหม้ของถ่านชาร์ เป็นการเผาไหม้ของคาร์บอนโดยเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นก๊าซ CO_2 , CO จนสุดท้ายจะเหลือเพียงสารอนินทรีย์ หรือที่เรียกว่า “เถ้า” (ash) นั้นเอง

2.3.2 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิสคือการแตกสลายของโมเลกุลด้วยพลังงานความร้อนภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน โดยการแตกสลายนี้จะเกิดจากการขาดออกจากกันของโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็กโดยชนิดและความหลากหลายของผลิตภัณฑ์จะขึ้นกับพลังงานพันธะ ณ ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งการไพโรไลซิสนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายมากตั้งแต่ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อในแวดวงอุตสาหกรรม หรือสามารถใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานเช่น การนำขยะพลาสติกมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสให้เกิดเป็นสารตั้งต้นเพื่อนำกลับมาใช้ในการผลิตต่อไป

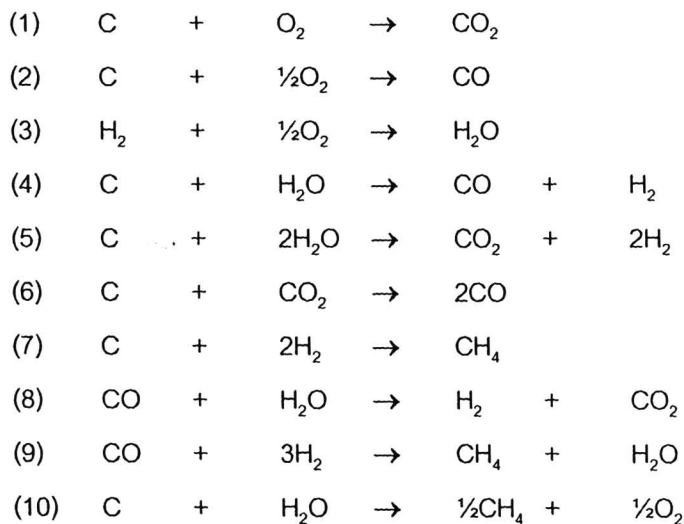
2.3.3 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

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 หรือเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซผลิตภัณฑ์ด้วยตัวเอง ดังสมการต่อไปนี้



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

- ปฏิกิริยาที่ (4) และ (5) เป็นปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำและก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นปฏิกิริยาทั่วไปที่เกิดขึ้นในแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน 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 และความดันที่ให้แก่ระบบแก๊ซซิฟิเคชันแล้วยังมีตัวแปรอื่นๆที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมี ความร้อนที่ได้ และการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

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



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่.....	13 ต.ค. 2555
เลขทะเบียน.....	246705
เลขเรียกหนังสือ.....	

2.4. การแปรสภาพทางความร้อนด้วยไมโครเวฟ

ในส่วนของการสลายตัวทางความร้อนของเอทิลีนไวนิลแอลซีเตตโคพอลิเมอร์นั้นมีการศึกษาของ A. Marcilla A. Gómez และ S. Menargues (A. Marcilla, A. Gómez, S. Menargues, 2005) ซึ่งได้ทำการศึกษาก๊าซที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ และ FT-IR โดยพบว่าเอทิลีนไวนิลแอลซีเตตโคพอลิเมอร์เกิดการสลายตัว 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) ซึ่งได้ทำการศึกษากาโรไลซิสเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่เคลือบอยู่บนแผ่นอลูมิเนียมจากเศษหลอดยาสีฟัน โดยพบว่ากระบวนการนั้นไม่มีความแตกต่างจากวิธีการที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ การให้ความร้อนโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้า แต่มีข้อดีที่เหนือกว่าคือ ไม่จำเป็นต้องผ่านการแยกแผ่นอลูมิเนียมก่อนการไพโรไลซิส ซึ่งกระบวนการทั่วไบนั้นจะต้องผ่านการแยกก่อน 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) ได้นำเทคนิคการเหนี่ยวนำไมโครเวฟมาใช้ในการไพโรไลซิสสัจฉัณน้ำเสียจากอุตสาหกรรมโดยใช้ถ่านชาร์เป็นตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟ โดยพบว่าสามารถทำให้ระบบมีอุณหภูมิในการไพโรไลซิสสูงถึง 900°C และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเตาปฏิกรณ์แบบทั่วไปพบว่ากระบวนการเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟใช้เวลาและพลังงานที่น้อยกว่าที่ระดับการไพโรไลซิสเท่ากัน

ในปีต่อมา A. Domínguez และคณะ (A. Domínguez *et al*, 2003) ได้ทำการศึกษาของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสสัจฉัณน้ำเสียที่ผสมกับตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟด้วยเทคนิค 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) ได้ทำการศึกษาน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสสสัดจ์ขยะระหว่างการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำไมโครเวฟกับวิธีการใช้เตาไฟฟ้าแบบทั่วไปซึ่งพบว่าชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นไม่แตกต่างกันแต่ปริมาณของผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ก๊าซของเหลว ของแข็ง จะแตกต่างกันออกไป โดยการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟนั้นใช้เวลาน้อยกว่าและน้ำมันที่ได้นั้นจะได้จะมีสารประกอบที่เป็นอะลิฟาติก และสารประกอบของออกซิเจนที่สูงกว่า

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