

หลักการและทฤษฎี

2.1 ชีวมวล

เชื้อเพลิงจากชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานสำคัญในลำดับต้นๆ ของประเทศเกษตรกรรมและประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลาย ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนกักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ ซึ่งมาจากการสังเคราะห์แสง และเกิดขึ้นหมุนเวียนซ้ำแล้วซ้ำอีกได้ในธรรมชาติสิ่งแวดล้อม สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงาน ที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลอาจมองว่าเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์ หรือกระบวนการที่เกี่ยวกับทางชีวภาพเกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีความหลากหลายของรูปแบบ ลักษณะเฉพาะแหล่ง ตามความหลากหลายและซับซ้อนทางชีววิทยาและสภาพสิ่งแวดล้อม ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากแหล่งที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย ข้อดีที่สำคัญทางสิ่งแวดล้อม คือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้า จะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลกในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป เพราะจะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต การใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) อย่างไรก็ตาม ชีวมวลมีการเก็บรักษาและการขนส่งที่ยาก และมีความเสี่ยงสูงในการจัดหาหรือรวบรวมปริมาณชีวมวลที่ต้องการใช้ให้คงที่ตลอดปี เพราะชีวมวลบางประเภท เช่น กากอ้อยมีจำกัดเพียงบางเดือน อีกทั้งชีวมวลทุกประเภทต่างต้องการพื้นที่ในการเก็บรักษาขนาดใหญ่กว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น หากต้องการปริมาณความร้อนที่เท่ากัน จะต้องใช้แกลบในปริมาณที่มากกว่าน้ำมันเตา เป็นต้น ดังนั้น การพัฒนาระบบวิธีการจัดเก็บและขนส่งจึงสำคัญและจำเป็นมาก

ชีวมวล ประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อยในรูปแบบของคาร์โบไฮเดรต หรือ เซลลูโลส ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมายทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต และยังรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ

หลักในรูปแบบอื่นๆ โดยทั่วไป ชีวมวลอาจจะจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ ชีวมวลแบบไม้ (woody) แบบไม้ใช้ไม้ (non woody) และของเสียจากสัตว์ ซึ่งมาจากแหล่งต่างๆ ดังนี้

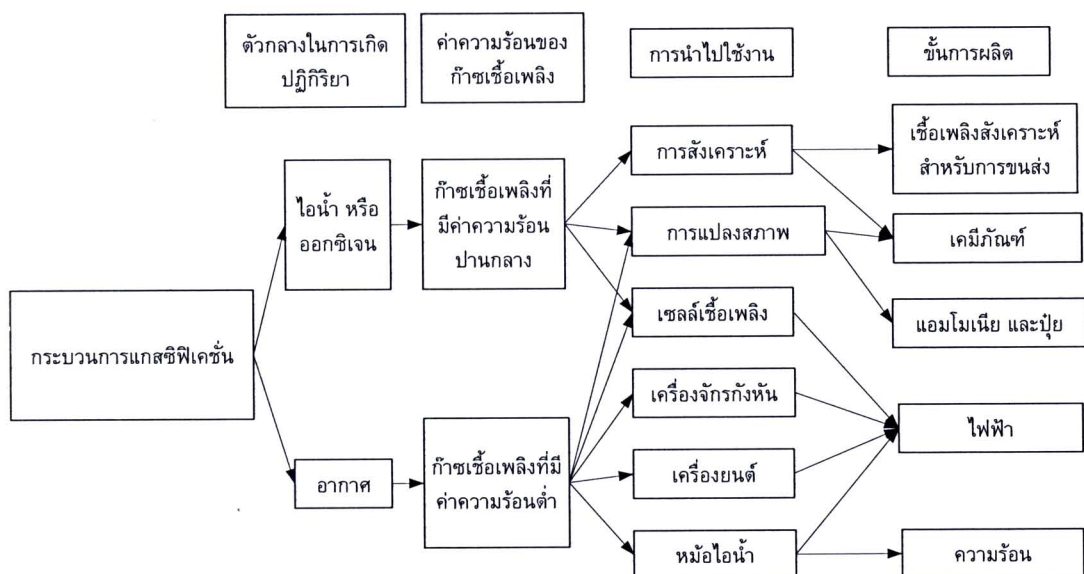
- ผลผลิตจากป่าดงพงไพร เรือกสวนไร่นา ต้นไม้ และวัชพืชต่างๆ ทั้งบนบกและในน้ำ เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ไม้โตเร็ว ใบไม้กิ่งไม้ หญ้า พืชล้มลุก จากส่วนเม็ด เปลือก ผล และจากมวลสำหรับพืชน้ำ เป็นต้น
- ผลผลิตจากพืชเศรษฐกิจ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน แกลบ ฟาง ชานอ้อย ยอดใบอ้อย เหง้ามัน ชังข้าวโพด ทลายปาล์ม
- เศษวัสดุและของเสียจากกระบวนการ และการประกอบการภาคอุตสาหกรรม เช่น ขี้เลื่อย กลิ เซอริน สำเหล้า กากอาหาร รวมไปถึงของเสียจากโรงงานแปรรูป ของเสียประเภทพลาสติก และกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม
- ของเสียจากแหล่งชุมชน เช่น ขยะชุมชน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน
- ผลิตภัณฑ์และของเสียจากสัตว์ เช่น ไขมัน มูลสัตว์ เป็นต้น

ข้อจำกัดในการใช้เศษกากชีวมวลเหล่านี้มาเป็นเชื้อเพลิง คือ

- (i) ความหนาแน่นต่ำ ปริมาณมาก และยากต่อการขนย้าย ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการขนส่งไปไกลๆ จากสถานที่ผลิต
- (ii) การนำเอาเศษวัสดุทางการเกษตรออกไปจากพื้นที่การเกษตรจำนวนมาก อาจจะมีผลต่อการลดลงของสารอาหารในดินอันควรได้จากเศษวัสดุเหล่านี้ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อผลผลิตทางการเกษตรบนพื้นที่นี้ต่อไปในอนาคต
- (iii) เศษวัสดุการเกษตรเหล่านี้จะมีให้ใช้ได้ เฉพาะฤดูกาลที่มีการผลิต ในช่วงเวลาอื่นของปีจะไม่ให้ใช้ หากต้องการใช้ตลอดปีจำเป็นต้องมีสถานที่กักเก็บรักษาขนาดใหญ่ ซึ่งมีราคาแพงและเป็นปัญหาในการจัดการได้

2.2 กระบวนการแกสซิฟิเคชัน

การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการแกสซิฟิเคชัน (gasification) เป็นวิธีที่น่าสนใจมากวิธีหนึ่ง กระบวนการแกสซิฟิเคชันเป็นการแปลงสภาพชีวมวลของแข็งโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) ที่อุณหภูมิสูงด้วยอากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำ ในช่วง 800-1800 °C ทำให้เกิดการแตกตัวมาเป็นก๊าซเชื้อเพลิง (producer gas) ที่มีค่าความร้อนค่อนข้างต่ำถึงปานกลางประมาณ 3-10 MJ/m³ ขึ้นกับก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เช่น การนำไปเผาไหม้สร้างความร้อนโดยตรงในหม้อไอน้ำ เป็นก๊าซเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ เครื่องจักรกังหันก๊าซ ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า หรือเป็นสารตั้งต้นในการเพิ่มคุณภาพให้เป็นสารเคมีหรือน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์สำหรับการขนส่ง



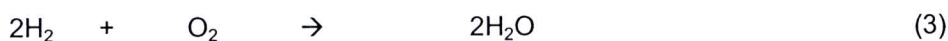
รูปที่ 2.1 การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงและการนำไปใช้ประโยชน์ (Bridgwater, 2003)

เตาปฏิกรณ์ของกระบวนการเรียกว่าแกสซิฟายเออร์ (gasifier) ซึ่งมีหลากหลายลักษณะ รูปแบบกระบวนการภายในตัวเตาปฏิกรณ์จะแตกต่างกันไปแล้วแต่เทคนิคการปฏิบัติการ ในเตาปฏิกรณ์สำหรับผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะเกิดกระบวนการทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่ การทำแห้ง (drying) ไพโรไลซิส การเผาไหม้ และการรีดักชัน (reduction) ซึ่งได้มาจากความร้อนถ่ายเทจากการเผาไหม้หรือบริเวณออกซิเดชัน ในบริเวณการทำแห้ง ความชื้นของชีวมวลจะถูกขับออกมาให้ระเหยกลายเป็นไอน้ำ ชีวมวลที่ถูกทำให้แห้งแล้ว จะยับเข้าสู่ไพโรไลซิส ซึ่งกระบวนการนี้จะแปลงสภาพชีวมวลให้กลายเป็นถ่านชาร์ ไอสารระเหย ไอน้ำมันดิน ไอน้ำ และก๊าซที่ไม่ควบแน่น ส่วนที่เป็นสถานะก๊าซและไอจะไหลออกจากแกสซิฟายเออร์ไป ถ่านชาร์จากไพโรไลซิสจะมีมวลประมาณ 15% ของชีวมวลตั้งต้น แล้วเข้าสู่บริเวณออกซิเดชันและรีดักชันต่อไป

ในการควบคุมการทำงานของเตาปฏิกรณ์ที่ดี ปริมาณออกซิเจนที่ป้อนเข้ามากจะมีไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ เพราะปริมาณออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงต่ำเกินไป ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นการเผาไหม้บางส่วนเท่านั้น และมีการย่อยสลายทางความร้อนของไอน้ำมันดินด้วย ในโซนรีดักชัน ผลผลิตจากการออกซิเดชันจะเกิดปฏิกริยารีดักชันกับถ่านชาร์ในสภาพไร้ออกซิเจน ซึ่งเกิดขึ้นเหมือนกับในเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ผลิตถ่านชาร์

ระหว่างกระบวนการ เมื่ออากาศและเชื้อเพลิงสัมผัสกันก่อให้เกิดปฏิกริยาทางเคมีระหว่างออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจนซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิง และเกิดปฏิกริยาอื่นๆ (Higman and van der Burgt, 2003) ดังนี้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้

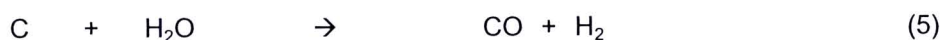


ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ความร้อนสูงที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาดูดความร้อนในบริเวณอื่นภายในเตาปฏิกรณ์ อุณหภูมิในบริเวณการเผาไหม้มีค่าระหว่าง 1100-1500°C ก๊าซร้อนที่ผ่านจากระบวนการเผาไหม้จะไหลผ่านมายังชั้นเชื้อเพลิงถัดไป ซึ่งไม่มีออกซิเจนเหลือในการทำปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาบูดูอาร์ด (Boudouard reaction)



ปฏิกิริยาน้ำแปลงก๊าซ (water gas reaction)



บริเวณถัดมาเกิดปฏิกิริยารีดักชัน อุณหภูมิในช่วงที่เกิดรีดักชันมีค่าระหว่าง 500-900°C ในโซนนี้ ก๊าซบางส่วนจากการเผาไหม้จะไหลเข้าทำปฏิกิริยากับถ่านร้อนที่กำลังลุกไหม้อยู่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาแปลงสภาพของแข็งเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนได้ ปฏิกิริยาในสมการที่ 4 และ 5 เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง 900°C ก๊าซที่ได้เป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ คือคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนซึ่งจะต้องผลิตให้ได้มากที่สุด ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซชีววมวลนี้จะขึ้นอยู่กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะเกิด ปฏิกิริยากับคาร์บอนได้มากน้อยเพียงใด ในบริเวณการเกิดรีดักชันนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วระหว่างก๊าซที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงแข็ง และพื้นที่สัมผัส ดังนั้นขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงแข็งที่ป้อนเข้าไปยังเตาเผาจึงมีผลต่อการผลิตก๊าซ เชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ยากต่อการจุดเผาภายในเตา และจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมากเป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อย และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีววมวลมีค่าต่ำ แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กจะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก ต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้น ขนาดของเชื้อเพลิงแข็งที่เหมาะสม ควรมีขนาด 20-100 มิลลิเมตร ถ้าอุณหภูมิในบริเวณนี้สูงกว่า 900°C แล้ว ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กว่า 90% จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 1100°C จะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เมื่อก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ไหลเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณการเกิดรีดักชัน ปฏิกิริยาที่ 4 และ 5 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนจะทำให้อุณหภูมิของก๊าซร้อนลดลงมาที่อุณหภูมิประมาณ 500-600°C ใอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิด

ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังปฏิกิริยาในสมการที่ 5 ปฏิกิริยานี้จะมีความสำคัญเพราะจะทำให้สัดส่วนของไฮโดรเจนในก๊าซเชื้อเพลิงมีค่ามากขึ้น

ปฏิกิริยาชิฟต์ (water gas shift reaction)



ถ้าในกระบวนการมีไอน้ำมากเกินไป อาจจะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ดังปฏิกิริยาในสมการ 6 ส่งผลให้ค่าความร้อนของก๊าซชีวมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงที่ใช้จะต้องมีค่าความชื้นไม่มากจนเกินไป ในบางสภาวะ เราจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยานี้ด้วยการเพิ่มไอน้ำร้อนเข้าไปผสม เนื่องจากความต้องการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มเติมนั่นเอง ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

ปฏิกิริยาแปลงมีเทน (methanation reaction)



ในกระบวนการ ก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนอาจจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นได้เล็กน้อย ดังปฏิกิริยาในสมการที่ 7 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

ปฏิกิริยาแปลงก๊าซด้วยไอน้ำ (steam reforming reaction)



การเพิ่มไอน้ำร้อนเข้าไปในเตาปฏิกิริยา อาจจะไปสู่การทำปฏิกิริยากับมีเทนให้แปลงเป็นก๊าซเชื้อเพลิงได้ มีคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

ปฏิกิริยาไพโรไลซิส

ความร้อนจากบริเวณรีดักชันจะแพร่มาสู่เชื้อเพลิงแข็ง ทำให้เกิดเป็นปฏิกิริยาไพโรไลซิส อุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่าประมาณ 200-500 °C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากผ่านกระบวนการคือคาร์บอนในรูปของถ่านชาร์ ซึ่งเข้าทำปฏิกิริยาต่อ



การทำแห้ง

ความร้อนในเตาที่อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหย แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะสามารถระเหยตัวออกมาในรูปของไอน้ำได้ที่อุณหภูมิประมาณ 100-200 °C

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

ในกระบวนการแกสซิฟิเคชัน อุณหภูมิและความดันจะเป็นสภาวะที่กำหนดให้เกิดปฏิกิริยาบางปฏิกิริยา และเกิดก๊าซหรือสารประกอบตามสภาวะสมดุลทางเคมี โดยทั่วไป ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C ปฏิกิริยามักไม่สามารถดำรงอยู่ได้ ที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C กระบวนการทางกายภาพ เช่น การแพร่ ผสมคลุกเคล้าของก๊าซ (diffusion) ที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจะตอบสนองไม่ทันเมื่อเทียบกับกระบวนการทางเคมีที่รวดเร็ว ทำให้ปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวกำหนดสมดุลการเกิดปฏิกิริยาที่ขณะนั้นเท่านั้น (kinetically influenced reactions) ภายในเตาปฏิกรณ์จะมีปฏิกิริยาเคมีมากมายเกิดขึ้น ในสภาวะอุณหภูมิและความดันต่างๆ พื้นที่ที่ถูกจำกัดภายในเตาจะทำให้กระบวนการทางกายภาพทำหน้าที่คลุกเคล้าส่งถ่ายมวลสารได้ดีเพียงใด ล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ปฏิกิริยาทางเคมีบางปฏิกิริยาเกิดขึ้น แต่ไม่สามารถดำรงอยู่ได้ โดยทั่วไปแล้ว องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้ มีดังนี้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างส่วนประกอบก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล

ส่วนประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง	ร้อยละโดยมวล
H ₂	12 - 20
CO	17 - 22
CO ₂	9 - 15
CH ₄	2 - 3
N ₂	50 - 54

ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้ มีดังนี้

ความชื้นของเชื้อเพลิง

ความชื้นในเชื้อเพลิง (moisture content) ช่วยทำให้เกิดสัดส่วนก๊าซไฮโดรเจนสูงขึ้นในก๊าซเชื้อเพลิง แต่ความชื้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซ และค่าความร้อนที่ต้องการลดลง ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง แหล่งที่มา และการเตรียมสภาพก่อนนำไปผลิตก๊าซชีวมวล ความชื้นในชีวมวลสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

- (i) ความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อชีวมวล สามารถอยู่ในรูเปิดของเซลล์ในชีวมวลได้โดยสมดุลกับบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 96 – 97%
- (ii) ความชื้นที่ผิว เป็นส่วนที่ล้นเกินจากความชื้นในรูเปิดของเซลล์ชีวมวล
- (iii) ความชื้นจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200-250°C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ระเหยความชื้นที่ผิวและความชื้นที่อยู่ภายในชีวมวล ถ้าต้องการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงาน ความชื้นไม่ควรไม่เกิน 50%

ขนาดของเชื้อเพลิง

ขนาดของเชื้อเพลิง (fuel size) จะมีผลกับการเกิดความดันตก (pressure drop) ภายในเตาแกสซิฟายเออร์ ถ้าเกิดความดันตกภายในเครื่องมากเกินไปจะทำให้ต้องใช้พลังงานในการนำอากาศเข้า และพาก๊าซที่ได้ออกจากเตาแกสซิฟายเออร์มาก เครื่องยนต์ก็จะต้องมีแรงดูดมากพอที่จะเอาชนะความดันตกของระบบทั้งหมด ในทางทฤษฎี อากาศควรสัมผัสกับพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงให้มากที่สุดเพื่อให้ได้ปริมาณก๊าซที่เพิ่มขึ้น และเกิดกระบวนการที่เร็วยิ่งขึ้น เตาแกสซิฟายเออร์ขนาดเล็กติดตั้งกับที่ หากใช้เชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะเกิดปัญหาการเผาไหม้ข้ามโซน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดเถ้าหลอมเยิ้มติดผนัง (slag) เพราะถ้าเชื้อเพลิงโตเกินไปเทียบกับขนาดเครื่อง พอเผาไหม้แล้วเชื้อเพลิงจะไหลลงไม่สะดวก และไม่ทันกับการเผาไหม้ที่มีอากาศเข้าเท่าเดิม อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงจึงสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 2000°C ซึ่งสูงพอที่จะเหนียวน้ำให้เกิดเถ้าหลอมในเชื้อเพลิงทุกชนิดได้ จึงควรที่จะมีการนำมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น

การกระจายขนาด

เชื้อเพลิงที่ไม่สร้างปัญหาให้กับเตาแกสซิฟายเออร์ ต้องมีขนาดที่สม่ำเสมอ ไม่แตกต่างกันมากนัก ถ้าขนาดแตกต่างกันมาก อากาศและก๊าซจะไหลผ่านตามช่องว่างที่เกิดจากเชื้อเพลิงขนาดโตและเล็กเกยกัน ทำให้บางบริเวณมีการเผาไหม้รุนแรง บางบริเวณเย็นตัวลงและอาจสลับกันในเวลาต่อมา ทำให้เกิดการหลอมกันเป็นก้อน (clinker)

ความหนาแน่นบัลค์

เป็นค่าที่แสดงลักษณะการใช้ปริมาตรของเชื้อเพลิงนั้น กล่าวคือ เมื่อเทเชื้อเพลิงที่เป็นเม็ดลงในภาชนะ รูปทรงของแต่ละเม็ดจะทำให้ผิวของเม็ดเชื้อเพลิงแนบกันไม่ได้ นั่นคือ เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงขึ้น ทำให้เบี่ยงปริมาตรในภาชนะ เพราะบรรจุได้น้ำหนักน้อย เนื่องจากมีช่องว่างอากาศทำให้ค่าความหนาแน่นโดยรวมต่ำลง โดยทั่วไป เชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตก๊าซ จะเบี่ยงเนื้อที่ประมาณ 20-75 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรบรรจุ

สารระเหยในเชื้อเพลิง

สารระเหย (volatile matter) ที่ปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยา สามารถควบแน่นได้ที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะก่อตัวเป็นน้ำมันดิน และน้ำมันที่กลั่นตัวต่างๆ ถ้าเชื้อเพลิงที่มีสารระเหยมากอาจจะสร้างปัญหาได้เนื่องจากน้ำมันดินและไอน้ำมันที่มีอุณหภูมิควบแน่น $120-150^{\circ}\text{C}$ จะเกาะฝังตัวบนผนัง จึงต้องแยกออกก่อนนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์

ขี้เถ้า

ขี้เถ้าเกิดจากสารแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบในเชื้อเพลิง รวมตัวกับออกซิเจนขณะเผาไหม้ ในความเป็นจริง อาจจะมีถ่านชาร์ค้างอยู่ด้วย สัดส่วนของขี้เถ้าในเชื้อเพลิงจะมีผลต่อการทำงานของเตา

แก๊สซิฟายเออร์ ถ้าสัดส่วนซีไธ่ในเชื้อเพลิงมีค่าสูงก็จะทำให้พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงลดลง และเตาแก๊สซิฟายเออร์ต้องสำรองเนื้อที่เก็บซีไธ่มากขึ้น และถ้าเกิดซีไธ่ไหลมั่ว ซึ่งมีโอกาสมากขึ้นเมื่อสัดส่วนซีไธ่มีมากขึ้น ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีซีไธ่ประมาณ 1-3% ยกเว้นแกลบและฟางข้าวจะมีสัดส่วนซีไธ่ประมาณ 10-20% ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้และการกำจัดพอสสมควร

ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง

ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง (bed thickness) จะมีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในเตาเผา ในกรณีที่ชั้นของเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้บริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันมีช่วงกว้างขึ้น ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน จะส่งผลให้อุณหภูมิของเตาลดลง

2.4 ชนิดของเตาปฏิกรณ์

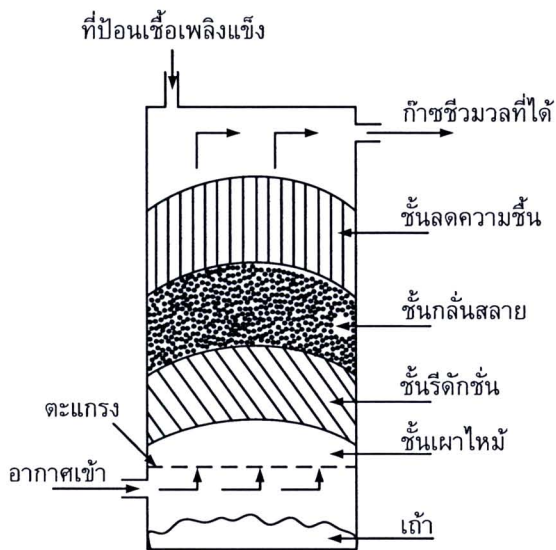
2.4.1 เตาปฏิกรณ์แบบชั้นวัสดุหนึ่ง

เตาประเภทนี้ สามารถแบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศเป็น 3 แบบ คือ แบบก๊าซไหลขึ้น

เตาแบบก๊าซไหลขึ้น (updraft gasifier) เป็นเตาที่ผลิตใช้เริ่มแรก และเป็นแบบที่ง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเตา และอากาศจะถูกส่งผ่านตะแกรงเข้ามาด้านล่าง บริเวณเหนือตะแกรงจะเป็นบริเวณการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แก๊สร้อนที่ผ่านจากบริเวณการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูง และถูกส่งไปยัง บริเวณปฏิกิริยารีดักชันซึ่งเป็นโซนที่มีปริมาณของคาร์บอนมากเพียงพอ ที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นแก๊สที่ได้ จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของชีวมวล และแตกตัวในช่วงอุณหภูมิ 200-500°C หลังจากนั้นแก๊สก็จะไหลเข้าสู่ชั้นของชีวมวลใหม่ที่เพิ่งป้อน แก๊สยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่จึงระเหยความชื้นที่อยู่ในชีวมวลเหล่านั้นออกก่อนทำให้แก๊สที่ออกจากเตาชีวมวลมีอุณหภูมิต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เตาประเภทนี้มีรูปแบบที่ไม่ยุ่งยากสลับซับซ้อน มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมาก และแก๊สชีวมวลที่ได้มีอุณหภูมิไม่สูงนัก แต่มีข้อจำกัด คือ แก๊สที่ผลิตได้จะมีผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำมัน และน้ำมันดินเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก จากบริเวณที่เกิดไพโรไลซิส และจะกลั่นตัวเมื่ออยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นแก๊สที่ได้จากเตาประเภทนี้จึงเหมาะที่จะนำไปใช้สำหรับหมอน้ำ หรือการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร ซึ่งแก๊สที่ได้จะผสมกับอากาศ และทำการเผาไหม้โดยตรงในห้องเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนในกระบวนการที่ใช้ความร้อนต่อไป

เตาปฏิกรณ์ประเภทนี้เหมาะสมกับชีวมวลหลากหลายชนิด ง่ายต่อการเตรียมเชื้อเพลิง มีประสิทธิภาพสูง เพราะได้อุณหภูมิแก๊สออกต่ำ ติดตั้งง่ายและสะดวก แต่มีข้อเสีย คือ มีปริมาณน้ำมันดินออกมาเยอะเพราะน้ำมันดินที่ผลิตได้ในโซนไพโรไลซิส ไม่ได้ผ่านบริเวณปฏิกิริยาการเผาไหม้ก่อนออก จึงเกิดการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันดินน้อย การกำจัดน้ำมันดินที่ควบแน่นออกมาเป็นปัญหา

ใหญ่สำหรับแก๊สซิฟายเออร์ประเภทนี้ การออกแบบบางอย่างสามารถลดปริมาณน้ำมันดินได้ เช่น การดึงก๊าซที่ผลิตได้ออกตรงเหนือบริเวณรีดักชัน อีกวิธีการหนึ่งที่ยืมมาใช้ คือ การเติมไอน้ำร้อนผสมเข้ากับอากาศเพื่อส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยา water gas และจะได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งการออกแบบมักจะรวมการสร้างไอน้ำไว้ในตัวเตาเอง เพื่อใช้ในการนี้โดยเฉพาะ



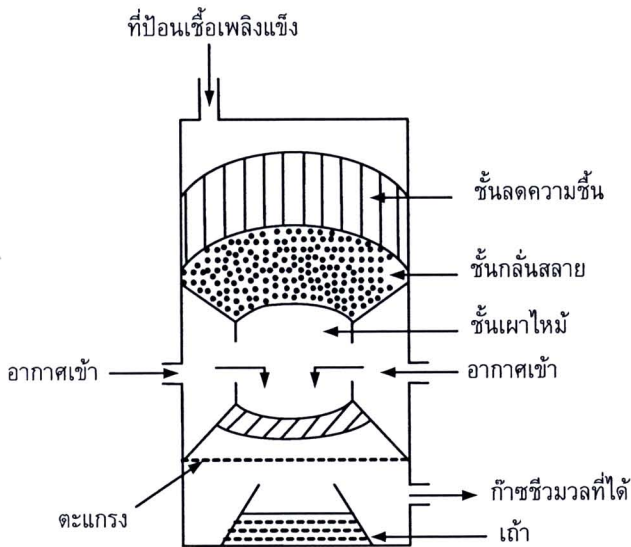
รูปที่ 2.2 ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบก๊าซไหลขึ้น

เตาแบบก๊าซไหลขึ้นอาจออกแบบให้ทำงานที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เศษถ่านกลายเป็นของเหลว (slagging) หรือที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอ่อนตัวของเศษถ่าน วิธีทั้งสองแบบต้องการตะแกรงที่แตกต่างกันออกไป สำหรับกรณีที่ต้องการให้ถ่านเหลว บริเวณการเผาไหม้ต้องทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเศษถ่าน ถ่านหลอมจะถูกปล่อยระบายออกตามช่องได้ บางครั้งหินปูน (limestone) จะช่วยในการลดอุณหภูมิหลอมเหลวของขี้ถ่านและค่าความหนืดลงซึ่งจะช่วยในการเกิดถ่านหลอมหรือสแลกได้ง่ายขึ้น ข้อดีของแบบถ่านหลอม คือ อัตราการเกิดก๊าซสูงมาก เพราะต้องใช้เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้สูงเพียงพอต่อการหลอมเหลวของเศษถ่าน การกำจัดเศษถ่านก็ทำได้ง่าย ถ่านหลอมที่ได้มีปริมาณคาร์บอนค้างอยู่น้อยมาก ซึ่งมีค่าเอาไปขายได้ แต่มีข้อเสีย เช่น อัตราการเกิดก๊าซสูงมากจะจำกัดขนาดของเชื้อเพลิงที่ใช้ได้ เนื่องจากปริมาณฝุ่นผงที่ออกไปกับการไหลของก๊าซ การกำจัดถ่านหลอมทำให้ค่าบำรุงรักษาเตาสูงขึ้นจากความจำเป็นที่ต้องเปลี่ยนวัสดุผนังบ่อย ภาระการทำงานของระบบจำเป็นจะต้องต่อเนื่องและสม่ำเสมอจึงจะได้สมรรถนะการทำงานที่ดี

สำหรับกรณีการทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอ่อนตัวของเศษถ่าน เตาจะมีตะแกรงไว้รองรับกองเชื้อเพลิงเหนือกองเก็บเศษถ่าน ซึ่งจะออกแบบมาให้เศษถ่านเคลื่อนตัวได้ตีสองกองเก็บเศษถ่านด้านล่างและในขณะเดียวกัน จะป้องกันไม่ให้ถ่านชาร์ตออกไป ถึงแม้ว่าอุณหภูมิในเตาจะถูกออกแบบให้มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมตัวของขี้ถ่านทุกจุด แต่ในทางปฏิบัติก็อาจมีการเกิดการเกาะตัวเป็นก้อนได้ (clinker) ซึ่งจะพิเศษสำหรับชีวมวลที่มีส่วนประกอบของเศษถ่านมาก ฉะนั้นในการออกแบบตะแกรงอาจมีกลไกไว้

สำหรับทุบบีบก้อนเศษถ่านที่เกาะตัวกันให้แตกออก อีกประเด็นที่น่าสนใจ คือ การมีชั้นเศษถ่านเหนือตะแกรงตลอดเวลาเพื่อปกป้องตะแกรง หากชั้นถ่านหนาเกินไปจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมสูงและอัตราการผลิตก๊าซต่ำ หากชั้นถ่านบางเกินไปอาจจะทำให้เกิดความร้อนสูงเกินไปในตะแกรงจนเกิดหลอมละลายได้

แบบก๊าซไหลลง



รูปที่ 2.3 ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบก๊าซไหลลง

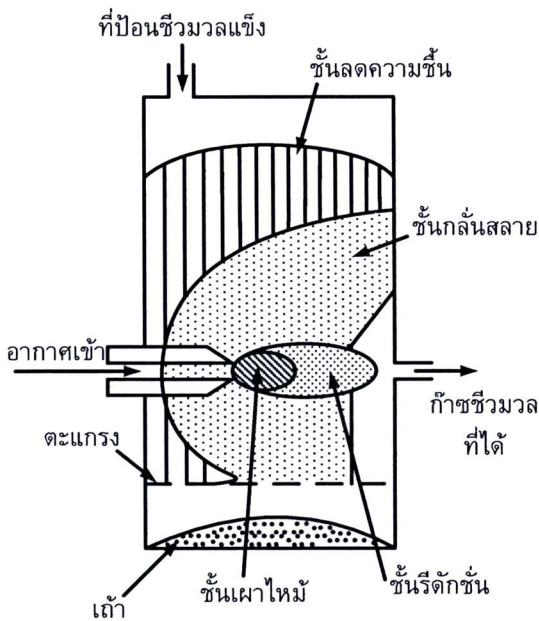
เตาประเภทนี้ (ดังรูปที่ 2.3) ออกแบบขึ้นมาเพื่อที่จะขจัดน้ำมันดินที่มีอยู่ภายในเชื้อเพลิงแข็ง โดยเฉพาะ อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของเตา ผ่านกลุ่มของหัวฉีด ซึ่งเรียกว่า Tuyers บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณการเผาไหม้ ก๊าซที่ได้จากโซนนี้จะเกิดรีดักชันในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรง ขณะเดียวกัน ในชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบนของโซน การเผาไหม้จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมาก ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อน และไอของน้ำมันดินที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นก๊าซ ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดที่อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 800-1000°C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1000°C ปฏิริยาดูดความร้อนจะทำให้ก๊าซที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ปฏิริยาคายความร้อนจะทำให้ก๊าซที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ก๊าซที่ผ่านโซน การเผาไหม้จะมีส่วนประกอบของน้ำมันดินและน้ำมันซึ่งจะมีปริมาตรลดลงเหลือน้อยกว่า 10% ของน้ำมันดินและน้ำมันที่ได้จาก updraft gasifier และก๊าซที่ได้จะมีความสะอาดมากกว่า ทำให้ใช้การกรองน้อยลง เตาแบบก๊าซไหลขึ้นและไหลลงจะมีความเร็วของอากาศไหลผ่านต่ำ และถ่านจะอยู่บริเวณตะแกรง ดังนั้นจึงมีปริมาณถ่านถ่านติดออกมากับก๊าซเชื้อเพลิงน้อยมาก

ในเตาปฏิกรณ์แบบก๊าซไหลลง ไอน้ำมันดินจากไพโรไลซิสจะต้องผ่านโซนการเผาไหม้จึงถูกทำให้สลายตัวทางความร้อน เตาประเภทนี้ออกแบบให้มีพื้นที่หน้าตัดลดแคบลง โดยมีการป้อนอากาศเข้าเหนือจุดพื้นที่หน้าตัดที่แคบที่สุดที่เรียกว่าคอคอด (throat) เพื่อกำหนดให้เกิดโซนถ่านร้อนแดงแคบๆ ที่บังคับให้ก๊าซจากไพโรไลซิสผ่าน ยิ่งบริเวณคอคอดลดลงมากจะยิ่งทำให้อุณหภูมิบริเวณนี้เพิ่มสูงขึ้น

ภายในขอบเขตจำกัดระดับหนึ่ง แต่คอคอดเล็กเกินไปจะส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อมมาก ซึ่งจะขวางการไหลของก้อนเชื้อเพลิงชีวมวลหากมีขนาดไม่เหมาะสม ฉะนั้น การออกแบบจึงต้องพยายามให้มีช่องคอคอดที่ขนาดพอเหมาะ โดยไม่ให้มีปัญหาของการไหล หรือความดันตกคร่อม โดยอุณหภูมิบริเวณโซนเผาไหม้ต้องรักษาระดับให้สูง

เตาแก๊สฟายเออร์แบบก๊าซไหลลงจะไม่เหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีเศษแฉะมาก เพราะสแลก หรือ เศษเถ้าหลอมที่เกิดขึ้นจากโซนออกซิเดชันจะไหลลงด้านล่าง เย็นตัวลง และแข็งตัวเป็นก้อนอย่างรวดเร็ว และจะกีดขวางทางการไหลของก๊าซและเชื้อเพลิง หากจำเป็นต้องใช้กับเชื้อเพลิงเศษแฉะมาก เตาแบบนี้จะต้องทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมตัวของเศษเถ้า และใช้ตะแกรงหมุนหรือขยับได้ ในเตาปฏิกรณ์แบบนี้ไม่จำเป็นต้องมีการฉีดไอน้ำเข้าไปเพราะปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงและอากาศมีเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาอยู่แล้ว

แบบก๊าซไหลขวาง



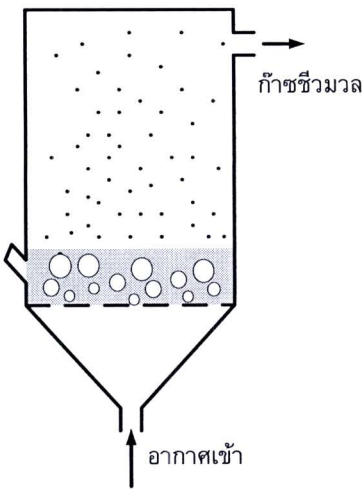
รูปที่ 2.4 ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง

เตาประเภทนี้ ดังรูปที่ 2.4 อากาศจะถูกดูดผ่านหัวฉีดซึ่งอยู่ในแนวราบ โซนของการเผาไหม้จะอยู่ ถัดจากหัวฉีดออกไป และถัดออกไปอีกจะเป็นบริเวณการเกิดรีดักชัน แล้วก๊าซชีวมวลจะออกสู่ภายนอก โดยผ่านตะแกรงรอบเตา ซึ่งอยู่ในแนวตั้งโดยรอบ ไอสารระเหยและน้ำมันดินที่ได้จากการไพโรไลซิสนี้จะ ผ่านโซนรีดักชันอุณหภูมิสูงก่อนที่จะออกไปสู่ภายนอกเตา ซึ่งเป็นเหตุให้น้ำมันและน้ำมันดินเกิดการแตก ตัวเป็นก๊าซก่อน ทำให้ก๊าซชีวมวลที่ได้มีปริมาณน้ำมันและน้ำมันดินต่ำ เตาแบบนี้ ได้ทำการออกแบบให้ สามารถใช้กับยานพาหนะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา และมีผลตอบสนองเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระที่ กระทำอยู่ เชื้อเพลิงที่ควรนำมาใช้กับเตาเผาแบบนี้ควรเป็นถ่านไม้ที่มีคุณภาพสูง

2.4.2 เตาปฏิกรณ์แบบชั้นของไหล

เตาปฏิกรณ์แบบชั้นเชื้อเพลิงนี้จากที่กล่าวมาแล้วทั้งสามแบบข้างต้น การทำงานของกระบวนการในระบบจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาทางเคมีและสภาพทางกายภาพของเชื้อเพลิง โดยที่จะเกิดปัญหาทางเศษถ่านลอมที่เกิดขึ้นมากเกินไป จึงก่อให้เกิดการอุดตันในเตาบ่อยครั้ง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเตาเผาแบบชั้นของไหล (fluidized bed) มาใช้ ดังรูปที่ 2.5

การทำให้มีสภาวะเสมือนของไหล (fluidization) หมายถึง การทำให้กลุ่มเม็ดของแข็งขนาดเล็กเปลี่ยนไปมีสภาวะคล้ายของไหลโดยการสัมผัสกับก๊าซหรือของเหลว ในชั้นของไหล (fluidized bed) แรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อน้ำหนักเม็ดของแข็งจะถูกต้านด้วยแรงจากการไหลขึ้นของก๊าซ ทำให้เม็ดของแข็งอยู่ในสภาวะกึ่งแขวนลอย พิจารณาการไหลของก๊าซหรืออากาศผ่านชั้นกลุ่มเม็ดของแข็งที่กองอยู่บนตะแกรงพรุนภายในช่องท่อ เมื่อความเร็วของก๊าซที่เพิ่มสูงขึ้นจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเหล่านี้ โดยที่ความเร็วก๊าซต่ำๆ กลุ่มเม็ดของแข็งจะอยู่นิ่งกับที่ตามปกติบนพื้นตะแกรง เมื่อความเร็วสูงขึ้นเรื่อยๆ แรงยกบนเม็ดของแข็งเพิ่มขึ้นจนกระทั่งทำให้เม็ดของแข็งยกตัว ชั้นเม็ดของแข็งขยายตัวออก อยู่ในสภาพกึ่งแขวนลอยคล้ายของเหลวกำลังเดือด หากเพิ่มความเร็วก๊าซขึ้นไปอีก แรงยกก็จะมีมากพอที่จะเป่าเม็ดของแข็งเหล่านี้ให้หลุดออกไปเลยได้

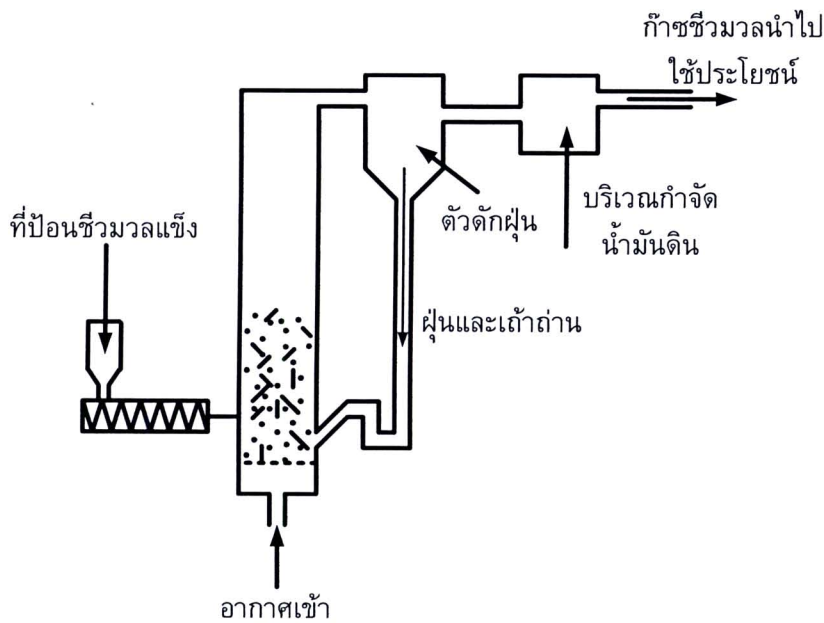


รูปที่ 2.5 ลักษณะของเตาปฏิกรณ์แบบชั้นของไหล

เตาแบบชั้นของไหลนี้ ก๊าซจะไหลผ่านชั้นของเม็ดวัสดุเฉื่อย ส่วนใหญ่ใช้เม็ดทรายขนาดเล็ก หรือวัสดุเร่งปฏิกิริยา เช่น หินปูน ซึ่งจะช่วยในการถ่ายเทความร้อนและช่วยทำความสะอาดก๊าซที่ได้ ในขณะที่เริ่มติดไฟนั้น ชั้นเม็ดวัสดุเฉื่อยจะเริ่มร้อนขึ้นจนมีอุณหภูมิสูงถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิงได้ หลังจากนั้นเม็ดเชื้อเพลิงขนาดเล็กจึงจะถูกป้อนเข้าเตาอย่างสม่ำเสมอ เตาปฏิกรณ์แบบนี้ มีข้อดี คือ การควบคุมอุณหภูมิในเตาสามารถกระทำได้ง่ายจึงสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของถ่านได้ ทำให้ไม่เกิดการจับตัวของถ่านลอมที่เกิดขึ้น จึงสามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีถ่านมากได้ โดยที่ถ่านเป็นเตาปฏิกรณ์แบบอื่นจะเกิดปัญหา ข้อเสียของเตาเผาแบบนี้ คือ ก๊าซชีวมวลที่ออกจากเตาจะมีปริมาณถ่าน

และฝุ่นถ่านออกมาด้วยมาก เนื่องจากความเร็วของอากาศภายในเตามีค่าสูง จึงต้องมีการนำ ถังไซโคลน หรือถุงกรองมาใช้กับระบบด้วย

เตาปฏิกรณ์แบบชั้นของไหลยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบฟองอากาศ (bubbling) และแบบ หมุนวน (circulating) ชั้นของไหลแบบฟองอากาศเกิดที่ความเร็วก๊าซต่ำ ในขณะที่ชั้นของไหลหมุนวนถูก พัฒนาเพื่อลดปริมาณถ่านที่หลุดลอดจากปฏิกิริยา (carbon carryover) โดยการนำกลับมาวนเข้าเตา ปฏิกรณ์ซ้ำ ชั้นของไหลแบบนี้จะมีความเร็วของก๊าซสูงกว่าแบบฟองอากาศธรรมดา ทำให้มีระดับความ บั่นป่วนสูง อนุภาคถูกพัดออกไปนอกชั้นของไหล และดักด้วยลมวนไซโคลนดังกลบเข้ามาในห้องเผาไหม้ อีกครั้ง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างเตาปฏิกรณ์แบบชั้นของไหลหมุนวน

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานและการทำงานของเตาปฏิกรณ์ (Basu, 2006)

	แบบชั้นเชื้อเพลิงนิ่ง		แบบฟลูอิดไดซ์เบด	
	Updraft	Downdraft	Bubbling	Circulating
ความไวต่อ				
ลักษณะเฉพาะของเชื้อเพลิง	ปานกลาง	เฉพาะชนิด	ยืดหยุ่นได้	ยืดหยุ่นได้
ขนาดเชื้อเพลิง	ดีมาก	ดี	พอใช้	พอใช้
ปริมาณความชื้น	ดีมาก	พอใช้	ดี	ดี
ปริมาณขี้เถ้า	แย่	แย่	ดีมาก	ดีมาก
อุณหภูมิปฏิกิริยา	1,000°C	1,000°C	850°C	850°C
การผสมกันของเชื้อเพลิง	แย่	แย่	ดีมาก	ดีเยี่ยม
อุณหภูมิก๊าซออก	250°C	800°C	800°C	850°C
ปริมาณน้ำมันดินในก๊าซ	สูงมาก	ต่ำมาก	ปานกลาง	ต่ำ
ปริมาณฝุ่นในก๊าซ	สูง	ปานกลาง	สูงมาก	สูงมาก
ศักยภาพการปรับเปลี่ยนขนาด	ดี	แย่	ดี	ดีมาก
การเริ่มต้นกระบวนการ	แย่	แย่	ดี	ดี
การควบคุม	พอใช้	พอใช้	ดีมาก	ดีมาก
การแปลงสภาพคาร์บอน	ดีมาก	ดีมาก	พอใช้	ดีมาก
ประสิทธิภาพทางความร้อน	ดีเยี่ยม	ดีมาก	ดี	ดีมาก
ค่าความร้อนของก๊าซ	แย่	แย่	แย่	พอใช้

รายละเอียดการเปรียบเทียบเชิงเทคนิค นำเสนอในตารางที่ 2.2 ส่วนตารางที่ 2.3 เสนอผลการเปรียบเทียบข้อเด่นข้อด้อยของระบบเตาปฏิกรณ์แบบชั้นนิ่งกับแบบชั้นของไหล ในเชิงการปฏิบัติการ มลภาวะ และการใช้พลังงาน

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบเตาแบบชั้นนิ่งกับเตาแบบชั้นของไหล (Warnecke, 2000)

fixed bed	fluidized bed
• มีช่วงของการกระจายอุณหภูมิที่กว้าง • วัสดุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงต้องมีขนาดใกล้เคียงกัน • มีอัตราการเปลี่ยนคาร์บอนและประสิทธิภาพทางความร้อนสูง • ปริมาณการใช้ ออกซิเจนต่ำ ก๊าซมีปริมาณฝุ่นน้อย • ก๊าซที่ได้มีปริมาณ tar ต่ำสำหรับเตาเผาแบบ downdraft • สำหรับระบบที่ต้องการพลังงานสูง ทำให้ต้องใช้เงินลงทุนสูง	• มีการถ่ายเทความร้อนดี ทำให้ความร้อนสามารถพุ่งขึ้นได้อย่างรวดเร็ว • วัสดุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงมีขนาดแตกต่างกันได้ • มีอัตราการเปลี่ยนคาร์บอน (carbon conversion) สูง • ก๊าซที่ได้มีฝุ่นปะปนมาด้วยมากกว่า fixed bed • ต้องการพลังงานสูงสำหรับการพ่นอากาศเพื่อให้เกิดการฟุ้งกระจายของของแข็ง

2.5 การกำจัดน้ำมันดิน

น้ำมันดินเป็นของผสมสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ซับซ้อน ควบแน่นได้ มีลักษณะข้นเหนียวสีดำ ติดไฟได้ องค์ประกอบภายในน้ำมันดินนั้นขึ้นอยู่กับแหล่งที่นำมาเผาไหม้ มีส่วนผสมเช่น แอสฟัลต์ หรือ เบนซีน เป็นต้น ปกติน้ำมันดินเป็นผลผลิตจากกระบวนการกลั่นตัวของซีเมนส์ หรือถ่านหิน น้ำมันดินเป็นปัญหามากในการนำก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ไปใช้ โดยสามารถควบแน่นในอุณหภูมิต่ำ และนำไปสู่การอุดตัน และขัดขวางเส้นทางการไหลของระบบ เกาต์ติดตัวกรอง และเครื่องยนต์ได้

การกำจัดน้ำมันดิน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงระหว่างการเกิดปฏิกิริยา (primary method) และช่วงหลังการเกิดปฏิกิริยา (secondary method) ซึ่งแต่ละช่วงมีวิธีการย่อยๆ ดังนี้ (Devi et al, 2003)

ตารางที่ 2.4 วิธีการกำจัดน้ำมันดิน

ช่วงระหว่างการเกิดปฏิกิริยา	ช่วงหลังการเกิดปฏิกิริยา
1. การใช้สภาวะทำงานที่เหมาะสม	1. การดักจับทางกายภาพ
2. การใช้วัสดุเติมพิเศษ	2. การแตกตัวด้วยความร้อน
3. การออกแบบเตาปฏิกรณ์ที่เหมาะสม	3. การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา
	4. การแตกตัวด้วยพลาสมา

2.5.1 การกำจัดน้ำมันดินระหว่างปฏิกิริยา

การใช้สภาวะทำงานที่เหมาะสม

ตัวแปรที่มีผลสำคัญยิ่งต่อการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์และปริมาณน้ำมันดินในกระบวนการกลั่นตัว คือ อุณหภูมิ ความดัน ค่าอัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio) ชนิดและลักษณะของซีเมนส์ ก๊าซตัวกลางที่ใช้ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และอื่นๆ

ปกติ อุณหภูมิทำงานของกระบวนการที่ใช้จะมากกว่า 800°C เพื่อให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีน้ำมันดินน้อย ไฮโดรคาร์บอนกลุ่มอะโรมาติกจะถูกทำลายได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 850°C อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิทำงานส่งผลเสียต่อค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง การใช้ถ่านชาร์ให้หมด (char conversion) และเสี่ยงต่อการเกิดการรวมตัวเป็นก้อน (sintering) น้ำมันดินจะถูกกำจัดหากทำงานที่ความดันสูง และที่อัตราส่วนสมมูลสูงขึ้น ก๊าซตัวกลางที่ใช้ในกระบวนการกลั่นตัว นอกเหนือจาก อากาศแล้ว ออกซิเจน ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ก็ถูกนำมาใช้ และมีผลต่อการเกิดน้ำมันดิน

การใช้วัสดุเติมพิเศษ

การเติมวัสดุจำพวกตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น นิเกิล โคบอลต์ แมงกานีส ซีโอไซด์ โอลีวัน และเหล็ก หรือวัสดุอื่น เช่น หินปูน ลงไปในชั้นเชื้อเพลิง จะส่งผลต่อผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาและการกำจัดน้ำมันดินได้ ซึ่งนอกจากจะมีผลต่อส่วนประกอบของก๊าซ และค่าความร้อนของก๊าซแล้ว ยังมีผลต่อการลดลงของ

ปริมาณน้ำมันดิน และอาจจะลดแนวโน้มการเกาะตัวกันของชั้นวัสดุที่จะไปขวางการไหลได้ด้วย โลหะออกไซด์อื่นๆ ที่ไดลองใช้ ได้แก่ V_2O_5 , Cr_2O_3 , Mn_2O_3 , Fe_2O_3 , CoO , NiO , CuO , MoO_3 เป็นต้น วัสดุชนิดอื่นที่หาได้ง่าย คือ ถ่านชาร์ ซึ่งใช้ในการแตกตัวชั้นสองแต่ตัวมันเองจะถูกทำปฏิกิริยาละลายไปด้วยโดยสรุป การใช้วัสดุเติมพิเศษ ลงในเตาปฏิกรณ์ จะมีผลดังนี้

- การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซแต่ละชนิดในก๊าซเชื้อเพลิง
- การลดลงของปริมาณน้ำมันดิน แต่ขึ้นกับสภาวะของกระบวนการ
- การเพิ่มขึ้นของปริมาณไฮโดรเจน
- การลดลงของ CO และการเพิ่มขึ้นของ CO_2
- ไม่มีการเปลี่ยนแปลงต่อ CH_4
- ปัญหาการหมดสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา และการเกิดฝุ่นผงมีมาก

การออกแบบเตาปฏิกรณ์ที่เหมาะสม

การออกแบบเตาปฏิกรณ์มีผลต่อกระบวนการ โดยเฉพาะประสิทธิภาพ ค่าความร้อนของก๊าซ และการเกิดน้ำมันดิน การปรับแต่งเตาสามารถทำให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่สะอาดได้ ตัวอย่างความพยายามในการปรับแก้ เช่น

- การฉีดอากาศช่วงที่สอง (secondary air injection) ในเตา
- ปฏิกริยา 2 ขั้นตอน (two-stage gasification)
- การหมุนเวียนก๊าซภายใน (internal gas recycling)

2.5.2 การกำจัดน้ำมันดินหลังปฏิกิริยา

การดักจับเชิงกล

เป็นการดักจับน้ำมันดินเชิงกล เช่น การใช้ลมวนไซโคลน ชุดกรองแบบต่างๆ การแยกอนุภาค การใช้เครื่องดักไฟฟ้าสถิตย์ หรือการดักด้วยสกรับเบอร์ โดยใช้ร่วมในการดักจับฝุ่นเขม่าด้วย วิธีเหล่านี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง สามารถดักได้เป็นที่น่าพอใจและถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามวิธีนี้เป็นเพียงการจำกัดน้ำมันดินโดยการดักจับและแยกออกไปเท่านั้น ไม่ได้ทำลายโครงสร้างภายในแต่อย่างใด มีราคาลงทุนค่อนข้างสูง อาจเป็นปัญหาในการกำจัดของเสียต่ออีก

การแตกตัวด้วยความร้อน

ในวิธีการทำให้น้ำมันดินแตกตัวด้วยความร้อน ก๊าซที่ได้จากกระบวนการแกสซิฟิเคชันจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงที่ซึ่งโมเลกุลของน้ำมันดินแตกตัวออกเป็นก๊าซเบา การทำให้แตกตัวจะสามารถเกิดได้ดีขึ้น หากเพิ่มเวลาของปฏิกิริยา หรือให้สัมผัสกับพื้นผิวร้อนโดยตรง หรือส่งเสริมให้เกิดการออกซิเดชันบางส่วนโดยการเติมอากาศหรือออกซิเจนเข้าไปผสม

ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันดินจะสูง หากทำให้ถึง $1250^\circ C$ และมีเวลา 0.5 วินาที โดยในก๊าซเชื้อเพลิงที่จะนำไปใช้กับเครื่องยนต์ควรมีปริมาณน้ำมันดินต่ำกว่า 50 mg/Nm^3

ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพการดักฝุ่นละอองและน้ำมันดิน (Hasler and Nussbaumer, 1999)

	% ดักฝุ่นละออง	% ดักน้ำมันดิน
เครื่องกรองชั้นทราย	70-99	50-97
ถังพ่นน้ำ	60-98	10-25
สกรับเบอร์แบบคอคอด	-	50-90
เครื่องดักไฟฟ้าสถิตแบบเปียก	> 99	0-60
เครื่องกรองผ้า	70-95	0-50
เครื่องแยกอนุภาคแบบหมุน	85-90	30-70
ตัวดูดซับน้ำมันดิน	-	50

การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ไขมันดินแตกตัวเป็นที่สนใจมาตั้งแต่ปี 1980 (Han and Kim, 2008) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาเคมีสลายไขมันดินกลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นหรือปรับปรุงส่วนประกอบในก๊าซเชื้อเพลิงได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันดินที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

- ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีผลในการกำจัดน้ำมันดิน
- หากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นก๊าซเชื้อเพลิง ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องสามารถแปลงมีเทนได้
- ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องสามารถปรับสัดส่วนของก๊าซที่เหมาะสม ตามต้องการจากกระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์ได้
- ตัวเร่งปฏิกิริยาควรมีความทนทานต่อการเสียดสี เนื่องจากเกราะตัวและการเกิดการอุดตันจากเขม่าถ่านได้ดี
- ตัวเร่งปฏิกิริยาควรสามารถที่จะถูกสร้างตัวขึ้นมาใหม่ และนำมาใช้ใหม่ได้อีก หลังเคยผ่านกระบวนการ
- ตัวเร่งปฏิกิริยาควรมีความแข็งแรง คงทน
- ตัวเร่งปฏิกิริยาควรมีราคาไม่แพง

ปกติ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

(1) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฐานจากนิกเกิล

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฐานจากนิกเกิล (Ni-based catalyst) เป็นที่สนใจอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีสำหรับการแปลงแอฟทาและมีเทน การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฐานจากนิกเกิลสามารถที่จะทำลายไขมันดินมวลหนักได้ที่ประสิทธิภาพการทำลายมากกว่า 90% และมีการเกิดไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากเดิม หากมีการเพิ่มอุณหภูมิ จะเกิดไฮโดรเจนมากยิ่งขึ้น และลดการเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเบา เช่น CH_4 และ C_2H_4 ได้ (Zhang et al, 2004)

(2) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฐานจากโลหะอัลคาไล

นอกจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฐานจากนิกเกิล ได้มีการนำโลหะอัลคาไลมาประยุกต์ใช้ในการสลายน้ำมันดิน ตัวอย่าง เช่น กลุ่มคาร์บอเนต กลุ่มออกไซด์ และ กลุ่มไฮดรอกไซด์ของโลหะอัลคาไล สามารถทำให้น้ำมันดินแตกตัวระหว่างปฏิกิริยาแกสซิฟิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(3) ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

โดโลไมต์ (dolomite) คือสารแร่กลุ่มแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งมีสูตรเคมีทั่วไปเป็น $\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ $\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ ปกติ โดโลไมต์จะใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตแมกนีเซียม เมื่อไม่นานมานี้ มีการค้นพบว่า โดโลไมต์มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันดินออกจากกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล ไม่แตกต่างจากกลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ มาก

(4) ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโลหะทรานซิชัน

กลุ่มโลหะทรานซิชันเหล่านี้ ได้แก่ โรเดียม (Rh) พัลเลเดียม (Pd) พลาตินัม (Pt) และ รูทีเนียม (Ru) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันดินสูง และมีความเสถียรในการทำงานดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากกลุ่มอื่นๆ แต่มีราคาแพงมากๆ

การแตกตัวด้วยพลาสมา

นักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มได้ทดลองพบว่าสารประกอบอินทรีย์สามารถถูกทำให้สลายได้ง่ายโดยกระแสไอออนโคโรนา หรือพลาสมา (Nair et al, 2003) โดยอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนกับโมเลกุลก๊าซทำให้เกิดสารอนุมูลที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาขึ้น และเข้าทำปฏิกิริยาในการแตกตัวน้ำมันดินได้อย่างรวดเร็ว