

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปีโตรเลียม [2]

ปีโตรเลียม (petroleum) เป็นคำภาษาลาติน มาจากคำว่า petra แปลว่าหิน และ oleum แปลว่าน้ำมัน ดังนั้นปีโตรเลียมจึงแปลว่า น้ำมันที่อยู่ในหิน

ปีโตรเลียมมี 2 สถานะคือก๊าซและของเหลว ก๊าซธรรมชาติจะอยู่ผิวดินและความดันบรรยากาศ ประกอบไปด้วย สารไฮโดรคาร์บอน ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น ส่วนน้ำมันดิบที่เป็นของเหลวจะอยู่ลึกจากผิวดินและมีอยู่ภายใต้ความดันสูง

กำเนิดของปีโตรเลียมมาจากสารอินทรีย์ของพืชและสัตว์ซึ่งสะสมอยู่ในหินชั้นภายใต้สภาวะนิ่งและไม่มีออกซิเจน เมื่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ที่อาศัยอยู่บนโลกนับหลายล้านปีมาแล้วได้ตายลง จะถูกทับถม หรือถูกกระแสน้ำพัดพามายังบริเวณที่เป็นทะเลหรือทะเลสาบ จากนั้นจะถูกกรวด หทราย และโคลนตมที่แม่น้ำลำคลองพัดพามาทับถมสลับกันเป็นชั้นๆ เมื่อเวลาผ่านไปชั้นตะกอนต่างๆ ที่ถูกทับถมจนหนาและกดทับกลายเป็นชั้นหินต่างๆ ซึ่งความกดดันจากชั้นหินเหล่านี้และความร้อนใต้ผิวดินในระยะเวลาที่ยาวนานทำให้สารสลายตัวตามธรรมชาติเป็นปีโตรเลียม

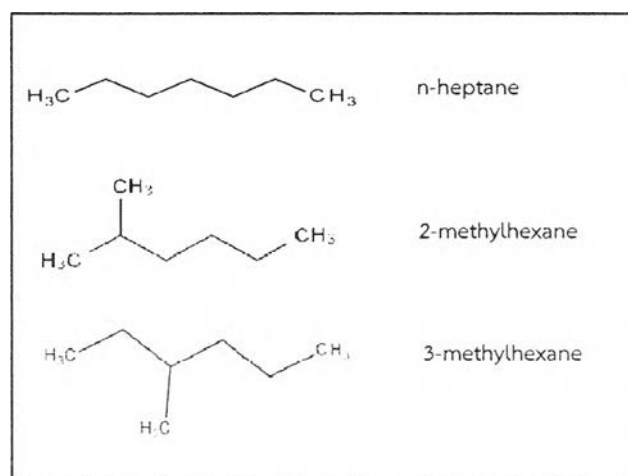
จากการวิเคราะห์ปีโตรเลียมพบว่า สารไฮโดรคาร์บอนบางชนิดในปีโตรเลียมมีลักษณะคล้ายกับที่พบในแหล่งตอน สาทรัยบางชนิด และสัตว์ชั้นสูง เช่น ปลา เป็นต้น จึงสันนิษฐานว่าสารไฮโดรคาร์บอนส่วนหนึ่ง (ประมาณร้อยละ 10) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่เดิมในเซลล์ของพืชหรือสัตว์ อีกส่วนหนึ่ง (ประมาณร้อยละ 90) เป็นสารที่ไม่ใช่สารไฮโดรคาร์บอน แต่เป็นสารที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในซากพืชซากสัตว์ เช่น ไขมัน โปรตีน ลิกนิน และคาร์โบไฮเดรต ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์เป็นปีโตรเลียม สารอินทรีย์แต่ละโมเลกุลจะเกิดปฏิกิริยาแบบต่างๆ ซึ่งมีทั้งการแตกตัวและการรวมตัวของโมเลกุลโดยอาจจะเกิดปฏิกิริยาที่เป็นสารอินทรีย์อยู่ด้วย แต่ละปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และมักเกิดแบบไม่สมบูรณ์

2.2 องค์ประกอบของน้ำมันดิบ

ปีโตรเลียมแต่ละแหล่งมีลักษณะไม่เหมือนกัน ได้แก่ สี ความใส ความหนืด และกลิ่น เพราะองค์ประกอบของปีโตรเลียมแต่ละแหล่งจะแตกต่างกัน ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างได้แก่โครงสร้างของอินทรีย์ที่อยู่ในซากพืชและซากสัตว์ ความลึกของชั้นหินที่เป็นแหล่งกำเนิด ชนิดของชั้นหินที่เกี่ยวข้อง

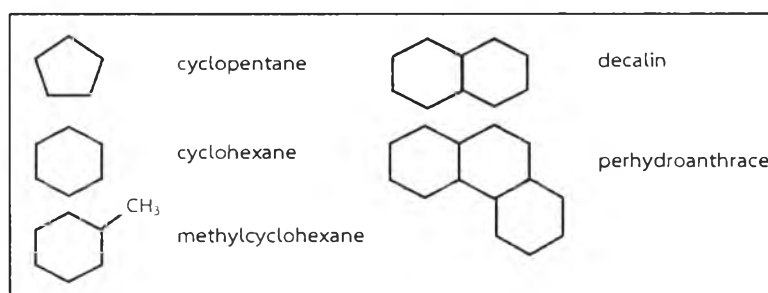
ในการเคลื่อนย้าย การเคลื่อนตัวของเปลือกโลกและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในแหล่งกักเก็บ ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมจะแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆดังนี้

2.2.1 พาราฟิน (paraffins) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated-hydrocarbons) หรือเรียกว่าอัลเคน (alkanes) ส่วนใหญ่ที่พบคือ 1. พาราฟินแบบโซ่ตรง เช่น นอร์มัลเฮปเทน (n-heptane) 2. ไอโซพาราฟิน เช่น 2-เมทิลเฮกเซน (2-methylhexane) และแบบที่ 3. พาราฟินแบบกิ่ง เช่น 3-methylhexane มีโครงสร้างแสดงในรูปภาพที่ 2.1



รูปภาพที่ 2.1 พาราฟินที่พบในปิโตรเลียม [2]

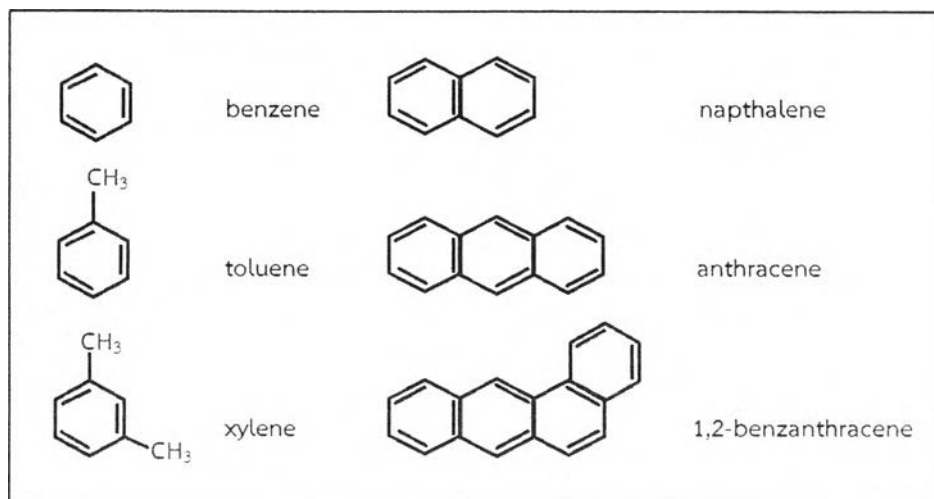
2.2.2 แนฟทีน (naphthenes) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงหรือเรียกว่าไซโคลออัลเคน (cycloalkanes) แนฟทีนที่พบในปิโตรเลียมส่วนใหญ่เป็นวงขนาดห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยมแสดงในรูปภาพที่ 2.2 โดยทั่วไปน้ำมันดิบจะมีแนฟทีนสูงถึงร้อยละ 50 ส่วนใหญ่จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเป็นแนฟทีนประเภทหลายวงแนบต่อกัน



รูปภาพที่ 2.2 แนฟทีนที่พบในปิโตรเลียม [2]

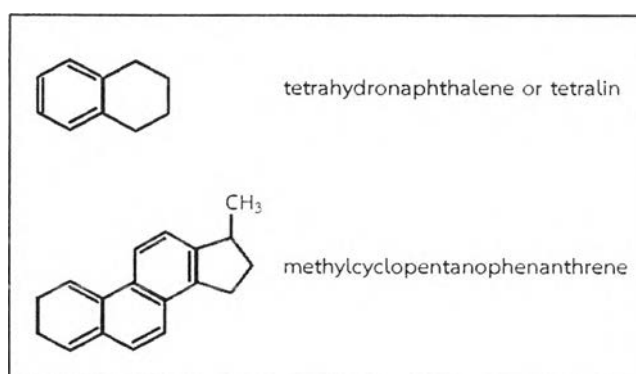
2.2.3 แอโรแมติก (aromatics) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงหกเหลี่ยม มีพันธะคู่สลับเดี่ยว เช่น เบนซีน ปริมาณของแอโรแมติกในน้ำมันดิบมีน้อยมาก และมักพบในส่วนกลั่นหนัก

เช่น ก๊าซออยล์ น้ำมันหล่อลื่นและกากการกลั่น อนุพันธ์ของเบนซีน ได้แก่ โทลูอินและไซลีน มักพบมากที่สุดอยู่ในปิโตรเลียม มีอยู่ปริมาณมากกว่าเบนซีนเสียอีก อนุพันธ์ประเภทอื่นของเบนซีนได้แก่ สารที่มีวงแอโรแมติกหลายวงแนบต่อกัน เช่น แนฟทาลีน พีแนนทริน และแอนทราซีน เป็นต้น แสดงในรูปภาพที่ 2.3



รูปภาพที่ 2.3 แอโรแมติกที่พบในปิโตรเลียม [2]

2.2.4 แนฟทีโน-แอโรแมติก (naphtheno-aromatic) เป็นสารประกอบบางประเภทที่พบในน้ำมันดิบ มีโครงสร้างที่เป็นทั้งแอโรแมติกและแนฟทีนอยู่ในโมเลกุลเดียวกันแสดงในรูปภาพที่ 2.4 มักพบอยู่ในน้ำมันดิบที่มีอายุการสะสมตัวน้อย

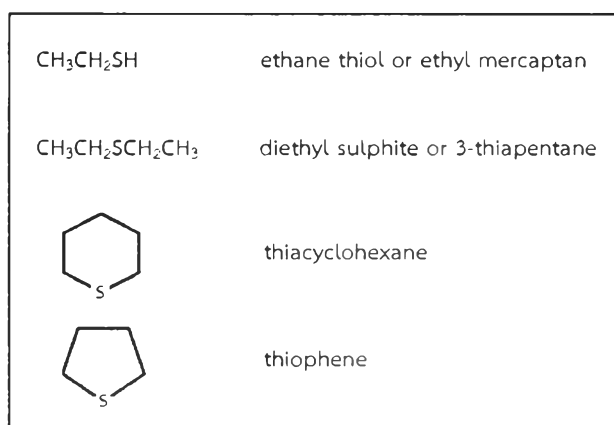


รูปภาพที่ 2.4 แนฟทีโน-แอโรแมติกที่ตรวจพบอยู่ในปิโตรเลียม [2]

2.2.5 สารประกอบกำมะถัน เป็นสารประกอบที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล ในจำนวนสารประกอบที่ไม่ใช่สารไฮโดรคาร์บอน โดยที่ตรวจพบในน้ำมันดิบมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 0.06-7.00 โดยน้ำหนักของน้ำมันดิบ ทั้งนี้ไม่รวมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เนื่องจากถูกกำจัดออกจาก

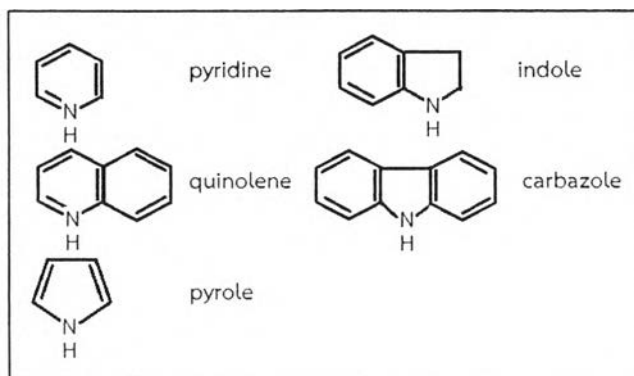


น้ำมันดิบพร้อมกับก๊าซไฮโดรคาร์บอนเบาอื่นๆในขั้นตอนการแยกก๊าซ สารประกอบกำมะถันที่พบในปิโตรเลียมได้แก่ ไทออล ซัลไฟด์และไทโอฟิน ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.5 สารประกอบกำมะถันทั้งหมดมีกลิ่นและมีฤทธิ์กัดกร่อนจะทำปฏิกิริยากับโลหะได้ ดังนั้นน้ำมันดิบที่มีสารประกอบกำมะถันจะมีราคาต่ำ และจำเป็นต้องกำจัดสารประกอบกำมะถันออกจากน้ำมันดิบให้หมดเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายระหว่างการนำไปใช้งาน ไม่เช่นนั้นแล้วผลิตภัณฑ์ที่มีสารประกอบกำมะถันจะก่อให้เกิดความเสียหายเมื่อนำไปใช้งาน



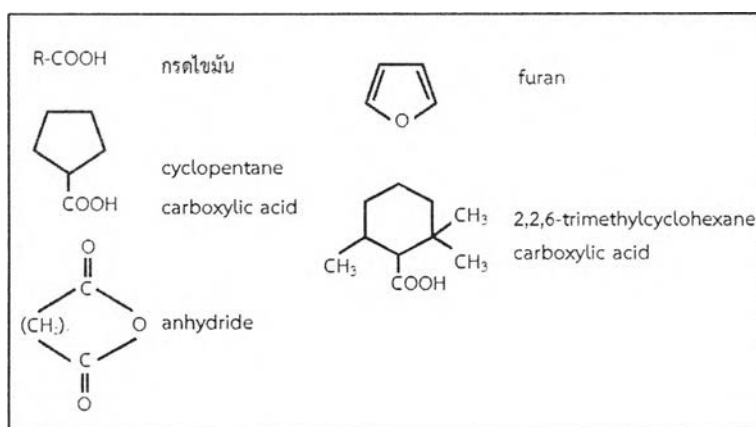
รูปภาพที่ 2.5 สารประกอบกำมะถันที่พบในปิโตรเลียม [2]

2.2.6 สารประกอบไนโตรเจน เป็นสารประกอบที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล ปริมาณธาตุไนโตรเจนที่ตรวจพบในน้ำมันดิบอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-2.0 โดยน้ำหนัก สารประกอบไนโตรเจนส่วนใหญ่จะมีจุดเดือดสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส สารประกอบไนโตรเจนจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆเสื่อมสภาพเร็วและทำให้เกิดยางเหนียวในน้ำมันเตา สารประกอบไนโตรเจนที่พบในน้ำมันดิบและสามารถแยกออกมาได้ ได้แก่ ฟิริดีน ควิโนลีน อินโดล พิโรล และคาร์บาโซล แสดงในรูปภาพที่ 2.6 อย่างไรก็ตามสารประกอบไนโตรเจนที่พบในน้ำมันดิบมีปริมาณน้อย และมักพบอยู่ในส่วนที่มีจุดเดือดสูง ประมาณร้อยละ 95 ของสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมดพบอยู่ในกาการกลั่นที่มีจุดเดือดสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 30 มิลลิเมตรปรอท น้ำมันดิบที่มีแอสฟัลต์สูง จะมีปริมาณสารประกอบไนโตรเจนสูงตามไปด้วย



รูปภาพที่ 2.6 สารประกอบไนโตรเจนที่ตรวจพบอยู่ในปิโตรเลียม [2]

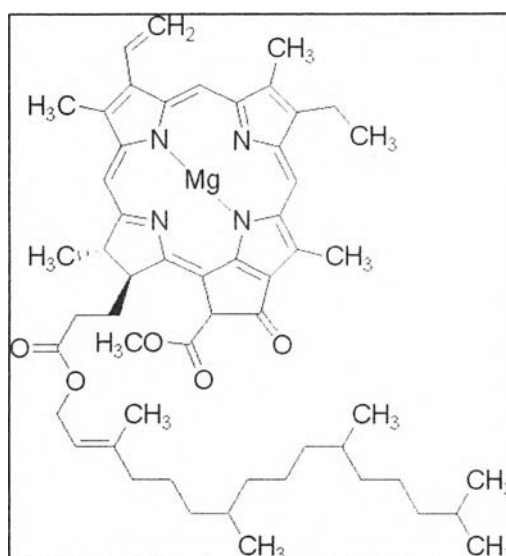
2.2.7 สารประกอบออกซิเจน เป็นสารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล ปริมาณธาตุออกซิเจนที่พบในปิโตรเลียมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-2.0 โดยน้ำหนัก มักอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์และมักพบในน้ำมันดิบที่ยังมีอายุการสะสมตัวน้อย กรดอินทรีย์เหล่านี้มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 1-30 อะตอม กรดที่มีโครงสร้างเป็นวงก็พบบ้างแต่ในปริมาณน้อย บางครั้งอยู่ในรูปของแนฟทีโน-แอโรแมติก กรดที่มีโครงสร้างเป็นวงที่พบมากจะมีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 9-13 อะตอม เมื่อมีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 14 อะตอม มักอยู่ในรูปวงสองวง นอกจากนี้แล้วยังพบสารประกอบออกซิเจนในรูปของ แอลกอฮอล์ ฟีนอล คีโตน เอสเทอร์ และแอนไฮไดรด์ แสดงในรูปภาพที่ 2.7



รูปภาพที่ 2.7 สารประกอบออกซิเจนที่ตรวจพบอยู่ในปิโตรเลียม [2]

อะตอมอื่นที่นอกเหนือจากคาร์บอนและไฮโดรเจน ได้แก่ ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ หรือกำมะถัน เรียกว่า เฮเทอโรอะตอม (heteroatom) มักพบอยู่ในน้ำมันดิบในส่วนที่เป็นแอสฟัลต์ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยทั่วไปแล้วเมื่อน้ำมันน้ำหนักโมเลกุลเพิ่ม ปริมาณเฮเทอโรอะตอมจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

2.2.8 สารประกอบออร์แกโนเมทัลลิก น้ำมันดิบส่วนมากมักมีโลหะปะปนอยู่ในรูปของ สารประกอบเชิงซ้อนของพอร์ไฟริน (porphyrin) จึงเรียกว่าปิโตรพอร์ไฟริน (petroporphyrin) มี โครงสร้างคล้ายกับคลอโรฟิลล์ แสดงในรูปภาพที่ 2.8 โดยมีโลหะอื่นแทนที่แมกนีเซียมที่อยู่ตรงกลาง ของวงพอร์ไฟริน โลหะที่พบมากได้แก่ แวนเนเดียม และนิกเกิล ที่พบรองลงมาได้แก่ ทองแดง และ เหล็ก หมู่แทนที่อยู่รอบวงพอร์ไฟรินอาจแตกต่างกันจากคลอโรฟิลล์เล็กน้อย หรืออาจจะไม่มีหมู่ แทนที่เลยที่บางตำแหน่ง โดยทั่วไปแล้วปริมาณของโลหะ กำมะถัน และแอสฟัลทีนส์ (asphaltenes) ที่พบในน้ำมันดิบจะสอดคล้องกัน ปริมาณของนิกเกิลในน้ำมันดิบมีตั้งแต่ 2-3 ส่วนในล้านส่วน สารประกอบเชิงซ้อนของพอร์ไฟริน แวนเนเดียม และนิกเกิลมีความเสถียรสูง และสามารถกลั่นแยก ออกมาได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส



รูปภาพที่ 2.8 โครงสร้างของคลอโรฟิลล์ซึ่งมีวงพอร์ไฟรินเป็นโครงสร้างหลัก [3]

2.3 พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก [4-6]

พลังงาน นับเป็นปัญหาใหญ่ในประเทศ และมีผลกระทบรุนแรงต่อการพัฒนาของประเทศ ไทยมากขึ้น เชื้อเพลิงต่างๆที่นำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น นับวันจะมีปริมาณน้อยลงและคงจะต้องหมดไปในอนาคต นอกจากนี้ราคาของเชื้อเพลิงมีความผันผวนไปในแนวทางที่สูงขึ้นตามสถานการณ์ทางเศรษฐกิจและการเมืองของโลก

พลังงานทดแทน หมายถึง พลังงานที่นำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง สามารถแบ่งตามแหล่งที่ได้มากเป็น 2 ประเภท คือ พลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป อาจเรียกว่า พลังงานสิ้นเปลือง ได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ นิวเคลียร์ หินน้ำมัน และทรายน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้ว สามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เรียกว่า พลังงานหมุนเวียน

ได้แก่ แสงอาทิตย์ ลม ชีวมวล น้ำ และไฮโดรเจน เป็นต้น เป็นพลังงานที่สะอาดและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.3.1 พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ เป็นพลังงานที่สะอาด ปราศจากมลพิษ และเป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูง ในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์สามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบคือ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน

2.3.2 พลังงานน้ำ เป็นรูปแบบหนึ่งของการสร้างกำลังโดยการอาศัยพลังงานของน้ำที่เคลื่อนที่ ปัจจุบันนี้พลังงานน้ำส่วนมากจะถูกใช้เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้แล้วพลังงานน้ำยังถูกนำไปใช้ในการชลประทาน การสี การทอผ้า และใช้ในโรงเลื่อย พลังงานของมวลน้ำที่เคลื่อนที่ได้ถูกมนุษย์นำมาใช้มานานแล้วนับศตวรรษ พลังงานน้ำเกิดจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานศักย์จากความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก การนำเอาพลังงานน้ำมาใช้ประโยชน์ทำได้โดยให้น้ำไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ พลังงานศักย์ของน้ำถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนนี้คือ กังหันน้ำ (Turbines) น้ำที่มีความเร็วสูงจะผ่านเข้าท่อแล้วให้พลังงานจลน์แกังกังหันน้ำ ซึ่งหมุนขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้า ในปัจจุบันพลังงานที่ได้จากแหล่งน้ำที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ พลังงานน้ำตก พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง พลังงานคลื่น

2.3.2.1. พลังงานน้ำตก การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำนี้ทำได้โดยอาศัยพลังงานของน้ำตก ออกจากน้ำตามธรรมชาติ หรือน้ำตกที่เกิดจากการดัดแปลงสภาพธรรมชาติ เช่น น้ำตกที่เกิดจากการสร้างเขื่อนกั้นน้ำ น้ำตกจากทะเลสาบบนเทือกเขาสูงหุบเขา กระแสน้ำในแม่น้ำไหลตกหน้าผา เป็นต้น การสร้างเขื่อนกั้นน้ำและให้น้ำตกไหลผ่านกังหันน้ำซึ่งติดอยู่บนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังงานน้ำที่ได้จะขึ้นอยู่กับความสูงของน้ำและอัตราการไหลของน้ำที่ปล่อยลงมา ดังนั้นการผลิตพลังงานจากพลังงานน้ำจำเป็นต้องมีบริเวณที่เหมาะสมและการสร้างเขื่อนนั้นจะต้องลงทุนอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามจากการสำรวจคาดว่าทั่วโลกสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจากกำลังน้ำมากกว่าพลังงานทดแทนประเภทอื่น

2.3.2.2. พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง มีพื้นฐานมาจากพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ของระบบที่ประกอบด้วยดวงอาทิตย์ โลก และดวงจันทร์ จึงจัดเป็นแหล่งพลังงานประเภทใช้แล้วไม่หมดไป สำหรับในการเปลี่ยนพลังงานน้ำขึ้นน้ำลงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า คือ เลือกแม่น้ำหรืออ่าวที่มีพื้นที่เก็บน้ำได้มากและพิสัยของน้ำขึ้นน้ำลงมีค่าสูงแล้วสร้างเขื่อนที่ปากแม่น้ำหรือปากอ่าว เพื่อให้เกิดเป็นอ่างเก็บน้ำขึ้นมา เมื่อน้ำขึ้นจะไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำ และเมื่อน้ำลงน้ำจะไหลออกจากอ่างเก็บน้ำ การไหลเข้าออกจากอ่างของน้ำต้องควบคุมให้ไหลผ่านกังหันน้ำที่ต่อเชื่อมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อกังหันน้ำหมุนก็จะได้ไฟฟ้าออกมาใช้งานหลักการผลิตไฟฟ้าจากน้ำขึ้นน้ำลงมีหลักการเช่นเดียวกับการ

ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำตก แต่กำลังที่ได้จากพลังงานน้ำขึ้นน้ำลงจะไม่ค่อยสม่ำเสมอเปลี่ยนแปลงไปมากในช่วงขึ้นลงของน้ำแต่อาจจัดให้มีพื้นที่กักน้ำเป็นสองบริเวณหรือบริเวณพื้นที่เดียว โดยการจัดระบบการไหลของน้ำระหว่างบริเวณบ่อสูงและบ่อต่ำ และกักบริเวณภายนอกในช่วงที่มีการขึ้นลงของน้ำอย่างเหมาะสม จะทำให้กำลังงานพลังงานน้ำขึ้นน้ำลงสม่ำเสมอดีขึ้น

2.3.2.3. พลังงานคลื่น เป็นการเก็บเกี่ยวเอาพลังงานที่ลมถ่ายเทให้กับผิวน้ำในมหาสมุทรเกิดเป็นคลื่นวิ่งเข้าสู่ชายฝั่งและเกาะแก่งต่างๆ เครื่องผลิตไฟฟ้าพลังงานคลื่นจะถูกออกแบบให้ลอยตัวอยู่บนผิวน้ำบริเวณหน้าอ่าวด้านหน้าที่หันเข้าหา คลื่น การใช้คลื่นเพื่อผลิตไฟฟ้านั้นถ้าจะให้ได้ผลจะต้องอยู่ในโซนที่มียอดคลื่นเฉลี่ยอยู่ที่ 8 เมตร ซึ่งบริเวณนั้นต้องมีแรงลมด้วย แต่จากการวัดความสูงของยอดคลื่นสูงสุดในประเทศไทยที่จังหวัดระนองพบว่า ยอดคลื่นสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 4 เมตรเท่านั้น ซึ่งก็แน่นอนว่าด้วยเทคโนโลยี การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานคลื่นในปัจจุบันนั้นยังคงไม่สามารถใช้ในบ้านเราให้ผลจริงจิงได้

2.3.3 พลังงานลม ลมเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ความกดดันของบรรยากาศและแรงจากการหมุนของโลก พลังงานลมเกิดจากพลังงานจากดวงอาทิตย์ตกกระทบโลกทำให้อากาศร้อน และลอยตัวสูงขึ้น อากาศจากบริเวณอื่นซึ่งเย็นและหนาแน่นมากกว่าจึงเข้ามาแทนที่ การเคลื่อนที่ของอากาศเหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดลม และมีอิทธิพลต่อสภาพลมฟ้าอากาศในบางพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งแนวฝั่งทะเลอันดามันและด้านทะเลจีน (อ่าวไทย) สิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเร็วลมและกำลังลม เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าลมเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่มีอยู่ในตัวเอง ซึ่งในบางครั้งแรงที่เกิดจากลมอาจทำให้บ้านเรือนที่อยู่อาศัยพังทลายต้นไม้หักโค่นลง สิ่งของวัตถุต่างๆ ล้มหรือปลิวลอยไปตามลม ฯลฯ ในปัจจุบันมนุษย์จึงได้ให้ความสำคัญและนำพลังงานจากลมมาใช้ประโยชน์มากขึ้น เนื่องจากพลังงานลมมีอยู่โดยทั่วไป เป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสภาพแวดล้อม และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่รู้จักหมดสิ้น ศักยภาพของพลังงานลมที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้สำหรับประเทศไทย มีความเร็วอยู่ระหว่าง 3 - 5 เมตรต่อวินาที และความเข้มพลังงานลมที่ประเมินไว้ได้อยู่ระหว่าง 20 - 50 วัตต์ต่อตารางเมตร

2.3.4 พลังงานความร้อนใต้พิภพ คือ พลังงานธรรมชาติที่เกิดจากความร้อนที่ถูกกักเก็บอยู่ภายใต้ผิวโลก โดยปกติแล้วอุณหภูมิภายใต้ผิวโลกจะเพิ่มขึ้นตามความลึก กล่าวคือยิ่งลึกลงไป อุณหภูมิจะยิ่งสูงขึ้น และในบริเวณส่วนล่างของชั้นเปลือกโลก (Continental Crust) หรือที่ความลึกประมาณ 25-30 กิโลเมตร อุณหภูมิจะมีค่าอยู่ในเกณฑ์เฉลี่ยประมาณ 250 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ในขณะที่ตรงจุดศูนย์กลางของโลกอุณหภูมิอาจสูงถึง 3,500 ถึง 4,500 องศาเซลเซียส



2.3.5 พลังงานชีวมวล (Bio-energy) หมายถึง พลังงานที่ได้จากชีวมวลชนิดต่างๆ โดยกระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ มีดังนี้คือ

2.3.5.1 การเผาไหม้โดยตรง (combustion) เมื่อนำชีวมวลมาเผาจะได้รับความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูงไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่างชีวมวลประเภทนี้คือ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้

2.3.5.2 การผลิตก๊าซ (gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงเรียกว่าแก๊สชีวภาพ (biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถนำไปใช้สำหรับกังหันแก๊ส (gas turbine)

2.3.5.3 การหมัก (fermentation) เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัวเกิดแก๊สชีวภาพ (biogas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้สามารถใช้ขยะอินทรีย์ชุมชน มูลสัตว์ น้ำเสียจากชุมชนหรืออุตสาหกรรมเกษตร เป็นแหล่งวัตถุดิบชีวมวลได้

2.3.5.4 การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช มีกระบวนการที่ใช้ผลิตดังนี้

1. กระบวนการทางชีวภาพ ทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่างหวาน กากน้ำตาล และเศษลำต้นอ้อย ให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน
2. กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (transesterification) เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล
3. กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่นกระบวนการไพโรไลซิส เมื่อวัสดุทางการเกษตรได้รับความร้อนสูงในสภาวะไร้ออกซิเจน จะเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน

ข้อเด่นของเชื้อเพลิงชีวมวล [7]

เป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมด วงจรชีวิตของพืชมีระยะสั้นต่างจากฟอสซิล ซึ่งใช้เวลาหลายพันล้านปี ก่อมลภาวะน้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากพืชปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) (ซึ่งเป็นตัวก่อฝนกรดและโอโซน (O_3) ในระดับพื้นดิน) น้อยมาก

และไม่เพิ่มระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากพืชต้องดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อการเจริญเติบโต ชีวมวลแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป เช่น แกลบ จะให้ค่าความร้อนสูงเนื่องจากมีความชื้นต่ำและไม่ต้องผ่านการบดย่อยก่อนนำไปเผาไหม้ โดยซีเถ้าที่เกิดจากการเผาแกลบสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและแก้วได้ ส่วนขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงที่เผาไหม้แล้วมีปริมาณซีเถ้าน้อยจึงมีปัญหาในการจัดการน้อย และซีเถ้าดังกล่าวยังสามารถนำไปใช้ปรับปรุงสภาพดินในไร่อ้อยได้อีกด้วย การใช้พลังงานชีวมวลมีข้อดีคือเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยเนื่องจากมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงประเภทอื่นมากและไม่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก นอกจากนี้การนำแหล่งวัตถุดิบที่มีอยู่ภายในประเทศมาใช้ถือเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งเกษตรกรยังมีรายได้เพิ่มจากการขายวัสดุทางการเกษตรที่เหลือใช้อีกด้วย

ข้อดีของเชื้อเพลิงชีวมวล

แม้พลังงานชีวมวลจะมีอยู่มากแต่มีอยู่อย่างกระจัดกระจายทำให้ยากแก่การรวบรวมเพื่อใช้ผลิตไฟฟ้าในปริมาณมากอย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามจากการสำรวจและประเมินศักยภาพของการผลิตไฟฟ้าด้วยชีวมวลภายในประเทศพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลที่เหลือจากการใช้ประโยชน์อื่นๆ สามารถนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าได้ 700-1000 เมกกะวัตต์ หากพลังงานจากชีวมวลได้รับการพัฒนาให้นำมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจังแล้วก็จะเป็ผลดีต่อประเทศชาติไม่น้อย

2.4 ปาล์มน้ำมัน [8-9]

ปาล์มน้ำมันมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* Jacq. มีลักษณะผลเป็นสี่เหลี่ยมแสดงในรูปภาพที่ 2.9 ปาล์มน้ำมันเป็นพืชน้ำมันที่ให้ปริมาณน้ำมันสูงเมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่น



รูปภาพที่ 2. 9 ต้นปาล์มและผลของปาล์มน้ำมัน [8-9]

2.4.1 ชนิดของน้ำมันปาล์ม

2.4.1.1 เปลือกหุ้มภายนอก (mesocarp) เรียกว่า น้ำมันจากเนื้อเมล็ดปาล์ม (crude palm oil) น้ำมันจะมีสีส้มเนื่องจากมีเบต้าแคโรทีนเป็นองค์ประกอบ กำจัดได้โดยนำไปต้มจนกระทั่งสีส้มนหายไป น้ำมันปาล์มดิบจะมีกรดไขมันอิ่มตัวเป็นองค์ประกอบสูง จึงมีลักษณะเป็นสารกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิห้อง

2.4.1.2 เนื้อในของเมล็ด (palm kernel) เรียกว่า น้ำมันจากเมล็ดปาล์ม (palm kernel oil) มีน้ำมันร้อยละ 44-48 มีกรดลอริกซึ่งเป็นกรดไขมันอิ่มตัวเป็นองค์ประกอบมาก และมีกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวน้อย จึงสามารถแยกส่วนที่เป็นของแข็งออกจากของเหลวได้โดยการกรองและบีบอัดความดัน ส่วนที่เป็นของแข็งเรียกว่า สเตียริน (stearin) ใช้ทำเนย และส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่า โอลีน (olein) ใช้ทำสบู่และใช้ในการบริโภค

2.4.2 กระบวนการแปรรูปน้ำมันปาล์ม

การแปรรูปน้ำมันจากปาล์มจะนำทะลายปาล์มมาอบด้วยไอน้ำ (sterilization) การอบทะลายจะช่วยหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซิส (lipolysis) ที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม และช่วยให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มหลุดจากข้อผลได้ง่าย จากนั้นนำไปแยกผล โดยการเขย่าเพื่อแยกผลปาล์มออกจากทะลาย และนำผลปาล์มไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม เพื่อให้ส่วนเปลือกแยกออกจากเมล็ด นำส่วนเปลือกมาสกัดน้ำมัน โดยผ่านเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัดคู่ จะได้น้ำมันปาล์มดิบที่มีองค์ประกอบคือ น้ำมัน 66% น้ำ 24% และของแข็ง 10% การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ นำน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการสกัด ส่งเข้าถังกรองเพื่อแยกน้ำและของแข็งออก แล้วนำเข้าเครื่องเหวี่ยง เพื่อทำความสะอาดอีกครั้ง และไล่น้ำออกเพื่อทำให้แห้ง ส่งเข้าถังเก็บน้ำมันสำหรับรอการกลั่นหรือจำหน่ายต่อไป

โดยทั่วไป น้ำมันปาล์มดิบมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ คือกลีเซอไรด์ประมาณร้อยละ 95 กรดไขมันประมาณร้อยละ 3 - 5 และ องค์ประกอบอื่นๆประมาณร้อยละ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยไฟโทรนิวเทรียนที่มีคุณค่าทางอาหารสูง และสารอื่น ๆ เช่น แคโรทีนอยด์, โทโคฟีรอล และ สารเจือปนต่างๆ

2.4.3 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบ

พบว่าน้ำมันปาล์มดิบมีกรดไขมันทั้งที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว โดยกรดไขมันที่พบมากในน้ำมันปาล์มดิบคือกรดไขมันปาล์มติก (C 16:0) มีปริมาณร้อยละ 43.5 และกรดไขมันโอเลอิก (C 18:1) มีปริมาณร้อยละ 39.8 แสดงในตารางที่ 2.1

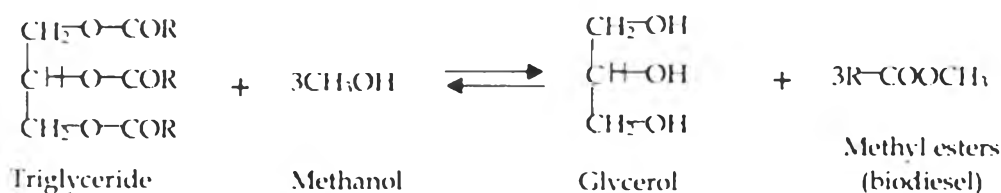
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบ [10]

| องค์ประกอบของกรดไขมัน | ร้อยละของปริมาณกรดไขมัน |
|-----------------------|-------------------------|
| C 14:0 | 1.1 |
| C 16:0 | 43.5 |
| C 16:1 | 0.2 |
| C 18:0 | 4.3 |
| C 18:1 | 39.8 |
| C 18:2 | 10.2 |
| C 18:3 | 0.3 |
| Others | 0.6 |
| Total | 100 |

2.5 เทคโนโลยีในการผลิตดีเซล [11]

ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่นิยมในการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.5.1 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Tranesterification) เป็นกระบวนการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หรือสารประกอบออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์ ที่อุณหภูมิ 37-87 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งเป็น 2 วัฏภาคคือ เมทิลเอสเทอร์ หรือ ไบโอดีเซล และกลีเซอรอลที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกใช้ไปแล้วติดมาด้วย ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.10



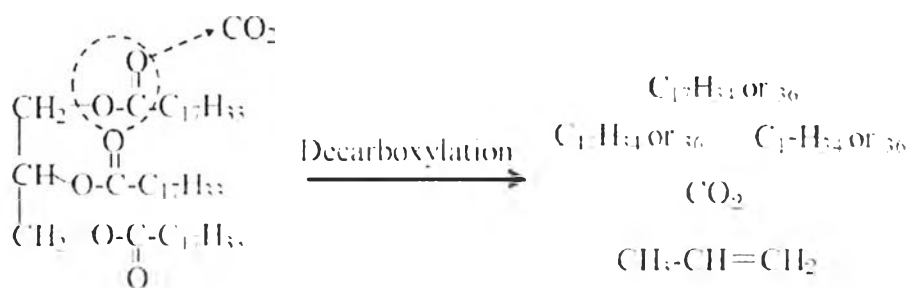
รูปภาพที่ 2. 10 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน[12]

2.5.2 กระบวนการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (hydrocracking) กระบวนการนี้เป็นการนำ ไตรกลีเซอไรต์มาแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะทรานซิชันภายใต้ความดันที่เป็นไฮโดรเจนที่สูง สารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นพวกวงแอรอแมติกหรือโอเลฟินจะถูกตัดพันธะออกแล้วเติมด้วยไฮโดรเจน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นพวกแนฟทีนและอัลเคนที่เป็นโซ่ตรง และมีค่าซีเทนสูงขึ้น (40-50) [13]

2.5.3 กระบวนการไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยา (catalytic pyrolysis reaction) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูงในการแตกสลายโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอน แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

2.5.3.1 กระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ความร้อน (thermal cracking) เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่แตกตัวเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก หากมีการควบคุมอุณหภูมิที่พอดีผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นไปตามที่ต้องการ แต่หากได้รับความร้อนมากเกินไป สารไฮโดรคาร์บอนจะแตกตัวมากจนได้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กมาก และอาจไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้

2.5.3.2 กระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic pyrolysis cracking) กระบวนการนี้เป็นการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาช่วยในการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดของโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงในสภาวะที่อับอากาศ กระบวนการนี้จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโครงสร้างที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะขึ้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แสดงในรูปภาพที่ 2.11



รูปภาพที่ 2.11 กระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน [23]

2.6 ปฏิกิริยาการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอน [14-16]

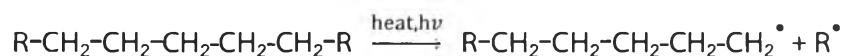
ปฏิกิริยาการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนแบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

2.6.1 กระบวนการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน

การแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลง หากมีการควบคุมอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาได้ดี จะทำให้สามารถเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่ต้องการได้มากที่สุด แต่หากมีการให้ความร้อนที่มากจนเกินไปจะทำให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมาก ทำให้ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กและอยู่ในสถานะเป็นแก๊ส C₁-C₄ ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จึงไม่เป็นที่ต้องการ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนอาจเกิดจากการทำปฏิกิริยากันเองระหว่างส่วนที่มีแขนโอเลฟิน (olefin) และไดโอเลฟิน (diolefin)

กระบวนการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (Free radical) แบบห่วงโซ่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นเริ่มต้น (initiation step) เป็นขั้นตอนในการเกิดอนุมูลอิสระ เนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการแตกพันธะของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอน ได้เป็นอนุมูลอิสระซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาในขั้นต่อไป แสดงในสมการที่ 2.1

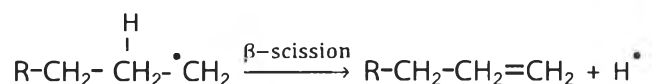
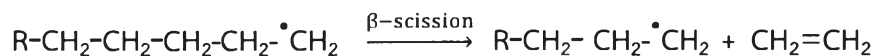


(สมการที่ 2.1)

2. ขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (propagation step) อนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไอโซเมอร์และแตกพันธะกลายเป็นโมเลกุลที่สั้นลงพร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้น นอกจากนี้อนุมูลอิสระอาจทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นๆ เกิดเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นได้อีก โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนก็จะมีสายโซ่ที่สั้นลงเรื่อยๆ แสดงในสมการที่ 2.2



β -fission



Chain transfer



(สมการที่ 2.2)

3. ขั้นหยุดปฏิกิริยา (terminal step) เป็นขั้นตอนที่อนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากันเองเพื่อหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่อง เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งโมเลกุลที่ได้ อาจจะเป็นโมเลกุลใหม่โมเลกุลเดียวหรือเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุลแสดงในสมการที่ 2.3



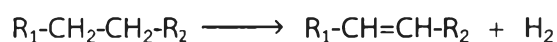
(สมการที่ 2.3)

2.6.2 กระบวนการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking)

เป็นกระบวนการแตกสลายพันธะของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำให้สารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่มีขนาดเล็กลงและมีโครงสร้างตามที่ต้องการ กลไกในการแตกสลายของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยามีดังนี้

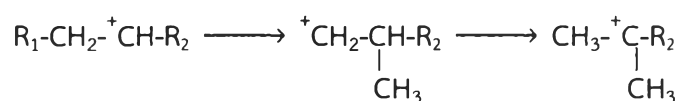
1. ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนเนียมไอออน (carbonium ion) คือการที่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดการสูญเสียไฮโดรเจนของไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด เกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออนที่มีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก โดยคาร์บอนเนียมไอออนที่มีโครงสร้างแบบ tertiary ion จะ

มีความเสถียรมากกว่า secondary ion และ primary ion ตามลำดับแสดงในสมการที่ 2.4



(สมการที่ 2.4)

2. ปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลคาร์บอนเนียมไอออน คือการเคลื่อนย้ายของหมู่เมทิลเพื่อให้โครงสร้างของไอออนมีความเสถียร ดังสมการ 2.5



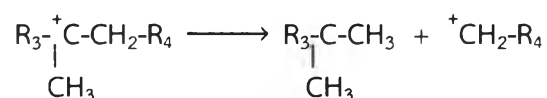
(สมการที่ 2.5)

จากนั้นเกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) ระหว่างคาร์บอนเนียมไอออนกับโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังสมการที่ 2.6



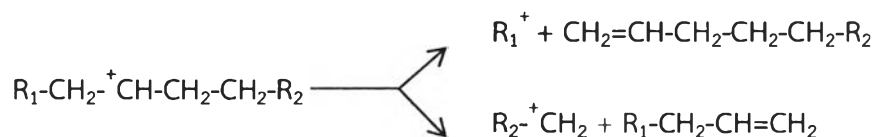
(สมการที่ 2.6)

ในส่วนของคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถแตกตัวหรือเกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง β ซึ่งนับจากตำแหน่งที่มีประจุบวก เกิดเป็นสารประกอบโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลง ส่วนใหญ่มักเกิดเป็นโครงสร้างแบบ primary carbonium ion ดังสมการที่ 2.7



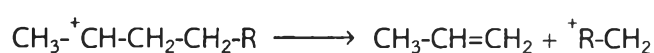
(สมการที่ 2.7)

คาร์บอนเนียมไอออนนั้นสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่น ตัวอย่างของ secondary carbonium ion ดังสมการที่ 2.8



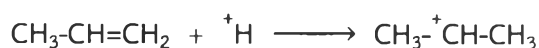
(สมการที่ 2.8)

แต่หาก R_1 เป็น H จะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ดังสมการที่ 2.9



(สมการที่ 2.9)

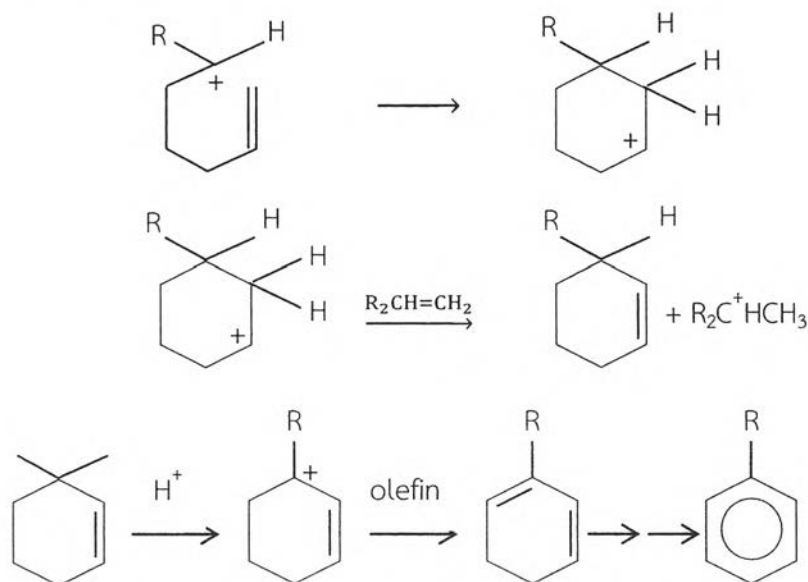
ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีนซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอน และจะอยู่ในรูปของคาร์บอนเนียมไอออน ซึ่งจะไม่สามารถเกิด β -scission ต่อไปได้อีกดังสมการที่ 2.10



(สมการที่ 2.10)

Isopropyl carbonium ion ที่เป็นผลิตภัณฑ์ในสมการที่ 2.10 จะเกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮโดรด์กับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลอื่น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพนหรืออาจเกิดการสูญเสียโปรตอน จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีน ในส่วนของการเกิดวงแอโรแมติกจะเกิดจากปฏิกิริยา dehydrocyclization ซึ่งโอเลฟินจะเกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยา β -scission ได้เป็นสารประกอบ olefin carbonium ion ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟิน โดยการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะได้ allylic carbonium ion ที่มีความเสถียร จากนั้นจะรับโปรตอนจาก cyclohexadiene ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบแอโรแมติก ดังสมการที่ 2.11





(สมการที่ 2.11)

2.6.3 กระบวนการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (hydrocracking)

เป็นกระบวนการที่เกิดทั้งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีกิ่งจำนวนมาก เป็นสารประกอบพาราฟินและแนฟทีน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ 2 อย่าง (dual function) คือช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนและช่วยเติมแก๊สไฮโดรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมักประกอบไปด้วยสารจำพวกซิลิกา-อะลูมินาที่สามารถช่วยในการแตกตัวของพันธะคาร์บอนได้พร้อมกับเติมไฮโดรเจนด้วย ปฏิกิริยาจะเริ่มจากการเกิดโอเลฟินขึ้นที่พื้นผิวส่วนที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโอเลฟินไปทำให้เกิดคาร์บอนเนียมไอออนตรงบริเวณที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจะเกิดการแตกตัวบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา การเติมแก๊สไฮโดรเจนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความอิ่มตัว และการเติมแก๊สไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถกำจัดโค้กบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้อีกด้วย [16]

กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์สูง จำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิให้เหมาะสมเพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้กและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาได้ หรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

2.7 การเร่งปฏิกิริยา [17]

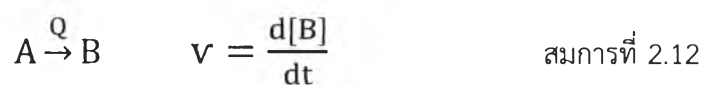
การเร่งปฏิกิริยา (catalysis) หมายถึงการทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ซึ่งเป็นสารที่สามารถเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นโดยที่ตัวมันเองไม่ถูกใช้ไปอย่างถาวรในปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalysts) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยา ไม่ว่าจะเป็นแก๊สหรือของเหลว ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิตที่เร่งโดยเอนไซม์ และปฏิกิริยาในสารละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจน ทำให้ง่ายต่อการศึกษา แต่มีข้อเสียคือมักสลายตัวหรือเสียสภาพในสถานะที่ใช้ความร้อน หรือความดันสูง
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalysts) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา เช่นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สหรือของเหลว การใช้ตัวเร่งแบบวิวิธพันธ์พบได้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น ปุ๋ย ผลิตภัณฑ์ยา เชื้อเพลิง เส้นใยสังเคราะห์ ตัวทำละลาย เนื่องจากสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือได้ง่ายกว่าระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์

2.7.1 เทอมที่เกี่ยวข้องกับการเร่งปฏิกิริยา

2.7.1.1 ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic efficiency) จากการเปลี่ยนสารตั้งต้น A ไปเป็น B โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Q ด้วยอัตราเร็ว v ดังสมการที่ 2.12



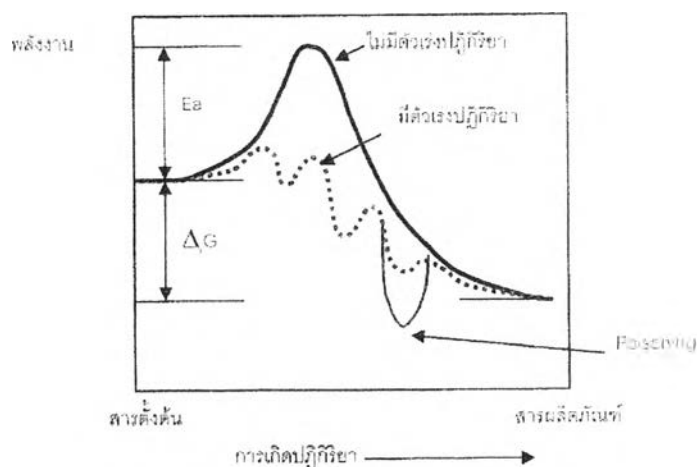
ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยตรงจากค่าความถี่ผันเวียน (turnover frequency) ซึ่งแสดงโดยค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งกัมมันต์ หรือเลขผันเวียน (turnover number) ซึ่งหมายถึงจำนวนวัฏจักรของการเร่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาต่อหน่วยเวลา กล่าวได้อีกแบบคือ อัตราการเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าความถี่ผันเวียน แทนด้วย N ซึ่งหาได้จากอัตราเร็วของปฏิกิริยา (v) หารด้วยความเข้มข้นของสาร C_A ซึ่งสามารถแทนด้วยพื้นที่กัมมันต์ ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.13

$$N = \frac{V}{C_A}$$

สมการที่ 2.13

2.7.1.2 วัฏจักรของการเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cycle) จะประกอบไปด้วยกลไกของปฏิกิริยาที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นสารมัธยันตร์ (intermediates) และสารผลิตภัณฑ์ โดยอาจมีการเปลี่ยนแปลงของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย แต่เมื่อวัฏจักรครบรอบแล้วจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับคืนมา โดยทั่วไปเราสามารถหาทฤษฎีอัตราของปฏิกิริยารวมได้จากกลไกของปฏิกิริยา สัดส่วนในการเลือกทำปฏิกิริยาเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้น การศึกษาวัฏจักรการเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ดี

2.7.1.3 การเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Energetic) ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเพิ่มความเร็วของปฏิกิริยาได้โดยการเปลี่ยนวิถีของปฏิกิริยา โดยวิถีใหม่มีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกิบส์ (Gibbs energy of activation, ΔG) ต่ำกว่าวิถีเดิม ดังแสดงในรูปภาพที่



รูปภาพที่ 2. 12 พลังงานของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งและมีพลังงานก่อกัมมันต์ของกิบส์สูงและปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพลังงานก่อกัมมันต์ต่ำแต่พลังงานโดยรวมของปฏิกิริยาทั้งสองเท่ากัน [17]

จะเห็นว่าระดับพลังงานของวิถีใหม่ไม่สูง แต่ต้องไม่ต่ำกว่าค่าพลังงานของสารผลิตภัณฑ์ เพราะสารผลิตภัณฑ์ต้องมีเสถียรภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ หากวิถีใหม่ทำให้เกิดสารที่มีพลังงานต่ำกว่าสารผลิตภัณฑ์ เรียกว่าเกิดพอยซันนิง (poisoning) จะทำให้วัฏจักรของปฏิกิริยาถูกทำลาย และไม่เกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ พอยซันนิงเป็นสาเหตุอันหนึ่งของการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.7.1.4 กัมมันตภาพ (Activity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคือความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อเข้าสู่สมดุล เป็นการวัดเชิงปริมาณว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้มากเพียงใดในการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นสารผลิตภัณฑ์

การหาร้อยละกัมมันตภาพแบบง่ายที่สุดทำได้โดยหาผลต่างของปริมาณสารตั้งต้นที่เข้าและออกจากระบบ (input reactant - output reactant) เทียบกับปริมาณสารตั้งต้นที่ใส่เข้าไป ดังสมการที่ 2.14

$$\% \text{ Activity} = \frac{\text{Input reactant} - \text{Output Reactant}}{\text{Input reactant}} \times 100 \quad (\text{สมการที่ 2.14})$$

2.7.1.5 สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา (Selectivity) คือความสามารถในการเลือกเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการโดยเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (side reaction) น้อยที่สุด สมการที่ 2.15 แสดงการหาสัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา จากสัดส่วนของปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด หารด้วยปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งหมด

$$\% \text{selectivity} = \frac{\text{Desired reaction} \times 100}{\text{All reactions}} \quad (\text{สมการที่ 2.15})$$

2.7.1.6 อายุการใช้งาน (Lifetime) คืออายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีต้องมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน สามารถในการเร่งวัฏจักรของปฏิกิริยาได้หลายรอบโดยไม่มีการเสื่อมสภาพ การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยานั้นต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของมันด้วย เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเร่งปฏิกิริยาได้หลายปฏิกิริยา และปฏิกิริยาข้างเคียงบางอันอาจทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาหรือเสื่อมสภาพ

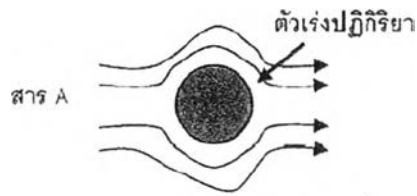
2.7.1.7 การทำให้คืนสภาพ (Regeneration) คือการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพแล้วหลังจากการใช้งานมาทำให้กลับไปอยู่ในสภาพที่ว่องไวและใช้งานได้เหมือนเดิม

2.7.1.8 ตัวยับยั้ง (Inhibitor) คือสารที่ทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเกิดช้าลง ถ้าเป็นตัวยับยั้งชนิดแข่งขัน (Competitive inhibitor) จะแข่งขันกับสารตั้งต้นในการเกิดพันธะกับตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวยับยั้งปฏิกิริยาที่แข็งแรงมากคือเกิดพันธะได้แข็งแรงมาก ทำให้สารตั้งต้นไม่สามารถเกิดพันธะกับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เรียกว่าเกิดพอยซัน (poison)

2.7.2 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยารีดอกซ์

กลไกของการถ่ายเทมวลสารซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยามี 7 ขั้นตอนดังนี้

2.7.2.1 การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น (External diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้นที่จะแพร่ไปยังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้ยังไม่มีเปลี่ยนแปลงทางเคมี



รูปภาพที่ 2. 13 การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น [17]

จากรูปแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.16

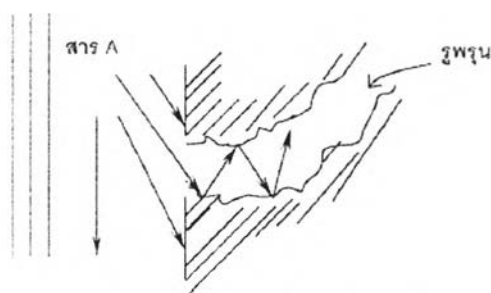
$$k_{\text{ext. diff.}} = k_g S_{\text{ext}} \quad (\text{สมการที่ 2.16})$$

เมื่อค่า k_g คือสัมประสิทธิ์ของการถ่ายโอนมวล (Mass transfer coefficient) หน่วย cm/s

$k_{\text{ext. Diff.}}$ คือค่าคงตัวของ การแพร่ภายนอก

และค่า S_{ext} คือพื้นที่ผิวภายนอกของอนุภาคต่อปริมาตรของอนุภาค

2.7.2.2 การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน (Internal pore diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้นที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา เข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปภาพที่ 2.14 เนื่องจากรูพรุนมีขนาดเล็กและรูปทรงไม่แน่นอน ทำให้ระหว่างการแพร่จะมีการชนกันเองระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น หรือชนกับผนังของรูพรุน ชั้นตอนนี้ยังไม่มี การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นเช่นกัน



รูปภาพที่ 2. 14 การแพร่ของสารตั้งต้นเข้าสู่ภายในรูพรุน [17]

ค่าคงตัวของ การแพร่สู่ภายในรูพรุนหาได้จากสมการ 2.16

$$k_{\text{int. diff.}} = k_s S_{\text{int}} \eta \quad (\text{สมการที่ 2.16})$$

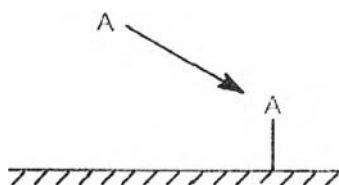
เมื่อ k_s คือค่าคงตัวของการแพร่ต่อหน่วยพื้นที่ผิว ซึ่งคำนวณตามสมการมีขนาดรูพรุนเป็นตัวกำหนด

$k_{int. diff.}$ คือค่าคงตัวของการแพร่ภายใน

S_{int} คือพื้นที่ผิวภายในของอนุภาคต่อปริมาตรของอนุภาค

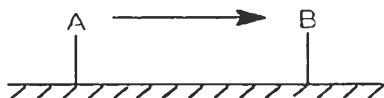
และค่า η คือประสิทธิผลของการแพร่ (diffusion effectiveness)

2.7.2.3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นการดูดซับของสารตั้งต้นบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ในขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารตั้งต้นแพร่ไปถึงตำแหน่งกระตุ้นซึ่งอยู่ในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วเกิดการดูดซับ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ในการเร่งปฏิกิริยานั้น การดูดซับจะเป็นการดูดซับในเชิงเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เสมอ นั่นคือเกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้นในที่นี้เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) และผิวหน้าของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่นี้เรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbent) ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.15 ซึ่งเป็นการดูดซับของสาร A บนผิวหน้า การดูดซับนี้ทำให้เกิดการจับของสารตั้งต้นเป็นชั้นเดียวหรือโมโนเลเยอร์ (monolayer) ที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปภาพที่ 2. 15 การดูดซับทางเคมีของสาร A บนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา [17]

2.7.2.4 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) หลังจากเกิดการดูดซับแล้วสารตั้งต้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ตำแหน่งกัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.16 โมเลกุล A เปลี่ยนไปเป็นโมเลกุล B ซึ่งเป็นลักษณะของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization)



รูปภาพที่ 2. 16 การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจากโมเลกุล A ไปเป็น B [17]

โดยการดูดซับจะต้องไม่แข็งแรงเกินไปเพราะสารตั้งต้นที่อยู่บนตำแหน่งกัมมันต์ต้องเคลื่อนที่ มาพบกันแบบรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหม่ หากการดูดซับแข็งแรงเกินไปสารจะเคลื่อนที่มาพบกันยาก

2.7.2.5 การคาย (Desorption) เป็นการหลุดออกของสารผลิตภัณฑ์จากตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นแล้ว ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขั้นตอนสุดท้าย

2.7.2.6 การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้เป็น การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกมาจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา แต่หากปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ สารที่ แพร่ออกมาก็จะมีสารที่เป็นสารตั้งต้นด้วย

2.7.2.7 การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์จากผิวหน้าด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้สารที่ เป็นผลิตภัณฑ์จะแพร่ออกจากผิวหน้าด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาและอาจจะมีสารตั้งต้นแพร่ออกมา ด้วยเช่นกันหากเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์

2.7.3 การดูดซับและการคาย (Adsorption and desorption)

การดูดซับ (adsorption) ของโมเลกุลต่างๆบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ คือการ เกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับ (adsorbent) กับตัวถูกดูดซับ (adsorbate) บนตำแหน่งกัมมันต์ (active site) เพื่อให้โมเลกุลเหล่านั้นเกิดปฏิกิริยาต่อไป

การคายซับ (desorption) คือการแตกออกของพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ทำให้ได้ตำแหน่งกัมมันต์กลับคืนมา

ชนิดของการดูดซับ

2.7.3.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับที่อ่อนและไม่ มีพันธะเคมีเกิดขึ้น แรงดึงดูดระหว่างอะตอมผิวหน้ากับตัวถูกดูดซับ คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) มีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำ (น้อยกว่า 25 kJ/mol) เป็นกระบวนการคายความร้อน ไม่มี พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) และไม่มีการแตกของพันธะ ดังนั้นจึงสามารถเกิดขึ้นได้ อย่างรวดเร็วในทันทีที่โมเลกุลเดินทางมาถึงผิวหน้า แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีความพรุนสูงอัตราการ เกิดปฏิกิริยาจะช้าลง เนื่องจากถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วของการแพร่ ปริมาณของการดูดซับแบบนี้เป็น แบบไม่เลือก กล่าวคือขึ้นกับจุดเดือดของแก๊ส แต่ไม่ขึ้นกับชนิดของพื้นผิวและชนิดของแก๊ส หลังการ ดูดซับแก๊สที่ผิวหน้าไม่เป็นชั้นเดียว

2.7.3.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่ แข็งแรง เป็นการเกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ความร้อนของการดูดซับมี

ค่าประมาณ 60-85 kJ/mol การดูดซับแบบนี้เป็นแบบเฉพาะเจาะจง กล่าวคือขึ้นกับชนิดของแก๊สและของผิวหน้า หลังการดูดซับแก๊สที่ผิวหน้าจะเป็นชั้นเดียว การที่จะให้การดูดซับทางเคมีเข้าสู่สมดุลนั้นจะต้องใช้เวลานาน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณที่ดูดซับที่สภาวะสมดุลจะขึ้นกับชนิดของระบบ ปริมาณไอของสารที่ดูดซับจะมีค่ามากที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของสารมาก และปริมาณการดูดซับจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิหนึ่งซึ่งผิวหน้าเกิดการอิมมิด

2.7.4 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ [17]

สมบัติทางกายภาพจะมีผลต่อการลำเลียง (Transport phenomena) ของสารตั้งต้นที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาและ/หรือสารผลิตภัณฑ์ สมบัติดังกล่าวประกอบด้วย พื้นที่ผิว (surface area) ปริมาตรรูพรุน (pore volume) ขนาดรูพรุน (pore size) และการกระจายตัวของขนาดรูพรุน (pore size distribution)

2.7.4.1 พื้นที่ผิว (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาจะบ่งบอกความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ยังมีพื้นที่ผิวมากจะยิ่งมีความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี การเพิ่มพื้นที่ผิวทำได้โดยลดขนาดของวัสดุให้เล็กลงจนเป็นผงละเอียด หรือเพิ่มพื้นที่ผิวโดยการทำให้เกิดเป็นโพรงเล็กๆจำนวนมาก ซึ่งวิธีนี้เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวได้ดีที่สุด

2.7.4.2 ขนาดและจำนวนของรูพรุน (size and number of pores) สามารถบอกปริมาณพื้นที่ผิวภายในตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวภายในสูงจะมีรูพรุนอยู่อย่างหนาแน่น ทำให้การกระจายตัวของตำแหน่งกัมมันต์ (active site) สูง และขนาดของรูพรุนที่เลือกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับโมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เนื่องจากขนาดของโพรงของตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีความสำคัญต่อความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขนาดของโพรงแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. มาโครพอร์ (Macropore) มีขนาดของโพรงมากกว่า 50 นาโนเมตร หรือรัศมีเฉลี่ยของรูพรุนใหญ่กว่า 25 นาโนเมตร
2. มีโซพอร์ (Mesopore) มีขนาดของโพรงระหว่าง 2-3 นาโนเมตรจนถึง 50 นาโนเมตร หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรงระหว่าง 1 และ 25 นาโนเมตร
3. ไมโครพอร์ (Micropore) มีขนาดของโพรงน้อยกว่า 2-3 นาโนเมตร หรือรัศมีเฉลี่ยของโพรงน้อยกว่า 1 นาโนเมตร



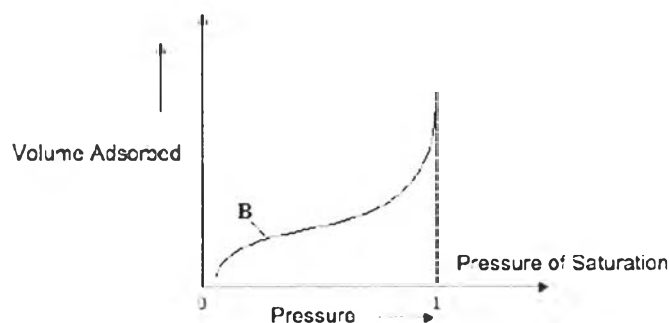
2.7.5 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนโดยใช้วิธีบีอีที (BET) [17]

การวัดพื้นที่ผิวภายในของวัสดุที่มีความพรุนทำได้โดยการศึกษาการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สอื่นที่มีขนาดเล็ก เช่น อาร์กอน โดยใช้ประโยชน์จากไอโซเทิร์มของการดูดซับทางกายภาพหรือวิธีบีอีที (BET ย่อมาจาก Brunauer-Emmett-Teller Method)

ไอโซเทิร์มแบบบีอีทีใช้สำหรับการดูดซับแบบหลายชั้นและการดูดซับทางกายภาพ สมมุติฐานของไอโซเทิร์มนี้เหมือนกับของแลงเมียร์ และมีข้อพิจารณาเพิ่มเติมคือ

1. ตัวถูกดูดซับอยู่ในผิวหน้าชั้นแรกจะเป็นตำแหน่งสำหรับตัวถูกดูดซับในชั้นถัดไป
2. อัตราเร็วของการดูดซับในชั้นที่ i จะเท่ากับอัตราเร็วของการคายในชั้นที่ $i+1$
3. เอนทัลปีของการดูดซับ ΔH_{ads} มีค่าเท่ากับสำหรับชั้นที่สองและชั้นต่อมาและจะเท่ากับความร้อนของการควบแน่น (heat of condensation) ของแก๊ส

การคำนวณพื้นที่ผิวภายในหาได้จากจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว การดูดซับของแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในภาพที่ 2.17 จะเกิดเร็วในช่วงแรกโดยจะเพิ่มตามความดันจนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนแปลง (ตำแหน่ง B) และเกิดการควบแน่นของแก๊สไนโตรเจนในรูพรุนของวัสดุที่มีความพรุนที่ต้องการหาพื้นที่ผิว ทำให้ปริมาตรของการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปภาพที่ 2. 17 การวัดพื้นที่ผิวโดยใช้วิธี BET [17]

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดันย่อยต่างๆ และปริมาตรที่ถูกดูดซับแล้วเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว คือสมการของบีอีที ดังแสดงในสมการที่ 2.17

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{CV_m} + \frac{(C-1)P}{V_m CP_0} \quad (\text{สมการที่ 2.17})$$

เมื่อ P คือ ความดันย่อยของแก๊สที่ถูกดูดซับ

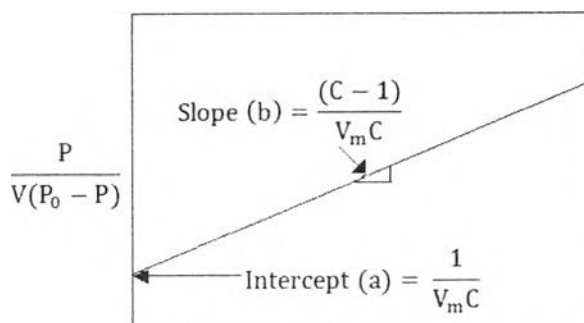
P_0 คือ ความดันอิ่มตัวของแก๊สที่ถูกดูดซับ ณ อุณหภูมิที่ศึกษา

V คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดัน P

V_m คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ทำให้เกิดการปกคลุมชั้นเดียว

C คือ ค่าคงที่

สมการที่ 2.17 นี้ เขียนได้ในรูปของกราฟเส้นตรง $y = a + bx$ เมื่อให้ x เป็น P/P_0 , y เป็น $P/V(P_0 - P)$, a คือ จุดตัดแกน y เป็น $1/V_m C$ และเทอม b คือ ความชัน เป็น $(C-1)/V_m C$ จากนั้นเขียนกราฟที่ได้จากการคำนวณในรูปเส้นตรงของสมการบีอีที ดังภาพที่ 2.18



รูปภาพที่ 2. 18 สมการ BET [17]

จากสมการของบีอีทีที่สามารถคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะของสารได้โดยนำปริมาตรของแก๊สที่ปกคลุมผิวของสารหรือ V_m ที่ได้จากสมการ 2.17 ไปคำนวณจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ 1 ชั้นโมเลกุล แล้วจึงนำไปคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะได้โดยใช้สมการที่ 2.18 ดังนี้

$$S_{sp} = \frac{N_A a_{max} S_0}{W} \quad (\text{สมการที่ 2.18})$$

เมื่อ S_{sp} คือพื้นที่ผิวจำเพาะของสาร (ตารางเมตรต่อกรัม)

N_A คือเลขอาโวกาโดร มีค่าเท่ากับ 6.02×10^{23} (จำนวนโมเลกุลต่อกรัมโมล)

a_{max} คือจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ 1 ชั้นโมเลกุล เท่ากับ $V_m/22,414$

S_0 คือพื้นที่ผิวหน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ มีค่าเท่ากับ 1.62×10^{-20} (ตารางเมตร)

W คือน้ำหนักของสารหรือตัวดูดซับ (กรัม)

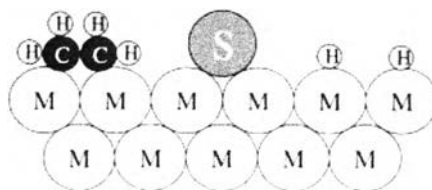
2.7.6 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Deactivation)

การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาคือการที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของตัวเร่งปฏิกิริยานี้เกิดจากสภาวะสิ่งแวดล้อมของระบบ จึงต้องมีการเปลี่ยนถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นระยะๆ ถ้าจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาทำงานได้เหมือนเดิมต้องนำตัวเร่งมาผ่านกระบวนการคืนสภาพ (Regeneration process) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปร่างสารที่เสื่อมสภาพให้กลับมาอยู่ในสภาพที่เร่งปฏิกิริยาได้อีกครั้งหนึ่ง

สาเหตุการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยามีดังนี้ [18]

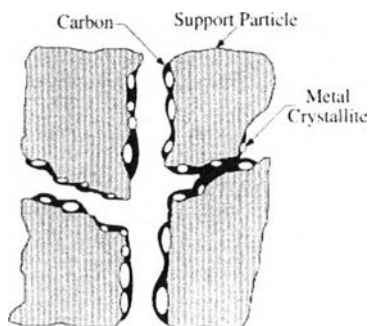
2.7.6.1 การเสื่อมสภาพของเม็ดอนุภาค คือการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับแรงกระแทกหรือแรงขัดสีที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ อาจทำให้เกิดการหลุดออกขององค์ประกอบบางตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลของเม็ดอนุภาคนั้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมักเป็นสาเหตุสืบเนื่อง คืออาจเกิดการแตกหรือเกิดผองอนุภาคไปอุดตันการไหล ซึ่งทำให้ระบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนรูปไป นำไปสู่การสะสมความร้อนเฉพาะที่ (Hot spot)

2.7.6.2 การเสื่อมสภาพเนื่องจากพอยซันนิง (Poisoning) เป็นการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดจากการเกาะติดของสารพอยซัน (Poison) บนพื้นที่กัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมีอย่างแข็งแรง (strong chemisorption) ทำให้สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปและไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของเอทิลีน โดยมีโลหะกัมมะถันเป็นสารพอยซันที่เกิดการดูดซับอยู่บนพื้นที่กัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ขัดขวางการเติมไฮโดรเจนของเอทิลีนดังรูปภาพที่ 2.19



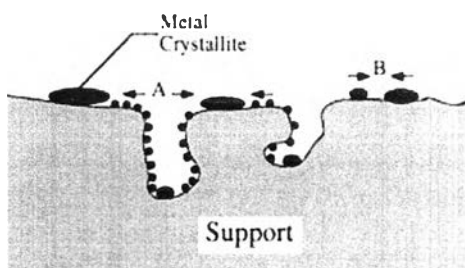
รูปภาพที่ 2. 19 การเกิดพอยซันนิงของปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของเอทิลีน [18]

2.7.6.3 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจากการเกิดถ่านโค้ก สำหรับปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน หรือ CO_x มักมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น ทำให้เกิดกลุ่มของคาร์บอนปกคลุมหรือปิดกั้นพื้นผิวกระตุ้นแบบกายภาพทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง เราเรียกกลุ่มคาร์บอนดังกล่าวว่าถ่านโค้ก แสดงในรูปภาพที่ 2.20



รูปภาพที่ 2. 20 การเกิดโค้กที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา [18]

2.7.6.4 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากการซินเทอริง (Sintering) เป็นการลดลงของพื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพโดยมีการปรับโครงสร้างภายในของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลจากความร้อนและทางกายภาพ ซินเทอริงสามารถเกิดได้ทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะบนตัวรองรับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวรองรับซึ่งเป็นการเคลื่อนที่มารวมกัน (migration) ของผลึกโลหะหรืออะตอมโลหะไปเป็นผลึกโลหะหรืออะตอมโลหะที่ใหญ่ขึ้น จะทำให้การกระจายตัวของอนุภาค ขนาดของอนุภาค และความสามารถในการระเหยของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา การเกิดซินเทอริงแสดงในรูปภาพที่ 2.21



รูปภาพที่ 2. 21 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซินเทอริง [18]

2.7.6.5 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงในสภาวะของแข็ง (Solid state transformation) เป็นการเสื่อมสภาพที่เป็นผลต่อเนื่องและรุนแรง เกิดขึ้นจากกระบวนการซินเทอริงที่อุณหภูมิสูงมากขึ้น กล่าวคือเกิดการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะกระตุ้นกับตัวรองรับ เช่น นิกเกิลกับ Al_2O_3 เกิดเป็นนิกเกิลอลูมินาต (nickel aluminate) ที่ 1000 องศาเซลเซียส

2.7.8 การแยกชนิดของน้ำมันดิบ [19-20]

ปัจจุบันวิธีแยกน้ำมันดิบจะแยกออกตามคาบจุดเดือดที่กว้างพอดีกับที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวสำเร็จรูปสามารถแบ่งได้เป็น

1. พวกที่มีคาบจุดเดือดตั้งแต่ IBP (Initial boiling point) จนถึง 200 องศาเซลเซียส เรียกว่า แก๊สโซลีน (gasoline fraction) มักใช้ในการผลิตน้ำมันเบนซิน
2. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 200 - 250 องศาเซลเซียส เรียกว่าน้ำมันก๊าด (kerosene fraction) มักใช้น้ำมันก๊าดเพื่อให้แสงสว่าง ถ้าจุดเกิดควันไม่ต่ำจนเกินไป น้ำมันก๊าดที่ได้จะมีคุณภาพดี แต่ถ้าจุดเยือกแข็งต่ำจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานไอพ่นได้ แต่ต้องขึ้นอยู่กับสมบัติเชื้อเพลิงอื่นๆด้วย
3. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 250 - 350 องศาเซลเซียส เราเรียกกันว่าแก๊สออยล์ชนิดเบา (light gas oil fraction) มักนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องยนต์
4. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 350 - 370 องศาเซลเซียส เรียกว่าแก๊สออยล์ (gas oil fraction) มักนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องยนต์ดีเซล
5. พวกที่มีคาบจุดเดือดสูงกว่า 370 องศาเซลเซียส เรียกว่ากากน้ำมัน (residue) นำไปใช้งานได้หลายอย่างขึ้นอยู่กับสมบัติของกากน้ำมัน เช่น นำมาใช้เป็นน้ำมันเตา ผลิตเป็นยางมะตอย หรือนำมาเป็นน้ำมันเครื่อง



งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Takuya Ito และคณะ [21] ศึกษาการนำน้ำมันที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นไบโอดีเซล โดยกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าที่อุณหภูมิ 360-390 °C ไตรกลีเซอไรด์แตกตัวเป็นสารไฮโดรคาร์บอนสายสั้นและกรดไขมันสายสั้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 420 °C จะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ของกรดไขมันได้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล อีกทั้งการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/C เป็นการส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สูง นอกจากนี้ยังปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิต่ำให้ดีขึ้นอีกด้วย

งานวิจัยของ M.A. Kalam และ H.H. Masjuki [22] ศึกษาการปลดปล่อยและการสะสมไว้ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อนำน้ำมันปาล์มดิบและอิมัลชันของน้ำมันปาล์มดิบที่ผสมด้วยน้ำ 1%, 2% และ 3% ไปดำเนินการทดลองในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ที่สภาวะการทดลองเป็นเวลา 100 ชั่วโมงด้วยความเร็วคงที่ที่ 2700 รอบต่อนาที และโหลด 5.50 Nm ในการศึกษาลักษณะการสูญเสียน้ำหนักด้วยเครื่อง TGA ของน้ำมันปาล์มดิบและอิมัลชันของน้ำมันปาล์มดิบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ในบรรยากาศไนโตรเจน พบว่าการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันปาล์มดิบจะเกิดขึ้นชัดเจนในช่วงอุณหภูมิ 150 – 450 องศาเซลเซียส จากนั้นที่ 450 – 825 องศาเซลเซียส พบว่าการสลายตัวจะเริ่มคงที่

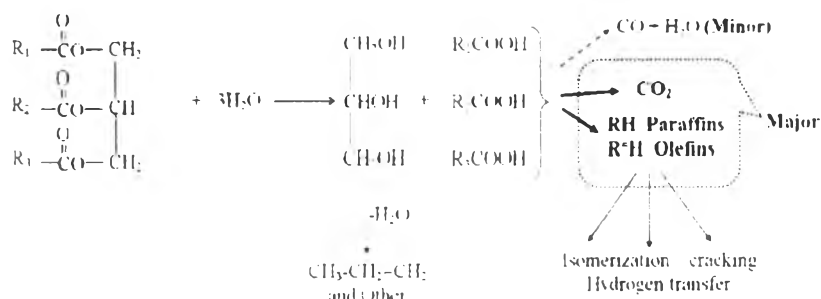
งานวิจัยของ Haruki Tani และคณะ [23] ได้ศึกษาการพัฒนากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลจากน้ำมันและไขมันโดยไม่ใช้เมทานอลและไฮโดรเจนจึงไม่มีกลีเซอรินเกิดขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นของเหลว $C_{10}-C_{20}$ ซึ่งประกอบด้วยโอเลฟินและพาราฟิน ทั้งโซ่ตรงและโซ่กิ่ง เมื่อเปรียบเทียบการใช้ $MgO-SiO_2$ และ $MgO-Carbon$ ในน้ำมันพืชชนิดต่างๆพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก $MgO-Carbon$ มีค่าความเป็นกรดต่ำกว่า $MgO-SiO_2$ และได้เปรียบเทียบจำนวนคาร์บอนของผลิตภัณฑ์จากการนำน้ำมันปาล์มไปทำการแตกตัวด้วยความร้อนโดยมี SiO_2 และ MgO/SiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า MgO ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนคาร์บอนของผลิตภัณฑ์ จำนวนคาร์บอนนั้นขึ้นอยู่กับน้ำมันที่นำมาทำปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนเหลวและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมาจากการที่มีน้ำเล็กน้อยในการทำปฏิกิริยาจึงไปไฮโดรไลซิสไตรกลีเซอไรด์ได้กลีเซอรินและกรดไขมัน จากนั้น MgO เข้าไปทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันได้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนทั้งพาราฟินและโอเลฟิน อีกทั้งได้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์

งานวิจัยของ Pramila Tamunaidu และคณะ [24] ศึกษาการแตกตัวของมันปาล์มเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น zeolite REY ใน transport riser reactor ที่อุณหภูมิ 400–500 °C สัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันปาล์ม 5–10 g/g^{-1} และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา



10–30 วินาที พบว่าสภาวะที่ทำให้ได้น้ำมันที่อยู่ในช่วงแกโซลีนมากที่สุดคือที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 20 วินาที และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันปาล์ม 5 g/g⁻¹

งานวิจัยของ H. Tani [25] และคณะศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์ที่มีความจำเพาะในการได้ผลิตภัณฑ์เป็นดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SiO₂, MgO-SiO₂, carbon, MgO-carbon, Spent FCC และ MgO พบว่าการใช้ MgO-carbon เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวของน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 430 °C ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันที่มีค่าความเป็นกรดและค่าไอโอดีนต่ำ ร้อยละของน้ำมันสูงถึง 64.9 และได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง จึงกล่าวได้ว่า MgO ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ของไตรกลีเซอไรด์หรือกรดไขมันอิสระ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารไฮโดรคาร์บอนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังปฏิกิริยา



โดยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดจากการที่กรดไขมันอิสระทำปฏิกิริยากับ MgO ได้ผลิตภัณฑ์เป็น MgCO₃ และสารไฮโดรคาร์บอน



ส่วน MgCO₃ จะสลายตัวกลายเป็น MgO และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



งานวิจัยของ Xu Junming และคณะ [26] ศึกษาการนำน้ำมันที่มาจากพืช เช่น น้ำมันดุน้ำมันปาล์ม และน้ำมันสบู่ดำมาทำปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking) ที่อุณหภูมิ 450-500 °C และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Al₂O₃, MCM-41 และ CaO พบว่าเมื่อใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความเป็นกรดลดลงและมีคุณสมบัติในการไหลในอุณหภูมิต่ำได้ดีโดยดูจากค่า cold flow filter plugging point และ freezing point ที่มีค่าต่ำ

งานวิจัยของ Denghui Wang และคณะ [27] ศึกษาการไพโรไลซิสของซังข้าวโพดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส CaO และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา ตรวจสอบโดย

เครื่อง thermogravimetry analyzer ควบคู่กับ Fourier transform infrared spectroscopy (TGA-FTIR) พบว่าการไพโรไลซิสที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น CaO ซึ่งเป็นเบส ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบคาร์บอนิลลดลง และได้ฟีนอล สารไฮโดรคาร์บอน และมีเทนมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา MCM-41 ดังนั้น CaO จึงมีความสามารถในการลดค่าความเป็นกรดและเปลี่ยนสารตั้งต้นให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ดีกว่า MCM-41

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์นั้นมีความจำเพาะเจาะจงต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นช่วงการกลั่นของดีเซลซึ่งมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมและคมนาคมอย่างยิ่ง และแมกนีเซียมออกไซด์ยังช่วยลดความเป็นกรดของน้ำมันให้ต่ำลงด้วย อีกทั้งน้ำมันที่จะนำมาวิจัยเป็นน้ำมันที่หีบมาจากทะเลลายปาล์มเปล่านั้นจะนำไปเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยน้ำมันที่ได้นี้มีมากถึง 6 ตันต่อวัน ซึ่งหากนำไปทิ้งต้องใช้พื้นที่จำนวนมากในการรองรับ จึงนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

