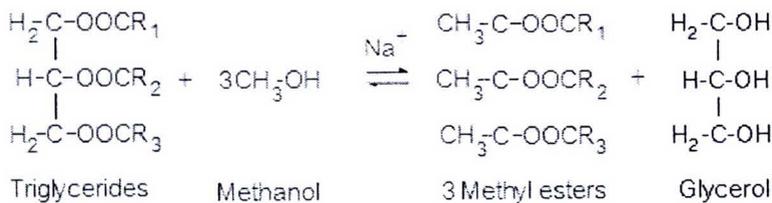


## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

วิกฤตการณ์ด้านเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์ของโลกมีมากขึ้นเป็นลำดับ เนื่องจากราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกปรับตัวสูงขึ้นจากการคาดการณ์ว่าแหล่งน้ำมันปิโตรเลียมกำลังจะหมดลงในอีก 50 ปีข้างหน้า รวมถึงปัญหาทางภาคการเกษตรด้านผลผลิตล้นตลาด ราคาตกต่ำและที่สำคัญ คือ ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่มีเพิ่มมากขึ้นส่งผลกระทบต่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ปัญหาต่างๆเหล่านี้ทำให้มีการมองหาพลังงานทางเลือกใหม่มาทดแทน ซึ่งไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกอันดับต้นๆที่นำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม โดยมีไตรกลีเซอไรด์ที่อยู่ในน้ำมันพืชและไขสัตว์ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบหมุนเวียนที่ยั่งยืนเป็นสารตั้งต้น การผลิตไบโอดีเซลนิยมทำผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์เพื่อผลิตเป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (ไบโอดีเซล) ดังสมการในรูปที่ 2.1 และได้กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (by-product)



รูปที่ 2.1 สมการเคมีทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล

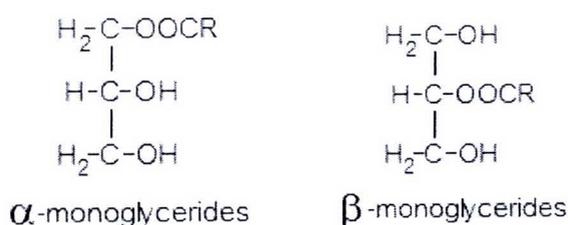
ปัจจุบันปริมาณกลีเซอรอลที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันมีมากขึ้นตามความต้องการและปริมาณการใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทดแทน โดยไบโอดีเซล 90 กิโลกรัมที่ผลิตได้จะเกิดกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง 10 กิโลกรัม เมื่อนำกลีเซอรอลมาทำให้บริสุทธิ์ขึ้นสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารเคมีเพิ่มมูลค่า (value-added chemicals) ได้หลากหลายชนิด เช่น โมโนกลีเซอไรด์ (monoglycerides) หรือกรดไขมันโมเลกุลเดี่ยวของกลีเซอรอล (fatty acid monoesters of glycerol) ซึ่งเป็นหนึ่งในอนุพันธ์ของกลีเซอรอลที่นิยมใช้เป็นอิมัลซิฟายเออร์ (emulsifiers) ในอุตสาหกรรมอาหาร ยา และเครื่องสำอาง เป็นต้น [1,2]

โมโนกลีเซอไรด์สามารถสังเคราะห์ผ่านทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไขมันหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดหรือเบส โดยเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นดินเหนียวชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเป็นเบส ซึ่งน่าจะนำมาใช้ในการเร่งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแต่ลักษณะโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ไม่เหมาะสำหรับการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรง เนื่องจากมีระยะห่างช่องว่างระหว่างชั้นหรือรูพรุนที่แคบ ซึ่งจะส่งผลให้สารตั้งต้นที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่แพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาได้ยาก นอกจากนั้นภายในช่องว่างระหว่างชั้นมีไอออนประจุลบ (anion) ที่มีความเป็นเบสต่ำ เช่น คาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) จึงนิยมนำเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ไปผ่านกระบวนการปรับปรุงลักษณะสมบัติด้วยวิธีต่างๆ ก่อนใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการสังเคราะห์แมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และการปรับปรุงลักษณะสมบัติด้วยการสอดแทรกแอลคอกไซด์ไอออนเข้าไปภายในช่องว่างระหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้เพื่อขยายระยะห่างช่องว่างระหว่างชั้นหรือรูพรุนและเพิ่มสมบัติความเป็นเบสให้มีความเหมาะสมต่อการเร่งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของเมทิลลอรเรตกับกลีเซอรอลในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์

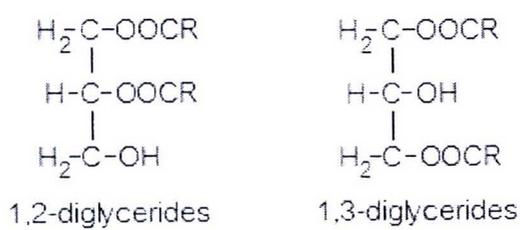
## 2.2 การสังเคราะห์อนุพันธ์กลีเซอไรด์ (synthesis of glyceride derivatives) [2,3]

การสังเคราะห์อนุพันธ์กลีเซอไรด์ในระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) ชนิดกรด เช่น กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) กรดฟอสฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) และตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบส เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอไรด์ผสมของ โมโน-, ได- และไตรกลีเซอไรด์ในสัดส่วน 40, 50 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และจำเป็นต้องนำไปกลั่นแยกโมเลกุลให้ได้อนุพันธ์ที่มีความบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงและทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายเพิ่ม นอกจากนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ต้องมีขั้นตอนการสะเทิน (neutralization) เพื่อหยุดปฏิกิริยาทำให้เกิดสบู่และเกลือในปริมาณมาก ดังนั้นจึงมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์แทนเพื่อลดปัญหาดังกล่าวเนื่องจากมีข้อดี คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้แยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย มีการเลือกจำเพาะต่อการเกิดผลิตภัณฑ์สูง ช่วยลดขั้นตอนการสะเทินและลดพลังงานที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์

อนุพันธ์กลีเซอไรด์ที่ได้รับความนิยมมี 2 ชนิด ได้แก่ โมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ [4] โครงสร้างของโมโนกลีเซอไรด์ แบ่งออกเป็น 2 ไอโซเมอร์ คือ  $\alpha$ -โมโนกลีเซอไรด์ และ  $\beta$ -โมโนกลีเซอไรด์ ดังรูปที่ 2.2 ส่วนไดกลีเซอไรด์ก็มี 2 ไอโซเมอร์ เช่นกัน คือ 1,2-ไดกลีเซอไรด์ และ 1,3-ไดกลีเซอไรด์ ดังรูปที่ 2.3



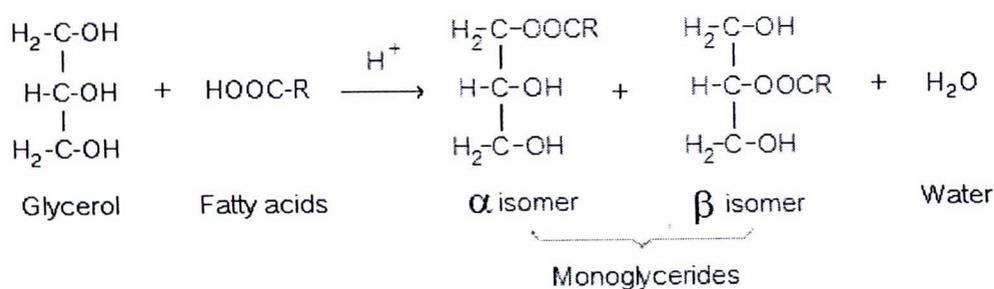
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีทั่วไปของโมโนกลีเซอไรด์



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีทั่วไปของไดกลีเซอไรด์

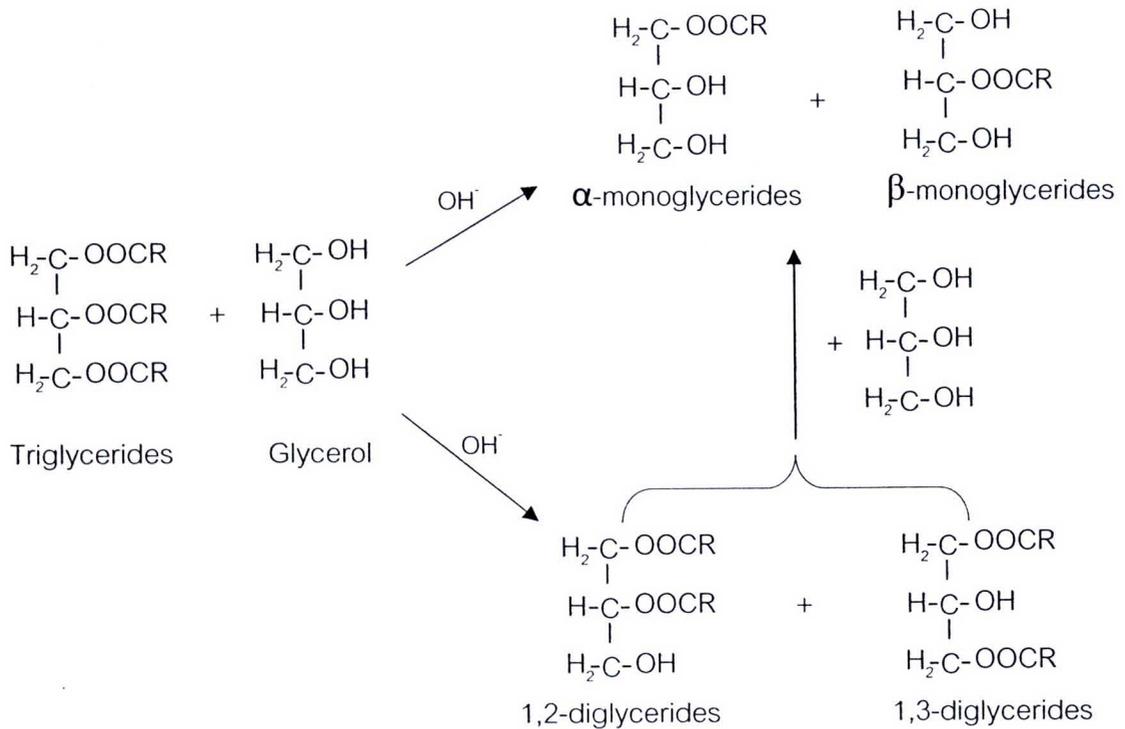
ในอุตสาหกรรมอนุพันธ์กลีเซอไรด์สามารถสังเคราะห์ได้จาก 2 ปฏิกิริยาหลัก ได้แก่

1) เอสเทอริฟิเคชัน (esterification) ของกรดไขมัน (fatty acid) หรือกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) กับกลีเซอรอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์หรือวิวิธพันธุ์ชนิดกรด ภายใต้ภาวะไนโตรเจน ดังรูปที่ 2.4

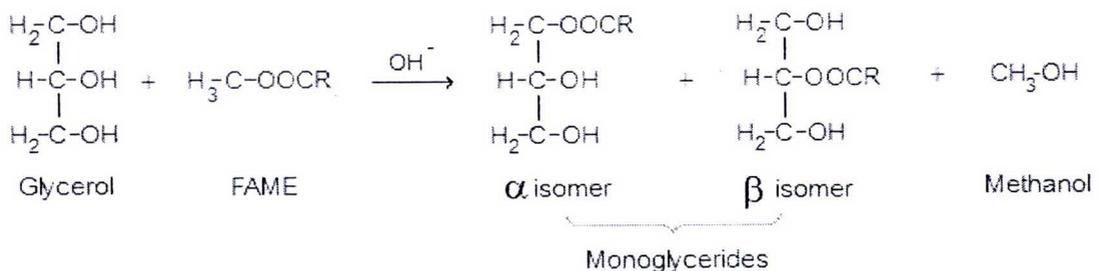


รูปที่ 2.4 สมการเคมีเอสเทอริฟิเคชันของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน

2) ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) ของไตรกลีเซอไรด์หรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl esters ; FAME) กับกลีเซอรอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์หรือวิธีพ่นธุ้ชนิดเบส ภายใต้ภาวะไนโตรเจน ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 สมการเคมีทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับกลีเซอรอล

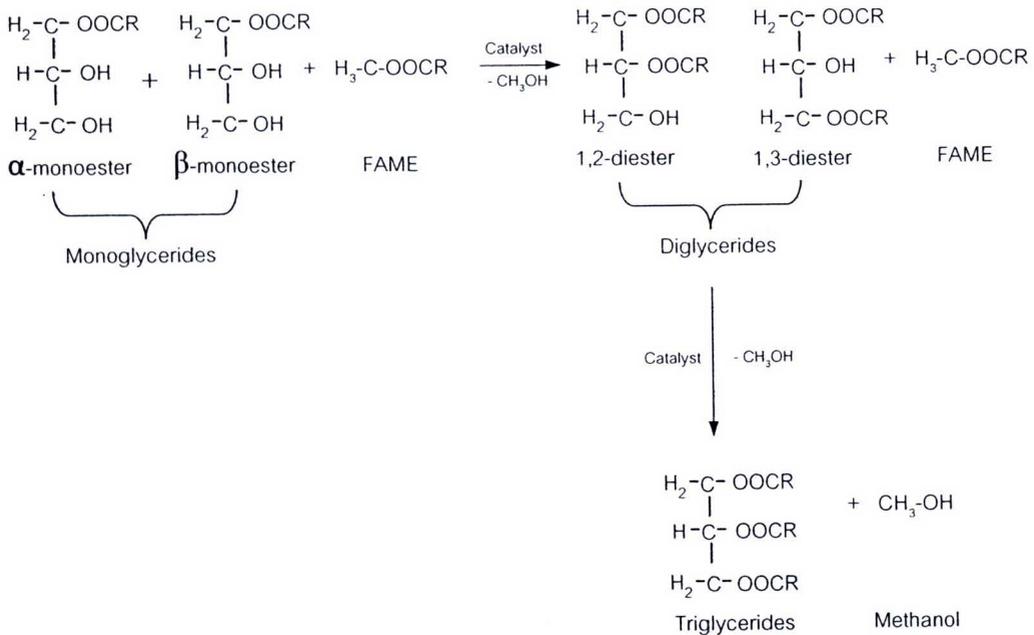


รูปที่ 2.6 สมการเคมีทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอรอล

ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอรอลเป็นปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ เนื่องจากใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันกับกลีเซอรอล โดยเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นได้มาจากกระบวนการเมทานอลิซิส (methanolysis) ของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชหรือไขสัตว์

ซึ่งสามารถแยกให้บริสุทธิ์ได้ง่ายและมีฤทธิ์กัดกร่อนน้อยกว่ากรดไขมัน นอกจากนั้นการใช้เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีข้อดีกว่าการใช้ไตรกลีเซอไรด์โดยตรงเป็นสารตั้งต้น เนื่องจากเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันมีขั้วมากกว่าไตรกลีเซอไรด์จึงละลายเข้ากับกลีเซอรอลได้มากกว่า ปฏิกริยาจึงเกิดได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมาก คือ ระหว่าง 120-230 องศาเซลเซียส ขณะที่ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับกลีเซอรอลต้องใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 260 องศาเซลเซียส

โมโนกลีเซอไรด์ที่เกิดผ่านทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับสารตั้งต้นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันได้เป็นไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งโมโนกลีเซอไรด์ที่สังเคราะห์ผ่านเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลกับกรดไขมันก็สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบเดียวกันนี้ได้เช่นกัน

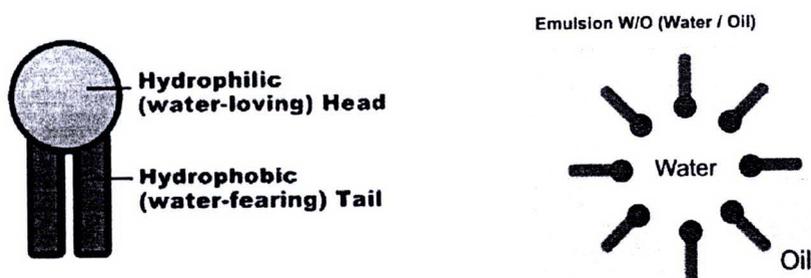


รูปที่ 2.7 สมการเคมีทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์กับเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

อนุพันธ์กลีเซอไรด์นิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ [5] เช่น

- 1) สารอิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) ในอุตสาหกรรมอาหาร ยา และเครื่องสำอางค์ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์คล้ายสารลดแรงตึงผิว (surfactant) คือ มีส่วน

หัวที่ชอบน้ำ (hydrophilic head) และส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic tail) ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะช่วย  
ให้ส่วนผสมหรือสารออกฤทธิ์ทางยาที่มีลักษณะชอบน้ำและไม่ชอบน้ำเข้ากันได้ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วย  
เพิ่มความสามารถในการดูดซับยาผ่านผิวหนังได้ด้วย



รูปที่ 2.8 โครงสร้างอย่างง่ายของสารลดแรงตึงผิว [5]

2) สารหล่อลื่น (lubricant) ในอุตสาหกรรมเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (engine oil), น้ำมันหล่อลื่นสำหรับตัดกลึงโลหะ (metal cutting fluid), น้ำมันเกียร์ (gear oil) และ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน หรือเรียกว่า Bio-Lubricant เป็นต้น สารหล่อลื่นประเภทเอสเทอร์และพอลิโอเลสเตอร์ (polyesters) มีสมบัติทั่วไปคือ มีค่าดัชนีความหนืด (viscosity index) สูง, จุดไหลเท (pour point) ต่ำ, อัตราการระเหย (Volatility) ต่ำ, อัตราการทนต่อความร้อน (Thermal Stability) สูงและมีความเป็นพิษต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้ง่าย สามารถลดความฝืดและการสึกหรอในเครื่องจักร และช่วยให้ผลิตภัณฑ์หลุดออกจากอุปกรณ์การผลิตได้ง่าย

### 2.3 การเร่งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

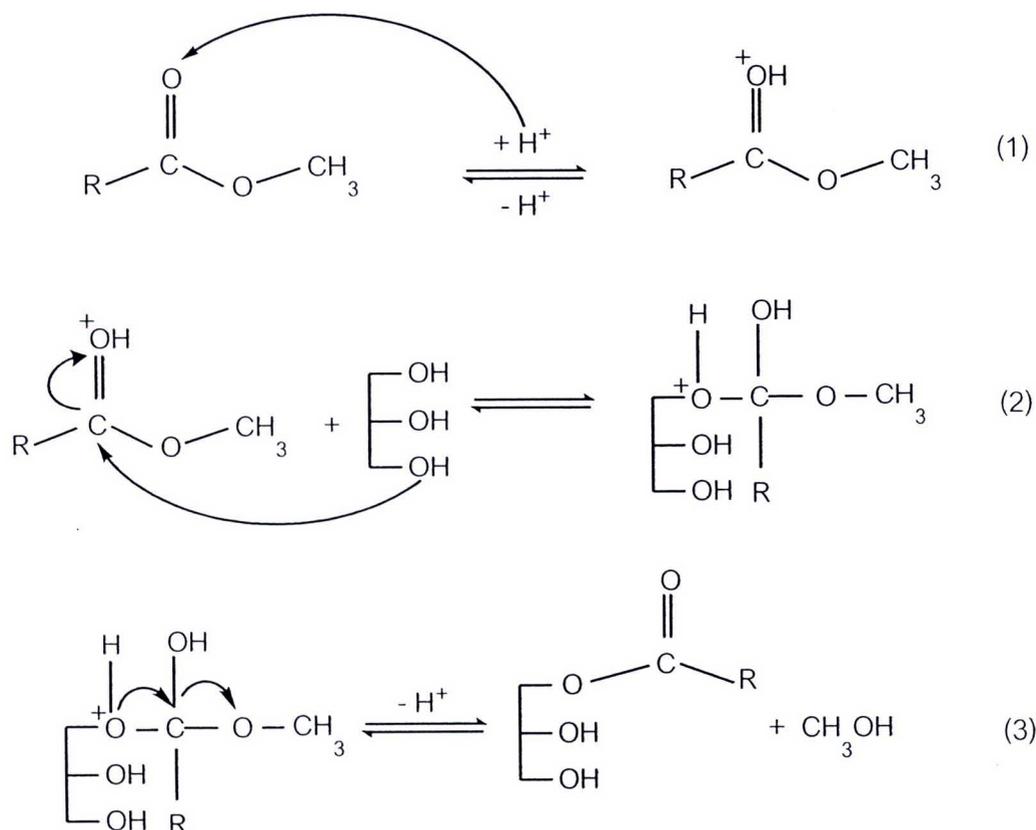
ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) มีความหมายในเชิงเคมี คือ ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนหมู่แอลคอกซิล (alkoxyl group, RO-) ของเอสเทอร์ด้วยแอลกอฮอล์

การทำทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสำหรับการสังเคราะห์อนุพันธ์กลีเซอไรด์เป็นปฏิกิริยาระหว่างเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอรอลเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารประกอบโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ ดังแสดงในรูป 2.6 และ 2.7 จากรูป พบว่า 1 โมลของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันทำปฏิกิริยาพอดีกับ 1 โมลกลีเซอรอลเกิดเป็นโมโนกลีเซอไรด์ 1 โมล แต่เนื่องจากปฏิกิริยานี้สามารถผันกลับได้ (reversible) ในทางปฏิบัติจึงต้องใช้ปริมาณกลีเซอรอลให้มากเกินไป เพื่อให้สมดุลเลื่อนไปทางขวาทำให้ได้ผลได้ (yield) ของโมโนกลีเซอไรด์สูงขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีทั้งชนิดกรดและเบส ซึ่งกลไกในการเร่งปฏิกิริยาของกรดและเบสจะแตกต่างกัน

แสดงดังรูปที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ ในกระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสมากกว่า เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนภายในเครื่องปฏิกรณ์

### 2.3.1 การเร่งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกรด

กลไกการเร่งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอรอลด้วยกรด แสดงด้วยสมการดังนี้



รูปที่ 2.9 กลไกการเร่งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากรด

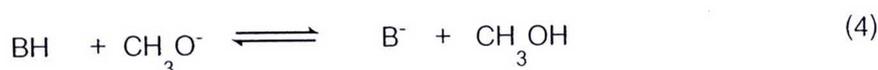
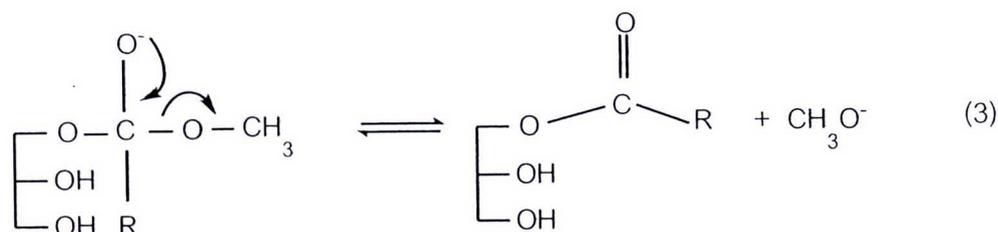
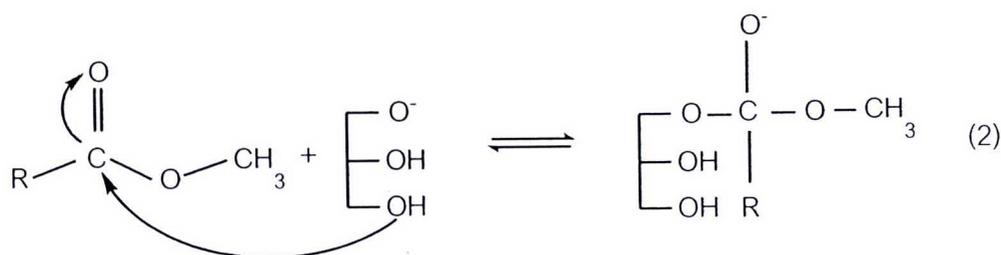
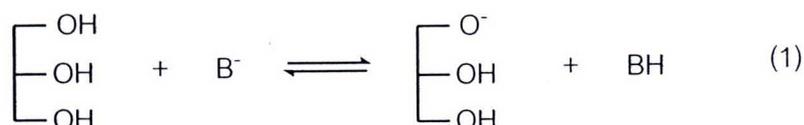
จากรูปที่ 2.9 การเร่งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากรดแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

- (1) โปรตอนเนชัน (protonation) ที่ตำแหน่งหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) ของสารตั้งต้นเอสเทอร์ เกิดเป็นคาร์โบเนียมไอออน (carbonium ion)
- (2) หมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอลเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์โบเนียมไอออนเกิดเป็นสารตัวกลางทรงสี่หน้า (tetrahedral intermediate) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยา (rate determining step)

- (3) การจัดเรียงโมเลกุลของสารตัวกลางพร้อมกับดีโปรโตเนชัน (deprotonation) และได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทานอล

### 2.3.2 การเร่งปฏิกิริยาด้วยเบส

กลไกการเร่งทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอรอลด้วยเบส แสดงด้วยสมการดังนี้



**รูปที่ 2.10** กลไกการเร่งทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเบส

จากรูปที่ 2.10 การเร่งทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเบสแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ

- (1) การทำปฏิกิริยาของเบสกับกลีเซอรอลได้กลีเซอไรด์ไอออน (glyceroxide ion) กับเบสที่ถูกดีโปรโตเนต
- (2) กลีเซอไรด์ไอออนเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเกิดเป็นสารตัวกลางทรงสี่หน้า (tetrahedral intermediate)

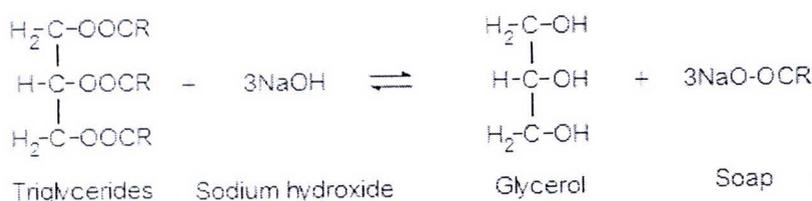
- (3) การจัดเรียงโมเลกุลของสารตัวกลางได้ผลิตภัณฑ์เป็นโมโนกลีเซอไรด์และเมทอกไซด์ไอออน
- (4) ดีโปรโตเนชันของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเมทอกไซด์ไอออน ซึ่งทำให้ได้เมทานอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงและตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะภาพพร้อมทำงานเช่นเดิม

โมโนกลีเซอไรด์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอรอลสามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเกิดเป็นอนุพันธ์ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ตามลำดับ

## 2.4 กลีเซอรอล (glycerol) [4,6]

กลีเซอรอลเป็นสารอินทรีย์ประเภทแอลกอฮอล์ มีสูตรเคมีคือ  $C_3H_5(OH)_3$  ซึ่งเป็นไตรไฮดริกแอลกอฮอล์ (trihydric alcohol) สมบัติทางเคมีทั่วไปของกลีเซอรอลคล้ายคลึงกับแอลกอฮอล์ อะตอมไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิลมีสมบัติเป็นกรดที่อ่อนมากและสามารถเปลี่ยนเป็นหมู่ฟังก์ชันอื่นได้ง่าย

กลีเซอรอลผลิตได้จากทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์จากน้ำมันพืชและไฮลด์รฟ์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักในการผลิตไบโอดีเซลดัง (รูปที่ 2.1) หรือ ผลิตได้จากปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชัน (saponification) ที่ใช้สำหรับการผลิตสบู่ ดังสมการเคมีในรูปที่ 2.11



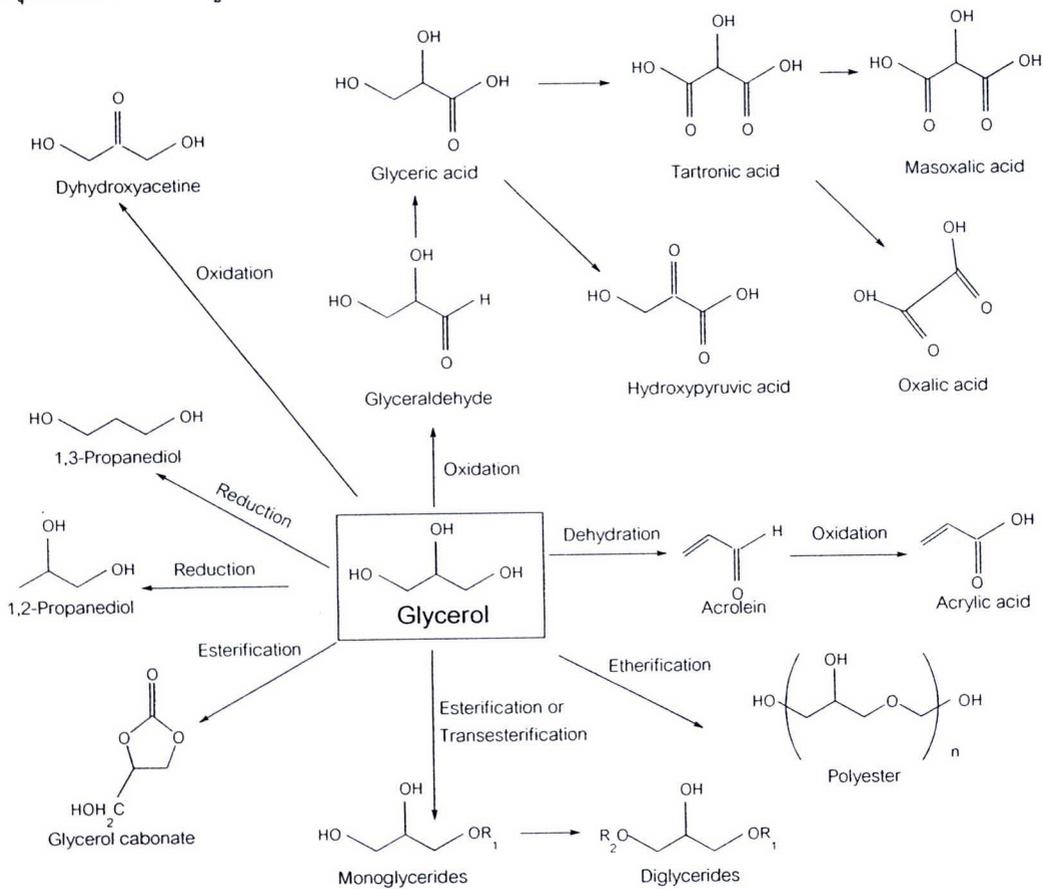
รูปที่ 2.11 สมการเคมีแซพอนิฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเบส

แซพอนิฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์เป็นปฏิกิริยาที่ไตรกลีเซอไรด์ถูกแยกสลาย ด้วยน้ำโดยมีเบสเข้าร่วม (alkaline hydrolysis) เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide, KOH) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลและเกลือของกรดไขมันหรือสบู่ ส่วนทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ เป็นปฏิกิริยาที่หมู่แอลคอกซี (alkoxy group) ของไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์

ปัจจุบันปริมาณกลีเซอรอลที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลผ่านทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีมากขึ้นตามความต้องการของการใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม โดยใน



การผลิตไบโอดีเซล 9 กิโลกรัม ให้กลีเซอรอลดิบเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงประมาณ 1 กิโลกรัมหรือคิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ แม้ว่ากลีเซอรอลสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมได้ แต่โครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอลที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลถึงสามหมู่ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นหมู่ฟังก์ชันอื่นได้ง่าย จึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มสนใจศึกษาการใช้กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตสารเคมีมูลค่าเพิ่ม (value-added chemicals) ชนิดต่างๆ โดยผ่านปฏิกิริยาต่างๆ เช่น ออกซิเดชัน (oxidation) รีดักชัน (reduction) อีเทอร์ฟิเคชัน (etherification) เป็นต้น ดังสรุปเป็นภาพรวมในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 สารเคมีมูลค่าเพิ่มชนิดต่างๆที่ผลิตได้จากกลีเซอรอล [6]

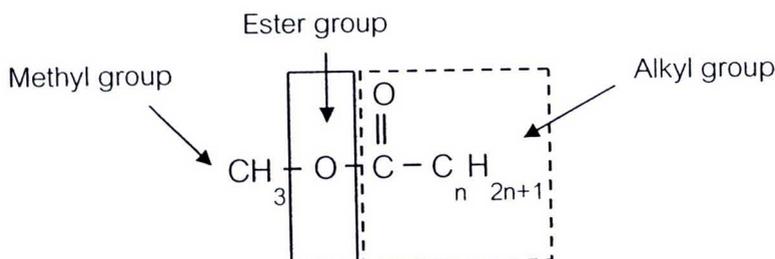
กลีเซอรอล เป็นส่วนประกอบหนึ่งในเครื่องสำอางที่ให้ความชุ่มชื้นแก่ผิวหรือที่เรียกกันทั่วไปว่า มอยส์เจอไรเซอร์ (moisturizer) เป็นสารให้ความหวาน (sweeteners) ในยา ยาสีฟัน และอาหารลดความอ้วน เป็นต้น





## 2.5 เมทิลเอสเทอร์ (methyl esters) [7]

เมทิลเอสเทอร์ (methyl esters) หรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl esters, FAME) เป็นสารอินทรีย์ประเภทเอสเทอร์ที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาว โดยมีโครงสร้างทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.13 และสูตรทั่วไป คือ  $\text{CH}_3\text{OCOC}_n\text{H}_{2n+1}$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนเต็มใดๆ



รูปที่ 2.13 โครงสร้างทั่วไปของเมทิลเอสเทอร์

เมทิลเอสเทอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากการเร่งปฏิกิริยาด้วยเบสระหว่างไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชหรือไขสัตว์กับเมทานอล ดังที่ได้กล่าวแล้วตามสมการรูปที่ 2.1 โดยปกติสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของเมทิลเอสเทอร์จะมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนในช่วง  $\text{C}_8\text{--C}_{18}$  ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สูตรเคมีทั่วไปของเมทิลเอสเทอร์ชนิดต่างๆ

ชื่อเมทิลเอสเทอร์	จำนวน C อะตอมของหมู่แอลคิล (R group)	สูตรเคมีทั่วไป
เมทิลแคปโรเลต (Methyl caprylate)	8	$\text{CH}_3\text{OCOC}_7\text{H}_{15}$
เมทิลแคเพรต (Methyl caprate)	10	$\text{CH}_3\text{OCOC}_9\text{H}_{19}$
เมทิลอันเดคะโนเอต (Methyl undecanoate)	11	$\text{CH}_3\text{OCOC}_{10}\text{H}_{21}$
เมทิลลอเรต (Methyl laurate)	12	$\text{CH}_3\text{OCOC}_{11}\text{H}_{23}$
เมทิลไมริสเตต (methyl myristate)	14	$\text{CH}_3\text{OCOC}_{13}\text{H}_{27}$

ตารางที่ 2.1 สูตรเคมีทั่วไปของเมทิลเอสเทอร์ชนิดต่างๆ (ต่อ)

ชื่อเมทิลเอสเทอร์	จำนวน C อะตอมของหมู่แอลคิล (R group)	สูตรเคมีทั่วไป
เมทิลปาล์มิตเตต (Methyl palmitate)	16	$\text{CH}_3\text{OCOC}_{15}\text{H}_{31}$
เมทิลเฮปตะเดคาโนเอต ( Methyl heptadecanoate )	17	$\text{CH}_3\text{OCOC}_{16}\text{H}_{33}$
เมทิลลิโนเลต (Methyl linolate)	18:2	$\text{CH}_3\text{OCOC}_{17}\text{H}_{35}$
เมทิลโอเลเอต (Methyl oleate)	18:1	$\text{CH}_3\text{OCOC}_{17}\text{H}_{35}$
เมทิลสตีเรต (Methyl stearate)	18:0	$\text{CH}_3\text{OCOC}_{17}\text{H}_{35}$

เมทิลเอสเทอร์สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงไบโอดีเซลหรือเป็นสารตัวกลาง (intermediates) ในอุตสาหกรรมโอเลโอเคมิคอลล (oleochemical industry) เพื่อผลิตสารมูลค่าเพิ่มชนิดต่างๆ เช่น สารลดแรงตึงผิว อิมัลซิฟายเออร์ สารเติมแต่งในอาหาร สารหล่อลื่น เป็นต้น

## 2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysts) [8,9]

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่เพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นโดยที่ตัวมันเองไม่ถูกใช้อย่างถาวรในปฏิกิริยา แม้ว่าอาจมีส่วนร่วมในบางขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา แต่ในที่สุดจะเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปเดิมหลังจากที่ปฏิกิริยาลิ้นสุดแล้ว การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดผ่านการสร้างพันธะเคมีกับสารตั้งต้นอย่างน้อยหนึ่งชนิด

### 2.6.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งตามสถานะเทียบกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalysts) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ทั้งในสถานะแก๊สหรือของเหลว ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มีตำแหน่งการเร่งปฏิกิริยาชัดเจน เช่น กรดซัลฟิวริก โพลีเอทิลีน ไนโตรเจนไดออกไซด์ สารประกอบโลหะอินทรีย์ (organometallic compounds) ที่มีลิแกนด์ไม่อิ่มตัว (unsaturated ligand)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์อยู่ในสถานะเดียวกับสารตั้งต้น จึงมีข้อดีคือ มีข้อจำกัดในการถ่ายโอนมวล (mass-transfer limitation) ต่ำ จึงให้อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาสูง ในภาวะการทำปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรง แต่มีข้อเสียคือการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก บางกรณีต้องมีการสะเทินเพื่อหยุดปฏิกิริยา วิธีการส่วนใหญ่ที่ใช้ในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ คือ การกลั่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การล้างด้วยน้ำ นอกจากนั้นการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ทำได้ยาก และมีอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาสั้น

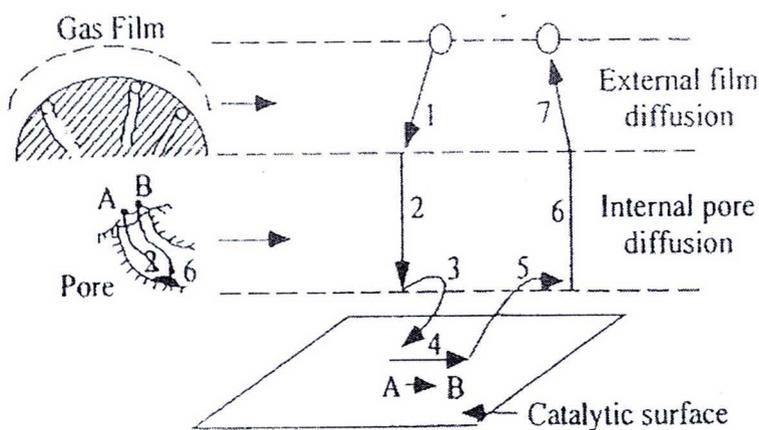
2) ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalysts) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง ส่วนสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลว ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์คือ สามารถแยกออกจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ ช่วยลดปริมาณการใช้สารเคมีและพลังงาน ลดปริมาณของเสียจากกระบวนการ สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้และทนทานต่อความดันและอุณหภูมิสูง จึงสามารถใช้ในภาวะที่มีอุณหภูมิหรือความดันสูงได้ ตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าและยังสามารถเพิ่มผลได้ของผลิตภัณฑ์ (product yield) และการเลือกจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ (product selectivity) ที่ต้องการ โดยการดัดแปรลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาให้เหมาะสมกับปฏิกิริยาที่ใช้

## 2.6.2 การเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalysis) [10]

การเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์เกิดขึ้นบนผิวสัมผัส (interface) ระหว่างสารตั้งต้นที่เป็นแก๊สหรือของเหลวกับตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ โดยทั่วไปกลไกการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์สามารถอธิบายเป็น 7 ขั้นตอน (รูปที่ 2.14) ดังนี้

- 1) การถ่ายโอนของมวลสารตั้งต้นจากของไหลภายนอกไปยังผิวสัมผัสระหว่างของไหลและของแข็ง (พื้นผิวด้านนอกของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา) โดยอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นเป็นแรงขับเคลื่อน (driving force)

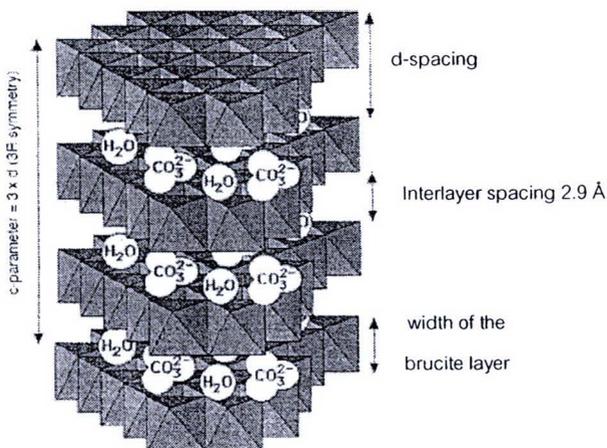
- 2) ในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นรูพรุน สารตั้งต้นจะแพร่เข้าสู่ภายในอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา (intraparticle diffusion) โดยอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1
- 3) การดูดซับ (adsorption) สารตั้งต้นบนตำแหน่งที่ว่องไว (active site) ภายในของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการสร้างพันธะเคมี หรือการดูดซับทางเคมี (chemisorption) ซึ่งจะเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (monolayer)
- 4) สารตั้งต้นที่ถูกดูดซับเกิดปฏิกิริยาบนตำแหน่งที่ว่องไวบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็นสารผลิตภัณฑ์ ปฏิกิริยาโดยทั่วไปขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยารวม
- 5) การคายสารผลิตภัณฑ์จากตำแหน่งที่ว่องไว ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นเมื่อปฏิกิริยาของสารตั้งต้นที่ถูกดูดซับไว้อยู่ในภาวะสมดุลแล้ว สารผลิตภัณฑ์จะถูกปล่อยออกจากตำแหน่งที่ว่องไว
- 6) การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์จากตำแหน่งที่ว่องไวผ่านรูพรุนออกสู่พื้นผิวด้านนอกของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา โดยภายในรูพรุนจะมีความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์สูงกว่าพื้นผิวด้านนอกของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา การแพร่จึงเกิดขึ้นเอง
- 7) การถ่ายโอนมวลของสารผลิตภัณฑ์จากพื้นผิวด้านนอกของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านชั้นฟิล์มที่ปกคลุมตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังของไหลภายนอก โดยอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 6



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ [10]

## 2.7 เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered double hydroxide) [11-16]

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์หรือสารประกอบแบบไฮดรทัลไซต์ (hydrotalcite-like compounds, HTLc) มีการสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกในระดับห้องปฏิบัติการในปี ค.ศ.1942 เมื่อ Feithnecht ทำการผสมระหว่างสารละลายเกลือโลหะกับเบส โดยในขณะนั้นยังไม่สามารถวิเคราะห์หาโครงสร้างที่แน่ชัดได้ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1960 Almann และ Taylor ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของของแข็งที่ได้ด้วยเทคนิค XRD พบว่า เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ประกอบด้วยชั้นของโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุเป็นบวกจัดเรียงซ้อนกัน โดยมีไอออนประจุลบและโมเลกุลน้ำอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้น เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่พบประกอบด้วยแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต มีสูตรทางเคมี คือ  $Mg_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$  ซึ่งมีคาร์บอเนตเป็นไอออนประจุลบภายในช่องว่างระหว่างชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างของแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ [ $Mg_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$ ] [15]

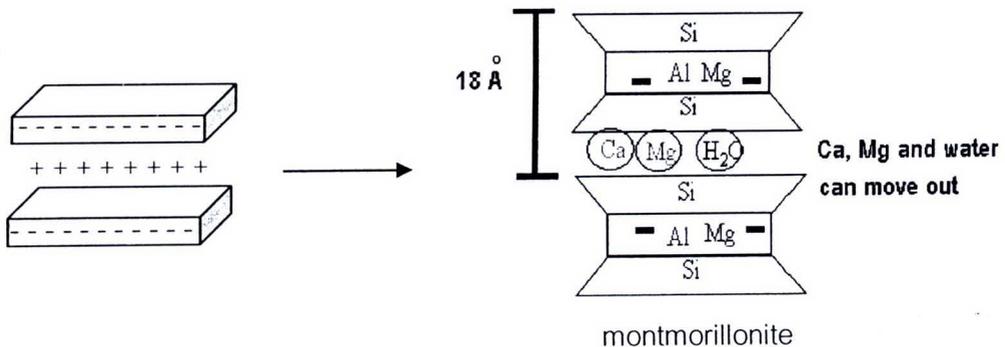
เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เป็นหนึ่งในสารประกอบแบบชั้น (layered compounds) ซึ่งสามารถแบ่งตามชนิดประจุของไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้นได้ 3 กลุ่ม คือ

- 1) ไม่มีไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้น เนื่องจากประจุของชั้นโลหะเป็นกลางจึงไม่มีการดูดประจุภายในช่องว่างระหว่างชั้น เช่น แกรไฟต์



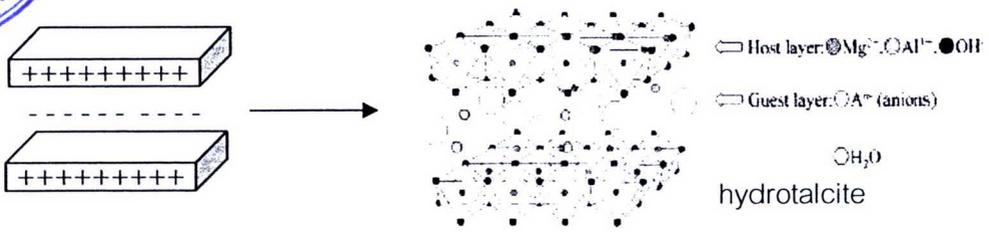
รูปที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างของแกรไฟต์ (graphite)

- 2) ไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้นมีประจุบวก (cationic ion) เช่น แร่ดินเหนียว (clay mineral) ซึ่งประกอบด้วย แผ่นของชั้นโลหะไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีประจุโดยรวมของชั้นเป็นลบ เกิดการจัดเรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้นๆ มีการดูดประจุด้วยชั้นของไอออนประจุบวก เช่น มอนมอริลโลไนต์ (montmorillonite) ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะโครงสร้างของมอนมอริลโลไนต์

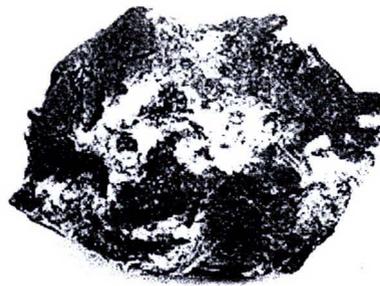
- 3) ไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้นมีประจุลบ (anionic ion) ประกอบด้วยชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุโดยรวมของชั้นเป็นบวก ซ้อนกันเป็นชั้นๆ โดยมีการดูดประจุด้วยชั้นของไอออนประจุลบ เช่น เลเยอร์ไฮดรอกไซด์ซอลท์(LDs- $M^{2+}(OH)_{2-x}(A^n)_{x/n}$ ) เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH- $M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2(A_n)_{x/n} \cdot nH_2O$ ) หรือ ไฮโดรทัลไซต์ (hydrotalcite) ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ลักษณะโครงสร้างของไฮโดรทัลไซต์

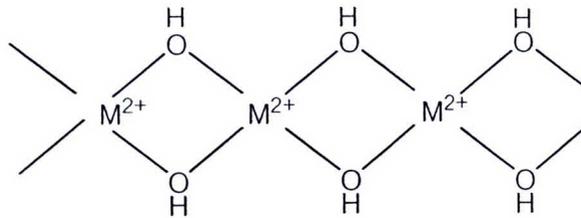
### 2.7.1 ลักษณะโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เป็นหนึ่งในสารประกอบแบบชั้น (layered compound) ที่มีลักษณะเป็นผลึกจัดเรียงตัวซ้อนกัน พบได้ในธรรมชาติดังแสดงตัวอย่างได้ในรูปที่ 2.19 หรือสังเคราะห์ขึ้นเอง การสังเคราะห์เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ทำได้ง่ายทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรม

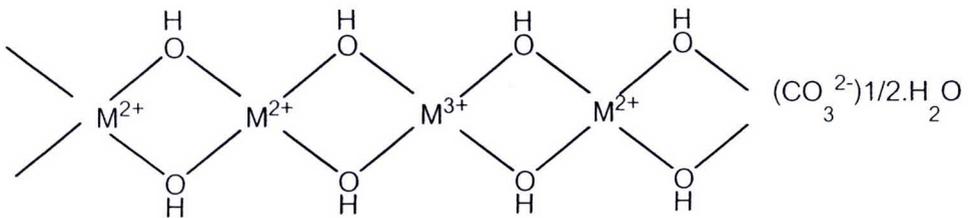


รูปที่ 2.19 ลักษณะเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่พบในธรรมชาติ [17]

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ มีองค์ประกอบทางเคมีที่หลากหลายสามารถปรับแต่งได้ สูตรเคมีทั่วไป คือ  $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)] A^{n-}_{x/n} \cdot yH_2O$  โดย  $M^{2+}$ ,  $M^{3+}$  แทนโลหะที่มีวาเลนซ์อ็อกซิเลคตรอนเท่ากับ 2 และ 3 ตามลำดับ  $x$  คือ อัตราส่วนโดยโมลของ  $M^{3+}/(M^{2+}+M^{3+})$  โดย  $A$  คือ ไอออนประจุลบ มีประจุเท่ากับ  $n$  ซึ่ง  $M^{2+}$  ได้แก่  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  หรือ  $Zn^{2+}$  และ  $M^{3+}$  ได้แก่  $Al^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Ga^{3+}$  หรือ  $Fe^{3+}$  โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ประกอบด้วยชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ ( $M^{2+}(OH)_2$ ) หรือชั้นบรูไซต์ (brucite layer) (รูปที่ 2.20) ซึ่งโลหะสองบวกมีการจัดเรียงตัวแบบออกตะฮีดรอล (octahedral) กับไฮดรอกไซด์แอนไอออน ( $OH^-$ ) โดยจะเกิดการซ้อนกันเป็นชั้นยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และเมื่อ  $M^{2+}$  ถูกแทนที่โดย  $M^{3+}$  จะทำให้ประจุโดยรวมของชั้นโลหะไฮดรอกไซด์เป็นบวกจึงต้องมีการดุลประจุนี้ด้วยไอออนประจุลบ (anionic ion) และโมเลกุลน้ำซึ่งอยู่ระหว่างชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 โดยเรียกชั้นนี้ว่า "ช่องว่างระหว่างชั้น (interlayer spacing)"



รูปที่ 2.20 ชั้นโลหะไฮดรอกไซด์หรือชั้นบรูไซต์



รูปที่ 2.21 การแทนที่  $M^{2+}$  ด้วย  $M^{3+}$  ในชั้นโลหะไฮดรอกไซด์

ตัวอย่างสารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ [11]

วัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี
Brucite	$\text{Mg}(\text{OH})_2$
Gibbsite	$\text{Al}(\text{OH})_3$ monoclinic
Natural hydrotalcite	$\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{16}(\text{CO}_3) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Meixnerite	$\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{OH})_8(\text{CO}_3)_{0.5} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Sjogrenie	$\text{Mg}_3\text{Fe}(\text{OH})_8(\text{CO}_3)_{0.5} \cdot 2.25\text{H}_2\text{O}$
Stichite	$\text{Mg}_3\text{Cr}(\text{OH})_8(\text{CO}_3)_{0.5} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Takovite	$\text{Ni}_3\text{Al}(\text{OH})_8(\text{CO}_3)_{0.5} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Pyroaurite	$\text{Mg}_3\text{Fe}(\text{OH})_8(\text{CO}_3)_{0.5} \cdot 2.25\text{H}_2\text{O}$
Hydrocalumite	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{CO}_3)_{1.1}(\text{OH})_{0.78} \cdot 2.38\text{H}_2\text{O}$

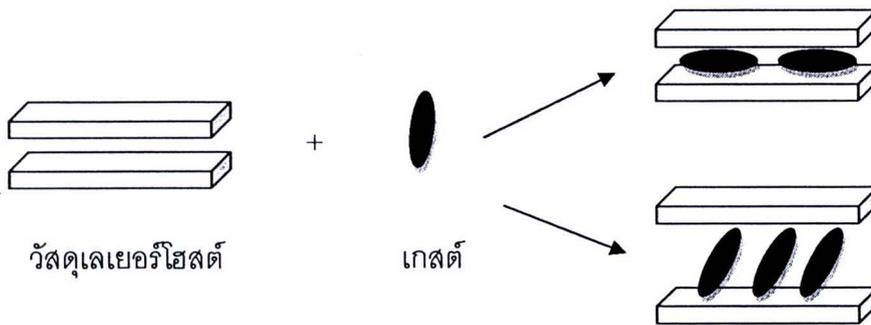
### 2.7.2 การดัดแปรโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

ช่องว่างระหว่างชั้น (interlayer spacing) ของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีขนาดขึ้นกับชนิดและขนาดของไอออนประจุลบที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างชั้น โดยทั่วไปเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

ทั้งที่พบในธรรมชาติและได้จากการสังเคราะห์จะมีคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เป็นไอออนประจุลบหลักจึงทำให้มีระยะห่างช่องว่างระหว่างชั้นที่แคบ (2.9 อังสตรอม) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ทำให้การประยุกต์ใช้เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ในงานด้านการเป็นตัวดูดซับและการเร่งปฏิกิริยาก่อนข้างจำกัด ดังนั้นจึงมีการศึกษาเพื่อขยายระยะห่างช่องว่างระหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์โดยการสอดแทรก (intercalation) ไอออนประจุลบหรือโมเลกุลขนาดใหญ่เข้าสู่โครงสร้าง ซึ่งทำได้หลายวิธี

### 2.7.2.1 การสอดแทรกหรืออินเตอร์คาเลชัน (Intercalation)

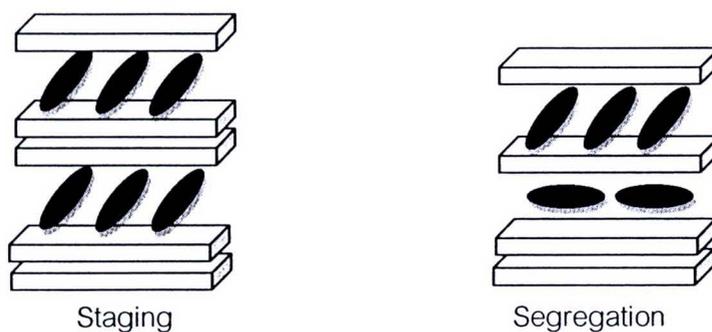
อินเตอร์คาเลชันเป็นการสอดแทรกหรือใส่เกสต์ชนิดต่างๆ (guest species) เช่น ไอออนโมเลกุล หรือพอลิเมอร์ เข้าไปภายในช่องว่างระหว่างชั้นของวัสดุโฮสต์ ที่มีโครงสร้างเป็นชั้น ซึ่งเรียกว่า วัสดุเลเยอร์โฮสต์ (layered host material) โดยองค์ประกอบพื้นฐานไม่เปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การสอดแทรกหรืออินเตอร์คาเลชันวัสดุเลเยอร์โฮสต์ด้วยโมเลกุลเกสต์

การสอดแทรกทำให้โครงสร้างภายในของวัสดุเลเยอร์โฮสต์ เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเลเยอร์โฮสต์และเกสต์ที่เข้าทำร่วม โดยทั่วไปเกสต์จะกระจายอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของวัสดุเลเยอร์โฮสต์ได้อย่างสม่ำเสมอทุกชั้น แต่ในบางกรณีการกระจายของเกสต์ในวัสดุเลเยอร์โฮสต์อาจมีลักษณะที่แตกต่างออกไปบ้าง (รูปที่ 2.23) ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- 1) สเตจิง (Staging) หมายถึงการสอดแทรกเกสต์เข้าไปในช่องว่างระหว่างชั้นของวัสดุเลเยอร์โฮสต์เพียงบางชั้น การสอดแทรกลักษณะนี้จะพบได้ในแกรไฟต์, เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เป็นต้น
- 2) เซกเรเกชัน (Segregation) หมายถึงการสอดแทรกที่โมเลกุลหรือไอออนในช่องว่างระหว่างชั้นแต่ละชั้น ในลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งคาดว่าเกิดจากการกระจายของประจุที่แตกต่างกันในแต่ละชั้นของวัสดุเลเยอร์โฮสต์



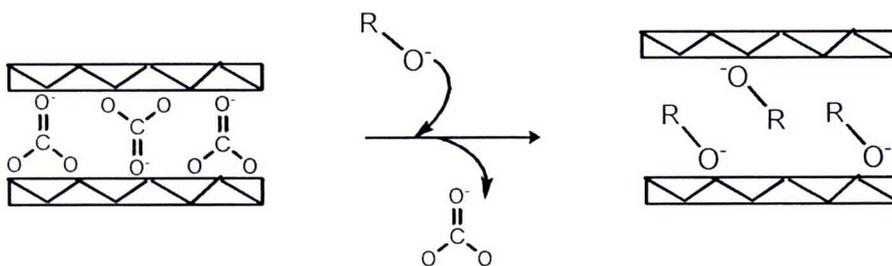
รูปที่ 2.23 การสอดแทรกแบบสแตจิงและเซกริเกชัน

### 2.7.2.2 การสอดแทรกไอออนเข้าสู่เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างชั้นกับไอออนประจุลบอื่น ซึ่งส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นของโลหะไฮดรอกไซด์หรือระยะห่างช่องว่างระหว่างชั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง การสอดแทรกไอออนประจุลบในช่องว่างระหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ทำได้หลายวิธีดังนี้

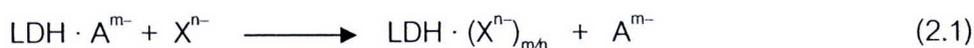
#### 1) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

วิธีการนี้ไอออนประจุลบในช่องว่างระหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จะถูกแลกเปลี่ยนกับเกสต์ที่มีไอออนประจุลบ ดังรูปที่ 2.24 การแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นได้ง่ายหรือยากขึ้นกับอันตรกิริยาทางประจุ (electrostatic interaction) ระหว่างชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุบวกกับไอออนประจุลบเดิมในโครงสร้าง



รูปที่ 2.24 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการแลกเปลี่ยนไอออนแสดงตามสมการที่ (2.1)



โดย A คือ ไอออนประจุลบในโครงสร้างเดิม  $m$  ประจุ  
 X คือ เกสท์ที่มีไอออนประจุลบ  $n$  ประจุ

สมการที่ (2.1) เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบหนึ่งหรือสอง เช่น คลอไรด์, ไนเตรต, คาร์บอเนต หรือ คาร์บอกซิเลต ที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีอันตรกิริยาทางประจุกับชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกันตามจำนวนประจุ

ปัจจัยที่มีผลในการแลกเปลี่ยนไอออนมีหลายประการ ได้แก่

- สัมพรรคภาพของไอออนประจุลบ (affinity for incoming anion)

การแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบขึ้นกับชนิดของไอออนประจุลบภายในช่องว่างระหว่างชั้น ซึ่งพบว่าไอออนประจุลบแต่ละชนิดภายในช่องว่างระหว่างชั้นมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ต่างกัน โดยความสามารถในการแลกเปลี่ยนนั้นเกิดได้ยากหรือง่าย ขึ้นกับจำนวนประจุของไอออนลบ โดย เรียงจากความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจากยากมาง่าย คือ  $\text{CO}_3^{2-} \gg \text{SO}_4^{2-} \gg \text{OH}^- > \text{F}^- > \text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{NO}_3^- > \text{I}^-$  โดยทั่วไปนิยมใช้เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่มีไนเตรตไอออนเป็นประจุลบภายในช่องว่างระหว่างชั้นเป็นสารตั้งต้นในการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย

- ความหนาแน่นของประจุในชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ (charge density of the sheet)

ความหนาแน่นของประจุในชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ส่งผลต่ออันตรกิริยาทางประจุระหว่างชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจুবวกกับไอออนประจุลบเดิมในโครงสร้าง เมื่อมีความหนาแน่นของประจุในชั้นไฮดรอกไซด์หนาแน่นส่งผลให้อันตรกิริยาทางประจุระหว่างชั้นโลหะไฮดรอกไซด์กับไอออนประจุลบเดิมสูง เป็นผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ยาก ซึ่งความหนาแน่นของประจุในชั้นขึ้นกับอัตราส่วนของโลหะสองบวกต่อสามบวก ( $M^{2+}/M^{3+}$ ) โดย ความหนาแน่นของประจุในชั้นเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของโลหะสองบวกต่อสามบวกลดลง จากงานวิจัย ของ T. Stanimirova และคณะ [18] ศึกษาผลการสอดแทรกเอทิลีนไกลคอลเข้าสู่ภายในช่องว่างระหว่างชั้นของแมกนีเซียมและอะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนของโลหะสองบวกต่อสามบวก ต่างกัน พบว่าที่อัตราส่วนของ Mg/Al เท่ากับ 3 สามารถสอดแทรกเอทิลีนไกลคอลภายในช่องว่างระหว่างชั้นได้ดีกว่าอัตราส่วนของ Mg/Al เท่ากับ 2 ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อชั้นโลหะไฮดรอกไซด์เกิดการแทนที่ด้วยโลหะสามบวกมากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของประจุเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ยาก

- ตัวกลางในการแลกเปลี่ยน (exchange medium)

เมื่อมีการใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนไอออน ตัวทำละลายดังกล่าวจะช่วยให้เกิดการขยายช่องว่างระหว่างชั้นได้ขณะที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากสมบัติในการบวมตัว (swelling) ได้ของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ซึ่งช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนเข้าสู่ภายในโครงสร้างได้ง่ายขึ้น เช่น สารละลายน้ำนิยมใช้ในการเป็นตัวทำละลายสำหรับไอออนของสารอนินทรีย์หรือสารละลายอนินทรีย์นิยมใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารอนินทรีย์

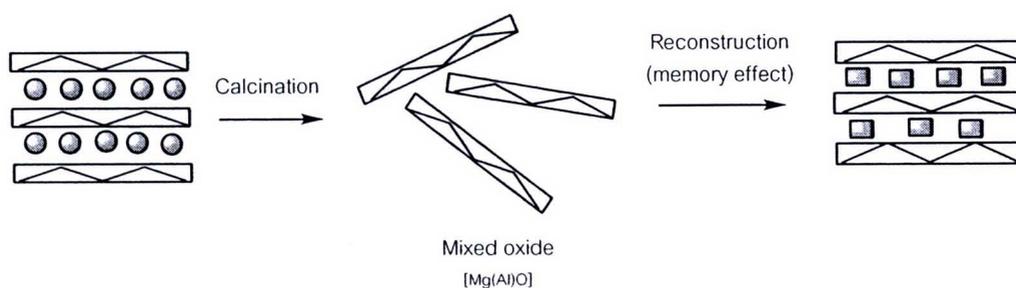
## 2) การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation)

การตกตะกอนร่วมเป็นการสอดแทรกไอออนประจุลบเข้าสู่โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์โดยตรง เป็นการตกตะกอนร่วมกันระหว่างสารละลายเกลือโลหะประจุบวกสองและสามกับสารละลายเบสที่มีไอออนประจุลบที่ต้องการสอดแทรกผสมอยู่ โดยไอออนประจุลบที่ต้องการสอดแทรกต้องมีความสามารถในการดุลประจุของชั้นโลหะไฮดรอกไซด์มากกว่าไอออนร่วมของเกลือโลหะ มิฉะนั้นไอออนร่วมของเกลือโลหะจะสอดแทรกเข้าสู่ช่องว่างระหว่างชั้นแทนไอออนประจุลบที่ต้องการ โดยทั่วไปจึงนิยมใช้เกลือโลหะคลอไรด์หรือไนเตรตเป็นสารตั้งต้นในการเตรียม โดยการตกตะกอนควรตกภายใต้ภาวะไนโตรเจนเพื่อป้องกัน คาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ( $\text{CO}_{2(\text{air})} + \text{moisture} \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$ ) โดยการตกตะกอนในกรณีที่มีโลหะหลายชนิดต้องมีการควบคุมพีเอชของสารละลาย โดยควบคุมให้พีเอชในการตกตะกอนสูงหรือเท่ากับพีเอชที่ชั้นโลหะไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนได้ โดยอุณหภูมิในการตกตะกอนมีผลต่อลักษณะความเป็นผลึกของสารที่ตกตะกอนได้ โดยสามารถให้อุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหลายชั่วโมงจนถึงหลายวัน หรือใช้แบบอโตคลอป (autoclave) ภายใต้ความดัน 10-150 เมกกะพาสคาล

## 3) การฟื้นฟูสภาพ (Reconstruction)

การฟื้นฟูสภาพเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่นิยมนำมาใช้ในการสอดแทรกไอออนประจุลบเข้าสู่ช่องว่างระหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เมื่อทำการให้อุณหภูมิประมาณ 300-500 องศาเซลเซียส จะเกิดการกำจัดหมู่ไฮดรอกซิลของชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ น้ำและไอออนประจุลบภายในช่องว่างระหว่างชั้น เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จะสลายโครงสร้างอยู่ในรูปออกไซด์โลหะ  $\text{M}^{2+}$  และ  $\text{M}^{3+}$  เมื่อนำมาผสมในสารละลายเอควิวสโครงสร้างของออกไซด์โลหะเหล่านี้จะกลับคืนเป็นโครงสร้างชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ร่วมกับไอออนประจุลบในสารละลายกลับมาสู่ภายในช่องว่าง

ระหว่างชั้น ซึ่งอาศัยหลักการที่เรียกว่า “memory effect” ดังแสดงแผนภาพกระบวนการฟื้นฟูสภาพในรูปที่ 2.25 โดยการเปลี่ยนโลหะออกไซด์ผสมกลับสู่โครงสร้างแบบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ นั้นสามารถเรียกได้หลายชื่อ คือ regeneration, reconstruction, restoration หรือ rehydration โดยวิธีนี้จะใช้เมื่อต้องการแทรกโมเลกุลขนาดใหญ่ เพื่อหลีกเลี่ยงการแข่งขันของสารอนินทรีย์ที่มาจากเกลือของโลหะ พบว่าอุณหภูมิในการเผามีผลต่อการฟื้นฟูโครงสร้าง เมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาสูงมาก การฟื้นฟูโครงสร้างจะลดลงเนื่องจากเกิดการเคลื่อนของโลหะบวกสองไปสู่ตำแหน่งเตตระฮีดรอลเกิดเป็นฟอร์มสปิเนล (spinel)

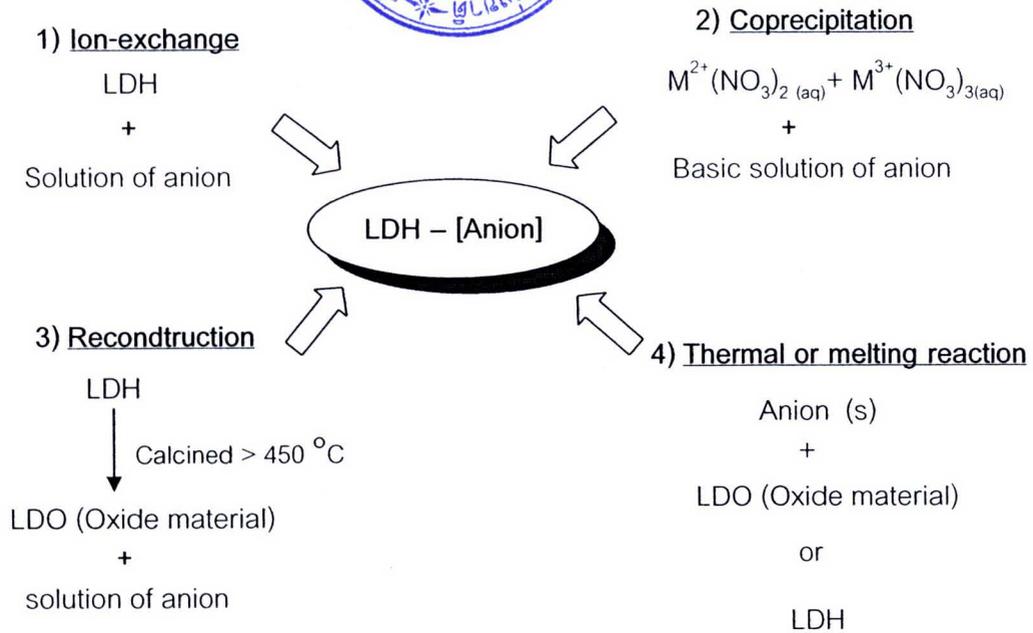


รูปที่ 2.25 กระบวนการฟื้นฟูสภาพ (reconstruction)

#### 4) กระบวนการความร้อน (Thermal or melting reaction)

กระบวนการความร้อนถือเป็นกระบวนการใหม่ในการนำมาเตรียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สอดแทรกด้วยไอออนประจุลบ โดยกระบวนการนี้อาศัยการผสมเข้ากันของสารตั้งต้นของไอออนประจุลบกับเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์หรือออกไซด์ที่ได้จากการเผาเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำให้ความร้อนแก่ของผสมโดยกำหนดอัตราการให้ความร้อนไม่เกิน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิที่มากกว่าจุดหลอมเหลวของสารที่ทำการสอดแทรกประมาณ 10 องศาเซลเซียส จากนั้นคงอุณหภูมิไว้จนเข้าสู่จุดสมดุลจากนั้นจึงลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างและเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งวิธีนี้ค่อนข้างยุ่งยากจึงไม่ค่อยนิยมนำมาทำการเตรียม

สรุปภาพรวมวิธีการสอดแทรกไอออนประจุลบตามที่กล่าวมาข้างต้น ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การเตรียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สอดแทรกด้วยไอออนประจุลบโดยวิธีต่างๆ [12]

### 2.7.3 ประโยชน์ของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

ปัจจุบันมีการนำเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆอย่างกว้างขวาง จากลักษณะสมบัติเด่นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เช่น

- (1) สังเคราะห์ได้ง่ายและมีราคาถูก
- (2) องค์ประกอบทางเคมีมีความหลากหลายและมีความยืดหยุ่น (flexibility) ของโครงสร้างสามารถปรับแต่งได้ สามารถสอดแทรกไอออน โมเลกุลที่ต้องการเข้าไป ปรับปรุงสมบัติของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างได้
- (3) มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี
- (4) มีคุณสมบัติ memory effect สามารถกลับสู่โครงสร้างเดิมได้

ประโยชน์ของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สามารถแบ่งเป็นด้านต่างๆได้ คือ

#### 1) ด้านตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysis)

โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ไม่เหมาะสำหรับการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรง เนื่องจากมีระยะห่างช่องว่างระหว่างชั้นหรือที่แคบ โดยภายในช่องว่างระหว่างชั้นมีไอออนประจุลบที่

มีความเป็นเบสต่ำ จึงนิยมนำเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ไปผ่านกระบวนการปรับปรุงลักษณะสมบัติด้วยวิธีต่างๆ ก่อนใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ทำการเผาเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ในช่วงอุณหภูมิ 200-450 องศาเซลเซียสให้อยู่ในรูปออกไซด์ผสมเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงตัวอย่างปฏิกิริยาที่ใช้เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในตารางที่ 2.3 นอกจากนี้ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วสามารถนำเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นตัวรองรับของโลหะต่างๆ เช่น เป็นตัวรองรับของ  $CeO_2$  ในปฏิกิริยาการกำจัด  $SO_x$  [19] เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 ปฏิกิริยาที่มีการนำเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [14]

LDH precursor	Catalytic application
$Mg_6Al_2(OH)_{16}(CO_3) \cdot 4H_2O$	ดีไฮเดรชัน, แอลกอฮอล์-คอนเดนเซชัน, ออกซิเดชัน, ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน
$Ni_6Al_2(OH)_{16}(CO_3) \cdot 4H_2O$	ไฮโดรจีเนชัน, ดีแอคิลเลชัน, รีฟอร์มมิ่ง
$Ni_3Mg_3Al_2(OH)_{16}(CO_3) \cdot 4H_2O$	ดีไฮโดรจีเนชัน, ออกซิเดชัน
$Cu_6Al_2(OH)_{16}(CO_3) \cdot 4H_2O$	ไอโซเมอไรเซชัน, ไฮโดรจีเนชัน
$Cu_3Zn_3Al_2(OH)_{16}(CO_3) \cdot 4H_2O$	รีฟอร์มมิ่ง, วอเตอร์แก๊สชิฟ

## 2) ด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental)

จากความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (anion-exchange) ได้ และความสามารถในการดูดซับ (adsorption) สามารถประยุกต์ใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่เป็นสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรม เช่น สีย้อม [20] หรือ การดูดซับสารลดแรงตึงผิว [21] เป็นต้น โดยประยุกต์ใช้รูปออกไซด์ของโลหะผสมจากการเผาเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์โดยอาศัยหลักของ memory effect หรือนำเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มาใช้ในการดูดซับสารปนเปื้อนเข้าสู่ในโครงสร้างโดยตรง การกำจัดสารปนเปื้อนอาจเกิดได้ทั้งดูดซับบนผิวหรือแลกเปลี่ยนเข้าในโครงสร้าง

## 3) ด้านอุตสาหกรรมยา (Pharmaceutical)

วิตามินซี วิตามินเอ วิตามินอี ซึ่งปกติจัดเก็บในลักษณะที่เป็นสารละลายจะพบว่ามีความไวต่อแสง ความร้อน ออกซิเจน ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย จึงมีการสอดแทรกโมเลกุลของวิตามินเข้าสู่โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เพื่อช่วยเพิ่มความเสถียรในการเก็บรักษา [22]

## 4) ด้านพอลิเมอร์ (polymer)

จากคลอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบในพอลิเมอร์ เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) สามารถเกิดปฏิกิริยา ดีไฮโดรคลอไรเนชัน (dehydrochlorination) ได้ภายใต้ความร้อนและแสงยูวี ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดเองได้ (autocatalytic) ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพ [23] จึงนำเลเซอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มาช่วยในการลดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ โดยให้เป็นสารเติมแต่งเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ ของพอลิเมอร์

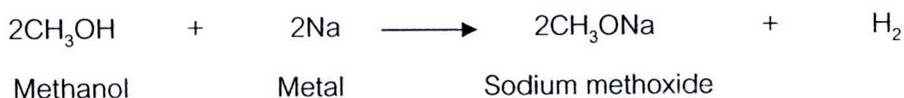
## 2.8 แอลคอกไซด์ (alkoxide) [24]

แอลคอกไซด์ เป็นคู่คอนจูเกตเบสของแอลกอฮอล์ ดังนั้นลักษณะโครงสร้างจึงประกอบด้วยกลุ่มของสารอินทรีย์ (R) เกิดพันธะกับอะตอมออกซิเจนที่มีประจุลบ ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.27 เขียนในรูปสูตรทั่วไป คือ  $RO^-$  โดยที่ R แทนด้วยกลุ่มของสารอินทรีย์



รูปที่ 2.27 โครงสร้างทั่วไปของแอลคอกไซด์

โดยที่ R เป็นโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น  $CH_3-$  (methoxide),  $C_2H_5-$  (ethoxide),  $C_3H_7-$  (propoxide)  $C_4H_9-$  (butoxide) เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างโครงสร้างและสมบัติของแอลคอกไซด์ตามตารางที่ 2.4 แอลคอกไซด์มีคุณสมบัติความเป็นเบสแรง มีความแรงเบสสูงกว่าไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ในภาวะที่เป็นสารละลายควรหลีกเลี่ยงน้ำ เนื่องจาก แอลคอกไซด์สามารถดึงโปรตอนจากโมเลกุลน้ำ ส่งผลได้ผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปแอลกอฮอล์และน้ำ แอลคอกไซด์สามารถประพฤติตัวเป็นนิวคลีโอไฟล์ที่ดีได้เป็นสารตัวกลาง (intermediates) ได้ในหลายปฏิกิริยา การสังเคราะห์แอลคอกไซด์สามารถทำได้หลายกระบวนการ โดยยกตัวอย่างปฏิกิริยาที่นิยมในการสังเคราะห์แอลคอกไซด์ คือ ปฏิกิริยารีดักชัน (reducing of metal) เป็นการทำปฏิกิริยาโดยตรงของโลหะกับแอลกอฮอล์ ได้แอลคอกไซด์ออกมาในรูปโลหะแอลคอกไซด์ โดยมีไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ตามสมการในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 สมการปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ในการสังเคราะห์แอลคอกไซด์

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างโครงสร้างและสมบัติของแอลคอกไซด์

แอลคอกไซด์ไอออน	โครงสร้าง	สูตรทั่วไป	pK <sub>b</sub>
เมทอกไซด์	$\text{H}_3\text{C} - \text{O}^-$	$\text{CH}_3 - \text{O}^-$	-2
เอทอกไซด์	$\text{H}_3\text{C} - \text{H}_2\text{C} - \text{O}^-$	$\text{C}_2\text{H}_5 - \text{O}^-$	-3
ไอโซโพรพอกไซด์	$\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C} \\ \diagdown \\ \text{CH} - \text{O}^- \\ \diagup \\ \text{H}_3\text{C} \end{array}$	$\text{C}_3\text{H}_7 - \text{O}^-$	-4
เตริต-บิวทอกไซด์	$\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C} \\   \\ \text{H}_3\text{C} - \text{C} - \text{O}^- \\   \\ \text{H}_3\text{C} \end{array}$	$\text{C}_4\text{H}_9 - \text{O}^-$	-5

## 2.9 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

E. Gardner และคณะ [25] ศึกษาการสอดแทรกแอลคอกไซด์ไอออนเข้าสู่ภายในช่องว่างระหว่างชั้นของแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ โดยการตกตะกอนร่วมระหว่างเกลือของโลหะผสมกับแอลกอฮอล์ ได้แก่ เมทานอล เอทานอล โพรพานอลและบิวทานอล จากผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า มีการขยายระยะห่างช่องว่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้น ภายหลังการสอดแทรก โดยเมทอกไซด์ไอออนสามารถขยายระยะห่างช่องว่างระหว่างชั้นได้สูงสุดจาก 2.9 อังสตรอม เป็น 4.40 อังสตรอม โดยคาดว่าเกิดการจัดเรียงตัวแบบโมโนเลเยอร์ (monolayer) ร่วมกับไอออนประจุลบชนิดอื่นและโมเลกุลของน้ำภายในช่องว่างระหว่างชั้น แต่จากงานวิจัยของ U. Costantino และคณะ [26] ทำการสอดแทรกแอลคอกไซด์โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่ามีการสอดแทรกเฉพาะโมเลกุลของแอลคอกไซด์ไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้นเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการสอดแทรกแอลคอกไซด์โดยวิธีการแลกเปลี่ยนแอนไอออนเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าวิธีการตกตะกอนร่วม

B.M. Choudary และคณะ [27] ศึกษาปฏิกิริยา Wadsworth-Emmons โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมกับเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สอดแทรกด้วยเตริต-บิวทอกไซด์ไอออน จากการศึกษาลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าลักษณะพื้นฐานภายหลังการสอดแทรกด้วยเตริต-บิวทอกไซด์ไอออน เกิดการเกาะรวมกลุ่มกันของอนุภาคส่งผลให้ขนาดอนุภาค

ใหญ่ขึ้น โดยเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่ทำการสอดแทรกนั้นปรากฏลักษณะรูปแบบไฮโดรทัลไซต์เช่นเดิมเหมือนรูปแบบก่อนการสอดแทรก แสดงให้เห็นว่าการสอดแทรกไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายหลังการสอดแทรก เมื่อนำมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยา พบว่าแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่ทำการสอดแทรกด้วยเตริต-บิวทอกไซด์ไอออนมีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาให้ผลได้ผลิตภัณฑ์สูงถึง 96 เปอร์เซ็นต์โดยใช้เวลาการทำปฏิกิริยาเพียงสองชั่วโมงซึ่งเมื่อเทียบกับเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่ไม่ผ่านการสอดแทรกนั้นไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ แสดงให้เห็นว่าการสอดแทรกเตริต-บิวทอกไซด์ไอออนเข้าสู่โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ส่งผลดีต่อการเร่งปฏิกิริยาได้และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาล้น

B.M. Choudary และคณะ [28] ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สอดแทรกด้วยเตริต-บิวทอกไซด์ไอออนผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนในการเร่งปฏิกิริยาแอลดอน-คอลเดนเซชัน พบว่าเมื่อทำการสอดแทรกบิวทอกไซด์ไอออนเข้าสู่โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ 99 เปอร์เซ็นต์โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 15 นาที ซึ่งเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ K. K. Rao [29] ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการเผาและแลกเปลี่ยนไฮดรอกไซด์แอนไอออนในปฏิกิริยาเดียวกัน พบว่าให้ผลได้ผลิตภัณฑ์เพียง 90 เปอร์เซ็นต์โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมกับเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สอดแทรกด้วยเตริต-บิวทอกไซด์ไอออนนั้นมีความว่องไวสูงในการเร่งปฏิกิริยามากกว่าในรูปแบบออกไซด์ผสมหรือการสอดแทรกด้วยไฮดรอกไซด์ไอออน

A. Corma และคณะ [2] ศึกษาความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสแบบบรอนสเตดเบส (Bronsted base) และ ลิวอิสเบส (Lewis base) ในการเร่งทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของโอเลอิกเอซิดเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล โดยศึกษาเปรียบเทียบจากตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรทัลไซต์ที่ผ่านการเผาและไฮโดรทัลไซต์ที่ทำการสอดแทรกด้วยไฮดรอกไซด์แอนไอออน พบว่าเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากันที่ 8 ชั่วโมง ไฮโดรทัลไซต์ที่ทำการสอดแทรกด้วยไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์สูงถึง 98 เปอร์เซ็นต์และให้ผลได้และการเลือกจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์สูงประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับ ไฮโดรทัลไซต์ที่ผ่านการเผาให้ผลได้และการเลือกจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์เพียง 64 และ 67 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ไฮโดรทัลไซต์ที่ทำการสอดแทรกด้วย ไฮดรอกไซด์ไอออนมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดีกว่าไฮโดรทัลไซต์ที่ผ่านการเผา

B.M. Choudary และคณะ [30] ทำการศึกษาการเร่งทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของคีโตเอสเทอร์กับแอลกอฮอล์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่ทำการสอดแทรกด้วยเตริต-บิวทอกไซด์

ไอออน พบว่าสามารถเร่งปฏิกิริยาให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ผลิตภัณฑ์สูงมากกว่า 90 โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 2 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่ทำการสอดแทรกด้วยไฮดรอกไซด์ไอออนให้ผลได้ผลิตภัณฑ์เป็น 77 เปอร์เซ็นต์โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 12 ชั่วโมงและเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่ไม่ผ่านการสอดแทรกนั้นจะไม่เกิดปฏิกิริยาแต่เมื่อทำการเผาให้อยู่ในฟอร์มโลหะออกไซด์ผสมให้ผลได้ผลิตภัณฑ์เป็น 55 เปอร์เซ็นต์โดยใช้ทำปฏิกิริยานาน 12 ชั่วโมง เมื่อนำเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่สอดแทรกด้วยเตริต-บิวทอกไซด์ไอออนนำกลับมาใช้ใหม่ พบว่าสามารถนำกลับมาใช้ปฏิกิริยาได้ใหม่หลายครั้ง แสดงให้เห็นว่าเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่สอดแทรกด้วยเตริต-บิวทอกไซด์ไอออนมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเร่งทรานส์เอสเทอริฟิเคชันได้ดีกว่าเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่ไม่ทำการดัดแปรโครงสร้างโดยให้ผลได้ผลิตภัณฑ์สูงและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาล้น