

บทที่ 2

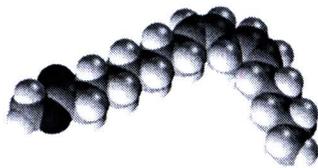
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล

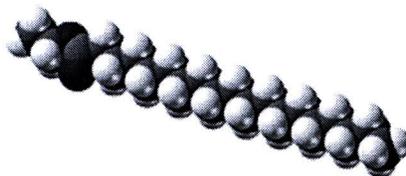
ไบโอดีเซลหมายถึง เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยโมโนแอลคิลเอสเทอร์ (mono-alkyl esters) ของกรดไขมันโซ่ยาว โดยการนำเอาน้ำมันจากพืชหรือสัตว์ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์ มาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่าทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (transesterification) โดยทำปฏิกิริยากับ แอลกอฮอล์โซ่ตรง (straight chain alcohol) เช่น เมทานอลหรือเอทานอล จะได้ผลผลิตเป็นเอสเทอร์ของ กรดไขมันโซ่ยาว (ester) และผลิตภัณฑ์พลอยได้กลีเซอรอล (glycerol) ซึ่งเราจะเรียกชนิดของไบโอดีเซล แบบเอสเทอร์นี้ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น เมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ ไบโอดีเซลชนิดเอสเทอร์นี้มีคุณสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด ไบโอดีเซลสามารถย่อยสลายทาง ชีวภาพ (biodegradable) ได้อย่างสมบูรณ์ ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง (non-carcinogenic) ไม่เป็นสาร เปลี่ยนแปลงพันธุกรรม (non-mutagenic) ไม่เป็นสารก่อภูมิแพ้ (non-allergenic) และมีพิษต่อ daphnia น้อยกว่าเกลือแกลง

ไบโอดีเซลสามารถใช้กับเครื่องยนต์ทุกชนิดโดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ และสามารถผสมกับ น้ำมันดีเซลได้ทุกสัดส่วนโดยเป็นตัวช่วยหล่อลื่นและปรับปรุงไอเสีย ไบโอดีเซลให้พลังงานเกือบเท่ากับ น้ำมันดีเซลเนื่องจากประสิทธิภาพในการเผาไหม้และสภาพหล่อลื่น (lubricity) ที่สูง โดยมีข้อดีในการช่วยลด ควันดำที่ท่อไอเสียซึ่งอนุภาคคาร์บอนส่วนใหญ่ถูกเผาไหม้เกือบอย่างบริบูรณ์ เนื่องจากไบโอดีเซล มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบในโครงสร้างโมเลกุล

โมเลกุลของไบโอดีเซลจะประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ดังภาพโมเดล 2.1 กรดไขมันลิโนลิกเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ 2 ตำแหน่ง จึงมีรูปทรงของโมเลกุลโค้งงอ ส่วนกรด ไขมันสเตียริกเป็นกรดไขมันอิ่มตัวรูปทรงของโมเลกุลจึงแสดงในแนวตรง คาร์บอนเผาไหม้กับออกซิเจนเกิด คาร์บอนไดออกไซด์หรือคาร์บอนมอนอกไซด์เมื่อปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดไม่บริบูรณ์ (สาเหตุหนึ่งมาจาก สมดุลในการเผาไหม้) ไฮโดรเจนเผาไหม้กับออกซิเจนให้น้ำ การเผาไหม้ธาตุทั้งสองเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic) และให้พลังงานออกมา ส่วนอะตอมออกซิเจนนั้นช่วยในการเผาไหม้แต่ไม่ให้พลังงาน



โมเดลของเมทิลลินลีเอต



โมเดลของเอทิลสเตียเรต

ภาพ 2.1 โมเดลตัวอย่างของโมเลกุลไบโอดีเซล

ปริมาณของออกซิเจนโดยน้ำหนักในไบโอดีเซลนั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของไตรกลีเซอไรด์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาหรือชนิดของน้ำมันหรือไขมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบหรือสารตั้งต้นหรือสารป้อน (feedstock) แต่โดยเฉลี่ยค่าออกซิเจนโดยน้ำหนักจะอยู่ที่ประมาณ 11% ดังนั้น มวลที่สามารถเผาไหม้ได้ในไบโอดีเซลก็จะน้อยกว่ามวลที่สามารถเผาไหม้ได้ของปิโตรเลียมดีเซล ประมาณ 11% เช่นกัน อย่างไรก็ตามการหาค่าปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มีฐานมาจากหน่วยมวล แต่ในการซื้อขายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลนั้น นิยมซื้อขายกันในหน่วยปริมาตร เช่น ลิตร ดังนั้นเมื่อความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะของไบโอดีเซลซึ่งมีค่าประมาณ 0.86-0.87 กิโลกรัมต่อลิตรและสูงกว่าความหนาแน่นของปิโตรเลียมดีเซลที่มีค่าประมาณ 0.82 กิโลกรัมต่อลิตร จึงส่งผลให้ 1 ลิตรของไบโอดีเซล (ในเชิงทฤษฎี) จะให้ค่าความร้อนที่น้อยกว่าดีเซลเพียงประมาณ 6% เท่านั้น

2.2 น้ำมันปาล์มดิบ

ปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis*) มีบทบาทสำคัญมากสำหรับการผลิตไบโอดีเซลในเอเชียใต้หลายส่วนของผลปาล์มสามารถใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตน้ำมันสำหรับการบริโภคของมนุษย์และใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม เปลือกผล (mesocarp) ของปาล์มน้ำมันจะให้น้ำมันปาล์ม ซึ่งจำแนกเป็นกรดไขมันอิ่มตัวไซยาวปานกลาง (กรดปาล์มติก) และกรดไขมันไม่อิ่มตัวพันธะเดี่ยว (monounsaturated) (กรดโอเลอิก) ในสัดส่วนที่สูงมาก น้ำมันปาล์มมีสีแดงส้มจากแคโรทีนอยด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบส่วนน้อยสามารถนำไปใช้ได้ทั้งในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย (เช่น สารเติมแต่งอาหาร) และเมื่อเปลี่ยนน้ำมันปาล์มให้เป็นเอสเตอร์แล้วสามารถการแยกคืนกลับ (recovery) ส่วนประกอบส่วนน้อยเหล่านี้ก็จะง่ายขึ้น โดยทั่วไปน้ำมันปาล์มสามารถแยกออกเป็น 2 ส่วน คือปาล์มสเตียรีนซึ่งเป็นส่วนของแข็งและปาล์มโอเลอีน

ในส่วนเหลว น้ำมันปาล์มและปาล์มสเตียรีนได้รับความนิยมในการใช้เป็นสารป้อนสำหรับการผลิตไบโอดีเซลเป็นอย่างมาก

จุดเด่นของน้ำมันปาล์ม ก็คือ ปาล์มน้ำมันให้ผลผลิต/พื้นที่/ปี สูงอย่างเห็นได้ชัดเจนและมีราคาปานกลางในตลาดโลก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชสำหรับการบริโภคชนิดอื่นๆ การจะทำให้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลสามารถแข่งขันในเชิงเศรษฐศาสตร์กับน้ำมันปิโตรเลียมดีเซลโดยไม่มีมาตรการการสนับสนุนด้านภาษีนั้น ค่าใช้จ่ายในการผลิตไบโอดีเซลต้องมีราคาต่ำ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ยากกับน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ ดังนั้นน้ำมันพืชบริโภคที่มีราคาสูงอาจจะต้องใช้ประโยชน์เป็นอาหารเท่านั้น นอกจากนั้นปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีค่าใช้จ่ายในการดูแลสวนต่ำ ดังนั้นการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มจึงสมเหตุสมผลในเชิงเศรษฐศาสตร์แม้ว่าจะมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวอยู่มากก็ตาม ส่วนประกอบกรดไขมันอิ่มตัวทำให้ไบโอดีเซลมีจุดจุดตันไส้กรองที่อุณหภูมิต่ำ (cold filter plugging point) โดยมีค่าประมาณ 11°C และมีจุดขุ่น (cloud point) ที่ 13°C ส่งผลให้ไม่สามารถใช้เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์ม ในฤดูหนาวของประเทศที่มีภูมิอากาศในเขตอบอุ่น (temperate climate) ได้ ยิ่งไปกว่านั้นปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่มากในน้ำมันปาล์มดิบ

เมื่อใช้เป็นสารป้อนในการเข้าทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่ใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะดำเนินการไม่ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนกำจัดกรดไขมันอิสระด้วยการทำสะเทิน (neutralization) หรือการทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน (esterification) ที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อน

ในน้ำมันปาล์มดิบนั้นองค์ประกอบของกรดไขมันจะเป็นสารประกอบอิ่มตัวและสารประกอบไม่อิ่มตัวในสัดส่วนเท่า ๆ กันคือ 50% ส่งผลให้มีค่าไอโอดีนประมาณ 53 และมีเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูงเมื่อเทียบกับน้ำมันพืชอื่น ๆ

ส่วนประกอบส่วนน้อย เช่น แคโรทีนอยด์ โทโคเฟอร์รอล สเตอรอล ฟอสฟาไทด์ ไตรเตอเพนิก และแอลกอฮอล์อะลิฟาติก มีรวมกันน้อยกว่า 1% ในน้ำมันปาล์มดิบ อย่างไรก็ตามก็มีบทบาทอย่างสูงในด้านเสถียรภาพออกซิเดชัน และการทำบริสุทธิ์ รวมทั้งการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของน้ำมันอีกด้วย

แคโรทีนอยด์ ที่อยู่ในระดับ 500 ถึง 700 ppm อยู่ในรูปของ α และ β แคโรทีน ซึ่งเป็น precursor ของวิตามิน A แคโรทีนอยด์ จะถูกทำลายด้วยความร้อนในระหว่างการทำจัดกลั่น แคโรทีนอยด์จะช่วยลดการเกิดออกซิเดชันโดยจะช่วยทำปฏิกิริยาออกซิเดชันก่อนไตรกลีเซอไรด์

น้ำมันปาล์มดิบยังประกอบด้วย โทโคเฟอร์รอลและโทโคไตรอีนอล (tocotrienols) ในระดับ 600-1,000 ppm ทั้งคู่เป็นสารแอนติออกซิแดนท์และป้องกันการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันปาล์มเช่นกัน

การรวมกันของแคโรทีนอยด์ โทโคเฟอร์รอล โทโคไตรอีนอล และกรดไขมันอิ่มตัวในสัดส่วนครึ่งหนึ่งของน้ำมันทั้งหมด ทำให้น้ำมันปาล์มจัดอยู่ในประเภทมีเสถียรภาพเชิงออกซิเดชันสูงกว่าน้ำมันพืชอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาดูปริมาณสเตอรอล จะพบว่าน้ำมันปาล์มมีคลอเรสเตอรอลน้อยกว่าน้ำมันพืชส่วนใหญ่
ตั้งข้อมูลในตารางต่อไปนี้

ตาราง 2.1 ระดับคลอเรสเตอรอลในน้ำมันดิบและไขมัน

Oil Type	Average (ppm)	Range (ppm)
Coconut oil	14	5-24
Cocoa butter	59	n.a.
Palm kernel oil	17	9-40
Palm oil	18	13-19
Sunflower oil	17	8-44
Soybean oil	28	20-35
Rapeseed oil	49	25-80
Maize oil	50	18-95

ตาราง 2.2 องค์ประกอบสเตอรอลของน้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันรีไฟน์และผลผลิต

Sample	Cholesterol	Campesterol	Stigmasterol	Sitosterol	Unknown
Crude palm oil	7-13	90-151	44-66	218-370	2-18
Degummed, bleached	5-10	49-116	22-51	113-286	Trace-8
RBD	1-5	15-16	8-30	45-167	Trace
Crude palm olein	6-8	57-104	30-51	149-253	24-28
Degummed, bleached	3-4	36-43	21-25	99-123	Trace-5
RBD	2	26-30	12-23	68-114	-

ตาราง 2.3 คุณสมบัติตามธรรมชาติของน้ำมันปาล์มมาเลเซีย

Chemical Characteristics	Mean	Range
Saponification value (mg KOH/g oil)	195.7	190-1-201.7
Unsaponifiable matter (%)	0.51	0.15-0.99
Iodine value (Wijs)	52.9	50.6-55.1
Slip melting point ($^{\circ}$ C)	34.2	30.8-37.6

สเตอรอลที่มีอยู่ในน้ำมันพืชเป็นสาเหตุในการเกิดตะกอนของแข็งในระหว่างกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ซึ่งทำให้ต้องกรองออกก่อนนำจำหน่าย ปัญหาสเตอรอลกลูโคไซด์ที่เกิดขึ้นนั้น ยังอยู่ในระหว่างการทําวิจัยเพื่อหาทางออกที่ดีที่สุดอยู่ในขณะนี้

2.3 เอทานอล

ปฏิกิริยาเอทานอลิซิส (ethanolysis) มักจะถูกพิจารณาอยู่เสมอ ๆ ในฐานะที่เป็นทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งก่อให้เกิดการผลิตเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากธรรมชาติจริงๆ ทั้งหมด ถ้าแอลกอฮอล์นั้นได้มาจากการหมักเศษเหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยว (เอทานอลชีวภาพ) ซึ่งตรงกันข้ามกับเมทานอลที่ส่วนใหญ่ผลิตมาจากแก๊สสังเคราะห์ที่ได้มาจากวัตถุดิบตั้งต้นฟอสซิล ข้อได้เปรียบของเอทานอลที่เหนือกว่าเมทานอลก็คือ ความเป็นพิษ (toxicity) โดยเปรียบเทียบแล้วมีความเป็นพิษต่ำกว่ามากหรือจะพูดได้ว่าไม่เป็นพิษเลย ดังนั้นการผลิตไบโอดีเซลด้วยเอทานอลจึงปลอดภัยกว่าสำหรับพนักงานที่ทำการผลิตหน้างาน และจากข้อมูลที่ว่าอะตอมคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นในโมเลกุลเอทิลเอสเตอ์จะมีปริมาณความร้อนและค่าซีเทนของเชื้อเพลิงที่สูงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยด้วย แต่ในอีกด้านหนึ่งของข้อด้อยนั้น ปฏิกิริยาเอทานอลิซิส จำต้องใช้พลังงานมากกว่าปฏิกิริยาเมทานอลิซิส เมื่อต้องใช้ข้อมูลภูมิการทำปฏิกิริยาประมาณ 75 องศาเซลเซียส (ใกล้จุดเดือดของเอทานอล) เพื่อให้ได้อัตราการเปลี่ยนเป็นเอสเตอ์ที่น่าพอใจ นอกเหนือจากนี้ ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการแยกเฟสเอสเตอ์และกลีเซอรอลหลังการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน จะแยกออกจากกันได้ง่ายกว่ามาก และเอทิลเอสเตอ์ละลายในกลีเซอรอลได้มากกว่าเมทิลเอสเตอ์

ปริมาณน้ำที่มีอยู่เพียงเล็กน้อยในสารผสมที่ทำปฏิกิริยา จะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเอทานอลิซิสที่สูงกว่าปฏิกิริยาเมทานอลิซิส Fillieres และคณะ (1995) รายงานว่า การทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันเรพซิดกับเอทานอล 95% (ที่เหลือคือน้ำ) มีร้อยละการเปลี่ยน (conversion) เพียง 30% เท่านั้น ซึ่งเปรียบเทียบกับร้อยละการเปลี่ยน 94-95% ภายใต้สภาวะที่ปราศจากน้ำ และต้นทุนของการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ (absolute ethanol) ยังสูงกว่าการผลิตเมทานอลอยู่มาก ทำให้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่ผลิตด้วยเอทานอลยังไม่สามารถแข่งขันในเชิงเศรษฐศาสตร์ได้กับเมทิลเอสเตอ์

ตาราง 2.4 คุณสมบัติที่ควรรู้ของแอลกอฮอล์

คุณสมบัติ	เมทานอล	เอทานอล
สูตรเคมี	CH ₄ O	C ₂ H ₆ O
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	32.04	46.07
ลักษณะ	ของเหลวไม่มีสี	ของเหลวไม่มีสี

คุณสมบัติ	เมทานอล	เอทานอล
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.7918	0.789
จุดเดือด (°C)	65	78
pK _a	15.5	15.9
ความหนืด (Pa.s)	5.9x10 ⁻⁴	1.2x10 ⁻³
ไดโพลโมเมนต์ (D)	1.69	1.69
จุดวาบไฟ (°C)	11-12	13-14
ความดันไอ (kPa: at 20 °C)	13.02	5.95

2.4 การเร่งปฏิกิริยาด้วยต่าง (alkaline catalysis)

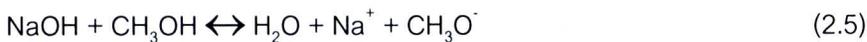
การเร่งปฏิกิริยาด้วยต่างเป็นประเภทของปฏิกิริยาโดยทั่วไปที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ข้อดีของปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่ เร่งปฏิกิริยาโดยใช้ด่างที่เหนือกว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก็คือ ให้อัตราการเปลี่ยนที่สูงภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง ใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่สั้นกว่า อาจประมาณได้ว่าภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ เท่ากัน ปฏิกิริยาเมทาโนไลซิส (methanolysis) ที่มีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเกิดขึ้นได้เร็วกว่ากรดในปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่สมมูลกันได้ถึงประมาณ 4,000 เท่า นอกจากนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่างมีสภาพกัดกร่อน (corrosiveness) ต่อเครื่องมืออุตสาหกรรมน้อยกว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้ถังปฏิกรณ์ที่เป็นเหล็กคาร์บอนซึ่งมีราคาถูกกว่า สุดท้ายปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ที่มีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้ปริมาณแอลกอฮอล์ที่น้อยกว่าปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ไลซิส (alcoholysis) ที่มีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นกัน ดังนั้น จึงสามารถลดขนาดของถังปฏิกรณ์ลงได้

Zhang และคณะ (2003) ประเมินไว้ว่าสำหรับโรงงานที่ผลิตไบโอดีเซลกำลังการผลิต 8,000 ตันต่อปี โดยใช้วัตถุดิบเป็นน้ำมันพืชใหม่สด (fresh vegetable oil) การลงทุนโดยใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีมูลค่าการลงทุนถาวรเบื้องต้น เพียงครึ่งหนึ่งของการลงทุนถาวรในการผลิตด้วยการเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กรด แต่หากใช้วัตถุดิบที่เป็นน้ำมันทอดใช้แล้ว (waste cooking oil) ซึ่งมีราคาถูกกว่าน้ำมันพืชใหม่สด 3 เท่า ต้นทุนการผลิตโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกกว่า แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ความไวเชิงเศรษฐศาสตร์นี้แปรตามราคาวัตถุดิบ ราคาไบโอดีเซล และขนาดของกำลังการผลิตอย่างมาก

ข้อด้อยที่สำคัญของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่างคือ ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาด่างต่อกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในสารป้อนสูง นั่นหมายความว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่มีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเหมาะสมกับ น้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิสระอยู่ต่ำ (น้ำมันที่มีคุณภาพสูง) เท่านั้น ซึ่งราคาน้ำมันก็

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (หรือโซดาไฟ, NaOH) ละลายในแอลกอฮอล์ จะเกิดเป็นสารละลายที่ประกอบด้วยไฮดรอกไซด์ไอออนและแอลคอกไซด์ไอออน ในสภาวะที่สมดุลกัน ตามสมการ (2.3) โดยสรุปว่าความเข้มข้นของแอลคอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นนั้น จะแปรตามความเข้มข้นของ ตัวเร่งปฏิกิริยา ค่า pK_a ตามแอลกอฮอล์ที่ใช้ และปริมาณของน้ำที่มีอยู่ ดังตัวอย่างของสารละลาย 0.1 โมลาร์ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอลความบริสุทธิ์ 99% ปริมาณ 96% ของเบสทั้งหมดจะอยู่ในรูปของ เมทอกไซด์ไอออน (ethoxide ion) และจะเป็นเช่นเดียวกันสำหรับในเมทานอลบริสุทธิ์ ดังนั้น การไฮโดรไลซิส โดยใช้ด่างเป็นสารเข้าทำปฏิกิริยาและเกิดเป็นสบู่จะเป็นปฏิกิริยาส่วนน้อยที่เกิดในแอลกอฮอล์ที่ปราศจาก น้ำ แต่ Tarasov และคณะ (1986) อ้างโดย Ruwwe (2008) รายงานว่าค่าคงตัวสมดุลของปฏิกิริยานี้ มีค่าเพียง 5.5×10^{-2} ซึ่งหมายถึงจะมีการแตกตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

สมการเคมีในการละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล คือ

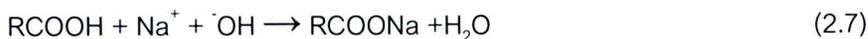


และสมดุลที่เกิดขึ้นระหว่าง CH_3O^- และ OH^- คือ



ในสาขาเคมีอินทรีย์ เมทอกไซด์ไอออนเป็นคู่เบสของเมทานอล ผู้ผลิตเมทอกไซด์จะออกมาได้แย้งว่า เป็นการไม่ถูกต้องที่จะบอกว่าเมทอกไซด์ได้มาจากการผสมของเมทานอลกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพราะเชื่อว่า มีปริมาณเมทอกไซด์เพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เกิดขึ้นจากการผสมอย่างง่าย ๆ นี้

เมทอกไซด์ได้รับการยอมรับว่าเป็นเบสที่แรงมากและว่องไวในการทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยเมทอกไซด์ คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่แท้จริงมีไฮดรอกไซด์ (อย่างที่มีการเข้าใจกันอย่างผิด ๆ) โดยน้ำที่มีอยู่ในระบบจะช่วย เร่งปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันให้เกิดเร็วขึ้นและจากประสบการณ์ของผู้เขียนได้พบว่า เพียงนาทีแรกของการทำ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่ใช้แอลคาไลน์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะเหลือเบสที่สามารถใช้เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาต่อได้เพียงครั้งเดียว เพราะปฏิกิริยากรดเบสเกิดขึ้นได้เร็วมาก



ปฏิกิริยานี้ผันกลับไม่ได้ดังนั้นเบสจะลดหายไปจากระบบไปอย่างรวดเร็ว

เช่นเดียวกับในกรณีที่ใช้สารละลายเมทอกไซด์ในเมทานอล (30-32% เมทอกไซด์) จำนวนน้ำเพียง เล็กน้อยที่อยู่ในระบบจะทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับเอสเตอ์ (ที่เป็นผลผลิต) หรือกลีเซอไรด์ (ที่เป็นสาร

ตั้งต้น) เกิดเป็นกรดไขมันอิสระและเข้าสู่ปฏิกิริยากรด/เบสเช่นกัน และในกรณีนี้เมทอกไซด์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแอลกอฮอล์



โซเดียมเมทอกไซด์ในเมทานอลเป็นพิษต่อมนุษย์โดยทำลายระบบประสาท หากสัมผัสโดยตรงต้องล้างด้วยน้ำโดยเร็วและต้องสังเกตอาการด้วยตนเอง โดยต้องไปพบแพทย์เมื่อมีอาการผิดปกติเพียงเล็กน้อย

การใช้โพแทสเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีข้อดีต่อสิ่งแวดล้อมในการบำบัดตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งหากใช้กรดฟอสฟอริกในการทำให้เป็นกลางในกลีเซอรอลดิบหรือน้ำล้าง เราจะได้โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ซึ่งสามารถใช้เป็นปุ๋ยได้ ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตพลอยได้ของการเกิดปฏิกิริยา ในขณะที่เกลือโซเดียมที่เกิดขึ้นนั้นนับว่าเป็นของเสียที่ต้องบำบัดต่อไป อย่างไรก็ตาม ข้อได้เปรียบของ NaOH ที่ดีกว่า KOH ในมุมมองของตัวเร่งปฏิกิริยาก็คือ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มที่จะเสร็จบริบูรณ์ได้เร็วกว่าและโซเดียมไฮดรอกไซด์มีราคาถูกกว่า

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในตัวทำละลายแอลกอฮอล์ควรต้องเตรียมแบบใหม่สด เพราะความชื้นในอากาศจะเพิ่มปริมาณน้ำในสารละลายแอลกอฮอล์ และทำให้การแตกตัวเป็นเมทอกไซด์ลดลงได้

ความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต่างแบบเอกพันธ์ จะแปรตามปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน ในกรณีที่มีกรดไขมันอิสระต่ำมาก เช่น < 0.2% อาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์เพียง 0.3-0.4% ก็เพียงพอ แต่ในกรณีที่กรดไขมันอิสระมีค่าสูงนั้น จำเป็นต้องชดเชยด้วยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาให้มากขึ้น เพื่อให้เพียงพอต่อปฏิกิริยาการทำสะเทินระหว่างกรดไขมันอิสระกับเบส แล้วยังคงมีปริมาณเหลืออยู่อีกจำนวนมากพอที่จะเร่งปฏิกิริยาต่อไป แต่การเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้นนั้นจะส่งผลถึงปริมาณของสบู่ที่จะเกิดขึ้นสูงตามไปด้วย โดยมีผลให้มีปริมาณเอสเทอร์หรือกลีเซอไรด์ในเฟสกลีเซอรอลมากขึ้นเกิดการสูญเสียผลได้ (yield loss) เนื่องจากสบู่จำนวนมากที่เกิดขึ้นจะกระจายไปอยู่ในเฟสกลีเซอรอลมากกว่า (แม้จะคิดจากฐานปริมาณกลีเซอรอลที่เกิดในปริมาณน้ำหนักที่น้อยกว่าเอสเทอร์แล้ว) ดังนั้น จึงต้องมีสมการสำหรับการคำนวณปริมาณที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์ ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของวัตถุดิบตั้งต้นประเภทหลากหลายคุณภาพ (multiple feedstock)

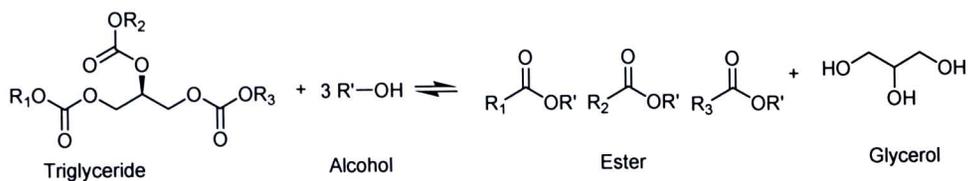
การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน 2 ครั้งหรือมากกว่า จะใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย หลังจากการทำปฏิกิริยาครั้งแรก กลีเซอรอลจะถูกแยกออกไปซึ่งคาดหมายว่าน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนหนึ่ง

รวมถึงสบู่และแอลกอฮอล์จะถูกแยกออกไปด้วย หลังจากนั้นจึงมีการเติมแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มเข้ามาใหม่อีกครั้ง ซึ่งปริมาณการใช้แอลกอฮอล์แต่ละครั้งยังไม่ชัดเจนว่าสัดส่วนใดที่เหมาะสม รวมทั้งความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาในแอลกอฮอล์ซึ่งทั้ง 2 ครั้งซึ่งไม่จำเป็นต้องเท่ากัน

การผลิตเมทอกไซด์เป็นกระบวนการที่อันตรายเพราะต้องใช้ความร้อนและเกิดไฮโดรเจน รวมถึงเมทอกไซด์ที่เป็นพิษ ดังนั้นจึงต้องสร้างสภาพการผลิตที่ปลอดภัยให้มากขึ้น

2.5 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification)

ทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ซึ่งมักจะถูกเรียกว่าแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) เป็นปฏิกิริยาของน้ำมันหรือไขมันกับแอลกอฮอล์ เพื่อทำให้เกิดเป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล หรือเอสเทอร์และเอสเทอร์ (กรณีเกิดเอสเทอร์และได-, โมโนกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นเอสเทอร์ชนิดหนึ่ง) ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน มักจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาและให้ได้ผลได้ (yield) ของปฏิกิริยาสูง เนื่องจากทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ (reversible) จึงต้องใช้แอลกอฮอล์ที่มากเกินพอ เพื่อให้สมดุลเลื่อนไปทางด้านของผลผลิตไบโอดีเซลให้มากที่สุด ปฏิกิริยานี้แสดงไว้ดังภาพ 2.2



ภาพ 2.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์

แอลกอฮอล์ที่ใช้จะเป็นแอลกอฮอล์ปฐมภูมิหรือทุติยภูมิสายโซ่ตรงที่มีหมู่ OH เพียงหมู่เดียว มีอะตอมคาร์บอน 1-8 อะตอม และที่นิยมใช้กันก็คือ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล และเอมีลแอลกอฮอล์ (amyl alcohol) แต่ที่ใช้กันมากที่สุด คือเมทานอลและเอทานอล โดยเฉพาะเมทานอล เนื่องจากมีราคาถูกและมีข้อได้เปรียบเชิงฟิสิกส์และเชิงเคมีในตัวของมันเอง จากการเป็นแอลกอฮอล์ที่มีขั้วและมีโซ่สั้นที่สุด ทำให้มันสามารถเกิดปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้อย่างรวดเร็วและละลายตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์ได้ง่าย โดยตามสัดส่วนปริมาณสัมพันธ์ (stoichiometry) ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีนั้นจำเป็นต้องใช้แอลกอฮอล์ต่อไตรกลีเซอไรด์ในสัดส่วน 3:1 โมล (ดังสมการภาพ 2.2) แต่ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องใช้ในแอลกอฮอล์ในสัดส่วนที่สูงกว่านี้ เพื่อเลื่อนสมดุลให้ก่อเกิดเป็นเอสเทอร์ที่มากขึ้น ปฏิกิริยานี้สามารถใช้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยาที่เป็นกรด แอลคาไลน์(ต่าง) หรือเอนไซม์ได้ โดยแอลคาไลน์ที่ใช้ก็เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สารประกอบคาร์บอเนต สารประกอบออกไซด์และแอลกอฮอล์ (alkoxides) ของ โซเดียมและโพแทสเซียม เช่นโซเดียมเมทอกไซด์ (sodium methoxide) โซเดียมเอทอกไซด์ (sodium ethoxide) เป็นต้น ส่วนกรดที่มักใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก็คือ กรดซัลฟิวริกหรือกรดกำมะถัน (sulfuric acid) กรดซัลโฟนิค (sulfonic acid) และกรดเกลือ (hydrochloric acid) ส่วนไลเปส (lipase) ก็เช่นNovozym 435 ซึ่งมีจุดเด่นในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่ใช้แอลคาไลน์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดขึ้นเร็วกว่าใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและมักใช้กันในเชิงอุตสาหกรรม

สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่ใช้แอลคาไลน์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ต้องใช้ไตรกลีเซอไรด์ และแอลกอฮอล์ที่ปราศจากน้ำหรือมีน้ำน้อยสุด เพราะน้ำจะช่วยในการเกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชัน (saponification) ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดสบู่ สบู่ที่เกิดขึ้นจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณน้อยลง ผลได้ (yield) ของเอสเตอร์ต่ำลง การแยกเอสเตอร์และกลีเซอรอลจะยากขึ้น รวมไปถึงการทำบริสุทธิ์ไบโอดีเซลด้วยการล้างด้วยน้ำ ซึ่งจะล้างได้ยากขึ้น สารป้อน (feedstock) ไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันอิสระปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อย จะเป็นสารป้อน ที่ดีสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่ใช้แอลคาไลน์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยหากสารป้อนไตรกลีเซอไรด์มีน้ำและกรดไขมันอิสระอยู่สูงมาก ควรเลือกใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทน หรือต้องทำสารป้อนให้บริสุทธิ์ขึ้นด้วยการกลั่นลำดับส่วน หรือผ่านปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนกรดไขมันอิสระเป็นสบู่ก่อนแล้วแยกสบู่ออกไป หลังจากนั้นจึงทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้แอลคาไลน์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์แล้ว ผลผลิตที่ได้จะเป็นสารผสมที่ประกอบด้วยเอสเตอร์ กลีเซอรอล แอลกอฮอล์ ตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำ สบู่และ ไตร- ได- และโมโนกลีเซอไรด์ที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์นั้นไม่ใช่สิ่งที่ทำได้โดยง่าย ในเชิงกายภาพ เพราะมีสิ่งปนเปื้อน (impurity) หลายชนิดในไบโอดีเซล เช่น ไตร-, ได- และโมโนกลีเซอไรด์ มีสมบัติเชิงกายภาพใกล้เคียงกับเอสเตอร์ สารปนเปื้อนบางชนิด เช่นโมโนกลีเซอไรด์เป็นสาเหตุให้เกิดความขุ่น (turbidity) ซึ่งจะเกิดผลึกขึ้นในสารผสมของเอสเตอร์ ปัญหาเช่นนี้พบได้ชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของไขมันสัตว์ เช่น จากไขมันวัว เป็นต้น

2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

2.5.1.1 ความชื้น (Moisture) และกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid)

วัตถุดิบเริ่มต้นใช้ไตรกลีเซอไรด์ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่ใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะต้องมีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 1% หากปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่า 1% จำเป็นต้องกำจัดกรด

ไขมันอิสระออกโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาให้เป็นกลางหรือเปลี่ยนกรดไขมันอิสระให้เป็น เอสเตอร์เสียก่อน เพราะถ้าไม่กำจัดกรดไขมันอิสระออกจะทำให้เกิดสบู่ขึ้นซึ่งมีผลดังนี้

- มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา
- เพิ่มค่าความหนืดและเกิดเจล
- การแยกกลีเซอรินยากมากขึ้น



2.5.1.2 สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ (molar ratio)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจะเป็นไปตามปริมาณสัมพันธ์โดยใช้แอลกอฮอล์ 3 โมล ทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล เพื่อให้เกิดผลได้ คือ เอสเตอร์กรดไขมัน 3 โมล และกลีเซอริน 1 โมล อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาแปรตามความเข้มข้นของสารเข้าทำปฏิกิริยา แต่การใช้แอลกอฮอล์มากเกินไป ทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายในการแยกคืนแอลกอฮอล์กับมาใช้ใหม่มากขึ้น และอุปกรณ์มีขนาดใหญ่มากขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยานี้

2.5.1.3 ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ประกอบด้วย

- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก และกรดไฮโดรคลอริก
- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเอนไซม์ เช่น เอนไซม์ไลเปส

ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจะเกิดเร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด แต่น้ำมันมีปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณน้ำที่สูงตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดจะเหมาะสมกว่า (Ma และ Hanna, 1999)

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับชนิดวัตถุดิบมีความสำคัญ เพราะมีข้อจำกัดของตัวเร่งปฏิกิริยาเอง เช่น โซเดียมเมทอกไซด์ ไม่เหมาะที่จะใช้กับระบบที่มีปริมาณน้ำสูง และโซเดียมเมทอกไซด์มีราคาสูง ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เฟสกลีเซอรอลเป็นของเหลวเหมาะในการดำเนินการในระบบแบทช์ แต่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 เท่า สำหรับโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถผลิตได้ในประเทศจึงมีราคาถูก แต่เฟสกลีเซอรอลเป็นของแข็งเมื่ออุณหภูมิต่ำจึงเหมาะกับระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง

2.5.1.4 เวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction time)

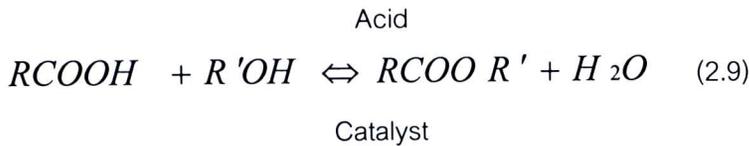
อัตราการเปลี่ยน (conversion) จะแปรกับเวลาทำปฏิกิริยา แต่การเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนจะลดลงตามเวลาเช่นกัน ดังนั้นการหาระยะเวลาที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญในเชิงเศรษฐศาสตร์มาก

2.5.1.5 อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา (Reaction temperature)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดน้ำมันที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา และแอลกอฮอล์ที่เข้าทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาโดยทั่วไปจะเกิดเร็วขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น หากดำเนินการที่ความดันบรรยากาศมักใช้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์บริสุทธิ์เล็กน้อย และถ้าต้องการใช้อุณหภูมิที่สูงกว่านี้ จะกระทำในภาชนะทนความดันสูงในระบบปิด เพราะแอลกอฮอล์จะกลายเป็นไอ หรือต้องติดตั้งระบบควบแน่นไอแอลกอฮอล์เพื่อป้องกันการสูญเสียแอลกอฮอล์ออกนอกระบบ

2.6 ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน (Esterification)

เอสเตอริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้กลายเป็น เอสเตอร์ มีสมการทั่วไปดังนี้



Fatty Acid Alcohol Ester Water

โดยทั่วไปจะใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นต้องมีการดึงน้ำออกเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปทางด้านขวามือเพื่อเพิ่มผลได้ (yield) ของเอสเตอร์ ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันสามารถประยุกต์มาใช้ในกรรมวิธีลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบให้เป็นเอสเตอร์ได้เป็นอย่างดี

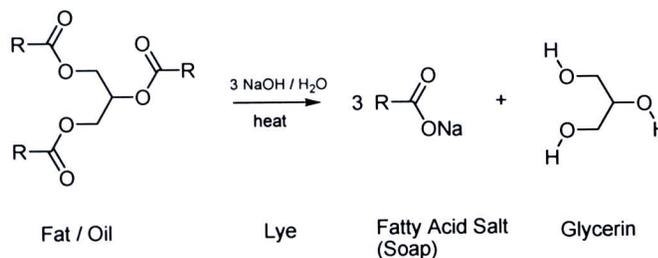
โครงสร้างทางเคมีของแอลกอฮอล์ กรดไขมัน และตัวเร่งปฏิกิริยากรด ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน ต่างก็มีผลต่ออัตราของปฏิกิริยาทั้งสิ้น แอลกอฮอล์แบบปฐมภูมิ เช่นเมทานอลและเอทานอลสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว เพราะมันมีขนาดค่อนข้างเล็กและไม่มีโซ่คาร์บอนด้านข้าง (side chain) ที่จะกีดขวางการเกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มักเป็นกรดสามัญทั่วไป คือกรดเกลือและกรดซัลฟิวริก เพราะเป็นกรดแก่ เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะถูกทำให้เป็นกลาง (neutralize) เพื่อแยกออกจากผลผลิต นักเคมีชาวเยอรมันในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง ได้พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยากรดที่เป็นของแข็งหรือเรซินแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin) สำหรับใช้ในการผลิตเอสเตอร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งเหล่านี้จะใช้งานได้ดีกับเอสเตอร์ที่ว่องไวต่อกรดเท่านั้น และมันจะถูกแยกออกจากผลผลิตโดยการกรอง

ในระดับอุตสาหกรรม มีการผลิตสารเอสเตอร์เหล่านี้ด้วยกระบวนการแบบแบทช์หรือแบบต่อเนื่อง กระบวนการแบบแบทช์จะประกอบด้วยถังปฏิกรณ์เดี่ยว ซึ่งเติมสารเข้าทำปฏิกิริยา (reactants) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดและแอลกอฮอล์เข้าไปเมื่อเริ่มทำปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปน้ำที่เกิดขึ้นจะถูกแยก

นอกจากระบบ กระบวนการแบบแบทช์มักต้องการถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ที่สามารถบรรจุสารเข้าทำปฏิกิริยาทั้งหมดไว้ได้ กระบวนการแบบต่อเนื่องสำหรับผลิตเอสเทอร์ได้รับการจดสิทธิบัตรในปี 1921 และใช้กันอย่างกว้างขวางในการผลิตเอสเทอร์ปริมาณมากๆ กระบวนการนี้ได้อ่อนกระแสของสารเข้าทำปฏิกิริยาทั้งหมดเข้าไปในถังปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกันก็ดึงผลผลิตออกมาด้วย เอสเทอร์ฟิเคชันแบบต่อเนื่องมีข้อดีคือสามารถผลิตผลผลิตจำนวนมากด้วยเวลาอันสั้น

2.7 ปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชัน (saponification)

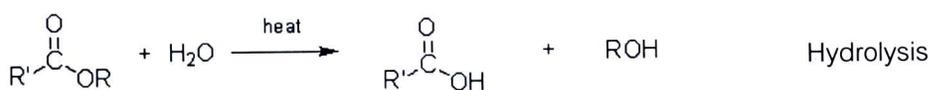
กระบวนการสะพอนิฟิเคชันเป็นกระบวนการผลิตสบู่ซึ่งตามปกติใช้ไขมันและด่าง ในเชิงเทคนิคแล้ว สะพอนิฟิเคชันคือการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ (ซึ่งจัดเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน) ด้วยเบส (ปกติใช้โซดาไฟ) เกิดเป็นเกลือคาร์บอกซิเลตและกลีเซอรอล ดังภาพ 2.3

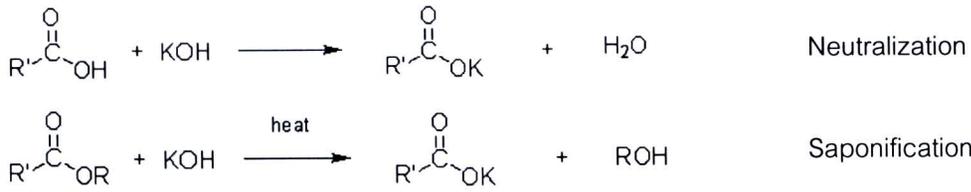


ภาพ 2.3 ปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์

ค่าสะพอนิฟิเคชัน (saponification value) คือปริมาณของเบสที่จำเป็นต้องใช้ในการทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสบู่ของตัวอย่างไขมัน ซึ่งสามารถใช้ระบุจำนวนโมลของกรดไขมันต่อน้ำหนักน้ำมันได้

ปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยารวมของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอสเทอร์และปฏิกิริยาสะเทินกรด-เบส ซึ่งเป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ ดังภาพ 2.4





ภาพ 2.4 กลไก 2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันของเอสเทอร์

ปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาข้างเคียงที่สำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์เอกพันธ์ เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกใช้หมดไปด้วยการถูกเปลี่ยนไปเป็นสบู่ ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยน (% conversion) ต่ำ และสบู่จะขัดขวางการทำปฏิกิริยาและการแยกชั้นของกลีเซอรอลจากเฟสไบโอดีเซลอีกด้วย

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอสเทอร์ในสภาวะเป็นกรด เป็นปฏิกิริยาผันกลับของปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะเปลี่ยนกรดไขมันอิสระให้เป็นเอสเทอร์โดยมีร้อยละการเปลี่ยนที่สูงมาก ๆ

2.8 การแยกคีนแอลกอฮอล์

การแยกคีนแอลกอฮอล์ในการผลิตไบโอดีเซลเป็นเรื่องที่สำคัญมาก เพราะจัดเป็นต้นทุนวัตถุดิบที่มีราคาสูง โดยในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่ใช้แอลคาไลน์เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาจะใช้แอลกอฮอล์เกินพอประมาณ 100% ซึ่งแอลกอฮอล์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยานี้ ถ้าเป็นเมทานอลจะกระจายตัวอยู่ในเฟสไบโอดีเซลประมาณ 40% และเฟสกลีเซอรอลประมาณ 60%

การแยกแอลกอฮอล์ออกจากไบโอดีเซลและกลีเซอรอลอาจทำได้หลายกรรมวิธี เช่น การระเหยแบบแฟลช (flash evaporation) การกลั่น และการล้างด้วยน้ำ โดยสารผสมเมทานอล/ไบโอดีเซล และเมทานอล/กลีเซอรอล จะไม่เป็นสารผสมอุดมคติ โดยมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลกันอยู่ ดังนั้นการแยกเมทานอลให้เหลืออยู่น้อยมาก ๆ จึงเป็นเรื่องที่ยาก

กระบวนการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ แล้วทำการแยกเมทานอลออกจากร้าน้ำอีกครั้งเป็นกรรมวิธีที่มีราคาสูง เพราะมีน้ำผสมอยู่เป็นสัดส่วนที่สูงมาก ส่วนการกลั่นแยกเมทานอลออกจากไบโอดีเซลนั้นทำได้ไม่ยาก แต่หากลั่นลำดับส่วนเป็นอุปกรณ์ที่ซับซ้อนทั้งการควบคุมและดำเนินการ ดังนั้นจึงมีค่าดำเนินการที่สูง ในระหว่างทางเลือกเหล่านี้ การระเหยแบบแฟลชจะเป็นทางออกที่ดีกว่า โดยการแยกเมทานอลให้เหลืออยู่ในไบโอดีเซลในจำนวนที่น้อยมากนั้น ต้องใช้กระบวนการระเหยหลายขั้นตอน ซึ่งรวมทั้งการระเหยภายใต้สูญญากาศด้วย ดังนั้นการตัดสินใจกำหนดอุปกรณ์ในกระบวนการแยกคีนทั้งหมดจะพิจารณาจาก 1) ปริมาณเมทานอลที่มากเกินพอในไบโอดีเซล 2) ค่าเมทานอลที่จะกำหนดให้คงเหลือ

ในไบโอดีเซล 3) สาธารณูปโภคด้านความร้อนที่มีอยู่ (การให้ความร้อนและการทำให้เย็น) 4) วัสดุที่ใช้สร้างอุปกรณ์

เมทานอลที่แยกคืนได้ในการระเหยนี้ มักจะมีน้ำผสมอยู่เกินมาตรฐานที่จะนำไปใช้ใหม่ ในกระบวนการผลิต จึงต้องทำให้บริสุทธิ์มากขึ้นด้วยการกลั่นหรือการดูดซับด้วย Molecular sieve ซึ่งพิจารณาทางเลือกเหล่านี้จะดูจากปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเมทานอลรวมทั้งขนาด กำลังการผลิตด้วย

Zhou และ Boocock (2006) ศึกษาการกระจายตัวของแอลกอฮอล์ กลีเซอรอล เอสเตอร์ สบูโซเดียม ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองด้วยการจำลองแบบ พบว่าเมื่อผสมเอสเตอร์ กลีเซอรอล และแอลกอฮอล์เข้าด้วยกันด้วยการเขย่าอย่างรุนแรงแล้วปล่อยให้แยกชั้น จะไม่พบเอสเตอร์ ในเฟสกลีเซอรอล เพราะไม่มี ได-, โมโนกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นสารอิมัลซิฟายเออร์อยู่ในระบบ เหมือนกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจริง และเมื่อจำลองแบบด้วยการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเมทอกไซด์เข้าไป การกระจายตัวในเฟสทั้งสองแสดงได้ในตารางต่อไปนี้

ตาราง 2.5 การกระจายตัวของแอลกอฮอล์ กลีเซอรอล เอสเตอร์ สบูโซเดียม ในเฟสเอสเตอร์และกลีเซอรอล

	Methanolysis mixture		Ethanolysis mixture	
	Ester-rich phase	Glycerol-rich phase	Ester-rich phase	Glycerol-rich phase
Glycerol	2.3%	97.7%	19.3%	80.7%
Alcohol	42.0%	58.0%	75.4%	24.6%
Ester	99.0%	1.0%	99.0%	1.0%
NaOR	5.8%	94.2%	10.1%	89.9%

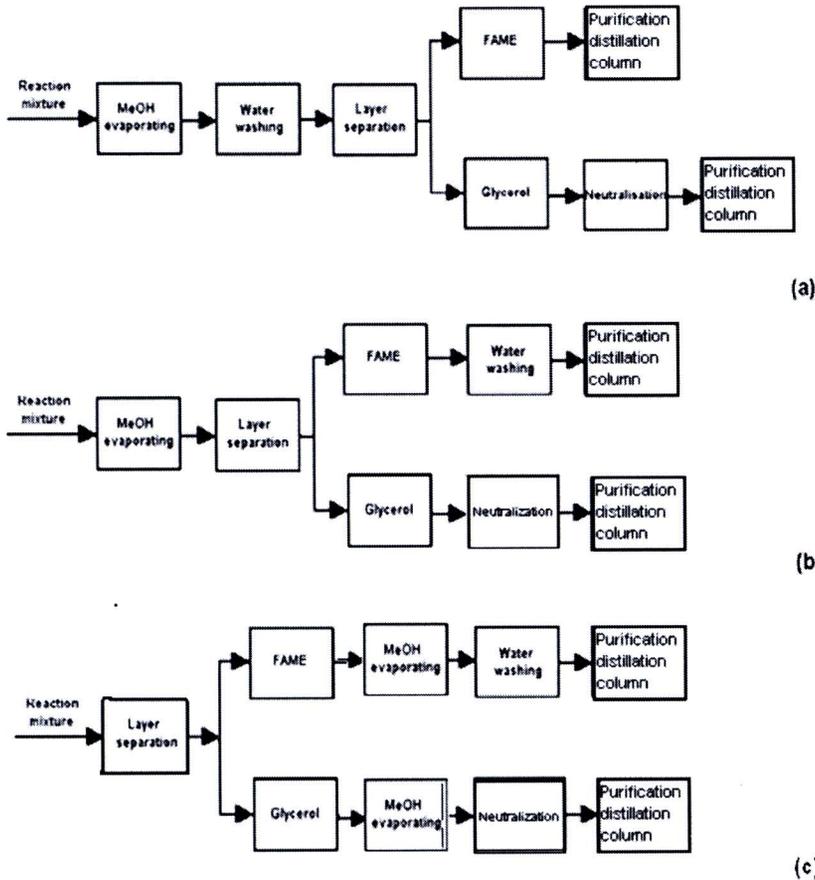
เทคโนโลยีที่ใช้ในการแยกคืนแอลกอฮอล์นั้นมีหลากหลายวิธีการ แล้วแต่กระบวนการและการออกแบบอุปกรณ์ เช่นเมื่อใช้ NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังเก็บกลีเซอรอลดิบจะถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิในช่วง 55-60 °C เพื่อป้องกันการแข็งตัวของกลีเซอรอล และกลีเซอรอลจะถูกปรับให้มี pH ประมาณ 6 ก่อนผ่านเข้าเครื่องระเหย ซึ่งด้านบนอาจออกแบบให้มีคอลัมน์ซึ่งบรรจุวัสดุบรรจุชนิดพิเศษไว้ ไอที่ระเหยออกจากเฟสกลีเซอรอลจะผ่านคอลัมน์นี้ก่อนที่จะผ่านเข้าไปยัง เครื่องควบแน่น และส่วนหนึ่งของเมทานอลที่ควบแน่นได้ จะถูกป้อนกลับเป็นรีฟลักซ์กลับมาที่ คอลัมน์อีกครั้ง ซึ่งเป็นการผสมผสานการกลั่นลำดับส่วนเข้ากับเครื่องทำระเหย โดยเมทานอลส่วนที่เหลือจากการป้อนกลับเป็นรีฟลักซ์ จะถูกทำให้เย็นแล้วนำเข้าสู่ถังเก็บเพื่อนำไปใช้ต่อไป

2.9 การล้าง (washing)

การล้างเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากประการหนึ่ง เพราะเป็นขั้นตอนขจัดสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ต้องการที่มีอยู่ในผลผลิตไบโอดีเซล หลังทำปฏิกิริยาแล้วให้เหลือน้อยที่สุด สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ได้แก่ สบู่ แอลกอฮอล์ กลีเซอรอลอิสระ และตัวเร่งปฏิกิริยาหากยังหลงเหลืออยู่ ขั้นตอนการล้างนี้เป็นขั้นตอนสำคัญเพราะการสูญเสียผลได้ (yield) จะเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้มาก

ขั้นตอนการล้างจะเกิดขึ้นหลังขั้นตอนการแยกคีนแอลกอฮอล์ด้วยการระเหยออกหลายครั้งหรือในบางเทคโนโลยี อาจล้างก่อนการแยกคีนแอลกอฮอล์ โดยนำน้ำล้างและเฟสกลีเซอรอลไประเหยแยกคีนแอลกอฮอล์ในขั้นตอนเดียว แต่แอลกอฮอล์ที่แยกคีนได้จะมีปริมาณน้ำอยู่สูง ซึ่งเป็นภาระในการกลั่นแยกแอลกอฮอล์ให้บริสุทธิ์ต่อไป ในอุตสาหกรรมอาจมีขั้นตอนการล้างที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพ 2.5 คือ

- แยกคีนแอลกอฮอล์, ล้างรวมทั้งเฟสเอสเทอร์และกลีเซอรอล, แยกชั้นของเฟสเอสเทอร์และกลีเซอรอลออกจากกัน แล้วตามด้วยการทำบริสุทธิ์แต่ละเฟส
- แยกคีนแอลกอฮอล์, แยกเฟสเอสเทอร์และกลีเซอรอลออกจากกัน แล้วจึงล้างเฉพาะเฟสเอสเทอร์ ส่วนเฟสกลีเซอรอลนำไปทำการสะเทินแล้วทำให้บริสุทธิ์ต่อไป
- แยกเฟสเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลหลังทำปฏิกิริยาทันที แยกคีนแอลกอฮอล์ในแต่ละเฟส แล้วจึงล้างเฉพาะเฟสเอสเทอร์ ส่วนเฟสกลีเซอรอลนำไปทำการสะเทินแล้วทำให้บริสุทธิ์ต่อไป



ภาพ 2.5 ระบบการล้างไบโอดีเซลในอุตสาหกรรม

ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมมักทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันมากกว่า 1 ครั้ง ส่วนใหญ่จะใช้ 2 ครั้ง และบางเทคโนโลยีใช้ถึง 3 ครั้ง สัดส่วนการเติมแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยาในแต่ละสแตจจะแตกต่างกันไปตามแต่ละเทคโนโลยี แต่ในบทความวิชาการมักนำเสนอโดยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน 2 ครั้ง โดยแบ่งแอลกอฮอล์ใช้ในสแตจแรก 70% และในสแตจที่สอง 30% ซึ่งยังไม่สามารถสรุปได้ว่าเป็นการผลิตที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

ในอุตสาหกรรมนั้น การแยกเฟสเอสเตอร์และเฟสกลีเซอรอลมักใช้อุปกรณ์เครื่องเหวี่ยงแยก ในการแยกแต่ละสแตจอาจมีการเติมน้ำลงไปด้วยเล็กน้อย เทคนิคเหล่านี้ไม่ได้ทำการเผยแพร่ในวงกว้าง ดังนั้นการล้างไบโอดีเซลจะเกิดหลังการแยกเฟสแล้วเป็นส่วนใหญ่ การล้างแบบรวมทั้งสองเฟสเกือบไม่มีการดำเนินการแล้วในปัจจุบัน ในเรื่องการล้างไบโอดีเซลนี้ มีงานวิจัยออกมาไม่มากนัก เนื่องจากเป็นกรรมวิธีที่รู้จักกันดีแล้ว และเนื่องจากการล้างด้วยน้ำจะมึน้ำเสียที่ต้องบำบัด จึงมีเทคโนโลยีการล้างแบบแห้งโดยใช้

สารดูดซับทั้งสบู แอลกอฮอล์ กลีเซอรอล และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือขึ้นมาเป็นทางเลือกในการใช้งานด้วยการล้างแบบแห้งนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเช่นกัน

2.9.1 การล้างด้วยน้ำ

การล้างด้วยน้ำเป็นกระบวนการที่ดำเนินการในอุตสาหกรรม โดยต่อท่อน้ำและท่อไบโอดีเซลเข้า static mixer และใช้เครื่องเหวี่ยงแยกมาแยกไบโอดีเซลออกจากน้ำ ดังนั้นจึงใช้น้ำล้างในจำนวนที่น้อยกว่า การล้างปกติ น้ำที่ใช้ล้างอาจเป็นน้ำอุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยล้างสบู่ออกจากไบโอดีเซลได้ดีขึ้น การล้างด้วยเครื่องเหวี่ยงจะรวดเร็ว ใช้น้ำน้อย และสูญเสียผลได้ไบโอดีเซลไปกับน้ำเสียน้อยกว่า การล้างน้ำจะล้างกันประมาณ 2 ครั้ง ปริมาณน้ำที่ใช้ล้างรวมทั้งหมดประมาณ 20% ของปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้

ในการล้างแบบปกตินั้น ต้องใช้เทคนิคพิเศษคือในการกวนน้ำเข้ากับเฟสไบโอดีเซลนั้นจะต้องไม่กวนอย่างรุนแรง เพราะปริมาณสบู่จำนวนมากที่อยู่ในไบโอดีเซลจะสร้างไมเซลล์ระหว่างน้ำกับไบโอดีเซลเกิดเป็นอิมัลชัน ซึ่งการสลายอิมัลชันอาจใช้การอุ่นไบโอดีเซลให้ร้อนอีกครั้งแล้วอิมัลชันจะค่อยๆ สลายตัวไปเองอย่างช้า ๆ

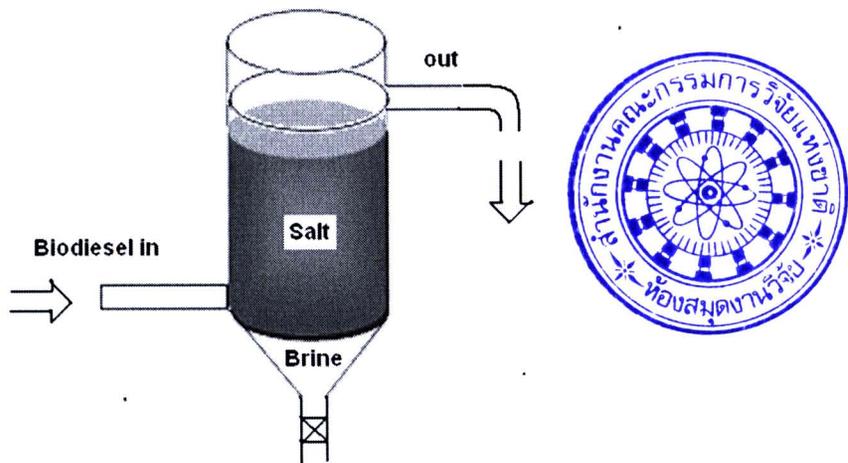
การล้างในการผลิตแบบแบทช์ ชาคริดและคณะ 2545 ได้ใช้เทคนิคการล้างหลายครั้งด้วยการพ่นน้ำอุ่นให้เป็นละอองตกผ่านจากด้านบน ของไบโอดีเซลที่ถ่ายเอากลีเซอรอลออกแล้ว ซึ่งในระหว่างที่หยดน้ำตกผ่านชั้นไบโอดีเซลก็จะละลายเอาสบู่ออกมาด้วย น้ำจะมารวมตัวอยู่ที่ด้านล่าง และเมื่อออกแบบถึงให้ เป็นก้นกรวย เราจะสามารถถ่ายน้ำล้างออกมาได้ หลังจากรอให้เฟสของชั้นน้ำแยกตัวจากเฟสไบโอดีเซล ในช่วงเวลาประมาณ 15 นาที ทำการล้างด้วยน้ำประมาณ 5 ครั้ง น้ำที่ใช้ล้างแต่ละครั้งประมาณ 20% โดยปริมาตรของไบโอดีเซลในถัง และในครั้งที่ 3, 4 และ 5 สามารถเปิดเครื่องกวนเพื่อให้ น้ำได้สัมผัสกับไบโอดีเซลอย่างทั่วถึง เพราะปริมาณสบู่ส่วนใหญ่ออกไปกับน้ำล้างใน 2 ครั้งแรกไปมากแล้ว และสบู่ที่เหลือน้อยจะไม่สร้างอิมัลชันขึ้น

เทคนิคการล้างอีกวิธีที่ใช้กันมาก คือการกวนด้วยฟองอากาศเบา ๆ ด้วยการเปิดบีมอากาศไว้ตลอดคืน โดยใช้น้ำล้างในปริมาตรเดียวกันกับปริมาตรไบโอดีเซล แล้วจึงถ่ายน้ำล้างออกในอีกวันหนึ่ง วิธีนี้ก็นิยมใช้กันมากในการผลิตขนาดเล็ก ๆ

หลังจากล้างน้ำแล้วก็ยังเป็นขั้นตอนการทำแห้ง ซึ่งควรทิ้งไว้ให้น้ำแยกชั้นไปอยู่ด้านล่างก่อนให้มากที่สุด การทำให้แห้งทั่วไปทำได้ด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 120°C เป็นเวลานานมากกว่า 2 ชั่วโมง ซึ่งหากสามารถดำเนินการขจัดน้ำออกภายใต้สุญญากาศได้ก็จะทำให้ลดเวลาการดำเนินการลงได้มาก

ในความเข้าใจของบุคคลทั่วไปจะเข้าใจว่าน้ำจะกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ 100°C ซึ่งจะเป็นจริงในสถานะน้ำบริสุทธิ์เท่านั้น แต่ในกรณีสารผสมหรือสารละลาย การกลายเป็นไอของน้ำจะยากขึ้นมากและยากมากในกรณีที่มีปริมาณน้ำเหลือน้อยมากๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากต้องการแยกน้ำออกจากสารประกอบประเภทมีสภาพขั้วจะยากมาก ดังนั้นไบโอดีเซลซึ่งมีสภาพขั้วที่สูงกว่าปิโตรเลียมดีเซลจึงขจัดน้ำออกได้ยากกว่า

สถานวิจัย ฯ ได้พัฒนาระบบทำแห้งหลังการล้างด้วยน้ำด้วยการใช้เกลือเป็นสารดูดซับน้ำในไบโอดีเซล ดังภาพ 2.6



ภาพ 2.6 ระบบทำแห้งหลังการล้างด้วยน้ำด้วยการใช้เกลือเป็นสารดูดซับน้ำในไบโอดีเซล

เกลือทะเลราคาถูกบรรจุในถังพลาสติกกันกรวย ติดท่อใส่วาล์วด้านกัน มีท่อป้อนไบโอดีเซลเข้าด้านข้างทางล่าง และมีท่อไบโอดีเซลออกด้านบน ป้อนไบโอดีเซลให้ไหลเข้าถังในอัตราที่ประมาณให้อยู่ในถังเกลือ 10 นาที ไบโอดีเซลจะไหลล้นออกด้านบนเอง น้ำในไบโอดีเซลจะถูกเกลือดูดซับไว้และสะสมเป็นน้ำเกลืออยู่ด้านล่างเพราะหนักกว่า ถ่ายน้ำเกลือออกเป็นครั้งคราว พร้อมเติมเกลือเพิ่มเมื่อเกลือพร่องลง ปริมาณน้ำในไบโอดีเซลจะลดลงเหลือประมาณ 1,000 ppm ซึ่งเกินมาตรฐานเล็กน้อยซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ และหากต้องการให้ได้มาตรฐานคือ ต่ำกว่า 500 ppm สามารถนำไปผ่านถังเรซินมีคุณสมบัติดูดซับน้ำได้ดีต่อไป แต่เรซินนี้มีราคาสูงมาก วิธีการนี้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานของการระเหยน้ำออกด้วยความร้อน และประหยัดกว่าการดูดซับด้วยเรซินที่พิเศษเฉพาะในการดูดซับน้ำเพียงอย่างเดียว

2.9.2 การล้างแบบแห้ง (Dry Washing)

การล้างแบบแห้งใช้หลักการการดูดซับ (adsorption) ซึ่งในอุตสาหกรรมนิยมใช้แมกนีเซียมซิลิเกต (magnesium silicate) ซึ่งใช้ในชื่อทางการค้าว่าแมกนีซอล (Magnesol) การใช้สารดูดซับมีข้อดีในการดำเนินการที่เร็วและไม่มีปัญหาในการบำบัดน้ำเสียโดยสามารถลดปริมาณสิ่งปนเปื้อนให้เหลือน้อยกว่า 500 ppm ได้ โดยไม่ต้องมีกระบวนการทำแห้งด้วย นอกจากนี้แมกนีซอลที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถผสมเป็นอาหารสัตว์หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

ต่อมา เรซินที่ใช้เป็นสารดูดซับได้ถูกพัฒนาขึ้น แต่ก็มีข้อสงสัยในการประชาสัมพันธ์เพราะพบว่าประสิทธิภาพในการใช้จริงจะต่ำกว่าค่า specification ที่ประกาศไว้ โดยมักประชาสัมพันธ์การใช้งานว่า 1 กิโลกรัมของเรซินจะใช้งานได้กับไบโอดีเซล ประมาณ 1,000 ลิตร

โชคดี มณีรัตน์ 2552 สถานวิจัยและพัฒนาฯ ศึกษาการประยุกต์ใช้ดินฟอกในกระบวนการล้างไบโอดีเซล ชนิด FAME โดยทำการระเหยเมทานอลออกจากไบโอดีเซลก่อน แล้วปล่อยให้สูญตกจนเป็นเวลา 1 วัน พบว่าสามารถลดปริมาณสบู่ในขั้นตอนนี้ได้ 87% การดูดซับสบู่ในไบโอดีเซลด้วยดินฟอกอุตสาหกรรมกระทำในช่วงปริมาณสบู่ 1,000-8,000 ppm ใช้สัดส่วนดินฟอกต่อน้ำหนักไบโอดีเซล 0.25-3.0% คุณหมุมิในการดูดซับจากศึกษาตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 120°C พบว่าความสามารถในการดูดซับสบู่ของดินฟอกมีค่าสูงสุดที่ 0.39 กรัมสบู่/กรัมดินฟอก ความเปลี่ยนแปลงของดินฟอกอยู่ที่ประมาณ 5.5 กิโลกรัม/1,000 ลิตรไบโอดีเซล และมีการสูญเสียไบโอดีเซลไปกับดินฟอกในค่าประมาณน้ำหนักของดินฟอกที่ใช้ และการประยุกต์ใช้ในระบบเบตนิ่งไม่เหมาะสมเพราะอนุภาคดินฟอกมีขนาดเล็กเกินไป

2.9.3 การล้างแบบผสมผสาน

ชาคริตและคณะ 2554 ศึกษากระบวนการล้างไบโอดีเซลโดยกระบวนการล้างด้วยน้ำร่วมกับสารดูดซับระบบ ต่อเนื่อง โดยได้รับทุนวิจัยสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา พบว่าเรซินชนิดแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ใช้ในเครื่องกรองน้ำ มีความเหมาะสมกว่าการใช้แมกนีซอลและดินฟอก เนื่องจากสามารถฟื้นฟูสภาพและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เมื่อใช้เรซินดูดซับสบู่และกลีเซอรอลในระบบเบตนิ่ง (fixed bed) ถึงดูดซับควรใช้อัตราความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 1.1-1.3:1 ระบบการล้างประกอบด้วยคอลัมน์เรซิน 2 คอลัมน์ ถังล้างน้ำ 1 คอลัมน์ และถังเกลือ 1 คอลัมน์ ไบโอดีเซลหลังการระเหยแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นสารป้อนเข้าระบบล้างมีค่าเฉลี่ยของ สบู่ประมาณ 5,000 ppm และพบว่าสามารถลดสบู่ลงได้ 95% ความสามารถในการดูดซับสบู่ของเรซินเท่ากับ 0.28 g Soap/g Resin เรซินสามารถฟื้นฟูสภาพการใช้งานได้ 5 ครั้ง ใช้ปริมาณน้ำล้าง 6.0% โดยปริมาตรของไบโอดีเซล และเมื่อเติมกรดซิตริกในอัตราส่วน 10 กรัมต่อไบโอดีเซล 100 ลิตรลงในน้ำล้าง จะลดปริมาณน้ำล้างเหลือเพียง 3.0% คุณภาพไบโอดีเซล

เช่น กากถ่าน เถ้าซิลิเกต สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด ค่าความเป็นกรด ปริมาณโลหะกลุ่ม 1 และโลหะกลุ่ม 2 มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด

น้ำล้างมีค่า บีโอดีและซีโอดีเท่ากับ 5,800 และ 215,000 ppm ตามลำดับ สามารถบำบัดน้ำเสียด้วยการระเหย น้ำออก โดยการใช้เชื้อเพลิงราคาถูก เช่น ผลผลิตพลอยได้ก๊าสโซลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล หลังระเหยน้ำหมดจะได้ของแข็งที่เป็นเกลือ นำของแข็งไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่าเป็นส่วนประกอบของเกลือ NaCl , KCl , MgO และ $\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$

ราคาค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดไบโอดีเซลนั้น พบว่าประมาณ 94% เป็นราคาของเรซิน และเมื่อประเมินราคาค่าใช้จ่ายในการบำบัดทั้งหมด พบว่ากรรมวิธีนี้มีราคาการล้างเท่ากับ 0.53 สตางค์/ลิตรไบโอดีเซล ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้