

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล หมายถึง โมโนอัลคิลเอสเทอร์ของกรดซึ่งเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากแหล่งไขมันเช่นน้ำมันพืช ไขมันสัตว์และน้ำมันสำหรับทอดที่ใช้แล้วซึ่งแหล่งไขมันเหล่านี้ถือเป็นพลังงานทดแทน กระบวนการที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซลคือการนำแหล่งไขมันมาผ่านปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่าทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยในกระบวนการผลิตจะผสมน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ให้ทำปฏิกิริยากับเอทานอลหรือเมทานอลเกิดเป็นสารเอสเทอร์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล จึงสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ต้องทำการปรับเครื่องยนต์แต่ประการใดซึ่งเราอาจแบ่งไบโอดีเซลตามประเภทของน้ำมัน ที่นำมาใช้ออกเป็น 3 ประเภท

2.1.1 น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์

ไบโอดีเซลประเภทนี้ก็คือน้ำมันพืชแท้ๆ (น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง และอื่นๆ) หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ (น้ำมันหมู และอื่นๆ) ซึ่งสามารถเอามาใช้ได้เลยกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสม หรือเติมสารเคมีอื่นใด หรือไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมันให้เปลืองเวลา เปลืองทรัพยากรอีก

2.1.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม

ไบโอดีเซลชนิดนี้เป็นลูกผสมระหว่างน้ำมันพืช (หรือสัตว์) กับ น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล หรืออะไรก็ได้เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด อย่างเช่น โคโคดีเซล (coco-diesel) ที่ อ.ทับสะแก ประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งเป็นการผสมกันระหว่างน้ำมันมะพร้าวกับน้ำมันก๊าด หรือปาล์มดีเซล (palm-diesel) เป็นการผสมระหว่างน้ำมันปาล์มกับน้ำมันดีเซล

2.1.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

เป็นความหมายของไบโอดีเซลที่แท้จริงที่ใช้กันทั่วไป ตัวอย่างเช่น ในเยอรมัน สหรัฐอเมริกา หรือที่มาเลเซีย ไบโอดีเซลประเภทนี้ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า เอสเทอริฟิเคชัน หรือทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเสียก่อน นั่นคือการนำเอาน้ำมัน

พืชหรือสัตว์ที่มีกรดไขมันไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้กรดหรือต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้เอสเทอร์ โดยจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ไบโอดีเซลชนิดเอสเทอร์นี้มีคุณสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด ทำให้ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์ เราสามารถนำมาใช้กับรถยนต์ได้ แต่ปัญหาที่จะมีก็คือต้นทุนการผลิตที่แพงนั่นเอง

2.2 การผลิตไบโอดีเซล มีหลายวิธี คือ

2.2.1 การผสม (Blending)

เป็นการนำน้ำมันพืชผสมกับน้ำมันดีเซล พบว่าอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันดีเซลต่อน้ำมันพืชที่ 80 ต่อ 20 ให้ผลเหมือนกรณีที่ใช้ น้ำมันดีเซลร้อยละ 100 อัตราส่วนนี้นิยมใช้มากที่สุด โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนเครื่องยนต์

2.2.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsions)

เป็นกระบวนการที่ทำให้ของเหลวมีสารแขวนลอยกระจายตัวอยู่ เช่น การผสมน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ ซึ่งจะมีสภาพเป็นอิมัลชัน และเมื่อนำไปใช้สามารถฉีดให้เป็นฝอยได้

2.2.3 เทอมอลแครกกิงหรือไพโรไลซิส (Thermal cracking or Pyrolysis)

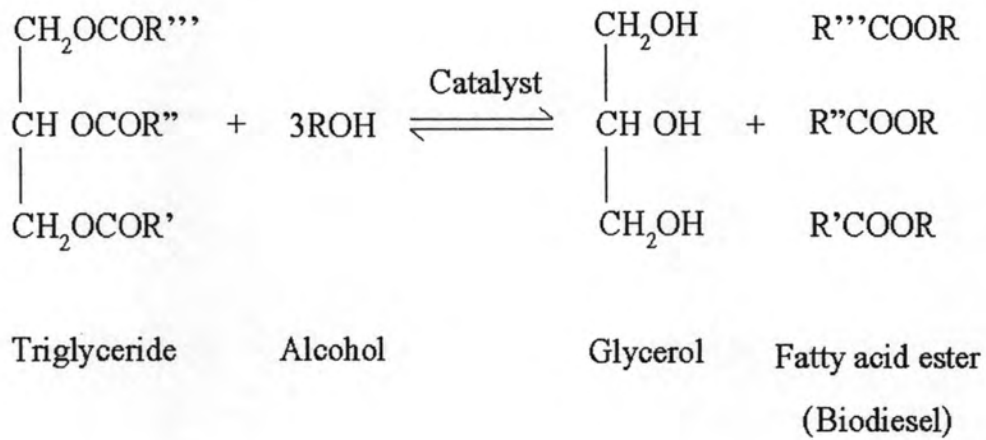
เป็นการให้ความร้อนกับน้ำมันพืชในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน เพื่อให้ น้ำมันแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลง และได้สารประกอบอื่นๆ ด้วย

2.2.4 ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันหรือแอลกอฮอล์ไลซิส (Trans-esterification or Alcoholysis)

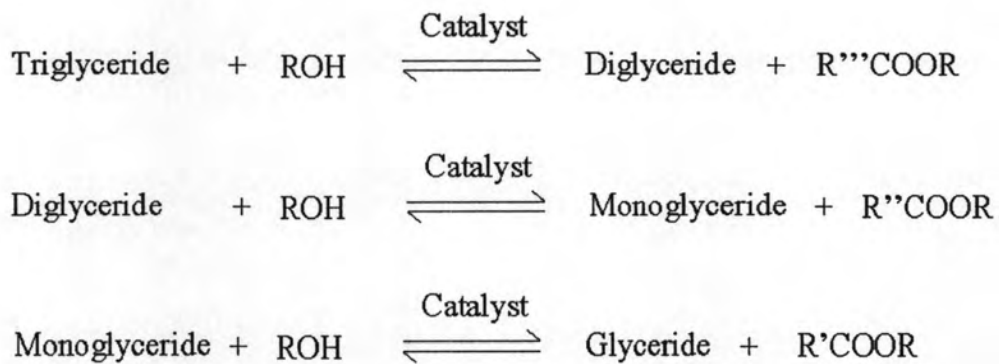
เป็นปฏิกิริยาของน้ำมันหรือไขมันกับแอลกอฮอล์ ได้เอสเทอร์ และกลีเซอรอล โดยใช้ต่าง กรด หรือ เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ไลซิส เป็นปฏิกิริยาการแทนที่หมู่แอลกอฮอล์ของกลีเซอรินในไตรกลีเซอไรด์ด้วยแอลกอฮอล์อีกชนิดหนึ่ง จะได้หมู่เอสเทอร์ของกรดไขมันตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่มาแทนที่ ซึ่งเป็นวิธีลดความหนืดของไตรกลีเซอไรด์ที่นิยมมาก และเรียกเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้ว่า น้ำมันไบโอดีเซล สมการปฏิกิริยาและสมการขั้นปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน



รูปที่ 2.2 ลำดับขั้นปฏิกิริยาพื้นฐาน ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

แอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้แก่ เมทานอล เอทานอล บิวทานอล และโพรพานอล โดยเฉพาะเมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรม และจากคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของเมทานอลที่เป็นสารที่มีขั้ว มีโครงสร้างเล็กจึงทำให้เมทานอลเข้าทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าแอลกอฮอล์ชนิดอื่น คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยเทียบกับน้ำมันดีเซลมาตรฐาน

Description	High Speed diesel	Low Speed Diesel	Diesel	100% Methyl Ester	10% Methyl Ester
Specific gravity at 15.6 °C ASTM D 1298	0.81-0.87	0.920 Max	0.8283	0.8642	0.8306
Kinematic viscosity at 40 °C ASTM D 445	1.8-4.1	8.0 Max	3.36	6.32	3.66
Pour point °C ASTM D 97	10 Max	16 Max	-8	15	2
Sulphur Content %wt ASTM D 129	0.05 Max	1.5 Max	0.04	0.001	-
Flashpoint °C ASTM D 93	52 Min	66 Min	65.73	152	69.2
Fire point °C	-	-	74	188	84
Heating value (KJ/kg)	-	-	47330	40390	47317

ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้เร็วขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะเป็นได้ทั้งเบส กรด และเอนไซม์ ตัวเร่งเบสที่นิยมใช้คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวเร่งกรดที่นิยมใช้คือกรดซัลฟิวริก และกรดไฮโดรครอริก ส่วนเอนไซม์ที่ใช้จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ (Biocatalysts) เช่น เอนไซม์ไลเปส ซึ่งระบบที่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งนั้น ต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานานกว่าระบบอื่น

2.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันชนิดเบส

ตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันชนิดเบสได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โซเดียมเอทอกไซด์ และอัลคอกไซด์อื่นๆ ซึ่งตัวเร่งอัลคาไลด์ดังกล่าวเร่งปฏิกิริยาได้เร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดถึง 4000 เท่า เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่ง

เท่ากัน ดังนั้นในอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ซึ่งที่นิยมใช้มากที่สุดคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีราคาถูกและหาง่าย

2.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันชนิดกรด

ตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันชนิดกรดได้แก่ กรดกำมะถัน (Sulfuric acid) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) กรดเกลือ (Hydrochloric acid) และกรดซัลโฟนิก (Organic sulfonic acid) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะมีความว่องไวต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง แต่ก็สามารถใช้ได้ดีกับไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันอิสระสูง และมีน้ำปนอยู่มาก

2.3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันชนิดเอนไซม์

เอนไซม์ที่นิยมใช้เร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน คือ เอนไซม์ไลเปส โดยจะทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระ จากนั้นจึงทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่ได้ให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันอิสระ ซึ่งต่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างที่กรดไขมันอิสระเป็นสิ่งรบกวนปฏิกิริยา ทำให้ตัวเร่งเอนไซม์ใช้ได้กับน้ำมันพืชใช้แล้ว แต่อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยมากมายแสดงให้เห็นว่า ผลได้ของผลิตภัณฑ์ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยายังไม่ดีเท่าการเร่งปฏิกิริยาด้วยต่าง

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันระบบที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เนื่องจากในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่ามีปัญหาในด้านการจับตัวเป็นสบู่ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างกรดไขมันอิสระซึ่งจะพบได้ในน้ำมันพืชใช้แล้วในปริมาณมากกับเบสซึ่งส่งผลให้ขั้นตอนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์นั้นทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาดังกล่าว แต่จะมีปัญหาเรื่องการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานกว่าแบบใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Freedman และคณะ (1986) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอล โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยพบว่าไคนติกของปฏิกิริยาไปข้างหน้าแบบ Pseudo-first order และย้อนกลับแบบ Second order

Canakci and Gerpan (1999) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และ

ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอล โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในแต่ละผลกระทบที่ทำการศึกษานั้นจะเพิ่มขึ้นกับผลกระทบอื่น จากการศึกษาพบว่าพบว่ามีผลกระทบที่จะทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงจากน้ำมันถั่วเหลืองไปเป็นไบโอดีเซล (Conversion) เพิ่มขึ้นได้นั้นคือ

- การเพิ่มปริมาณของอัลกอฮอล์ที่ใช้การทำปฏิกิริยา หรือกล่าวได้ว่าเป็นการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของอัลกอฮอล์นั่นเอง
- การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา
- การเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก
- การใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาให้นานขึ้น

อย่างไรก็ตามในการศึกษาดังกล่าวไม่ได้ศึกษาถึงความเกี่ยวข้องกันของตัวแปรเหล่านี้ว่ามีผลกระทบซึ่งกันและกันหรือไม่ อีกทั้งยังไม่มีมีการนำเสนอไว้ว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการทำปฏิกิริยาเป็นเช่นไร

Ripmeester (1998) ได้ทำการศึกษาระบวนการ ทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชใช้แล้วกับเมทานอล โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลต่ำสุดคือ 50 ต่อ 1 (เมทานอล ต่อ น้ำมันพืชใช้แล้ว) ความเข้มข้นของกรดที่ร้อยละ 1.5 ถึง 3.5 โดยโมลของปริมาณสารทั้งหมด จากการศึกษาพบว่าการใช้อัตราส่วนของเมทานอลที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากน้ำมันพืชใช้แล้วไปเป็นไบโอดีเซลสมดุล (Equilibrium conversions) ที่สูงมากที่สุดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ต่อมา McBride (1999) ได้นำสภาวะต่างๆ ที่ได้จากผลการศึกษาของ Ripmeester มาศึกษาและออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับผลิต ไบโอดีเซลซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ขนาด 15 ลิตร โดยมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแจ็กเก็ต (Heating jacket) ติดตั้งที่เครื่องปฏิกรณ์เพื่อให้ความร้อนแก่ระบบทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 50 ต่อ 1 ความเข้มข้นของกรดที่ร้อยละ 1.5 โดยโมล ความดัน 170 ถึง 180 กิโลพาสคัล และทำการกวนผสมที่ความเร็ว 400 รอบต่อนาที จากการศึกษาภายใต้สภาวะดังกล่าวพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงจากน้ำมันพืชใช้แล้วไปเป็นไบโอดีเซลที่ร้อยละ 97 ต้องใช้เวลา 240 นาที ได้แบบจำลองไดเนติกเป็นแบบ First order และทำให้ทราบค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate constant)

จากงานวิจัยข้างต้นพบว่า การทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่ง จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่าแบบใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่มีข้อดีคือไม่ทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระทำให้ไม่ต้องมีขั้นตอนการปรับสภาพ และการแยกสบู่ที่เกิดขึ้นออกจากผลิตภัณฑ์เหมาะสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันประกอบอาหารที่ใช้แล้วเพราะน้ำมันประเภทนี้จะมี

ปริมาณของกรดไขมันอิสระอยู่มาก ในการลดระยะเวลาในการทำปฏิกริยานั้นสามารถทำได้หลายวิธี งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการลดอันดับของปฏิกริยา เนื่องจากปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะเกิดขึ้นต่อเนื่องไปที่ละขั้นและเป็นปฏิกริยาผันกลับได้ โดยอันดับของปฏิกริยานั้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่เป็นสารตั้งต้น ตัวอย่างเช่น อันดับของปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลเป็นปฏิกริยาอันดับหนึ่ง เมื่ออัตราส่วนโดยโมลเป็น 30 ต่อ 1 และเป็นปฏิกริยาอันดับสอง เมื่ออัตราส่วนโดยโมลเป็น 6 ต่อ 1 ดังนั้นยิ่งอัตราส่วนโดยโมลมากก็จะช่วยลดอันดับของปฏิกริยาได้ และจากการทดลองของ D. Damoko และ M. Cheryan (2000) พบว่าปฏิกริยาผันกลับมีผลต่อการเกิดปฏิกริยาน้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ค่าคงที่อัตราเร็วการเกิดปฏิกริยาขึ้นอยู่กับปฏิกริยาไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว

Egle S. และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันไข่แล้วกับเมทานอล โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกริยา เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือหาสภาวะการดำเนินงานที่ดีที่สุดในการทำปฏิกริยาเพื่อนำมาคำนวณพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการนี้ จากการวิจัยพบว่าอัตราการเกิดปฏิกริยาขึ้นอยู่กับปริมาณของกรด และค่าความเป็นกรดของปฏิกริยา และที่อัตราส่วนโดยมวล น้ำมันไข่แล้วต่อเมทานอลต่อกรดซัลฟิวริก 1 ต่อ 1 ต่อ 0.05 ที่อุณหภูมิ 20 – 80 องศาเซลเซียส ความเร็วในการกวนผสมครั้งที่ 850 รอบต่อนาที จะได้ค่าคอนเวอร์ชันที่ดีที่สุดโดยใช้เวลาในการทำปฏิกริยา 15 นาที และเมื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์จะได้ ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) เท่ากับ 13.3 กิโลจูลต่อโมล และค่าคงที่ A เท่ากับ 1.27

M.A, Dube และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันไข่แล้วกับเมทานอล โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกริยา โดยใช้การป้อนเมทานอลที่มากเกินไป งานวิจัยนี้เลือกใช้การปรับตัวแปรความเร็วในการกวนผสม องค์ประกอบในสายป้อน (อัตราส่วนโดยโมล น้ำมันไข่แล้วต่อเมทานอลต่อกรด) และอุณหภูมิ จากการศึกษาว่าความเร็วในการกวนผสมไม่ส่งผลกระทบมากนักกับผลผลิตไบโอดีเซล (Yield) แต่อัตราส่วนโดยโมล และอุณหภูมิกลับมีผลอย่างมากต่อผลผลิตไบโอดีเซล โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันไข่แล้วต่อเมทานอลต่อกรด 1 ต่อ 245 ต่อ 3.8 และที่ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลที่ช่วง 1 ต่อ 74 ต่อ 1.9 ถึง 1 ต่อ 245 ต่อ 3.8 จลนพลศาสตร์ของปฏิกริยาไปข้างหน้าแบบ Pseudo-first order มีค่าคอนเวอร์ชัน $99 \pm 1\%$ ใช้เวลา 4 ชั่วโมง และเมื่อทำการป้อนเมทานอลจนมากเกินไปใช้เวลาในการคอนเวอร์ชันน้อยลง

2.5 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

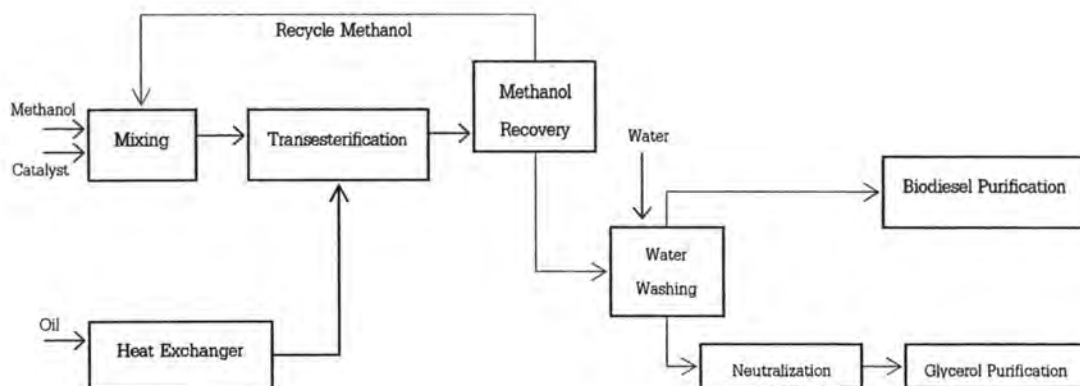
Y. Zhang และคณะ (2002) ได้ทำการออกแบบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชบริสุทธิ์หรือน้ำมันพืชใช้แล้วแบบต่อเนื่องไว้รวมทั้งสิ้น 4 แบบในขนาดการผลิต 8000 ตันต่อปี โดยใช้โปรแกรม HYSYS Plant NetVers 2.1.3 ในการออกแบบ จากการศึกษาทำให้ทราบข้อมูลของสถานะของกระบวนการ และการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ รวมถึงสามารถเปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคของทั้ง 4 กระบวนการทั้งประโยชน์ทางเทคนิค และข้อจำกัดของแต่ละแบบ จากการศึกษาวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า กระบวนการที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้น้ำมันพืชบริสุทธิ์เป็นสารตั้งต้นให้หน่วยผลิตที่มีขนาดเล็ก และมีจำนวนหน่วยในการผลิตน้อยที่สุด แต่มีราคาค่าวัตถุดิบที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกลับกระบวนการแบบอื่น และเมื่อเปรียบเทียบกระบวนการที่ใช้น้ำมันพืชใช้แล้วเป็นสารตั้งต้นระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองแบบพบว่ากระบวนการที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ผลที่ดีกว่า และทางด้านเทคนิคก็มีหน่วยการผลิตที่ซับซ้อนน้อยกว่ากระบวนการที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้น้ำมันพืชใช้แล้วเป็นสารตั้งต้น

Naoko Ellis และคณะ (2006) ได้ทำการออกแบบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้โปรแกรม HYSYS รวมทั้งสิ้น 4 แบบ โดยแบบที่ 1 และ 2 เป็นกระบวนการผลิตแบบเบส และแบบกรดที่วัฏภาคของระบบเป็นของเหลว แบบที่ 3 เป็นกระบวนการที่ใช้กรดในวัฏภาคของแข็งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และแบบที่ 4 เป็นการนำหลักการซูเปอร์คริติคอลล (Supercritical) มาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยทั้ง 4 กระบวนการต้องให้ได้ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์สูง จากการศึกษาพบว่ากระบวนการแบบที่ 3 และ 4 กระบวนการไม่ซับซ้อนมาก และมีจำนวนหน่วยในการผลิตน้อย พลังงาน มวลสาร และขนาดของหน่วยปฏิบัติการ เมื่อทำการพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่ามีความคุ้มค่า

จากการวิจัยดังกล่าว สามารถสังเกตได้ว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นมีขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

1. การเตรียมน้ำมันรวมถึงสารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการผลิต
2. การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน
3. การดึงเมทานอลกลับมาใช้ใหม่
4. การแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอล
5. การดึงเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออกเพื่อทำให้สารมีสภาพเป็นกลาง
6. การทำให้ไบโอดีเซล และกลีเซอรอลมีความบริสุทธิ์มากขึ้น

ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนผังแสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

2.6 การจำลองกระบวนการ

การจำลองกระบวนการ ประกอบด้วย ขั้นตอนการออกแบบแบบจำลอง (Model) ของระบบงานจริง (Real System) การดำเนินการทดลองใช้แบบจำลองนั้นเพื่อการเรียนรู้พฤติกรรมของระบบงาน หรือเพื่อประเมินผลการใช้กลยุทธ์ (Strategies) ต่างๆ ในการดำเนินการภายใต้ข้อกำหนดที่วางไว้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการจำลองแบบปัญหาซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง และการนำเอาแบบจำลองนั้นไปใช้งานเชิงวิเคราะห์อีกขั้นหนึ่ง ส่วนการจำลองกระบวนการมีหลักสำคัญคือ ต้องสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระบบงานจริง เพื่อนำผลไปปรับปรุงการดำเนินงานของระบบได้อย่างเหมาะสม

การจำลองกระบวนการถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในขั้นตอนการออกแบบ และการดำเนินงานโดยในขั้นตอนการออกแบบมุ่งความสนใจไปที่ การทำตุลมวลและพลังงาน ต้นทุน อุปกรณ์ ซึ่งมักเกี่ยวข้องกับทางเศรษฐศาสตร์ ส่วนขั้นตอนการดำเนินงานจะมุ่งความสนใจไปที่ การกำหนดปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การแก้ปัญหาเฉพาะหน้า (Troubleshooting) ของโรงงาน ความสามารถในการควบคุม (Controllability) ความปลอดภัยในการดำเนินงานและการบำรุงรักษา เพื่อลดต้นทุนรักษาศักยภาพการผลิต และเพิ่มความสามารถในการแข่งขันทางการค้า

การจำลองกระบวนการส่วนใหญ่อาศัยซอฟต์แวร์ หรือแพคเกจการจำลองสถานการณ์ (Simulation Packages) เป็นเครื่องมือในการคำนวณและให้วิศวกรเรียนรู้ ประกอบกับความก้าวหน้าด้านคอมพิวเตอร์ ทำให้การจำลองกระบวนการด้วยคอมพิวเตอร์เป็นที่นิยมมากที่สุด อีกทั้งโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ถูกพัฒนาโดยนักพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีให้เลือกใช้อย่างมากมาย ดังนั้นการจำลองสถานการณ์กระบวนการในปัจจุบันสามารถใช้แทนการสร้างแบบจำลองย่อส่วน (Pilot scale) ได้เป็นอย่างดี

เหตุผลที่ต้องสร้างแบบจำลองกระบวนการแทนการทดลองกับกระบวนการจริงมีดังนี้

1. เพราะการทดลองกับกระบวนการจริง อาจก่อให้เกิดความขัดข้องในการดำเนินงานตามปกติ

2. เพราะในการทดลองกับกระบวนการจริงนั้นเป็นการยากที่จะควบคุมสภาวะต่างๆ ในการทดลองให้คงที่ ทำให้ผลการทดลองที่ได้ในแต่ละครั้ง อาจไม่ใช่ผลที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการทดลองกลุ่มเดียวกัน

3. เพราะการทดลองกับกระบวนการจริงอาจต้องใช้เวลา และค่าใช้จ่ายจำนวนมากจึงจะได้ข้อมูลเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์

4. เพราะการทดลองกับกระบวนการจริง อาจเป็นไปได้ที่จะทดลองกับเงื่อนไขทุกรูปแบบที่ผู้วิเคราะห์ต้องการ

อย่างไรก็ตามการจำลองกระบวนการโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์นั้น ผู้ใช้ต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาดีพอ และสามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ของปัญหานั้นๆ ได้ รู้ถึงฟังก์ชันจุดประสงค์ว่ากระบวนการต้องการสิ่งใด อาทิเช่น กำไรสูงสุด หรือต้นทุนวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ต่ำสุด นอกจากนี้ผู้จำลองกระบวนการต้องมีประสบการณ์หรือความสามารถในการตีความคำตอบที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อแยกแยะและตัดสินใจนำผลที่คำนวณได้ไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.7 หลักการออกแบบโครงสร้างระบบควบคุมแบบแพลนท์ไวด์

การควบคุมแบบแพลนท์ไวด์ คือ หลักการออกแบบการควบคุมที่พิจารณาสัมพันธ์ระหว่างหน่วยผลิตทุกหน่วยในกระบวนการ เพื่อออกแบบโครงสร้างการควบคุมทั้งกระบวนการให้ได้ตามวัตถุประสงค์ของการดำเนินกระบวนการ

1. หลักการของบัคเลย์ (Buckley Basic)

เน้นการควบคุมปริมาณสารที่อยู่กับหน่วยต่างๆ สำหรับหอกลับ คือ

1. ของเหลวก้นหอ
2. ของเหลวในยอดหอ
3. ความดันในหอ (ปริมาณก๊าซในหอ)

โดยบัคเลย์กล่าวว่าสามารถควบคุม ปริมาณสารกับคุณภาพแยกกันได้ เพราะค่าคงที่ของการควบคุมปริมาณช้ากว่า 10 เท่า จึงเปรียบเสมือนสภาวะคงตัว จนแยกได้โดยสามารถควบคุมผลิตภัณฑ์ให้ได้ตามที่ต้องการ

2. หลักการของด็อกลาส (Douglas Basic)

ได้เสนอแนวความคิดที่ว่าโรงงานทางเคมีทั่วไป ต้นทุนของวัตถุดิบและมูลค่าของผลิตภัณฑ์จะมีค่ามากกว่า ต้นทุนของการสร้างโรงงานและพลังงาน โดยมีความคิด 2 ข้อ คือ

1. ลดการสูญเสีย สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ โดยถือว่ามีมูลค่ามาก
2. กำหนดค่าอัตราการไหลของสายรีไซเคิลก๊าซให้มากที่สุด คิดว่าต้นทุนด้านพลังงานที่ใช้มีค่าน้อย

การควบคุมให้ความให้ปริมาณสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์มีการสูญเสียน้อยที่สุด หมายถึงการควบคุมสารองค์ประกอบที่สำคัญแบบตรงเป้าหมาย กรณีที่สารผลิตภัณฑ์มีราคาแพงกว่าพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการทำรีไซเคิลแก๊สสามารถช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ โดยดำเนินการให้คอมเพรสเซอร์ทำงานเต็มกำลัง ข้อดีของภาวการณ์ดำเนินการแบบนี้คือ เป็นการลดองศาความอิสระของกระบวนการ เพื่อให้ระบบดำเนินการได้ง่ายขึ้น

3. หลักการของดาวน์ (Downs Basic)

อธิบายถึงความเข้าใจกระบวนการอย่างถ่องแท้ รู้อะไรที่ไปแต่ละองค์ประกอบอย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากการทำสมดุลมวลสารของหน่วยย่อยก่อนทำการพิจารณาทั้งกระบวนการ รู้ว่ามีการสะสมที่ใด ควรจะใช้สารทุกตัวให้หมดไปจากระบบเท่าที่เป็นไปได้ เมื่อเชื่อมเข้าด้วยกันระหว่างหน่วยย่อยมักเกิดปัญหาคุลมวลสารระหว่างหน่วยย่อย ดังนั้นควรพิจารณากระบวนการอย่างละเอียดเพื่อให้สารทุกโมเลกุลถูกใช้ในกระบวนการตรงตามสมการการเกิดปฏิกิริยา

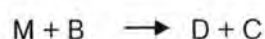
4. หลักการของลูเบน (Luyben Basic)

เสนอกฎ 3 ข้อ ซึ่งได้จากการศึกษาโครงสร้างการควบคุม ซึ่งเป็นกฎที่เกิดจากการศึกษากระบวนการหลายๆ กระบวนการ

1. กระแสที่มีรีไซเคิลควรจะต้องตั้งตัวควบคุมการไหลเพื่อป้องกันการเกิดสโนวบอลเอฟเฟ็กต์ (Snowball Effect)

2. สามารถติดเครื่องควบคุมการไหลในสายป้อนสารตั้งต้นได้ 2 กรณี คือ

- เมื่อสารตั้งต้นตัวหนึ่งในระบบถูกใช้หมดไป
- เมื่อระบบเกิดตัวกลางที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์อีกตัว เราควรควบคุมสัดส่วนของสารตั้งต้นเพื่อสามารถเปลี่ยนไปในสภาวะที่เหมาะสมได้ เช่น



ถ้าผลิตภัณฑ์เป็น D และ C เราจะต้องคำนวณสัดส่วนที่ทำให้เกิด D และ C โดยปรับอัตราส่วน A และ B ให้เหมาะสม เพราะถ้า A มากเกินไป จะมี D น้อยไป

3. ในระบบหอกลับ ถ้าผลิตภัณฑ์ออกที่ก้นหอ ควรป้อนสารเป็นไอ ในทางกลับกัน ควรป้อนสารเป็นของเหลว เพราะว่า เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราของสารที่เข้าหอกลับจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะขัดแย้งกลับทางการออกแบบที่สภาวะคงตัวที่มักกำหนดให้สารที่ป้อนเป็นของเหลวเพื่อลดต้นทุน

5. หลักการของริชาร์ดสัน (Richardson Basic)

ควรเลือกจัดการสารของเหลวที่มีขนาดใหญ่ที่สุด เพื่อควบคุมระดับของของเหลวในภาชนะซึ่งเน้นไปถึงสารที่น่าจะส่งผลกระทบต่อระบบมากที่สุด

6. หลักการของชินสกี (Shinsky Basic)

ได้เสนอการควบคุมในระดับสูงของระบบต่างๆ ซึ่งใช้ในการพัฒนาคุณภาพของสภาวะไดนามิก ซึ่งจะต้องเป็นระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพ และง่ายต่อการควบคุมด้วย โดยใช้ควบคุมอัตราส่วน การควบคุมแบบลำดับขั้น การควบคุมแบบโอเวอร์ไรด์ (Override Control) การควบคุมดังกล่าวเป็นการควบคุมที่ใช้สำหรับการควบคุมกระบวนการพื้นฐานทั้งหมด

7. หลักการของไทร์ูส (Tyreus)

กล่าวถึงการควบคุมที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง สำหรับการควบคุมระบบการควบคุมแพลนไวต์ คือการกำเนิดชนิดของตัวควบคุมและการปรับแต่งตัวควบคุม ในการควบคุมระบบควบคุมแบบพีไอ ซึ่งเป็นการควบคุมที่ไม่ต้องการความถูกต้องของตัวแปรควบคุมมากนัก ดังนั้นการกำหนดค่าเกณฑ์การควบคุมควรมีค่าประมาณ 1.67 ที่ค่านี้อาจจะเปิดให้ระดับอยู่ที่ร้อยละ 80 และวาล์วจะปิดเมื่ออยู่ที่ร้อยละ 20 สำหรับการควบคุมหน่วยย่อยอื่นนิยมใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งให้ผลที่เร็วและง่าย และเลือกค่าการปรับแต่งรูปควบคุมด้วยการทดสอบบริเลย์-พีดแบค (Rela-Feedback) ซึ่งเป็นการทดสอบอย่างง่ายและรวดเร็วเพื่อให้ได้ค่าเกนสูงสุด (Ultimate gain, K_u) และคาบค่าสุดท้าย (Ultimate Period, P_u) ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบควบคุมด้วยวิธีแบบซิกเลอร์-นิโคล (Ziegler-Nichols) ได้นำเสนอค่าเกน และค่าคงที่ของเวลาในการจูนค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$K_{TL} = K_U / 3.2 \quad \tau_{TL} = 2.2 P_U$$

โดยตัวจูนทั้งสองนี้เหมาะสำหรับระบบป้อนกลับที่มีค่าแดมปีง (Damping coefficient) เท่ากับ 0.4 ในขณะที่ถ้าเราต้องการควบคุมอย่างละเอียดสุด ซึ่งจะใช้เมื่อค่าแดมปีงประมาณ 0.1

$$K_{ZN} = K_U / 2.2 \quad \tau_{ZN} = P_U / 1.2$$

เมื่อ K_U คือ ค่าเกนสุดท้ายในระบบ
 P_U คือ ช่วงเวลาที่ใช้ให้ถึงค่า K_U

2.7.1 ความจำเป็นของการควบคุมแบบแพลนท์ไวด์ เนื่องจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักมี 3 ลักษณะ ซึ่งส่งผลให้การควบคุมกระบวนการย่อยไม่เพียงพอต่อการควบคุมระบบให้ดำเนินไปตามเป้าหมายได้ จึงจำเป็นต้องใช้หลักการควบคุมกระบวนการแบบแพลนท์ไวด์เพื่อควบคุมลักษณะทั้ง 3 ประการคือ

1. การหมุนเวียนสารภายในกระบวนการ มีเหตุผลพื้นฐานที่สำคัญ 6 ข้อดังนี้

- การเพิ่มผลการเปลี่ยนแปลงให้เพิ่มขึ้น
- การปรับปรุงด้านเศรษฐศาสตร์
- การควบคุมผลผลิตที่ได้
- การให้มีตัวระบายความร้อน
- การป้องกันการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง
- สมบัติการควบคุม

2. การสะสมของพลังงานในกระบวนการ เหตุผลเบื้องต้นที่ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานคือ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการ โดยมีการส่งพลังงานไปมาระหว่างหน่วยผลิตย่อยภายในกระบวนการ ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานภายในกระบวนการลง เนื่องจากการลดค่าใช้จ่ายด้านยูทิลิตี้ลง

3. การควบคุมองค์ประกอบของสารในกระบวนการ สารในกระบวนการสามารถจำแนกลักษณะของสารองค์ประกอบที่อยู่ในกระบวนการได้เป็น 3 ชนิดคือ สารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ และสารเฉื่อย การทำดุลมวลสารแต่ละองค์ประกอบนั้นจะต้องเหมาะสม และถูกต้องตามสมการปฏิกิริยา โดยทั่วไปแล้วจะไม่มีปัญหาสำหรับสารผลิตภัณฑ์และสารเฉื่อย อย่างไรก็ตามปัญหาที่แท้จริงจะเกิดเมื่อพิจารณาถึงสารตั้งต้น (เนื่องจากการหมุนเวียนของสารในกระบวนการ) และการตรวจสอบการมีอยู่ของสารภายในกระบวนการทั้งหมดทุกๆโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ป้อนเข้าในโรงงานจะต้องถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา หรือออกจากกระบวนการเป็นสารปนเปื้อน หรือสารปล่อยทิ้ง การออกจากกระบวนการด้วย 2 วิธีหลังนี้ถือเป็นการสูญเสียสารตั้งต้น ดังนั้นจึงต้องพยายามที่จะลดการสูญเสียสารตั้งต้นที่ออกจากกระบวนการให้น้อยที่สุด เนื่องจากสิ่งนี้แสดงถึง

ผลผลิตที่ลดลงด้วย ดังนั้นจะป้องกันสารตั้งต้นไม่ให้ออกจากกระบวนการด้วยวิธีดังกล่าว นั้นหมายถึงต้องแน่ใจว่าทุกโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ป้อนเข้ากระบวนการต้องถูกใช้ไปโดยการเกิดปฏิกิริยา

2.7.2 เป้าหมายสำหรับระบบควบคุมกระบวนการแบบแพลนท์ไวด์มีดังนี้

1. การดำเนินการอย่างปลอดภัยและสม่ำเสมอ โดยไม่ก่อให้เกิดความขัดข้องของระบบ
2. การควบคุมให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์แบบตรงค่าเป้าหมายเมื่อเกิดการรบกวนระบบต่างๆ
3. การหลีกเลี่ยงเงื่อนไขที่จะทำให้กระบวนการเกิดอันตราย
4. การทำให้ระบบควบคุมทำงานอย่างอัตโนมัติ และต้องการความใส่ใจทางด้าน การปฏิบัติงานน้อยลง
5. การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตที่เร็วและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ
6. ไม่มีผลกระทบที่ไม่ดีต่อสิ่งแวดล้อม

2.7.3 ขั้นตอนเบื้องต้นในการออกแบบการควบคุมแบบแพลนท์ไวด์ มี 9 ขั้นตอน เป็นการให้หลักการเบื้องต้นทางด้านวิศวกรรมเคมีนั้นคือการอนุรักษ์พลังงานและมวลสาร มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดวัตถุประสงค์การควบคุม

เป็นการกำหนดวัตถุประสงค์การควบคุมกระบวนการที่สภาวะคงตัวและภาวะพลวัตสำหรับกระบวนการ ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญมากของปัญหาเนื่องจากวัตถุประสงค์การควบคุมที่แตกต่างกันนำไปสู่โครงสร้างการควบคุมที่แตกต่างกันด้วย โครงสร้างการควบคุมที่ดีที่สุดสำหรับโรงงานขึ้นอยู่กับ การออกแบบและหลักการควบคุมที่กำหนดขึ้น

วัตถุประสงค์เหล่านี้จะรวมถึงผลผลิตที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยา และการแยกสาร การระบุถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เกรดของผลิตภัณฑ์ และการตรวจสอบความต้องการของทางการตลาดความเข้มงวดทางด้านสิ่งแวดล้อม และช่วงของสภาวะการปฏิบัติงานที่ปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 2 หองศาความเป็นอิสระของการควบคุม

นับจำนวนของวาล์วควบคุมที่สามารถหาได้ซึ่งก็คือจำนวนขององศาอิสระสำหรับการควบคุม การนับจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุมให้อยู่ในค่าเป้าหมายจำนวนของวาล์วอิสระจะต้องเหมาะสมด้วยการวางวาล์วควบคุมเหล่านี้บางครั้งจะทำได้เพื่อปรับปรุงสมรรถนะเชิงพลวัต แต่บ่อยครั้งที่ไม่สามารถเลือกการวางตำแหน่งสำหรับวาล์วเหล่านั้นได้

หน้าที่โดยทั่วไปของวาล์วควบคุม คือ

1. กำหนดอัตราการผลิต
2. รักษาปริมาณของแก๊สและของเหลวให้เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด
3. ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์
4. หลีกเลี่ยงข้อจำกัดด้านความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม
5. วาล์วที่เหลือหลังจากการกำหนดหน้าที่เหล่านี้แล้วสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเพิ่มวัตถุประสงค์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่สภาวะคงตัว หรือเพิ่มความสามารถในการควบคุมทางพลวัต เช่น ลดการใช้พลังงานให้น้อยลง เพิ่มผลผลิตที่ได้ให้มากขึ้น หรือกำจัดการรบกวนออกไป

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดระบบการจัดการพลังงาน

ภายในกระบวนการต้องมีระบบการควบคุมความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี โดยอาจส่งความร้อนดังกล่าวไปใช้ในหน่วยอื่นของกระบวนการ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความร้อนถูกใช้ในกระบวนการจนเพียงพอแล้ว ความร้อนดังกล่าวจะถูกส่งไปที่หน่วยยูทิลิตี้ และออกจากระบบไปในที่สุด ดังนั้นระบบควบคุมพลังงานในกระบวนการต้องทำหน้าที่ดังนี้

1. ถ้ามีการสะสมความร้อนเกิดขึ้นระหว่างกระแสของกระบวนการ ต้องทำการควบคุมการแพร่กระจายของความร้อนไม่ให้แพร่กระจายไปตามหน่วยต่างๆ ของระบบ และต้องมั่นใจว่าความร้อนที่เกิดจากการคายความร้อนของปฏิกิริยาจะต้องถูกใช้หมดไป หรือถูกกำจัดหมดไปโดยไม่มีความร้อนกลับมารบกวนระบบอีก
2. ในกรณีที่มีความร้อนที่เกิดขึ้นจากการคายความร้อนของปฏิกิริยา จำเป็นต้องกำจัดความร้อนส่วนนี้ออกจากระบบ เพราะอาจทำให้ระบบไม่สามารถควบคุมได้ ส่วนระบบที่ปฏิกิริยาเป็นการดูดความร้อน ระบบจำเป็นต้องเพิ่มความร้อนให้กับปฏิกิริยาเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น
3. การส่งผ่านความร้อนระหว่างกระแสของกระบวนการ ถือเป็นส่วนที่สำคัญเพราะสารที่ไหลออกจากเครื่องปฏิกิริยาไปสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าควบคุมอุณหภูมิได้ไม่ดีอาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ และเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ในกระบวนการ

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดอัตราการผลิต

เป็นการกำหนดตัวแปรหลักที่มีผลต่ออัตราการผลิต และหาตัวแปรปรับที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมตัวแปรดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนกำลังการผลิตทำได้หลายทางทั้งทางตรง และทางอ้อม เช่น การเพิ่มอัตราการผลิตโดยเพิ่มอุณหภูมิ เพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้น เพิ่มปริมาตร

ของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ (กรณีสารในระบบของเหลว) และเพิ่มความดัน (กรณีทั้งระบบเป็นแก๊ส)

ทางเลือกในการกำหนดตัวแปรหลักของระบบมีความสัมพันธ์ต่อปฏิริยาของระบบและสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์ด้วย เช่น การเลือกอุณหภูมิเป็นตัวแปรหลักในปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ได้ผลผลิตมากขึ้น แต่ในกระบวนการที่เป็นปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลอย่างรวดเร็วทำให้อัตราการผลิตลดลง ดังนั้นการเลือกตัวแปรหลักจำเป็นต้องพิจารณาถึงลักษณะของปฏิริยาและเครื่องปฏิกรณ์ด้วย

ตัวแปรหลักที่เลือกใช้ควรทำให้อัตราการผลิตเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ราบเรียบ และสามารถกำจัดผลการรบกวนได้ด้วย ที่สำคัญตัวแปรหลักควรมีผลต่อหน่วยแยกให้น้อยที่สุด แต่ควรมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิริยาอย่างรวดเร็ว ภายใต้สภาวะที่สามารถดำเนินการได้จริง

ขั้นตอนที่ 5 ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ความปลอดภัย สิ่งแวดล้อม และการปฏิบัติงาน

การเลือกवालควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ความปลอดภัย ความสามารถในการดำเนินการ และข้อจำกัดทางสิ่งแวดล้อมที่ดีที่สุด เพื่อให้ได้การควบคุมแบบตรงเป้าหมายถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ และการปฏิบัติงาน เช่น การเลือกवालตัวแปรปรับที่มีค่าเวลาคงที่ของกระบวนการต่อการตอบสนองวาล์วน้อย ค่าเวลาน่วงของระบบต่ำ และมีค่าเกนสภาวะคงตัวมาก นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงขนาดของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล และตัวแปรบางตัวที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น อุณหภูมิในหอกลั่นส่วนล่างถูกควบคุมโดยการปรับการไหลของไอน้ำที่ส่งไปรีบอยเลอร์ และระดับของของเหลวในหอกลั่นส่วนล่างที่ตัวแปรควบคุมอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนที่ 6 ควบคุมสารหมุนเวียนให้คงที่และควบคุมปริมาณสารสะสมในระบบ (ระดับความดันและของเหลว)

การกำหนดอัตราการไหลในทุกอุปกรณ์ และการเลือกตัวแปรปรับที่ดีที่สุดสำหรับควบคุมระดับของเหลวนิยมทำโดยใส่ตัวควบคุมอัตราการไหลในทุกอุปกรณ์ของกระแสป้อนกลับที่ทำเช่นนี้ เพราะทำได้ง่าย และมีประสิทธิภาพในการป้องกันการเปลี่ยนแปลงขนาดของอัตราการไหลในกระแสป้อนกลับ เพื่อผลการควบคุมภาวะคงตัว และภาวะพลวัตให้ได้ตรงตามเป้าหมายที่โรงงานต้องการ

การกำหนดอัตราการไหลในกระแสน้ำกลับจะไม่ซับซ้อน ถ้าพิจารณาตามการเลือกตัวแปรหลักเพื่อควบคุมอัตราการผลิตในขั้นตอนที่ 4 เพราะกระแสน้ำกลับทุกสายมีความสำคัญต่อเป้าหมายการควบคุมแบบแพลนที่ไว้ด เช่น การพิจารณารูปแก๊สย้อนกลับโดยปกติมักกำหนดให้มีการไหลเวียนได้มากที่สุดเท่าที่เครื่องคอมเพรสเซอร์สามารถทำงานได้ การกำหนดอัตราการไหลในแต่ละลูบป้อนกลับจะใช้วาล์วควบคุมระดับของสารแต่ละหน่วย และการเลือกตัวแปรปรับที่มีผลต่อหน่วยผลิตมากที่สุด เพื่อให้ได้วาล์วควบคุมที่เหมาะสมต่อการควบคุมที่สุด

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบคุณสมบัติประกอบ

การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารที่เข้า-ออก และสารที่ถูกใช้ในกระบวนการ จะมีความยุ่งยากเมื่อกระบวนการมีการป้อนกลับ เพราะกระแสน้ำกลับจะทำให้เกิดการสะสมของสารองค์ประกอบ ซึ่งมีผลต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ในระบบ ดังนั้นการทำคุณสมบัติประกอบที่ถูกต้องจะทำให้เข้าใจกลไกการใช้ไปของสารต่างๆ ภายในกระบวนการได้อย่างถูกต้อง

สารองค์ประกอบที่อยู่ภายในกระบวนการประกอบไปด้วย สารตั้งต้น สารผลิตภัณฑ์ และสารเฉื่อย สารตั้งต้นควรถูกใช้ให้หมดไปในการทำปฏิกิริยา และไม่ควรมีสารตั้งต้นปนเปื้อนในสารผลิตภัณฑ์เพราะถือว่าการสูญเสีย ดังนั้นควรปรับปริมาณสารตั้งต้นใหม่ที่เข้าสู่กระบวนการโดยเทียบจากการใช้ไปของสาร สำหรับสารเฉื่อยในระบบจะต้องปล่อยออกจากระบบบางส่วน และควบคุมสารองค์ประกอบเฉื่อยบางส่วนด้วยสัดส่วนของสารเฉื่อยในกระแสน้ำกลับ

ขั้นตอนที่ 8 ควบคุมหน่วยปฏิบัติการแต่ละหน่วย

การกำหนดรูปการควบคุมที่จำเป็นสำหรับหน่วยปฏิบัติการย่อยแต่ละหน่วย มีรูปแบบการควบคุมมากมาย ตัวอย่างเช่น เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ โดยทั่วไปนิยมการควบคุมอุณหภูมิขาเข้า สำหรับปฏิกิริยาคัดความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงจะมีระบบควบคุม คือการปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ส่งไปยังเตาเผา เพื่อให้พลังงานแก่เครื่องปฏิกรณ์ ส่วนเครื่องตกผลึกซึ่งต้องการปรับไหลลดการทำความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิการไหลของสารป้อนที่เป็นตัวทำละลายเหลวไปยังเครื่องดูดซึมทำการควบคุมโดยปรับอัตราส่วนแก๊สที่ป้อนเข้ากระบวนการ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 9 ทำออปติไมซ์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ และปรับปรุงความสามารถในการควบคุมเชิงพลวัต

หลังจากการควบคุมกระบวนการให้สอดคล้องกับทุกความต้องการที่เป็นข้อกำหนดพื้นฐานแล้วโดยทั่วไปจะมีองศาอิสระที่เกี่ยวข้องกับวาล์วควบคุมที่ไม่ได้ใช้ในการควบคุม ค่า

เป้าหมายในเครื่องควบคุมบางเครื่องที่สามารถปรับค่าได้ สิ่งเหล่านี้สามารถใช้เพื่อออกปติไมซ์ สมรรถนะกระบวนการทางเศรษฐศาสตร์ที่ภาวะคงตัว (เช่น ลดพลังงานให้น้อยลง เพิ่มความสามารถเลือกให้เพิ่มขึ้น) หรือเพื่อปรับปรุงการตอบสนองทางพลวัต ตัวอย่างเช่น เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบคายความร้อนสามารถทำให้เย็นได้ด้วยน้ำหล่อเย็นในแจ็คเก็ต และน้ำเกลือที่ส่งไปยังเครื่องควบแน่นของสารรีฟลักซ์ การควบคุมอุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้จะควบคุมได้อย่างรวดเร็วเมื่อใช้ตัวควบคุมเป็นกระแสไฟฟ้าเกลือ แต่ค่าใช้จ่ายในการใช้กระแสไฟฟ้าเกลือมีราคาแพงกว่าการใช้ น้ำในการหล่อเย็นดังนั้นในการควบคุมระบบจำเป็นต้องพิจารณาผลทางเศรษฐศาสตร์ว่าคุ้มค่าหรือไม่

2.8 ตัวอย่างการควบคุมแบบแพลนทีไวต์

ปัญหาของการควบคุมทั้งโรงงานเกิดจากผลกระทบซึ่งกันและกันอันเกิดจากการรวมหน่วยผลิตย่อยๆ เข้าด้วยกัน โดยสามารถจำแนกลักษณะของปัญหาได้ดังนี้

2.8.1 โครงสร้างของหน่วยกระบวนการที่ต่อกันแบบอนุกรม สำหรับกระบวนการที่มีการเชื่อมโยงต่อกันแบบอนุกรม ผลิตภัณฑ์ของแต่ละหน่วยใช้เป็นสารป้อนของหน่วยถัดไปและไม่มีสายการป้อนกลับของวัตถุดิบหรือพลังงาน โครงสร้างนี้เป็นปัญหาของแพลนทีไวต์ที่ง่ายที่สุด เพราะสามารถใช้โครงสร้างการควบคุมแต่ละหน่วยย่อยในกระบวนการควบคุมการรบกวนที่เข้าสู่ระบบได้

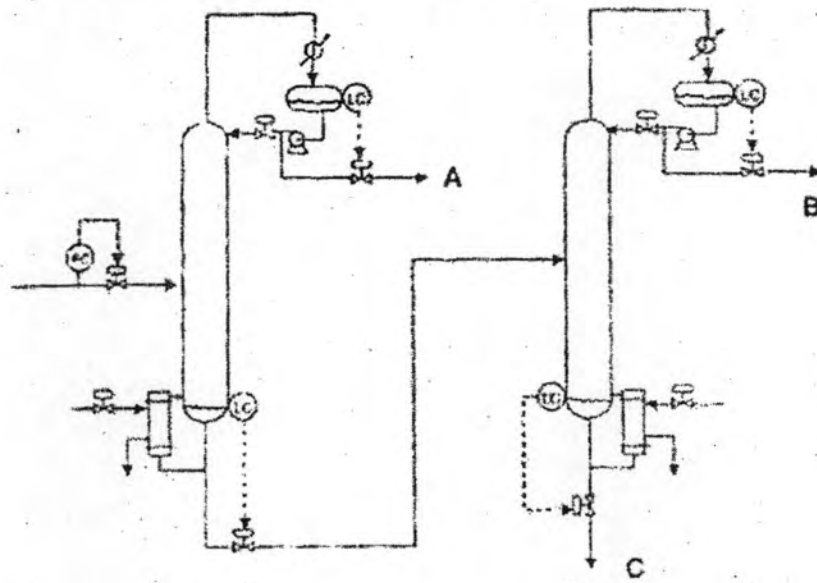
จากตัวอย่างกระบวนการในรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 สามารถทำการกำหนดอัตราการผลิตได้ 2 ลักษณะคือ

1. กำหนดโดยหน่วยต้นทางของสารไหลเข้าสู่ระบบ
2. กำหนดโดยปลายทางที่ควบคุมผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบ

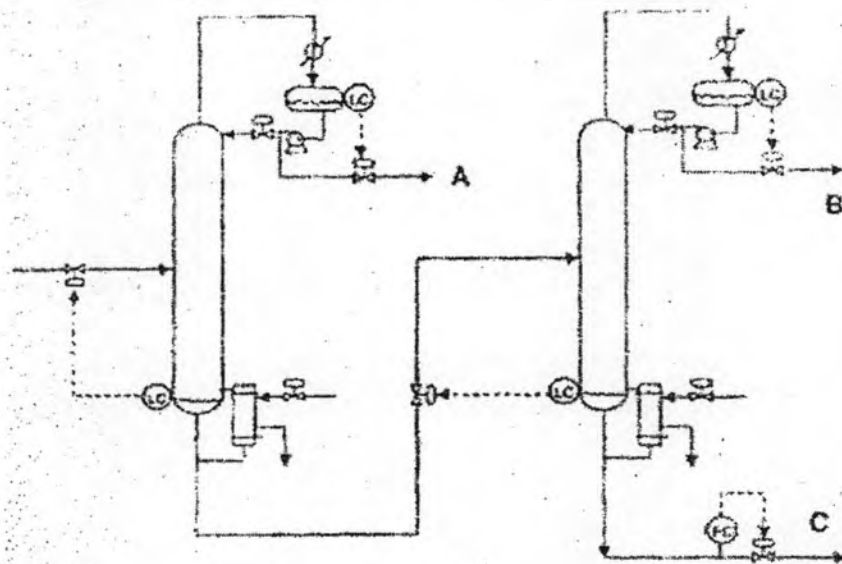
จากรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 เป็นกระบวนการที่มีกระแสไหลเข้ากระบวนการสายเดียวที่ประกอบไปด้วยสาร A B และสาร C โดยสารทั้ง 3 สารมีค่าการระเหยสัมพัทธ์ดังนี้ $A > B > C$ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการแยกสารแบบตรง ดังนั้นสาร A ถูกแยกออกที่หอแรกทางด้านบนของหอ และสาร B ถูกแยกในหอที่สองทางด้านบนเช่นกัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างการควบคุมทั้งสองโครงสร้างซึ่งเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องเหมือนกันพบว่า รูปที่ 2.4 ควบคุมอัตราการผลิตด้วยการปรับอัตราการผลิตป้อนสาร และควบคุมระดับของเหลวในแต่ละหน่วยด้วยการปรับอัตราการผลิตออกของหน่วยนั้นๆ ดังนั้นผลการรบกวนระบบทั้งหมดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตของสายเข้ากระบวนการ และส่งผลต่อหน่วยผลิตที่อยู่ถัดไป ส่วนรูปที่ 2.5 เป็นการควบคุมอัตราการผลิตของผลิตภัณฑ์ C ที่ออกจาก

ส่วนล่างของหอที่ 2 ซึ่งเป็นการควบคุมตามความต้องการของปลายทาง พร้อมกับควบคุมระดับของเหลวด้วยการปรับอัตราการไหลเข้าของแต่ละหน่วย



รูปที่ 2.4 การควบคุมระดับที่มีทิศทางเดียวกับอัตราการไหลของสารในระบบ Luyben (1998)

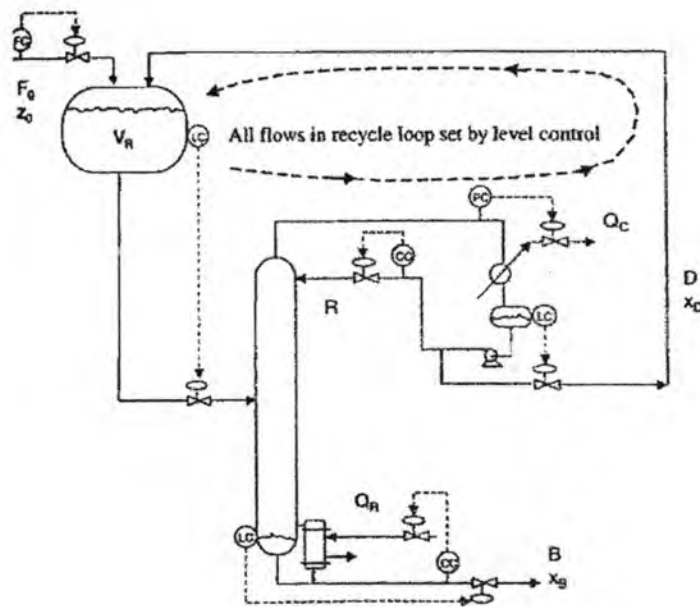


รูปที่ 2.5 การควบคุมระดับที่มีทิศทางตรงข้ามกับอัตราการไหลของสารในระบบ Luyben (1998)

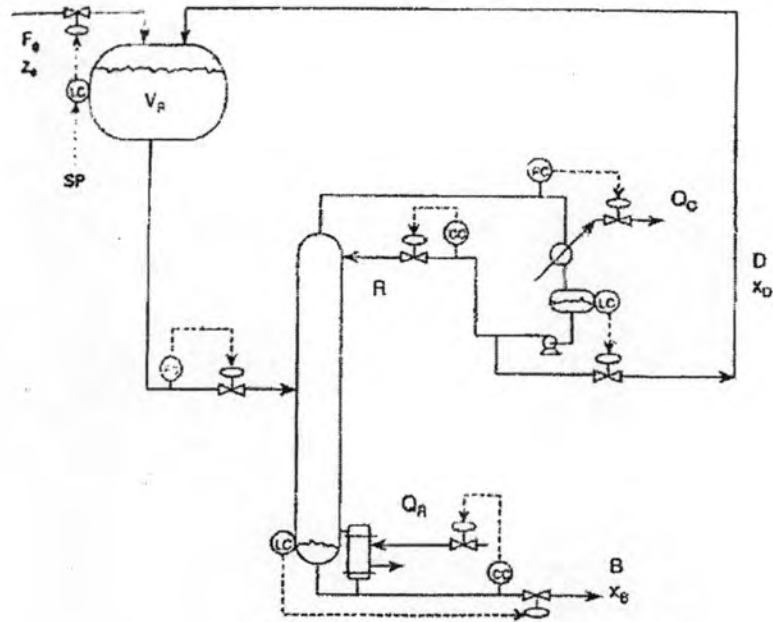
โครงสร้างการควบคุมทั้งสองแบบนี้มีหลักในการควบคุมที่ต่างกันคือ โครงสร้างแรกเมื่อมีการรบกวนระบบ การแพร่กระจายของการรบกวนจะมีทิศทางเดียวกับอัตราการไหลของสารภายในกระบวนการ แต่สำหรับโครงสร้างที่ 2 ผลการรบกวนจะมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสของสารที่ไหลในกระบวนการ แต่เนื่องจากทั้ง 2 ระบบเป็นกระบวนการแบบไม่มีการป้อนกลับของพลังงานและสารภายในกระบวนการ ทำให้ไม่ส่งผลกระทบของสารจากหน่วยต้นทางไปยังหน่วยผลิต

ปลายทาง ดังนั้นพลศาสตร์ของกระบวนการมีอิสระจากกันในแต่ละหน่วย และเส้นทางการรบกวน กระบวนการจะเป็นแบบเชิงเส้นตลอดทั้งกระบวนการ ซึ่งการที่จะเลือกใช้โครงสร้างระบบการควบคุมแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการ

2.8.2 โครงสร้างของหน่วยกระบวนการที่มีอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างเครื่องปฏิกรณ์กับหน่วยแยก การกำหนดโครงสร้างระบบควบคุมที่ต่างกันทำให้ผลการควบคุม กระบวนการเมื่อเกิดการรบกวนมีความแตกต่างกันทำให้ผลการควบคุมกระบวนการเมื่อเกิดการรบกวนมีความแตกต่างกัน เช่นโครงสร้างระบบควบคุมในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 เป็นกระบวนการที่ประกอบไปด้วย เครื่องปฏิกรณ์ต่อกับหน่วยแยกและมีสายป้อนกลับจากหน่วยแยกกลับเข้าสู่ เครื่องปฏิกรณ์ทำให้กระบวนการมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนขึ้น เนื่องจากกระบวนการมีอันตรกิริยา ระหว่างเครื่องปฏิกรณ์และหน่วยแยก การควบคุมแบบเดิมไม่เพียงพอต่อการควบคุมทั้ง กระบวนการ จึงต้องนำรูปแบบการควบคุมแบบแพลนท์ไว้ดมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบการ ควบคุม



รูปที่ 2.6 โครงสร้างการควบคุมที่กำหนดอัตราการป้อนสารเข้ากระบวนการ Luyben (1999)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างการควบคุมที่กำหนดระดับของเหลวของเครื่องปฏิกรณ์ Luyben (1999)

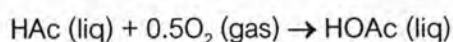
จากรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 พบว่าตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเกิดผลิตภัณฑ์คืออัตราการเกิดปฏิกิริยา $A \rightarrow B$ ซึ่งขึ้นอยู่กับ ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์ อุณหภูมิ (มีผลต่อค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา) และความเข้มข้นของสารตั้งต้น จากรูปที่ 2.4 พบว่าเมื่อต้องการเพิ่มอัตราการผลิตสาร B ทำได้โดยการเพิ่มอัตราสารป้อนเข้าระบบ ผลจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเข้าจะส่งผลต่อหน่วยแยกสารที่อยู่ถัดไป ซึ่งเป็นภาวะที่ไม่ต้องการในการออกแบบโครงสร้างการออกแบบโครงสร้างการควบคุม เนื่องจากรบกวนหน่วยแยกสารจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้โครงสร้างดังกล่าวยังอาจก่อให้เกิดปรากฏการณ์สโนว์บอลเอฟเฟกต์อีกด้วย เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารองค์ประกอบในเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนโครงสร้างระบบควบคุมรูปที่ 2.5 มีการติดตั้งควบคุมอัตราการไหลเข้าสู่หน่วยแยก เพื่อลดผลการรบกวนระบบที่เกิดขึ้นที่เครื่องปฏิกรณ์ไม่ให้ส่งผลกระทบต่อหน่วยแยก ดังนั้นการเพิ่มกำลังการผลิตทำได้โดยการเปลี่ยนระดับของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งการควบคุมระดับของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์เป็นการควบคุมปริมาณสารภายในระบบทางอ้อม ทำให้สามารถกำจัดผลการเกิดสโนว์บอลเอฟเฟกต์ได้

2.9 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงสร้างระบบควบคุมแบบแพลนท์ไวต์

Michael L. Luyben, และ Bjorn D. Tyreus (1997) ได้เสนอวิธีการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมเคมี โดยใช้หลักการควบคุมแบบแพลนท์ไวต์ซึ่งมี 9 ขั้นตอน โดยที่ได้ศึกษาตัวอย่างกระบวนการทางอุตสาหกรรม 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการผลิตไวเนล อะซิเตต กระบวนการของอีเอ็ม และกระบวนการไฮโดรอัลคิลเลชัน พบว่ามี 5 ขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแบบแพลนท์ไวต์โดยตรง ไม่มีการคำนึงถึงแต่ละหน่วยปฏิบัติการ ได้แก่ การกำหนดการจัดการพลังงาน การกำหนดอัตราการผลิต การตรวจสอบสมดุลองค์ประกอบ การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และจัดการกับข้อจำกัดทางด้านความปลอดภัยสิ่งแวดล้อม และการปฏิบัติงาน

Alex Zheng, Rama V. Mahajanam และ J.M. Douglas (1999) ได้เสนอแนวคิดสำหรับการสร้างระบบควบคุมแพลนท์ไวต์ ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาระบบที่ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องแยกสาร และกระแสการรีไซเคิล ในการพิจารณาโครงสร้างการควบคุมแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน โดยใช้หลักการออปติไมซ์ เพื่อให้ได้ผลกำไรสูงสุด จากการจำลองกระบวนการที่สภาวะพลวัตสามารถสร้างโครงสร้างการควบคุมได้ 4 แบบ จากศึกษาพบว่ามียู 1 โครงสร้างที่ให้ประสิทธิภาพในการควบคุมดีที่สุด คือการใช้อัตราการผลิตของผลิตภัณฑ์ควบคุมระดับของผลิตภัณฑ์ในถังเก็บ ตัวสร้างไอควบคุม ปริมาณของผลิตภัณฑ์ อัตราการผลิตของกระแสป้อนใหม่ ควบคุมอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น อัตราการผลิตของสารควบคุมระดับของสารในเครื่องปฏิกรณ์ และอัตราการผลิตของรีฟลักซ์ควบคุมอัตราส่วนของการรีฟลักซ์

William L. Luyben (2000) ได้ทำการศึกษาถึงการควบคุมหอกลับโดยที่ประเด็นในแง่ของการทำสมดุลองค์ประกอบที่จำเป็นต้องกล่าวหาถึงถึงการออกแบบโดยใช้หลักการควบคุมแบบแพลนท์ไวต์ โดยงานวิจัยนี้จะแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นระหว่างการควบคุมคอลัมน์แบบปกติกับแบบที่ใช้หลักการควบคุมแบบแพลนท์ไวต์ โดยทำการศึกษาเป็นตัวอย่างของการตรวจสอบสมดุลองค์ประกอบเครื่องปฏิกรณ์หอกลับ และกระบวนการไอโซเมอร์ไรเซชันโดยสมมติปฏิกิริยาเป็น $A \rightarrow B$ และการศึกษากระบวนการ อะเซทัลดีไฮด์ออกซิเดชัน



ซึ่งทำการสร้างวงควบคุม 2 วงแล้วทำการเปรียบเทียบกัน โดยพิจารณาตัวรบกวนที่แตกต่างกัน สรุปได้ว่าการพัฒนาระบบควบคุมนั้นส่วนมากแล้วขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การควบคุมกระบวนการทั้งหมด สำหรับกรณีหอกลับจำเป็นต้องออกแบบโดยอาศัยความเข้าใจว่าการควบคุมหอกลับจะมีผลโดยรวมอย่างไรต่อระบบควบคุม โดยมองเป็นภาพรวมให้ออก และ

ต่อมา Ping Wang และ Thomas McAvoy (2001) เสนอการออกแบบควบคุมกระบวนการ แพลนท์ไวต์เพื่อควบคุมผลิตภัณฑ์ โดยใช้หลักการที่อาศัยการออปติไมเซชัน ร่วมกับการออกแบบที่สภาวะคงตัวโดยที่สมมติว่าแบบจำลองที่สภาวะพลวัตนั้นสามารถหาได้ ใน

การศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือขั้นตอนการควบคุมความปลอดภัยของตัวแปรควบคุม 2 ขั้นตอน และการควบคุมผลิตภัณฑ์ ในแต่ละขั้นตอนนี้มีการใช้โปรแกรมเชิงเส้นช่วยหาโครงสร้างการควบคุม หลังจากนั้นทำการปรับจูนค่าตัวควบคุมโดยใช้หลักการออปติไมเซชัน แล้วเอาตัวควบคุมเข้าไปในแบบจำลองพลวัตเพื่อทำการวิเคราะห์การควบคุมผลิตภัณฑ์

Wongsri and Poothanakul (2002) ได้ทำการศึกษาโดยนำหลักการควบคุมแบบแพลนท์ไวต์มาใช้ในการออกแบบโครงสร้างการควบคุมกระบวนการไอโซเมอร์ไรเซชันบิวเทน เพื่อควบคุมผลิตภัณฑ์ให้มึนอร์มัลบิวเทนเจือปนอยู่ไม่เกินร้อยละ 2 โมล และมีอัตราการผลิตตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยออกแบบโครงสร้างการควบคุมทั้งหมด 3 แบบ เปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างกัน และเปรียบเทียบสมรรถนะกับโครงสร้างอ้างอิงที่ลูเบนเสนอไว้ พบว่าโครงสร้างที่ออกแบบมีสมรรถนะที่ดีกว่าโครงสร้างอ้างอิง

Wongsri and Kietawarin (2003) ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบโครงสร้างการควบคุม 4 โครงสร้าง เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยตัวแปรที่ทำให้การผลิตเปลี่ยนแปลง คือเปลี่ยนปริมาณของสารโพลีเอทิลีนหรือเปลี่ยนอุณหภูมิเข้าเครื่องปฏิกรณ์ โดยเปรียบเทียบกับ โครงสร้างการควบคุมแบบอ้างอิงซึ่งใช้วิธีการควบคุมโดยใช้ลูควบคุมปริมาณสารโพลีเอทิลีนด้วยการวัดระดับของเหลวอดฮอริไซเคิล จากการศึกษาพบว่าในแต่ละโครงสร้างที่ออกแบบนั้นมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกัน โดยในแต่ละโครงสร้างให้ผลที่ดีกว่าโครงสร้างอ้างอิงในด้านสมรรถนะ ความทนทาน หรือความเร็วต่อการตอบสนองการรบกวนแตกต่างกันไป