

## บทที่ 3

### กระบวนการผลิตไบโอดีเซลกับหลักการควบคุมแบบแพลนท์ไววด์

#### 3.1 การจำลองกระบวนการ

เพื่อให้ง่ายในการพิจารณากระบวนการเราจึงเริ่มด้วยการออกแบบแบบจำลองโดยมองที่ภาพรวมของกระบวนการ อย่างไรก็ตามในการจำลองกระบวนการย่อมให้ผลข้อมูลที่แตกต่างจากการทำการศึกษาดูด้วยกระบวนการจริงบ้างไม่มากก็น้อย ซึ่งซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองกระบวนการส่วนใหญ่จะให้ผลข้อมูลที่เชื่อถือได้เนื่องจากสามารถใช้รูปแบบของแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกได้หลายแบบ และครอบคลุมหลายกระบวนการ มีรายชื่อและคุณสมบัติต่างๆของสารเคมีที่มากมาย และสามารถทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนซึ่งให้ผลที่ถูกต้อง และแม่นยำได้ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Aspen HYSYS 2006 ในการทำแบบจำลองกระบวนการ

ขั้นตอนหลักในการจำลองกระบวนการ คือ

1. การกำหนดสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ รายการของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการนั้นในส่วนของเมทานอล กลีเซอรอล กรดซัลฟิวริก ปาล์มเมติกโอเลอเท และน้ำ นั้นมีข้อมูลอยู่แล้วในซอฟต์แวร์ โดยน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้คือน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ซึ่งองค์ประกอบหลักของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว คือ กรดปาล์มเมติก จึงได้กำหนดใช้ไตรโอเลอิน ( $C_{57}H_{104}O_6$ ) เป็นตัวแทนของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ดังนั้นสารเคมีที่ซอฟต์แวร์ไม่มีข้อมูลคือ ไตรโอเลอิน แคลเซียมออกไซด์ และแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งสามารถสร้างสารเคมีดังกล่าวได้โดยใช้ The Hypo Manager ในซอฟต์แวร์ซึ่งต้องทำการค้นหาข้อมูลคุณสมบัติของสารเหล่านี้เพื่อสร้างขึ้นมา

2. กำหนดแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิก สำหรับสารเคมีความเป็นขั้วสูง เช่น เมทานอล และกลีเซอรอล แบบจำลองเทอร์โมไดนามิกที่เหมาะสมสำหรับการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมีของสารเคมีในสถานะของของเหลว คือ non-random two liquid (NRTL) และ universal quasi-chemical (UNIQUAC) สำหรับค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์บางตัวที่ไม่สามารถประเมินความเป็นปฏิสัมพันธ์ซึ่งกันและกันได้โดยใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิก UNIQUAC เช่น เมทานอลกับปาล์มเมติกโอเลอเท กลีเซอรอลกับปาล์มเมติกโอเลอเท และกรดซัลฟิวริกกับสารเคมีอื่นในระบบ

3. การประเมินกำลังในการผลิตของกระบวนการ โดยต้องการผลผลิตไบโอดีเซลปริมาณ 8000 ตันต่อปี

4. การเลือกใช้หน่วยปฏิบัติการย่อย หน่วยการผลิตหลักๆ ของกระบวนการประกอบด้วย เครื่องปฏิกรณ์ หม้อกลั่น หม้อแยกเฟส เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ปั๊ม และหอสกัดแบบของเหลวคู่ของเหลว

5. การกำหนดสภาวะการทำงาน (อัตราการใช้ อุณหภูมิ ความดัน และสภาวะอื่นๆ) เนื่องจากข้อมูลค่าต่างๆของแบบจำลองโคเนติกได้มาจากงานวิจัยของเอเกิล และคณะ (Egle S. และคณะ) ในปี ค.ศ. 2004 จึงเลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ The continuous stirred-tank reactor (CSTR) โดยใช้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันซึ่งมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตั้งสมมติฐานไว้ว่า เครื่องปฏิกรณ์เป็นแบบต่อเนื่อง เป็นถังกวน และค่าอัตราส่วนของปฏิกิริยาต่อปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์ (Fill Factor) ของเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 0.5 (อัตราส่วนของปฏิกิริยาต่อปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์)

ในส่วนของหน่วยแยกสารนั้นเลือกใช้หม้อกลั่นซึ่งสามารถใช้แยกเมทานอลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ให้ผลได้ดีพอๆกับการแยกเมทานอลซึ่งทำให้ทั้งไบโอดีเซล และกลีเซอรอลบริสุทธิ์ยิ่งขึ้นโดยจุดเดือดของเมทานอล (65 องศาเซลเซียส ที่ 1 บรรยากาศ) นั้นต่ำกว่าไบโอดีเซล (จากการประมาณที่ 320 องศาเซลเซียส ที่ 1 บรรยากาศ) หรือกลีเซอรอล (300 องศาเซลเซียส ที่ 1 บรรยากาศ) ซึ่งในการออกแบบจำลองนั้นต้องการทำให้ไบโอดีเซล และกลีเซอรอลบริสุทธิ์ยิ่งขึ้น (ให้ได้ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก) นั้นไม่สามารถทำได้ด้วยกรรมวิธีแยกปกติ โดยมาตรฐาน ASTM นั้นผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่ได้ต้องมีความบริสุทธิ์ที่ร้อยละ 99.65 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีความแตกต่างกันอย่างมากของจุดเดือดของสารเคมีที่เข้าหม้อกลั่นดังนั้นหม้อกลั่นจึงมีจำนวนชั้นทางทฤษฎีแค่ประมาณ 5 ถึง 6 ชั้นก็เพียงพอแล้ว และเราได้ตั้งสมมติฐานประสิทธิภาพของแต่ละชั้นในหม้อกลั่นไว้ที่ร้อยละ 60 ถึงร้อยละ 70 เนื่องจากไบโอดีเซล และกลีเซอรอลแยกกันที่อุณหภูมิ 250 และ 150 องศาเซลเซียสตามลำดับ (Newman, 1986; Goodrum, 2002)

หอสกัดแบบของเหลวคู่ของเหลว (L-L extraction) ที่ใช้ในการแยกไบโอดีเซลจากกลีเซอรอล, เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา โดยข้อมูลการคำนวณขนาดของอุปกรณ์ได้มาจากผลงานวิจัยของ Zhang (2002)

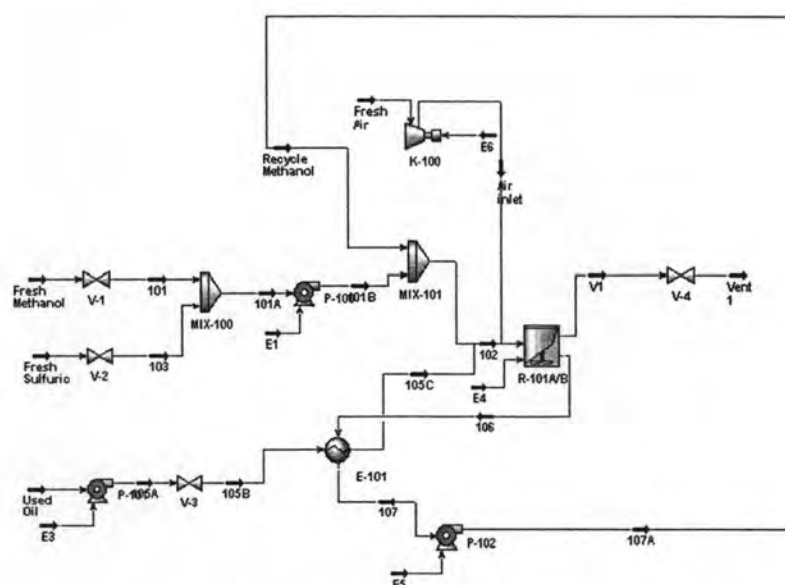
หลังจากทำการป้อนข้อมูลและการดำเนินการแบบจำลองกระบวนการที่สภาวะคงตัวพบว่า Mass and energy balance ของแต่ละหน่วยได้ค่าดีพอๆกับสภาวะในการดำเนินการที่ได้มาจากงานวิจัยอ้างอิง

การออกแบบในแต่ละหน่วยปฏิบัติการมีดังนี้

- หน่วยทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน

จากงานวิจัยที่ใช้อ้างอิงเราได้เลือกสภาวะในการปฏิบัติการ โดยกำหนดสารป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ให้มีอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วต่อเมทานอลต่อกรดซัลฟิวริกให้อยู่ที่ 1 ต่อ 1 ต่อ 0.05 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 150 กิโลพาสคัล และใช้ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ ดังนี้ ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) เท่ากับ 13.3 กิโลจูลต่อโมล และค่าคงที่ A เท่ากับ 1.27

เมทานอลใหม่ และเมทานอลที่มาจากกรีไซเคิลของกระบวนการจะนำมาทำการผสมกับกรดซัลฟิวริกและถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ส่วนน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วจะทำการให้ความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจมน้ำอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ก่อนป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ โดยเครื่องปฏิกรณ์

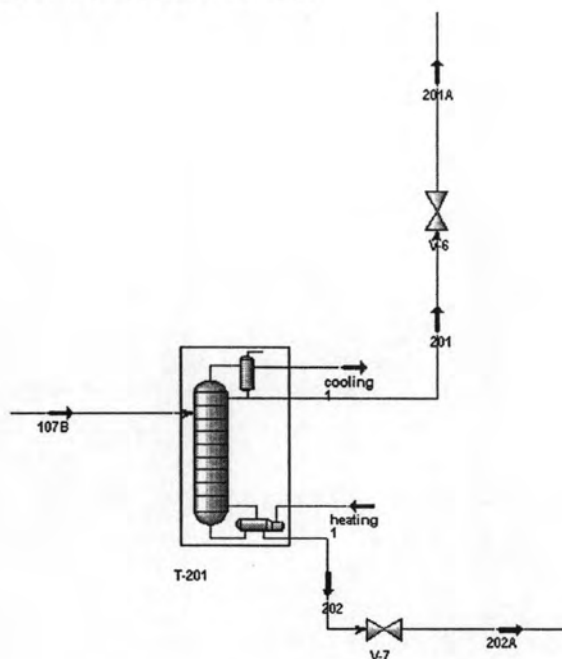


รูปที่ 3.1 หน่วยทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

- หน่วยแยกเมทานอลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

เนื่องจากกระบวนการต้องใช้เมทานอลที่มากเกินไปในการทำปฏิกิริยาเพื่อลดอันดับของปฏิกิริยาจึงต้องมีหน่วยแยกเมทานอลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อลดปริมาณของเมทานอลที่เป็นสารป้อนใหม่ โดยหน่วยนี้เป็นหอกลั่น 5 ชั้นมีอัตราการฟลักซ์เป็น 2 ซึ่งหน่วยนี้สามารถแยก

เมทานอลออกมาได้ถึงร้อยละ 94 โดยจะได้เมทานอลออกทางด้านบนของหอ ส่วนสารที่ออกทางด้านล่างจะถูกส่งต่อไปยังหน่วยกำจัดความเป็นกรด

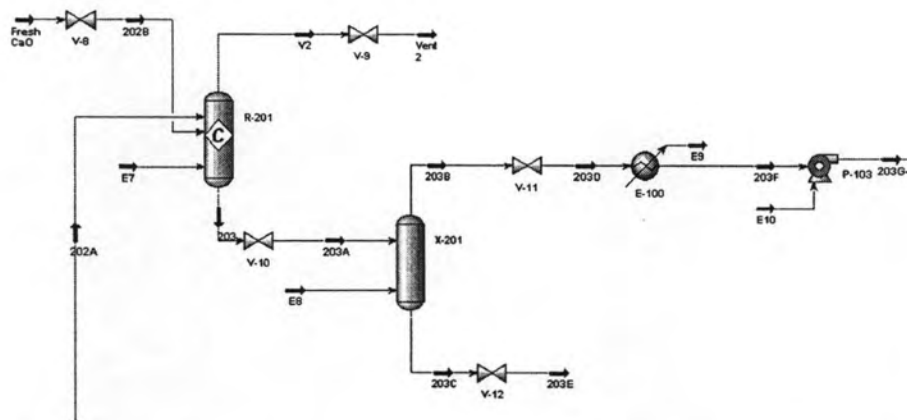


รูปที่ 3.2 หน่วยแยกเมทานอลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

- หน่วยกำจัดความเป็นกรด

ในหน่วยนี้กรดซัลฟิวริกสามารถถูกกำจัดได้อย่างสมบูรณ์ด้วยปฏิกิริยานิวทรัลไลซ์เซชัน โดยการเติม แคลเซียม ออกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกจนได้เป็น แคลเซียมซัลเฟตและน้ำ เนื่องจากแคลเซียม ออกไซด์จัดว่าเป็นเบสที่มีราคาค่อนข้างถูกเมื่อเทียบกับเบสชนิดอื่น

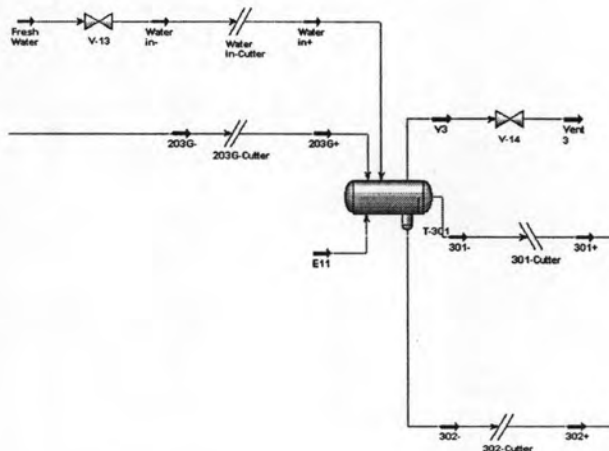
เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีจุดเดือดที่สูงจึงใช้เพียงเครื่องแยกแฟลชก็สามารถแยก แคลเซียมซัลเฟตออกจากผลิตภัณฑ์ได้แล้ว โดยของผสมหลังจากผ่านกระบวนการทั้งสองข้างต้นแล้วมีปริมาณ 1277 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประกอบไปด้วยไบโอดีเซลร้อยละ 81 กลีเซอรอลร้อยละ 9.2 เมทานอลร้อยละ 7.6 และน้ำร้อยละ 2.2 โดยจะถูกส่งต่อไปยังหอสกัดเพื่อแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลต่อไป



รูปที่ 3.3 หน่วยกำจัดความเป็นกรดในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

- หน่วยแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซล

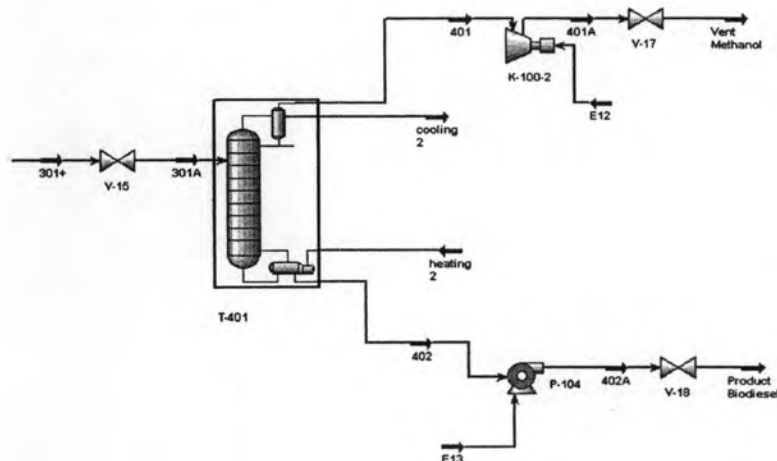
ในขั้นนี้เป็นการแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลด้วยหอสกัดแบบของเหลวสู่ของเหลว โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายซึ่งในขั้นนี้จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกแบบ NRTL เพื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมีของสารเคมีในสถานะของของเหลวมาจำลองการสกัด ที่หน่วยนี้ได้ทำการป้อนน้ำที่อัตราการไหล 234.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยจะได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.1 โดยมวลซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังหอกลั่นเพื่อทำให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้นต่อไป ส่วนกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลพลอยได้ในตอนนี้มีความบริสุทธิ์เพียงร้อยละ 25 โดยมวลจะถูกส่งต่อไปยังหอกลั่นเพื่อทำให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้นต่อไปเช่นกัน



รูปที่ 3.4 หน่วยแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

- หน่วยทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น

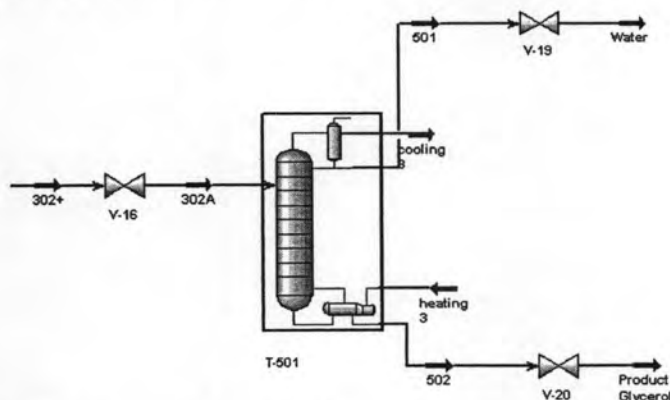
เนื่องจากตามมาตรฐาน ASTM ไบโอดีเซลต้องมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.65 โดยมวลในขั้นตอนนี้จึงเลือกใช้หอกลั่นซึ่งมี 4 ชั้นหอกลั่นเป็นแบบป้อนรีฟลักซ์กลับทั้งหมดโดยจะแยกเมทานอล และน้ำที่ยังเจือปนอยู่ในผลิตภัณฑ์ออกเป็นไอจากคอนเดนซ์เซอร์ และจะได้ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.69 ออกทางด้านล่างของหอ



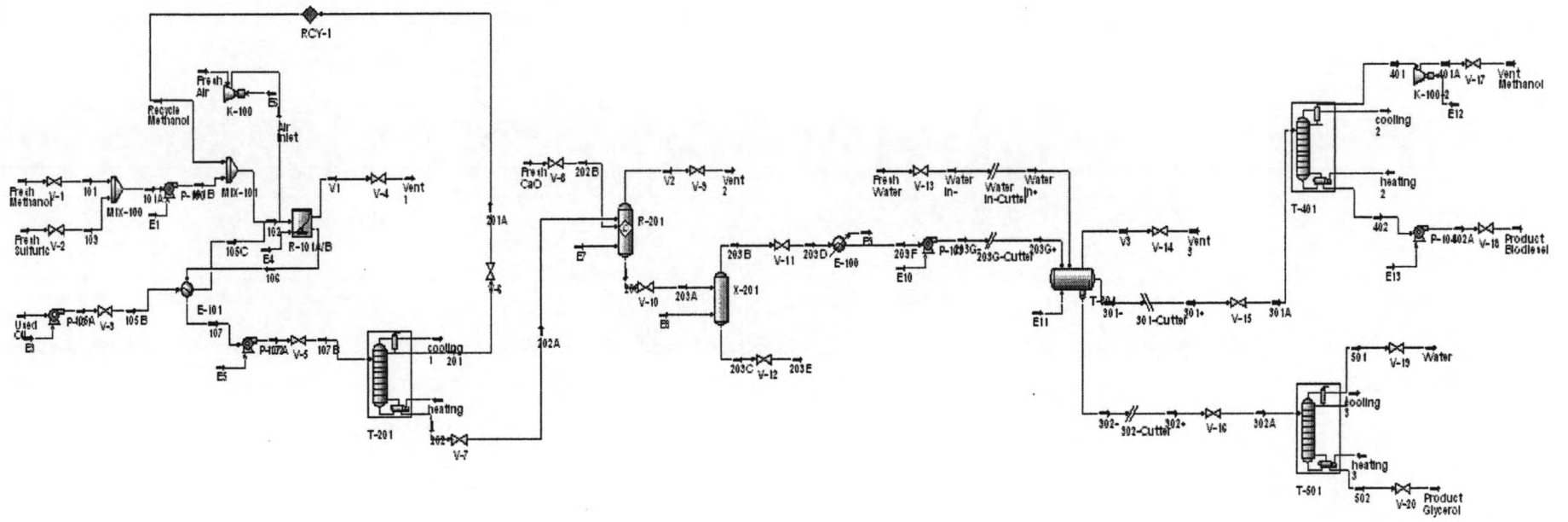
รูปที่ 3.5 หน่วยทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

- หน่วยทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น

เป็นหน่วยที่ทำกลีเซอรอลให้มีมูลค่ายิ่งขึ้นจึงต้องทำให้กลีเซอรอลมีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 92 โดยมวลในขั้นตอนนี้จึงเลือกใช้หอกลั่นซึ่งมี 4 ชั้นมีอัตราการรีฟลักซ์เป็น 2 โดยจะแยกเมทานอล และน้ำที่ยังเจือปนอยู่ในผลิตภัณฑ์ออกทางด้านบนของหอ และจะได้ผลิตภัณฑ์กลีเซอรอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.52 ออกทางด้านล่างของหอ



รูปที่ 3.6 หน่วยทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3.7 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### 3.2 การประยุกต์ใช้หลักการแพลงก์ทอนไวด์สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

สำหรับการออกแบบโครงสร้างการควบคุมของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบตามขั้นตอนของหลักการแพลงก์ทอนไวด์ 9 ขั้นตอนดังนี้

#### ขั้นตอนที่ 1 กำหนดวัตถุประสงค์การควบคุม

สำหรับงานวิจัยนี้มีการออกแบบโครงสร้างการควบคุม 3 แบบ เพื่อประเมินเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละโครงสร้างการควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ โดยทำการเปรียบเทียบค่า ไอเออี (IAE) ของแต่ละโครงสร้าง

โครงสร้างระบบควบคุมแบบที่ 1 เป็นโครงสร้างการควบคุมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วยอัตราการไหลของสารผลิตภัณฑ์

โครงสร้างระบบควบคุมแบบที่ 2 เป็นโครงสร้างการควบคุมที่เน้นเกี่ยวข้องกับการจัดการทางด้านการลดผลกระทบของสายรีไซเคิลเมื่อเกิดความแปรปรวนมวลสาร โดยทำการวัดปริมาณของเมทานอลรวมที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แล้วปรับอัตราการป้อนเมทานอลใหม่ให้ได้ตามภาวะที่ต้องการ

โครงสร้างระบบควบคุมแบบที่ 3 เป็นการควบคุมทั้งปริมาณและคุณภาพของไบโอดีเซลที่หน่วยทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้นโดยใช้การควบคุมแบบแคสเคดควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ร่วมกับวงควบคุมอุณหภูมิของเครื่องต้มซ้ำ และเพิ่มการควบคุมอัตราการไหลของสายผลิตภัณฑ์เข้าไป

#### ขั้นตอนที่ 2 หาองศาความเป็นอิสระของการควบคุม

จำนวนขององศาอิสระสำหรับการควบคุมของกระบวนการนี้คือ 27 โดยประกอบไปด้วย วาล์วควบคุมการป้อนสาร 4 ตัว คือ ป้อนน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ป้อนเมทานอลผสมกับกรดซัลฟิวริก ป้อนน้ำและป้อนแคลเซียมออกไซด์ วาล์วควบคุมสายล่าง และสายด้านบนของหอแยกแพรซ์ซึ่งมีอยู่สองหน่วย คือหน่วยแยกแคลเซียมซัลเฟต และหน่วยแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซล วาล์วสำหรับควบคุมระดับของเหลว และวาล์วควบคุมความดันของเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีอยู่สองหน่วยคือหน่วยทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน และหน่วยกำจัดความเป็นกรด วาล์วสำหรับควบคุมระดับของเหลวในคอนเดนเซอร์ สายหล่อเย็นของหอกลั่น รีฟลักซ์ สายดิสทิลเลท และวาล์วด้านล่างของหอกลั่นซึ่งมีอยู่สามหน่วย คือหน่วยแยกเมทานอลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ หน่วยทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น และหน่วยทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น



### ขั้นตอนที่ 3 กำหนดระบบการจัดการพลังงาน

ระบบการจัดการทางด้านพลังงานในกระบวนการนี้เกิดจาก ความต้องการในการควบคุม อุณหภูมิในแต่ละหน่วยปฏิบัติการ ซึ่งได้เลือกใช้การควบคุมอัตราไหลของพลังงานความร้อนที่ ป้อนเข้าสู่หน่วยปฏิบัติการนั้นๆ ส่งผลให้เกิดการส่งผ่านความร้อนระหว่างกระแสของกระบวนการ โดยในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์เพื่อทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันนั้นเป็น กระแสร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ระบบจำเป็นต้อง เพิ่มความร้อนให้กับปฏิกิริยาเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น จึงนำกระแสร้อนดังกล่าวไปแลกเปลี่ยน ความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้แก่สายป้อนน้ำมันปาล์มใช้แล้วเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ สูงขึ้นก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ และในส่วนของความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปในกระแสที่ ผ่านหน่วยต่างๆ ที่อยู่ ณ ขั้นตอนการนำเมทานอลมาใช้ใหม่ และขั้นตอนการกำจัดความเป็นกรด นั้นจะถูกถ่ายไปยังปลัต์คอนเดนเซอร์ ซึ่งจะช่วยลดการสะสมพลังงานในกระแสรีไซเคิลของ กระบวนการได้ และในงานวิจัยนี้เราไม่ต้องการทำบายพาสรอบๆเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

### ขั้นตอนที่ 4 กำหนดอัตราการผลิต

ในขั้นแรกต้องทำการตรวจสอบว่าตัวแปรใดมีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของ เครื่องปฏิกรณ์ โดยพิจารณาสมการทางจลนพลศาสตร์ สำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันจะ เห็นได้ว่าตัวแปรที่ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น คืออุณหภูมิ อัตราส่วนโดยมวลของน้ำมัน ปาล์มใช้แล้วเทียบกับเมทานอล

$$\begin{aligned} \frac{dC_{TG}}{d\tau} &= -k_1 C_{TG} C_A + k_2 C_{DG} C_{ME} \\ \frac{dC_{DG}}{d\tau} &= k_1 C_{TG} C_A - k_2 C_{DG} C_{ME} - k_3 C_{DG} C_A + k_4 C_{MG} C_{ME} \\ \frac{dC_{MG}}{d\tau} &= k_3 C_{DG} C_A - k_4 C_{MG} C_{ME} - k_5 C_{MG} C_A + k_6 C_{GL} C_{ME} \\ \frac{dC_{GL}}{d\tau} &= k_5 C_{MG} C_A - k_6 C_{GL} C_{ME} \\ \frac{dC_{ME}}{d\tau} &= k_1 C_{TG} C_A - k_2 C_{DG} C_{ME} + k_3 C_{DG} C_A \\ &\quad - k_4 C_{MG} C_{ME} + k_5 C_{MG} C_A - k_6 C_{GL} C_{ME} \\ \frac{dC_{GL}}{d\tau} &= -k_1 C_{TG} C_A + k_2 C_{DG} C_{ME} - k_3 C_{DG} C_A \\ &\quad + k_4 C_{MG} C_{ME} - k_5 C_{MG} C_A + k_6 C_{GL} C_{ME} \end{aligned}$$

จากสมการ จะเห็นได้ว่า มี 3 ตัวแปร ที่เป็นตัวแปรหลัก ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และ อัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์

ความดันมีผลต่ออัตราการผลิต ตลอดทั้งความเข้มข้นของสารตั้งต้นในกระแสขาเข้า การดำเนินการของเครื่องปฏิกรณ์ โดยปกติแล้วความดันของเครื่องปฏิกรณ์จะเข้าใกล้ขอบเขตของที่ได้ ออกแบบไว้ ดังนั้นความดันจึงมีผลต่ออัตราการผลิต จึงต้องมีการควบคุมปรับความดันเพื่อให้ได้ อัตราการผลิตที่เปลี่ยนแปลงไปตามต้องการ

จากความสัมพันธ์  $\frac{dr/r}{dT} = \frac{E_a}{RT^2}$  แสดงความสัมพันธ์ถึงการเปลี่ยนแปลงในอัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่ขึ้นกับอุณหภูมิตลอดทั้งพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) ในกรณีนี้ที่ศึกษานี้จึงค่อนข้างชัดเจนแล้วว่า อุณหภูมิยังคงเป็นตัวแปรหลักของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ปริมาตรของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ อัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเทียบกับเมทานอล

ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาผันกลับได้ที่มีค่าต่ำกว่าปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว กรณีเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน อุณหภูมิยังคงเป็นตัวแปรหลักสำหรับคุณภาพผลิตภัณฑ์ในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา สามารถควบคุมได้โดยภาวะความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ต้องมีค่าไม่เกิน 80 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการระเหยของเมทานอลออกจากถังปฏิกรณ์ ซึ่งส่งผลให้อัตราการคอนเวอร์ชันต่ำลง

จากงานวิจัยของเอเกิล และคณะ อัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเทียบกับเมทานอลที่ให้ค่าคอนเวอร์ชันที่ดีที่สุด และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่นานอยู่ที่ 1 ต่อ 1 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงจำนวนมากในทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์อัตราส่วนโดยมวลจะทำให้เกิดความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งสาย ปริมาณของน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์สามารถควบคุมได้โดยตรง ในส่วนของการควบคุมปริมาณเมทานอลนั้นต้องทำการควบคุมทางอ้อม เนื่องจากมีการรีไซเคิลเมทานอลมารวมกับเมทานอลใหม่

ดังนั้นการควบคุมปริมาณเมทานอลทางอ้อม สามารถควบคุมได้ 2 วิธีคือ ทำการวัดปริมาณของเมทานอลรวมที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แล้วปรับอัตราการป้อนเมทานอลใหม่ให้ได้ตามภาวะที่ต้องการดังโครงสร้างที่ 2 ซึ่งจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์สารเพื่อวัดปริมาณเมทานอลที่ใช้ในกระบวนการ ส่วนวิธีที่ 2 วัดปริมาณของเมทานอลที่ออกมาจากยอดหอกลั่นรีไซเคิล แล้วปรับอัตราการไหลของเมทานอลรีไซเคิลให้คงที่

## ขั้นตอนที่ 5 ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ความปลอดภัย สิ่งแวดล้อม และการปฏิบัติงาน

ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการนี้ คือส่วนที่กลั่นออกมาจากหอกลั่นที่หน่วยทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น และต้องการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM คือไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99.6 โดยมวล โดยจากกระบวนการไม่สามารถทำอะไรได้กับกลีเซอรอลที่ยังเจือปนเข้ามาในหน่วยนี้ อย่างไรก็ตามสิ่งเจือปนอื่นนอกจากกลีเซอรอลสามารถกลั่นแยกออกมาได้

ในโครงสร้างที่ 1 ใช้วิธีการปรับอัตราการไหลของสารผลิตภัณฑ์ เพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และใช้อัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์เพื่อควบคุมระดับของเหลวในรีฟลักซ์ดรัม และที่หอกลั่นหน่วยแยกเมทานอลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่นั้นต้องมีการควบคุมอัตราการไหลของกระแสรีไซเคิล เหตุผลคือ อัตราการไหลของกระแสดังกล่าวนี้จะมีผลกับอัตราการผลิต ซึ่งเป็นอิสระจากเครื่องปฏิกรณ์

ในโครงสร้างที่ 2 ได้เลือกปรับอัตราไหลของพลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าสู่หอกลั่นเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ กำหนดอัตราการรีฟลักซ์ให้คงที่ และใช้วาล์วที่สายผลิตภัณฑ์เพื่อควบคุมระดับของเหลวในรีฟลักซ์ดรัม

ในโครงสร้างที่ 3 เป็นการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบแคสเคด (Cascade control) ร่วมกับการควบคุมแบบวงควบคุมเดี่ยว (Single-loop control) โดยโครงสร้างนี้ปรับปรุงโดยนำข้อดีของโครงสร้างระบบควบคุมแบบที่ 1 และแบบที่ 2 จากการศึกษาโครงสร้างที่ 1 พบว่าสามารถควบคุมคุณภาพของไบโอดีเซลได้ดีแต่ไม่มีการควบคุมปริมาณของไบโอดีเซล เนื่องจากสิ่งสำคัญในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลคือ ปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลเป้าหมายของโครงสร้างนี้คือ ควบคุมทั้งปริมาณและคุณภาพของไบโอดีเซลที่หน่วยทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้นโดยใช้การควบคุมแบบแคสเคดควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ร่วมกับวงควบคุมอุณหภูมิของเครื่องต้มซ้ำ และเพิ่มการควบคุมอัตราการไหลของสายผลิตภัณฑ์เข้าไป

สำหรับการจัดการทางด้านความปลอดภัย เพื่อหลีกเลี่ยงความดันสูง จึงควบคุมความดันของเครื่องปฏิกรณ์ และเครื่องแยกเฟลซ โดยใช้วาล์วควบคุมไอด้านบนของหน่วยดังกล่าว

## ขั้นตอนที่ 6 ควบคุมสารหมุนเวียนในถังที่และควบคุมปริมาณสารสะสมในระบบ (ระดับความดันและของเหลว)

การควบคุมอัตราการป้อนกลับให้คงที่เป็นวงควบคุมที่จำเป็น เนื่องจากเมื่อดำเนินการไปนานๆ สารป้อนกลับที่ไม่ถูกควบคุมอาจเกิดการสะสมขึ้นภายในระบบ เมื่อกระบวนการถูกรบกวนด้านมวลสารจากภายนอกเพียงเล็กน้อย ผลกระทบที่เกิดขึ้นภายในทำให้ระบบถูกรบกวนอย่าง

รุนแรง เนื่องจากปัญหาการสะสมที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการ ดังนั้นกระบวนการที่มีการป้อนกลับ ควรพิจารณาตรวจสอบให้กระแสน้ำกลับมีค่าคงที่เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว

การควบคุมระดับของเหลว แบ่งเป็นการควบคุมที่ยอดหอและก้นหอ โดยโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 ได้นำเสนอวิธีและเหตุผลในการควบคุมกระแสป้อนกลับไว้แล้วในขั้นตอนที่ 4 และ 5 ในส่วนของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 นั้นใช้อัตราการไหลออกของกระแสไหลที่ขุดหอเป็นตัวแปรปรับปริมาณของเหลวในรีฟลักซ์ดรัม และเพิ่มการควบคุมปริมาณเมทานอลโดยวัดปริมาณของเมทานอลรวมที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แล้วปรับอัตราการป้อนเมทานอลใหม่ให้ได้ตามภาวะที่ต้องการซึ่งวิธีดังกล่าวช่วยลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณเมทานอลภายในระบบได้เป็นอย่างดี โดยโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 3 ใช้การโครงสร้างการควบคุมดังกล่าวควบคุมในส่วนของการรีไซเคิลเช่นกัน และในส่วนของควบคุมระดับของเหลวในเครื่องต้มซ้ำนั้นใช้การปรับอัตราการไหลของสายผลิตภัณฑ์ที่ส่วนล่างของหอ

ทุกโครงสร้างการควบคุม มีการควบคุมความดันที่รีฟลักซ์ดรัมของหอกลั่นทั้ง 3 หน่วยในกระบวนการเหมือนกัน คือเลือกใช้อัตราการหล่อเย็นเป็นตัวแปรปรับเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอเป็นของเหลว

#### ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบคุณสมบัติสารองค์ประกอบมวลสาร

สารองค์ประกอบที่อยู่ภายในกระบวนการประกอบไปด้วย สารตั้งต้นนั้นคือน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมทานอล แคลเซียมออกไซด์ น้ำ และกรดซัลฟิวริก สารผลิตภัณฑ์คือ ไบโอดีเซล แคลเซียมซัลเฟต และกลีเซอรอล

- น้ำมันปาล์มใช้แล้วถูกใช้หมดไปในการทำปฏิกิริยา
- เมทานอลจะถูกกำจัดออกไปจากกระบวนการเป็นจำนวนมากที่หน่วยแยกเมทานอลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และส่วนที่เหลือจะถูกกำจัดออกหมดไปที่หน่วยทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น และที่หน่วยทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น
- กรดซัลฟิวริกจะถูกกำจัดหมดไปที่หน่วยกำจัดความเป็นกรด โดยในหน่วยนี้แคลเซียมออกไซด์ถูกใช้หมดไปในการทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกด้วย

ซึ่งจากการจำลองที่สภาวะพลวัตพบว่า มีน้ำมันปาล์มใช้แล้วปนเปื้อนมากับผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลบ้าง เมื่อเทียบเป็นร้อยละโดยมวลแล้วถือว่าน้อยมาก

#### ขั้นตอนที่ 8 ควบคุมหน่วยปฏิบัติการแต่ละหน่วย

เป็นการกำหนดตรวจสอบควบคุมที่จำเป็นต่อการทำงานในแต่ละหน่วยปฏิบัติการโดยการควบคุมตัวแปรอิสระที่เหลือในกระบวนการ ซึ่งในโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 และแบบที่ 3 ใช้

ตัวแปรอิสระที่เหลือคืออัตราการใช้พลังงานของหอกลั่นแยกทุกหอที่มีในกระบวนการมาควบคุมระดับของเหลวในรีฟลักซ์ดรัม แต่ในโครงสร้างการควบคุมที่ 2 กำหนดให้อัตราการใช้พลังงานของหอกลั่นในกระบวนการมีค่าคงที่

### ขั้นตอนที่ 9 ทำออปติไมซ์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ และปรับปรุงความสามารถในการควบคุมเชิงพลวัต

หลังจากการควบคุมกระบวนการให้สอดคล้องกับทุกความต้องการที่เป็นข้อกำหนดพื้นฐานแล้วโดยทั่วไปจะมีองศาอิสระที่เกี่ยวข้องกับวาล์วควบคุมที่ไม่ได้ใช้ในการควบคุม ค่าเป้าหมายในเครื่องควบคุมบางเครื่องที่สามารถปรับค่าได้ สิ่งเหล่านี้สามารถใช้เพื่อออปติไมซ์สมรรถนะกระบวนการทางเศรษฐศาสตร์ที่ภาวะคงตัว (เช่น ลดพลังงานให้น้อยลง เพิ่มความสามารถเลือกให้เพิ่มขึ้น) หรือเพื่อปรับปรุงการตอบสนองทางพลวัตซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาถึงขั้นตอนนี้