

บทที่ 2

การกำจัดกำมะถันในน้ำมันมิดเดิลดีเซล

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันโดยใช้ไฮโดรเจน (Hydro-desulfurization) เป็นการดึงสารประกอบกำมะถันที่อยู่ในไฮโดรคาร์บอนออกมา โดยเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ สารป้อนหรือสารตั้งต้นจะถูกนำไปผสมกับแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิและความดันสูงโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเร่งปฏิกิริยา สภาพของปฏิกิริยาจะเกิดได้ทั้งในสถานะที่น้ำมันระเหยกลายเป็นไอ (เรียกว่า vapor phase reaction) หรือในสถานะที่น้ำมันเพียงบางส่วนระเหยกลายเป็นไอ (เรียกว่า trickle phase reaction)

ผลได้ (Yield) ของปฏิกิริยานี้สูงมากเนื่องจากการดึงกำมะถันออกเพียงตัวเดียวเท่านั้น นอกจากนี้สารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นยังเป็นสารประกอบที่เกิดได้ง่ายและสามารถแยกออกจากสารผลิตภัณฑ์ได้ง่าย สารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่แยกออกมาได้จะมีความเข้มข้นสูงมาก และสามารถนำไปเปลี่ยนรูปเป็นกำมะถันเหลวโดยใช้กระบวนการเคลอว์ (Claus Process) ต่อไป

ในบทนี้ จะกล่าวถึงปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันโดยใช้ไฮโดรเจนในน้ำมันรวมทั้งปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นเมื่อมีปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันโดยใช้ไฮโดรเจนเกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยาการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนโดยใช้ไฮโดรเจน (Hydrogenolysis of Nitrogen Compound) ปฏิกิริยาการกำจัดสารประกอบออกซิเจนโดยใช้ไฮโดรเจน (Hydrogenolysis of Oxygen Compound) ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนให้กับสารประกอบอะโรมาติกส์และโอเลฟินส์ (Hydrogenation of Aromatics and Olefins) ปฏิกิริยาแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลสูง (Hydrocracking) และปฏิกิริยาการเกิดโค้ก (Coke formation)

ในน้ำมันมิดเดิลดีเซล ปริมาณสารประกอบไนโตรเจน สารประกอบออกซิเจนมีน้อยมากเมื่อเทียบกับสารประกอบกำมะถัน ดังนั้นสามารถพิจารณาได้ว่าปฏิกิริยาเหล่านี้มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตน้อยมากเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถัน ส่วนปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนให้กับสารประกอบอะโรมาติกส์และโอเลฟินส์ (Hydrogenation of Aromatics and Olefins) นั้นขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของสารป้อนหรือสารตั้งต้น สารประกอบอะโร

มาติกส์จะเกิดจากกระบวนการเนฟทาร์ฟอรั่มมิง (Naphtha Reforming) ส่วนสารประกอบโอเลฟินส์จะเกิดจากกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal Cracking) สารป้อนของหน่วยกำจัดกำมะถันในน้ำมันมิดเดิลดีสทิลเลทที่ทำการศึกษานั้นมาจากการกลั่นตรงของน้ำมันดิบ ดังนั้นจะไม่มีสารประกอบอะโรมาติกส์และโอเลฟินส์อยู่ จึงพิจารณาได้ว่าปฏิริยานี้ไม่มีผลกระทบกับกระบวนการผลิต

ปฏิริยาที่อาจเกิดขึ้นในหน่วยกำจัดกำมะถันโดยทั่วไปมีดังนี้

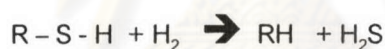
2.1.1) ปฏิริยาการกำจัดกำมะถันโดยใช้ไฮโดรเจน

2.1.1.1) ปฏิริยาการกำจัดกำมะถันของสารประกอบซัลไฟด์ (Sulphides)



Sulphide

2.1.1.2) ปฏิริยาการกำจัดกำมะถันของสารประกอบเมอแคพแทนส์ (Mercaptanes)



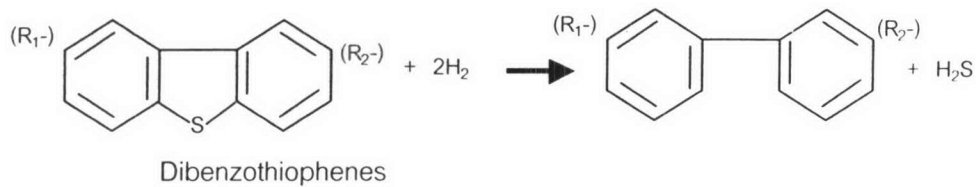
Mercaptanes

2.1.1.3) ปฏิริยาการกำจัดกำมะถันของสารประกอบ Benzothiophenes



Benzothiophenes

2.1.1.4) ปฏิริยาการกำจัดกำมะถันของสารประกอบ Dibenzothiophenes



2.1.1.5) ปฏิริยาการกำจัดกำมะถันของสารประกอบ Thiophenes



จากการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 500 องศาเซลเซียสและที่ความดันย่อยของไฮโดรเจนไม่เกิน 300 บาร์ พบว่าปฏิริยาการกำจัดกำมะถันโดยใช้ไฮโดรเจนจะไม่ถูกจำกัดโดยสมดุลของระบบหรือไม่ขึ้นกับเทอร์โมไดนามิกส์นั่นเอง ดังนั้นความสัมพันธ์ทางจลศาสตร์จะมีผลต่อกระบวนการกำจัดกำมะถันมากกว่า

หน่วยกำจัดกำมะถันที่ทำการศึกษามีปริมาณสารประกอบกำมะถันในน้ำมันมิดเดิลดีสทิลเลทซึ่งเป็นสารป้อนอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ สารประกอบกำมะถันเหล่านี้ต้องถูกกำจัดออกโดยปฏิริยาการใช้ไฮโดรเจนโดยต้องให้มีปริมาณสารประกอบกำมะถันเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ในช่วง 300 ถึง 500 ส่วนในล้านส่วน เนื่องจากปริมาณของสารประกอบกำมะถันในสารป้อนมีมากกว่าสารประกอบอื่น ๆ เช่นสารประกอบไนโตรเจน (มีอยู่ไม่เกิน 150 ส่วนในล้านส่วน) สารประกอบออกซิเจน (มีอยู่ไม่เกิน 0.3 ส่วนในล้านส่วน) ดังนั้นปฏิริยาการกำจัดกำมะถันจึงเป็นปฏิริยาหลักของกระบวนการที่ทำการศึกษ ตัวแปรปรับในกระบวนการผลิต เช่น อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารประกอบกำมะถันเป็นหลัก

2.1.2) ปฏิริยาการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนโดยใช้ไฮโดรเจน (Hydrogenolysis of Nitrogen Compound)

สารประกอบไนโตรเจนในน้ำมัน เช่น ไพริดีน (Pyridines) ควิโนลีน (Quinoline) ไพโรล (Pyrroles) จะทำปฏิริยากับไฮโดรเจนได้เป็นแอมโมเนีย



ปฏิริยานี้เกิดในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 500 องศาเซลเซียสและที่ความดันย่อยของไฮโดรเจนสูงมากกว่า 100 บาร์

ในน้ำมันมิดเดิลดีสทิลเทลที่ศึกษามีสารประกอบไนโตรเจนอยู่น้อยมาก (ในระดับไม่เกิน 150 ส่วนในล้านส่วน) เมื่อเทียบกับสารประกอบกำมะถันที่มีในปริมาณ 0.3 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ และในกระบวนการกำจัดกำมะถันที่ใช้ศึกษามีอุณหภูมิไม่เกิน 380 องศาเซลเซียสและความดันย่อยของไฮโดรเจนไม่เกิน 50 บาร์ ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าปฏิริยานี้ไม่เกิดขึ้นในหน่วยกำจัดกำมะถันที่ทำการศึกษา

2.1.3) ปฏิริยาการกำจัดสารประกอบออกซิเจนโดยใช้ไฮโดรเจน (Hydrogenolysis of Oxygen Compound)

สารประกอบออกซิเจน เช่น ฟีนอล (Phenol) กรดแนฟทีนิก (Naphthenic acids) ที่มีในน้ำมันจะทำปฏิริยากับไฮโดรเจนได้เป็นน้ำ

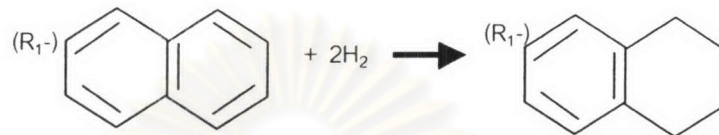
ปริมาณของสารประกอบออกซิเจนที่มีอยู่ในน้ำมันมิดเดิลดีสทิลเทล ซึ่งเป็นสารป้อนของหน่วยกำจัดกำมะถันที่ใช้ศึกษามีอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก (มีในรูปของกรดแนฟทีนิกซึ่งน้อยกว่า 0.3 ส่วนในล้านส่วน) เมื่อเทียบกับสารประกอบกำมะถันซึ่งมีในปริมาณระหว่าง 0.3 ถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าสารประกอบออกซิเจนจะไม่มีผลกับตัวแปรต่าง ๆ ในหน่วยกำจัดกำมะถันที่ศึกษา

2.1.4) ปฏิริยาการเติมไฮโดรเจนให้กับสารประกอบอะโรมาติกส์ (Hydrogenation of Aromatics)

สารประกอบอะโรมาติกส์ เช่น เบนซีน (Benzenes) และแนฟทาลีน (Naphthalenes) จะถูกทำให้อิ่มตัวโดยการเติมไฮโดรเจน



Aromatics Compound



Naphthalenes Compound

ปฏิกิริยานี้เกิดที่ความดันย่อยไฮโดรเจนสูงถึง 300 บาร์ และที่ช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส สารประกอบกลุ่มอะโรมาติกส์ที่มีอยู่ในสารป้อนนั้นจะมาจากกระบวนการแนฟทาร์ฟอรัมมิง (Naphtha Reforming) ถ้าสารป้อนมาจากกระบวนการแนฟทาร์ฟอรัมมิงจะมีสารประกอบอะโรมาติกส์อยู่และตัวแปรในกระบวนการผลิต เช่นอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบอะโรมาติกส์ด้วย

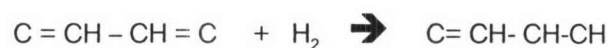
ในหน่วยกำจัดกำมะถันที่ศึกษานั้นน้ำมันมิดเดิลดีสทิลเลท ซึ่งเป็นสารป้อนได้จากการกลั่นตรงจากน้ำมันดิบ ซึ่งจะไม่มีการประกอบอะโรมาติกส์เป็นองค์ประกอบ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์สูงไม่เกิน 380 องศาเซลเซียส และความดันย่อยของไฮโดรเจนไม่เกิน 50 บาร์ ดังนั้นปฏิกิริยานี้จึงไม่เกิดขึ้นในหน่วยกำจัดกำมะถันที่ศึกษา

2.1.5) ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนให้กับสารประกอบโอเลฟินส์ (Hydrogenation of Olefins)

ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนให้กับสารประกอบโอเลฟินส์ อาจเกิดได้ดังนี้



Olefins Compound



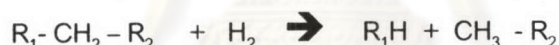
Olefins Compound

ปฏิกริยานี้เกิดที่ความดันย่อยของไฮโดรเจนสูงและอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ไม่สูงมาก สารประกอบโอเลฟินส์นั้นมาจากกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยา (Catalytic Cracking) ถ้าสารป้อนมาจากหน่วยผลิตเหล่านี้จะมีสารประกอบโอเลฟินส์เป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณมาก

ในหน่วยกำจัดกำมะถันที่ศึกษานั้น น้ำมันมิดเดิลดีสทิลเลทซึ่งเป็นสารป้อนได้จากการกลั่นตรงจากน้ำมันดิบ ซึ่งจะไม่มีการประกอบโอเลฟินส์เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นปฏิกริยานี้จึงไม่เกิดขึ้นในหน่วยกำจัดกำมะถันที่ศึกษา

2.1.6) ปฏิกริยาแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลสูง หรือ Hydrocracking

ปฏิกริยาแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนอาจเกิดได้ดังนี้



ปฏิกริยาการแตกตัวด้วยไฮโดรเจนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในทุกสภาวะการผลิต เราสามารถจำกัดการเกิดปฏิกริยานี้โดยการเลือกชนิดของตัวเร่งปฏิกริยาให้มีความจำเพาะเจาะจงต่ำต่อปฏิกริยานี้และรักษาอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ในระดับต่ำ

2.1.7) ปฏิกริยาการเกิดโค้ก (Coke formation)

ปฏิกริยาการเกิดโค้ก (Coke formation) หรือปฏิกริยาการกลั่นตัว (Condensation reaction) ของสารที่มีโมเลกุลไม่ซับซ้อนไปเป็นโครงสร้างวงแหวนที่มีโมเลกุลใหญ่และซับซ้อนขึ้นจนกลายเป็นโค้กที่เกาะบนตัวเร่งปฏิกริยา ที่อุณหภูมิสูงปฏิกริยานี้จะเกิดขึ้นได้ดี ในขณะที่ถ้าความดันย่อยของไฮโดรเจนสูงจะเกิดปฏิกริยานี้ลดลง ในทางปฏิบัติเราไม่ต้องการให้เกิดโค้กบนตัวเร่งปฏิกริยาเนื่องจากจะทำให้ความว่องไว (Activity) ของตัวเร่งปฏิกริยาลดลง เพราะตัวเร่งปฏิกริยาจะสูญเสียพื้นที่ผิวในการทำปฏิกริยาไปถ้ามีโค้กมาเกาะ ดังนั้นในทางปฏิบัติอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะถูกรักษาระดับให้ต่ำที่สุด เท่าที่จะไม่ทำให้ปริมาณกำมะถันในผลิต

ภยันต์สูงเกินกว่าที่กำหนดไว้ และความดันย่อยของไฮโดรเจนจะถูกรักษาในระดับที่สูงที่สุดเพื่อลดการเกิดโค้ก

2.2 ตัวแปรในกระบวนการผลิตที่มีผลต่อปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถัน

ตัวแปรสำคัญของหน่วยกำจัดกำมะถันที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันในน้ำมันมีดัดเดิลดิสทิลเลทมีดังนี้

2.2.1 อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor Temperature)

อุณหภูมิมีผลกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยอุณหภูมิจะมีผลกับค่า k (ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา) ตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) ดังนี้

$$k = k_0 e^{-E_a/RT} \quad \dots\dots\dots \text{สมการ 2.2.1)}$$

E_a คือ พลังงานกระตุ้น (Activation energy) kcal/kmol

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (Gas Constant) 1.987 kcal/kmol/K

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute Temperature) K

อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ยิ่งสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันยิ่งสูง นั่นคือปริมาณกำมะถันในสารผลิตภัณฑ์จะยิ่งต่ำลง ในทางกลับกันปฏิกิริยาข้างเคียงเช่นปฏิกิริยาการเกิดโค้กจะยิ่งเกิดมากขึ้น ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวลดลง ในทางปฏิบัติอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ควรจะถูกรักษาไว้ในระดับต่ำที่สุด ที่จะไม่ทำให้ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่ากำหนด ทั้งนี้เพื่อลดการเกิดโค้กบนตัวเร่งปฏิกิริยา

ในกรณีที่มีโค้กเกิดขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะถูกเพิ่มขึ้นอีกเพื่อรักษาปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ไม่ให้เกินค่ากำหนด (ซึ่งได้กบนตัวเร่งปฏิกิริยาจนเพิ่มด้วย) อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะถูกเพิ่มขึ้นสูงสุดจนถึงค่าหนึ่งซึ่งโดยมากจะเป็นค่าที่วัสดุที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์ไม่สามารถทนได้ และถ้าที่อุณหภูมินี้ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ไม่ลดลงอยู่ในค่าที่กำหนด เราต้องเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่

ในหน่วยกำจัดการำมะถันที่ศึกษาจะใช้อุณหภูมิเฉลี่ยที่เรียกว่า อุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก WABT (Weighted average bed temperature) เป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต โดยมีสมการดังนี้

$$WABT = 1/3 RIT + 2/3 ROT \quad \dots\dots\dots\text{สมการ 2.2.2)}$$

ที่มาของสมการ 2.2.2 แสดงไว้ในภาคผนวก ก

WABT คือ อุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted average bed temperature) องศาเซลเซียส หรือ K

RIT คือ อุณหภูมิขาเข้าของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor inlet temperature) องศาเซลเซียส หรือ K

ROT คือ อุณหภูมิขาออกของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor outlet temperature) องศาเซลเซียส หรือ K

2.2.2) ความดันย่อยของไฮโดรเจน (Hydrogen Partial Pressure)

ความดันย่อยของไฮโดรเจนมีผลอย่างมากกับจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา อัตราการกำจัดการำมะถัน ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ และการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความดันย่อยของไฮโดรเจนสูง อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่ต้องการสำหรับกำจัดการำมะถันจะลดลง นอกจากนี้ที่ความดันย่อยของไฮโดรเจนสูงจะช่วยลดการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Deactivation) ดังนั้นในทางปฏิบัติ ความดันย่อยของไฮโดรเจนจะถูกปรับให้มีค่าสูงสุดจนถึงค่าสูงสุดที่อุปกรณ์ของหน่วยผลิตสามารถรับได้

วิธีปรับความดันย่อยของไฮโดรเจนในหน่วยกำจัดการำมะถันสามารถทำได้โดย

2.2.2.1) การปรับความดันขาออกของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor Outlet Pressure) โดยทั่วไปความดันขาออกของเครื่องปฏิกรณ์นั้นสามารถปรับได้จากเครื่องอัดอากาศ หรือ คอมเพรสเซอร์ ถ้าความดันขาออกของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าสูง นั่นคือความดันรวมของระบบมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ความดันย่อยของไฮโดรเจนจะมีค่าสูงด้วย

2.2.2.2) การปรับอัตราการไหลของสายไฮโดรเจน ที่ป้อนกลับเครื่องปฏิกรณ์ (Recycle gas rate) เมื่ออัตราการไหลของสายไฮโดรเจนที่ป้อนกลับเครื่องปฏิกรณ์มีค่าต่ำ ความดันย่อยของไฮโดรเจนจะมีค่าต่ำ ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสายไฮโดรเจนที่ป้อน

กลับเครื่องปฏิกรณ์ให้มีค่าสูง ความดันย่อยของไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นด้วยเพราะจะมีปริมาณไฮโดรเจนที่เข้าทำปฏิกิริยามากขึ้น

2.2.2.3) การปรับให้สายไฮโดรเจนที่ป้อนกลับมีความบริสุทธิ์มากขึ้น เมื่อสายไฮโดรเจนที่ป้อนกลับมีความบริสุทธิ์มากขึ้นความดันย่อยของไฮโดรเจนจะสูงขึ้น วิธีการปรับให้สายไฮโดรเจนที่ป้อนกลับมีความบริสุทธิ์มากขึ้นมีหลายวิธี เช่น

2.2.2.3.1) การเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ที่ป้อนเข้าหน่วยกำจัดกำมะถัน

2.2.2.3.2) การปล่อยทิ้ง (Flaring) ของไฮโดรเจนที่ป้อนกลับเมื่อสายไฮโดรเจนนี้มีความบริสุทธิ์ลดลง

2.2.2.3.3) การล้างสิ่งเจือปนในสายไฮโดรเจนที่ป้อนกลับ ด้วยสารประกอบแอมมีน

2.2.2.3.4) การปรับอุณหภูมิของส่วนแยกสายไฮโดรเจนที่ป้อนกลับ ให้ลดลง (ส่วน Cold High Pressure separator) เพื่อให้สิ่งเจือปนในสายไฮโดรเจนที่ป้อนกลับมีปริมาณลดลง

2.2.3) ปริมาณกำมะถันที่มีอยู่ในสารป้อน

ปริมาณกำมะถันที่อยู่ในสารป้อนจะมีผลอย่างมากกับอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ถ้าปริมาณกำมะถันในสารป้อนสูง อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะต้องถูกปรับให้สูงขึ้นเพื่อให้ปฏิกิริยากำจัดกำมะถันเกิดได้ดีขึ้น และให้ได้ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ตามค่าที่กำหนด ปริมาณสูงสุดของกำมะถันที่มีในสารป้อนที่สามารถป้อนเข้าหน่วยกำจัดกำมะถันได้จะขึ้นอยู่กับ

2.2.3.1) อุณหภูมิสูงสุดที่เครื่องปฏิกรณ์สามารถรับได้ เพราะถ้าปริมาณกำมะถันในสารป้อนสูงมากเกินไปอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะต้องถูกปรับให้สูงขึ้นมาก (เพื่อให้ได้ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ตามค่าที่ต้องการ) จนกระทั่งวัสดุที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์ไม่สามารถรับได้ ซึ่งจะสามารถทำให้เครื่องปฏิกรณ์เสียหายได้

2.2.3.2) การเกิดไคกบนตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อปริมาณกำมะถันในสารป้อนมากขึ้นอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้จะยิ่งสูงขึ้น ปฏิกิริยาการเกิดไคกจะสูงขึ้น และมีผลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมเร็วขึ้น ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาบ่อยขึ้นซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้น

ในกระบวนการผลิตนั้น วิธีที่ควบคุมไม่ให้ปริมาณกำมะถันในสารป้อนมีค่าเกินกว่าที่ยอมรับได้คือการเลือกชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น (ไม่ให้มีปริมาณกำมะถันสูงเกินไป) และการเก็บตัวอย่างของสารป้อนเพื่อวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันในสารป้อนทุกวัน

2.2.4) เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Reaction time or Space Velocity)

การเกิดปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันเกิดขึ้นที่ Active site บนตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาเฉลี่ยที่แต่ละโมเลกุลใช้บนตัวเร่งปฏิกิริยา (Reaction Time) จะหาได้จากจำนวน active site ในเครื่องปฏิกรณ์และจำนวนโมเลกุลของน้ำมันในเครื่องปฏิกรณ์ต่อชั่วโมง ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะหาได้จาก สัดส่วนของปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์หารด้วยอัตราการไหลต่อชั่วโมงของสารป้อน ซึ่งเป็นสัดส่วนผกผันกับ Space Velocity

จากข้างต้นสามารถสรุปได้เป็นสมการดังนี้

$$\text{Reaction time} = \frac{1}{\text{Space Velocity}} \quad \text{.....สมการ 2.2.3)}$$

$$\text{Space Velocity} = \frac{\text{Feed Flow Rate (ton/hr)}}{\text{Catalyst Volume (m}^3\text{)}} \quad \text{.....สมการ 2.2.4)}$$

$$\text{Reaction time} = \frac{1}{\text{WHSV (ton/m}^3\text{ hr)}} \quad \text{.....สมการ 2.2.5)}$$

WHSV คือ Weight Hourly Space Velocity (ton/m³ catalyst hr)

WHSV คือ อัตราการไหลของสารป้อนต่อชั่วโมง/ปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่ออัตราการไหลของสารป้อนเพิ่มขึ้น WHSV จะเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะต้องถูกปรับให้สูงขึ้นเพื่อให้ปฏิกิริยากำจัดกำมะถันเกิดได้ดีขึ้น และให้ได้ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ตามค่ากำหนด อัตราการไหลสูงสุดของสารป้อนที่สามารถป้อนเข้าหน่วยกำจัดกำมะถันได้นั้นจะขึ้นอยู่กับ การออกแบบของหน่วยกำจัดกำมะถันนั้น ๆ โดยทั่วไปตัวแปรในการออกแบบที่กำหนดค่าอัตราการไหลสูงสุดของสารป้อน คือความสามารถในการปล่อยทิ้งของไหลในกรณีฉุกเฉิน (Relief Valve Capacity)

2.2.5) ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันมี 2 กลุ่ม คือ โคบอลต์-โมลิบดีนัม (Co-Mo Catalyst) และ นิกเกิล-โมลิบดีนัม (Ni-Mo Catalyst) การเลือกชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารป้อน อุณหภูมิสูงสุดของเครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถรับได้และ ปริมาณกำมะถันที่ต้องการในผลิตภัณฑ์

2.2.5.1) Co-Mo Catalyst โดยทั่วไปจะใช้กับหน่วยกำจัดกำมะถันที่มีสารป้อนที่มาจากกรกลั่นตรงของน้ำมันดิบ หรือเป็นน้ำมันที่ได้จากกระบวนการแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจน (Hydrocracking) หรือใช้กับสารป้อนที่มีปริมาณสารประกอบไนโตรเจนไม่เกิน 2 ส่วนในล้านส่วน

2.2.5.2) Ni-Mo Catalyst โดยทั่วไปจะใช้กับหน่วยกำจัดกำมะถันที่มีสารป้อนที่มาจาก การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal Cracking, Catalytic Cracking) ซึ่งสารป้อนนี้จะมีสารประกอบโอเลฟินส์เป็นอยู่มาก หรือใช้กับสารป้อนที่มีสารประกอบไนโตรเจนมากกว่า 2 ส่วนในล้านส่วน

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น มีผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถัน เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกันจะมีค่า k_0 ต่างกัน และแม้ว่าจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเดียวกัน แต่ผู้ผลิตต่างกัน ค่า k_0 ก็ต่างกันด้วย ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะต่างกัน

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของผู้ผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการกำจัดกำมะถัน

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ผู้ผลิต	ชื่อตัวเร่งปฏิกิริยา
Co-Mo	Criterion	C-448, C-444, HDS22
	AKZO-Nobel	KF-742, KF-707
	UOP	S12H
Ni-Mo	Criterion	C-424, C-324, HDS3
	AKZO-Nobel	KF-840

ที่มา: Shell Global Solution, Hydrotreater and Hydrodesulfurization Process Guide. Amsterdam: Shell, 1997.

2.2.6) Poisoning of Catalyst

Poisoning of Catalyst คือการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสีย active site ไปเนื่องจากการดูดซับสารปนเปื้อน (โดยทั่วไปเป็นโลหะ) เข้าไว้ใน active site ของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันเกิดช้าลงและต้องเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่หน่วยผลิตสามารถรับได้ และในที่สุดถ้าไม่สามารถลดปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามที่กำหนดได้ จะต้องมีการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้น

สารปนเปื้อนในสารป้อนที่ถือว่าเป็น Poisoning กับตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท Co-Mo และ Ni-Mo ส่วนมากเป็นโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว (Pb) สารหนู (As)ปรอท (Hg) โซเดียม (Na) ซิลิคอน (Si) นิกเกิล (Ni) วาเนเดียม (V) เป็นต้น

2.2.7) อายุของตัวเร่งปฏิกิริยา (Life time of catalyst)

อายุของตัวเร่งปฏิกิริยา (Aging) ความเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา (De-activation) มีผลทำให้ค่า k ลดลงซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันเกิดช้าลงและต้องเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาขึ้นเรื่อย ๆ ความเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับ

2.2.7.1) ความดันย่อยของไฮโดรเจน ความดันย่อยของไฮโดรเจนสูงจะช่วยลดความเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Deactivation) ดังนั้นในทางปฏิบัติความดันย่อยของไฮโดรเจนจะถูกปรับให้มีค่าสูงสุดจนถึงค่าสูงสุดที่อุปกรณ์ของหน่วยผลิตสามารถรับได้

2.2.7.2) อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ยิ่งสูงปฏิกิริยาการเกิดโค้กจะยิ่งเกิดมากขึ้น ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวลดลง ในทางปฏิบัติอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ควรจะถูกรักษาไว้ในระดับต่ำที่สุด ที่จะไม่ทำให้ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่ากำหนด ทั้งนี้เพื่อลดการเกิดโค้กบนตัวเร่งปฏิกิริยา

2.2.7.3) ปริมาณกำมะถันในสารป้อน เมื่อปริมาณกำมะถันในสารป้อนสูงขึ้น อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะต้องถูกปรับให้สูงขึ้น เพื่อให้ปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันเกิดได้ดีขึ้นและให้ได้ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ตามค่ากำหนด ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาการเกิดโค้กจะยิ่งเกิดมากขึ้น ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวลดลง

เมื่อหน่วยกำจัดกำมะถันใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีน้อยมาก ความเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปโดย ค่า k

ตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) จะลดลงเรื่อย ๆ ถ้าเราไม่สามารถหาค่า k ที่ลดลงนี้ได้ การปรับอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะไม่สัมพันธ์กับปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

2.3 จลศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถัน

ในกระบวนการผลิต เราสามารถแบ่งปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันออกเป็น 2 แบบใหญ่ตามสภาวะของการเกิดปฏิกิริยาและสารป้อน สภาวะของปฏิกิริยาจะเกิดได้ทั้งในสภาวะที่น้ำมันระเหยกลายเป็นไอ (เรียกว่า vapor phase reaction) หรือในสภาวะที่น้ำมันเพียงบางส่วนระเหยกลายเป็นไอ (เรียกว่า trickle phase reaction) สมการทางจลศาสตร์ของปฏิกิริยาทั้งสองแบบนี้จะต่างกัน

จลศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถัน เมื่อแบ่งตามสภาวะของการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้นเป็นดังนี้

2.3.1) จลศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถัน เมื่อสารป้อนระเหยกลายเป็นไอ (Vapor Phase Reaction)

ในกรณีนี้สารป้อนจะอยู่ในสถานะไอเมื่อทำปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถัน หน่วยกำจัดกำมะถันที่ใช้สารป้อนในสภาวะเป็นไอนี้ คือหน่วยกำจัดกำมะถันสำหรับน้ำมันแนฟทา และหน่วยกำจัดกำมะถันสำหรับน้ำมันก๊าด โดยทั่วไปหน่วยกำจัดกำมะถันเหล่านี้จะถูกออกแบบมาสำหรับ WHSV ประมาณ $4 \text{ ton/m}^3 \text{ hr}$

จากเอกสารอ้างอิงตามภาคผนวก ก ปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันในสภาวะที่สารป้อนเป็นไอหมดจะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันในสารป้อน กำมะถันในสารผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\ln \left[\frac{Sf}{Sp} \right] = \frac{P}{WHSV} k_0 \cdot \text{Exp}(-Ea/RT) \quad \dots\dots\dots \text{สมการ 2.3.1)}$$

Sf คือ ปริมาณกำมะถันในสารป้อน (%wt)

- Sp คือ ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ (%wt)
- P คือ รากที่สองของความดันย่อยของไฮโดรเจน (Bar)
- k_0 คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา ($\text{ton/m}^3 \text{ hr}$)
- Ea คือ พลังงานกระตุ้น (activation Energy) มีค่า 30,000 kcal/kmol
- R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่า 1.987 kcal/kmol/K
- T คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของเครื่องปฏิกรณ์ (K) ในที่นี้คือ WABT

สมการข้างต้นสามารถใช้หาอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่ต้องการ ค่า k_0 หรือหาปริมาณกำมะถันในสารผลิตภัณฑ์ เมื่อมีข้อมูลจริงของหน่วยผลิต (Test Run data)

2.3.2) จลศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันเมื่อสารป้อนระเหยกลายเป็นไอเพียงบางส่วน (Trickle Phase Reaction)

ในกรณีนี้สารป้อนจะอยู่ในสถานะเป็นไอเพียงบางส่วน ขณะที่บางส่วนจะยังเป็นของเหลวเมื่อทำปฏิกิริยากำจัดกำมะถัน หน่วยกำจัดกำมะถันที่ใช้สารป้อนในสภาวะนี้คือหน่วยกำจัดกำมะถันสำหรับน้ำมันดีเซล หน่วยกำจัดกำมะถันสำหรับน้ำมันมิดเดิลดีเซลไลท์ หน่วยกำจัดกำมะถันสำหรับน้ำมันก๊าดหนัก

สมการทางจลศาสตร์ของ Trickle Phase Reaction สามารถแบ่งตามระดับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกำมะถันในสารป้อนและผลิตภัณฑ์ได้ (Conversion Level) ดังนี้

2.3.2.1) กรณีที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกำมะถันในสารป้อนต่อผลิตภัณฑ์ต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ (Conversion level below 90 %)

ปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันในกรณีนี้จะเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง สมการจลศาสตร์ ซึ่งได้จากเอกสารอ้างอิงตามภาคผนวก ก สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\left[\begin{array}{cc} 1 & - 1 \\ S_p & S_f \end{array} \right] = \frac{F \cdot M \cdot P}{WHSV} \cdot k_0 \cdot \text{Exp} (-E_a/RT) \quad \dots\dots\dots \text{สมการ 2.3.2)}$$

F คือ แฟกเตอร์ของชนิดของสารป้อน (Feed Stock Factor) ค่า F นี้จะหาได้จากตาราง 2.2

M คือ แฟกเตอร์ของช่วงของการกลั่นของสารป้อน (Boiling Range Factor) ซึ่งหาได้ตามสมการ 2.3.3) โดยที่มาของสมการนี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

แฟกเตอร์ของชนิดของสารป้อน (F, Feed Stock Factor) นั้นหาได้จากตาราง 2.2 ซึ่งขึ้นกับชนิดของสารป้อนว่ามาจากแหล่งใด สารป้อนมาจากการกลั่นตรงของน้ำมันดิบ หรือมาจากกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน หรือมาจากกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วย

แฟกเตอร์ของช่วงของการกลั่นของสารป้อน (M, Boiling Range Factor) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Log } M = -8.8 \log T_B + 24.38 \quad \dots\dots\dots\text{สมการ 2.3.3)}$$

เมื่อ T_B คือ จุดเดือดเฉลี่ยของสารป้อน (Average Molar Boiling Point) (K) ซึ่งสามารถหาได้จากผลการกลั่นด้วยวิธี ASTM D86 ดังแสดงในสมการ ที่ 2.3.4)

$$T_B = \left[\frac{\text{ASTM10\%} + \text{ASTM30\%} + \text{ASTM50\%} + \text{ASTM70\%} + \text{ASTM90\%}}{5} - 5.21 * \left[\frac{\text{ASTM90\%} - \text{ASTM 10\%}}{80} \right]^{1.18} \right] \quad \dots\dots\dots\text{สมการ 2.3.4)}$$

ASTM10%, ASTM30%, ASTM50%, ASTM70% และ ASTM90% คืออุณหภูมิของน้ำมันที่กลั่นออกมาเมื่อปริมาตรของน้ำมันที่กลั่นออกมาได้ทั้งหมด ณ จุดนั้นเป็น 10 30 50 70 และ 90 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

สมการข้างต้นสามารถใช้หาอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่ต้องการ ค่า k_0 หรือหาปริมาณกำมะถันในสารผลิตภัณฑ์ เมื่อมีข้อมูลจริงของหน่วยผลิต (Test Run data)

2.3.2.2) กรณีที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกำมะถันในสารป้อนต่อผลิตภัณฑ์สูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ (Conversion level above 90 %)

ปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันในกรณีนี้จะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งถึงสอง ขึ้นกับปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ จากเอกสารอ้างอิงตามภาคผนวก ก สมการจลศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันในสารป้อน กำมะถันในผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{1}{n-1} \left[\frac{1}{S_p^{n-1}} - \frac{1}{S_f^{n-1}} \right] = \frac{F \cdot M \cdot P}{WHSV} k_0 \cdot \text{Exp}(-E_a/RT)$$

.....สมการ 2.3.5)

N คือ อันดับของการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Order)

n = 2 กรณีที่ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง 1000 ส่วนในล้านส่วน

n = 1.5 กรณีที่ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง 500 ส่วนในล้านส่วน

n = 1.2 ถึง 1.4 กรณีที่ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง 50 ส่วนในล้านส่วน

สำหรับสมการการหา F และ M นั้น ใช้สมการเดียวกับกรณีที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกำมะถันในสารป้อนต่อผลิตภัณฑ์ต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.3.2.1)

สมการข้างต้นสามารถใช้หาค่าต่าง ๆ เช่นอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องมีข้อมูลที่ทำกรทดลองจริง (Test Run Data) ของกระบวนการผลิตนำมาเปรียบเทียบ โดยทั่วไปเมื่อมีข้อมูลในการผลิตจริงจะนำมาคำนวณหาค่า k_0 และนำค่า k_0 ที่หาได้มาคำนวณย้อนกลับหาค่าสภาวะการผลิต เช่นอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อีกครั้งหนึ่ง

แต่เนื่องจาก ค่า k_0 นั้นจะมีค่าเปลี่ยนไปตามอายุของตัวเร่งปฏิกิริยาและความเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ความแม่นยำในการคำนวณค่าต่าง ๆ ของสมการข้างต้นลดลง ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้สมการข้างต้นเป็นสมการหลัก และจะใช้ผลการทดลองซึ่งได้จากกระบวนการ

ผลิจจริงมาเปรียบเทียบว่าสมการข้างต้นมีความคลาดเคลื่อน (Error) เท่าไรเมื่อเทียบกับข้อมูลจริง จากนั้นจะหาว่าความคลาดเคลื่อนนี้ขึ้นกับตัวแปรอะไรบ้าง และจะเพิ่มตัวแปรแก้ไข (Correction Factor) เข้าไปในสมการข้างต้นเพื่อให้สมการข้างต้นมีความแม่นยำมากขึ้น ตัวแปรแก้ไขที่เพิ่มเข้าไปนั้นจะเป็นสมการเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อน กับตัวแปรที่มีอิทธิพลกับความคลาดเคลื่อนนั้น

ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการที่ 2.3.1) ถึง 2.3.5) แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ที่มาของตารางที่ 2.2 แสดงไว้ในภาคผนวก ก ค่าต่าง ๆ เหล่านี้จะขึ้นกับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดของสารป้อน ศัพท์เฉพาะของตารางที่ 2.2 สามารถอธิบายได้ดังนี้

SRGO และ SR คือ Straight Run Gas Oil คือน้ำมันในช่วงจุดเดือดของ Gas Oil ที่ได้จากการกลั่นตรงจากน้ำมันดิบ

TCGO คือ Thermal Cracked Gas Oil น้ำมันในช่วงจุดเดือดของ Gas Oil ที่ได้จากการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน

LCO คือ Light Cycle Oil น้ำมันที่ได้จากการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วย ซึ่งจะเป็นชื่อเฉพาะของน้ำมันในช่วงจุดเดือดที่มากกว่า Gas Oil และจะมาจากกระบวนการ Catalytic Cracking

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ค่าตัวแปรทางจลศาสตร์ที่ใช้ในสมการจลศาสตร์สำหรับ Trickle flow reaction

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด C-448 (Co-Mo Catalyst)

Feed	Blend Ratio	n	Ea	k_0	F
SRGO	-	1.5	25000	5.0e8	1.00
SR/TCGO	<50 % TCGO	1.5	30000	2.1e10	0.75
SR/TCGO	> 50% TCGO	1.5	30000	2.1e10	0.70
SR/LCO	< 50% LCO	1.5	30000	2.1e10	0.75
SR/LCO	> 50% LCO	1.5	30000	2.1e10	0.70

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด C-424 (Ni-Mo Catalyst)

Feed	Blend Ratio	n	Ea	k_0	F
SRGO	-	1.2	30000	6.9e9	1.00
SR/TCGO	<50 % TCGO	1.2	30000	6.9e9	0.70
SR/TCGO	> 50% TCGO	1.4	30000	9.0e9	0.70
SR/LCO	< 30% LCO	1.2	30000	6.9e9	0.70
SR/LCO	> 30% LCO	1.4	30000	9.0e9	0.70

ที่มา: Shell Global Solution, Hydrotreater and Hydrodesulfurization Process Guide.
Amsterdam: Shell, 1997.