

ผลของความถี่และแอมพลิจูดของการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีในไรเซอร์ ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน

Effects of frequency and amplitude of pulsating flow on hydrodynamics and chemical reaction
in riser of fluidized bed reactor for oil vapor cracking

หาญณรงค์ ชิตเจริญอยู่¹, เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ²

¹ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

² ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

*ติดต่อ E-mail: benjapon.c@chula.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 02-218-7682

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน ปริมาณความต้องการใช้น้ำมันยังคงเพิ่มขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจโลก หน่วยเพิ่มคุณภาพน้ำมันโดยการแปลงสภาพผลิตภัณฑ์มูลค่าต่ำไปเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูงผ่านปฏิกิริยาเคมีการแตกตัวของไอน้ำมันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาจึงกำลังได้รับความสนใจ ปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวเกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่เรียกว่า ไรเซอร์ ซึ่งรูปแบบการไหลของของไหลและของแข็งจะส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการ งานวิจัยนี้ ศึกษาผลของรูปแบบการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันโดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม พลังงาน และ องค์ประกอบ จะถูกแก้ร่วมกับทฤษฎีจลนการไหลของของแข็ง และ สมการปฏิกิริยาเคมีการแตกตัวของไอน้ำมัน มีตัวแปรที่สนใจสองตัวแปร คือ ความถี่และแอมพลิจูดของการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ ผลที่ได้ พบว่า ความถี่และแอมพลิจูด มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและดำเนินการกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาในโรงกลั่นน้ำมัน เพื่อเพิ่มศักยภาพของเครื่องปฏิกรณ์ให้สูงขึ้น และ จะนำไปสู่การเพิ่มมูลค่าทางการตลาดให้แก่ผลิตภัณฑ์ต่อไป

คำสำคัญ: การแตกตัวของไอน้ำมันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, การไหลป้อนเข้าแบบพัลส์, อุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมี, เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด, แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Abstract

Nowadays, oil demand continues growing as the global economics expands. The fluid catalytic cracking (FCC) units, which convert the products from low market value to the more valuable products, are being interested. The mentioned reaction is occurred inside the riser of fluidized bed reactor. The flow patterns of fluids and solids have an effect on hydrodynamics

and chemical reaction in this process. The present study investigates the effects of pulsating flow on hydrodynamics and chemical reaction in riser of fluidized bed reactor for oil vapor cracking by using computational fluid dynamics. The mass, momentum, energy and species conservation equations are solved along with the kinetic theory of granular flow and chemical reactions of oil vapor cracking. There are two interested operating parameters, frequency and amplitude of pulsating flow. The results can be concluded that frequency and amplitude have the effects on hydrodynamics and chemical reaction in riser of fluidized bed reactor for oil vapor cracking. The results can then be applied to fluidized bed reactor for oil vapor cracking process in refinery, to improve the reactor performance and to get more product values.

Keywords: Fluid catalytic cracking, Pulsating flow, Hydrodynamics and chemical reaction, Fluidized bed reactor, Computational fluid dynamics

บทนำ

หน่วยเพิ่มคุณภาพน้ำมันโดยการแปลงสภาพผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าต่ำเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูงผ่านปฏิกิริยาเคมีมีความจำเป็นอย่างมากในโรงกลั่นน้ำมัน หนึ่งในกระบวนการที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย คือ การแตกตัวของไอน้ำมันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะของไหล ซึ่งเป็นกระบวนการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ซีโอไลต์ ให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด กระบวนการนี้เป็นกระบวนการหนึ่งในโรงกลั่นน้ำมันที่สามารถเพิ่มมูลค่าทางการตลาดให้แก่ผลิตภัณฑ์ เช่น เปลี่ยนน้ำมันเตาให้เป็นน้ำมันเบนซินและดีเซล

กระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันเริ่มต้นจากไอของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหนักและตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดทางด้านล่างกระบวนการ ผ่านส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ที่เรียกว่า ไรเซอร์ (Riser) และเกิดการสัมผัสกันอย่างสมบูรณ์ ทำให้โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง ก่อนที่จะออกจากไรเซอร์และเข้าไปในไซโคลน (Cyclone) เพื่อแยกผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกกลั่นแยกในหอกลั่นเป็นผลิตภัณฑ์ส่วนกลั่นที่มีจุดเดือดต่างๆ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วจะมีคาร์บอนเกาะสะสมอยู่บนพื้นผิวในรูปถ่านโค้ก ทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลง จึงต้องกำจัดถ่านโค้กออกโดยอาศัยการเผาไหม้กับอากาศ (Coke burning) ในเครื่องฟื้นฟูสภาพ แล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เผาไล่ถ่านโค้กออกกลับมาใช้ซ้ำในกระบวนการต่อไป

อุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดซึ่งเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเคมีจะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การเคลื่อนที่ของของไหลและอนุภาคของแข็งภายในท่อไรเซอร์จึงถูกศึกษาโดยการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งสามารถจำลองรูปแบบการไหล ทำนายร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์หรือร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ได้ถูกต้องแม่นยำ จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบปัญหาที่เกี่ยวกับอุทกพลศาสตร์หรือรูปแบบการไหลภายในท่อไรเซอร์ เช่น ลักษณะการไหลแบบรูปทรง S (S-shape) ที่ทำให้ของแข็งมีการกระจายตัวหนาแน่นที่ด้านล่างและบางเบาที่บริเวณด้านบน การไหลแบบแกนในวงนอก ที่ทำให้เกิดการผสมที่ไม่ดีจากการจับกลุ่มกันของอนุภาคของแข็ง (Aggregates) ที่บริเวณผนังท่อ ลักษณะการไหลทั้งสองจะทำให้มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ไม่สม่ำเสมอภายในเครื่องปฏิกรณ์

จากปัญหาดังกล่าว จึงมีผู้ทำวิจัยพัฒนาความเหมาะสมของรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันเพื่อเพิ่มความสามารถของเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ลักษณะการไหลแบบพัลส์ เช่น รูปแบบการไหลแบบพัลส์ที่ความถี่ต่ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบสะเป่าตั้งเบดทำให้เกิดการผสมที่สูงกว่ารูปแบบการไหลแบบปกติในเครื่องปฏิกรณ์แบบสะเป่าตั้งเบด [1] การใช้รูปแบบการไหลแบบพัลส์ให้ประสิทธิภาพที่สูงในการอบแห้ง [2] การไหลแบบพัลส์ช่วยลดความเร็วต่ำสุดที่ใช้ในการเกิดฟลูอิดเซชันและทำให้การผสมภายในเบดสูงขึ้น [3] การไหลแบบพัลส์ที่ความถี่สูงทำให้ปริมาณฟองแก๊ส สัดส่วนการขยายตัวของเบด การกวัดแกว่งของความดันและความเร็วสูงสุดในแนวแกนของของแข็งลดลงซึ่งเป็นผลดีต่อระบบ และ การไหลแบบพัลส์ช่วยปรับปรุงการผสมโดยลดการจับกลุ่มของอนุภาคและการรวมกันของฟองแก๊ส [4] การไหลแบบพัลส์ในการอบแห้งชีวมวลทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนและอัตราการถ่ายโอนมวลสารเพิ่มขึ้น [5] การไหลแบบพัลส์ในท่อโรเซออร์ที่ใช้ในการแตกตัวของไอน้ำมันทำให้อัตราการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น [6] อย่างไรก็ตาม พบว่า งานวิจัยที่ผ่านมาไม่มีการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีภายในท่อโรเซออร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันเบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์เพียงบางส่วนเท่านั้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้ ที่จะศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการคือ ความถี่และแอมพลิจูด ที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีภายในท่อโรเซออร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันเบดโดยการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งจะสามารถนำผลที่ได้ไปประยุกต์สำหรับกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาในโรงกลั่นน้ำมันเพื่อเพิ่มศักยภาพของเครื่องปฏิกรณ์ให้สูงขึ้น และจะนำไปสู่การเพิ่มมูลค่าทางการตลาดให้แก่ผลิตภัณฑ์ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

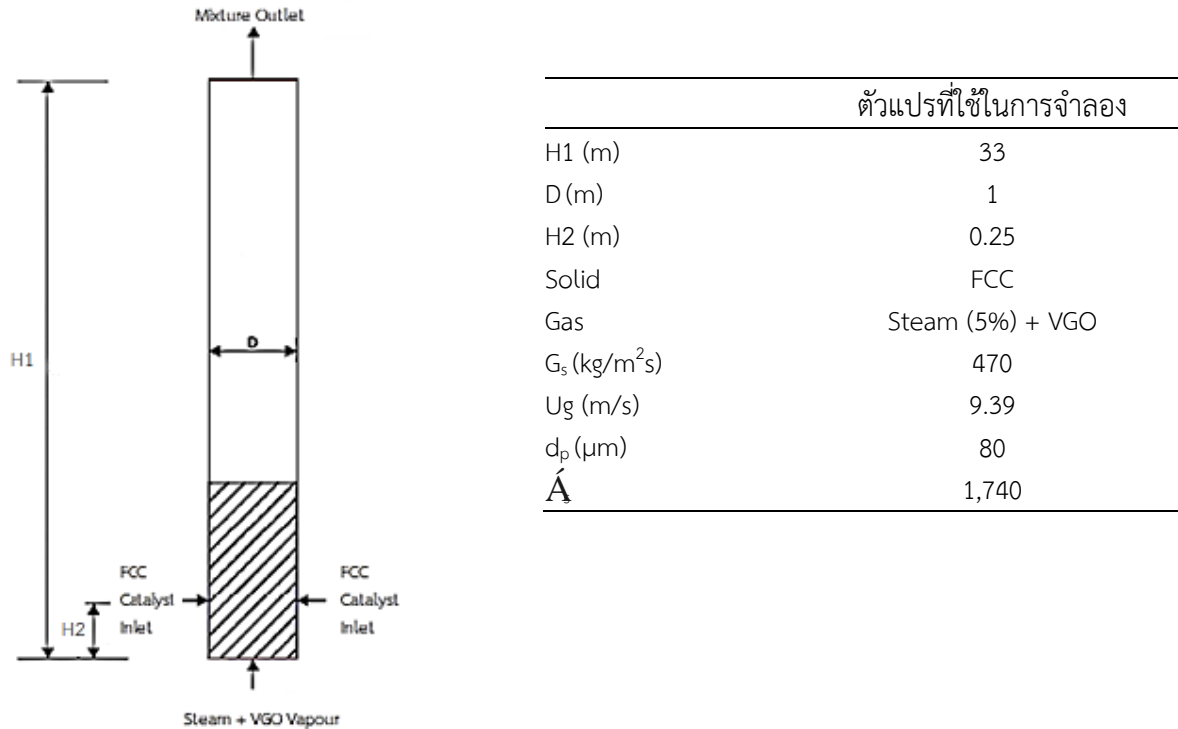
แบบจำลองการไหล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันในท่อโรเซออร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันเบด ได้มาจากข้อมูลการทดลองของ Shah และ Utikar [6] โดยสมการที่ใช้ในแบบจำลอง ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการอนุรักษ์พลังงาน สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ ทฤษฎีจลนการไหลของของแข็ง และสมการการเกิดปฏิกิริยาของการแตกตัวของไอน้ำมัน เพื่อใช้อธิบายอุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตแบบจำลอง ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม GAMBIT เพื่อออกแบบท่อโรเซออร์ และใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT สำหรับจำลองปรากฏการณ์โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม GAMBIT

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม GAMBIT ในการสร้างแบบจำลองการไหลแบบพัลส์ในโรเซออร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันเบด ในระบบ 3 มิติ โดยอ้างอิงจากข้อมูลงานวิจัยของ Shah และ Utikar [6] ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดในส่วนของท่อโรเซออร์ จากการผสมกันระหว่างอนุภาคกับของไหล ซึ่งโรเซออร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร และสูง 33 เมตร ไอน้ำมันและไอน้ำจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของท่อโรเซออร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกป้อนเข้าทางบริเวณด้านข้างของท่อโรเซออร์ทางด้านซ้ายและขวา ซึ่งทั้งแก๊สและของแข็งจะออกที่ทางออกด้านบนของท่อโรเซออร์ การจำลองจะสร้างเซลล์คำนวณทั้งหมด 4 ขนาด ดังนี้ 5,000 10,000 20,000 และ 30,000 เซลล์ โดยไอน้ำมันและไอน้ำจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของท่อโรเซออร์ซึ่งมีขนาดทางเข้าเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ส่วน

ของแข็งจะถูกป้อนเข้าบริเวณด้านข้างของท่อโรเซอ์ทั้งด้านซ้ายและขวามีขนาดทางเข้า 0.25 เมตร และของผสมจะออกทางด้านบนของท่อโรเซอ์ที่มีขนาด 1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปทรงเรขาคณิตอย่างง่ายของท่อโรเซอ์ และ ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบพัลส์ในท่อโรเซอ์

การจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบ 2 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคแก๊สจะใช้เป็นแก๊สผสมระหว่าง ไอน้ำ และ ไอน้ำมัน และ ภูมิภาคของแข็งจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1,740 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ภายในท่อโรเซอ์จะเกิดการแตกตัวของไอน้ำมันจากการผสมกันระหว่างอนุภาคกับของไหล โดยระบบจะป้อนแก๊สเข้าที่บริเวณด้านล่างของท่อโรเซอ์ และป้อนของแข็งเข้าที่บริเวณด้านข้างของท่อโรเซอ์ โดยความเร็วป้อนเข้าเท่ากับ 9.39 เมตรต่อวินาที ซึ่งสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบของแก๊สเข้าประกอบด้วยไอน้ำมัน (VGO) ร้อยละ 95 และไอน้ำ ร้อยละ 5 ของแข็งและแก๊สจะออกจากระบบทางด้านบนของท่อโรเซอ์ สำหรับการแก้ปัญหาจะเป็นการคำนวณแบบสามมิติ และ การคำนวณจะต้องทำการกำหนดค่าสมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบและภาวะขอบ รวมถึงค่าภาวะเริ่มต้น เพื่อเป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นในการคำนวณ จากนั้น โปรแกรมจะทำการแก้ปัญหการไหล จากสมการการไหล และสมการอื่นๆ โดยรายละเอียดสมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบที่ใช้ อ้างอิงจากงานของ Nayak และคณะ [7] แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบ

Component	Density (kg/m ³)	Viscosity (kg/(ms))	Molar mass (kg/kmol)	Specific heat (J/(kgK))	Thermal conductivity (W/(mK))
Gas mixture	Ideal gas	Mixing law		Ideal gas mixing law	Ideal gas mixing law
VGO	-	5.00×10^{-5}	400	1,040	0.0250
Gasoline	-	1.66×10^{-5}	100	1,040	0.0250
Gas	-	1.66×10^{-5}	50	1,040	0.0250
Coke	-	1.66×10^{-5}	400	1,040	0.0250
Steam	-	2.00×10^{-5}	18	1,000	0.0250
Catalyst	1,730	-	-	1,000	0.0454

สมการอนุรักษ์

สมการอนุรักษ์มวล

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g) = 0 \quad (1)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (2)$$

$$\varepsilon_g + \varepsilon_s = 1 \quad (3)$$

เมื่อ

ε_s คือ สัดส่วนของปริมาตรวัฏภาคของแข็ง

ε_g คือ สัดส่วนของปริมาตรวัฏภาคแก๊ส

ρ_s คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง

ρ_g คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคแก๊ส

v_s คือ ความเร็วของวัฏภาคของแข็ง

v_g คือ ความเร็วของวัฏภาคของแก๊ส

t คือ เวลา

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \varepsilon_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\varepsilon_g \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \varepsilon_g \rho_g \vec{g} + \beta(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \quad (4)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \varepsilon_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\varepsilon_s \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_s - \nabla p_s + \varepsilon_s \rho_s \vec{g} - \beta(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \quad (5)$$

เมื่อ

$\bar{\tau}$ คือ ความเค้นเทนเซอร์

β คือ สัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค

ρ คือ ความดันของวัฏภาคแก๊ส

ρ_s คือ ความดันของวัฏภาคของแข็ง

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

สมการอนุรักษ์พลังงาน

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g h_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g h_g) = -\varepsilon_g \frac{\partial P}{\partial t} + \bar{\tau}_g : \nabla \vec{v}_g \quad (6)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s h_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s h_s) = -\varepsilon_s \frac{\partial P}{\partial t} + \bar{\tau}_s : \nabla \vec{v}_s \quad (7)$$

เมื่อ

h_s คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของของแข็ง

h_g คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของแก๊ส

สมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการกวัดแกว่งจากความปั่นป่วน (Turbulent Fluctuating Energy, θ_s)

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \varepsilon_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \varepsilon_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = \tau_s : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (\kappa_s \nabla \theta_s) - \gamma_s + 3\beta \theta_s \quad (8)$$

เมื่อ

พจน์ทางซ้ายมือของสมการ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานกวัดแกว่งสุทธิ

พจน์แรกทางขวามือของสมการ คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากความเค้น

พจน์ที่สองทางขวามือของสมการ คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ

พจน์ที่สามทางขวามือของสมการ คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

พจน์ที่สี่ทางขวามือของสมการ คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างของแข็งกับแก๊ส

$$\theta_s = \frac{1}{3} (v'_s)^2 \quad (9)$$

θ_s คือ อุณหภูมิแกรนูลาร์

v'_s คือ ความเร็วที่แปรผันไปจากความเร็วเฉลี่ยหรือพลังงานกวัดแกว่ง

สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ

แบบจำลองการแก้สมการอนุรักษ์องค์ประกอบจะถูกคำนวณในวัฏภาคแก๊สเท่านั้น

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g Y_i) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g Y_i) = -\nabla \cdot \varepsilon_g J_i + \varepsilon_g R_{i,ho} + R_{i,net} \quad (10)$$

เมื่อ

$R_{i,ho}$ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีรวมของสมการปฏิกิริยาเคมีแบบเอกพันธ์ขององค์ประกอบ i

$R_{i,het}$ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีรวมของสมการปฏิกิริยาเคมีแบบวิวิธพันธ์ขององค์ประกอบ i

Y_i คือ สัดส่วนโดยมวลของแต่ละองค์ประกอบ i

J_i คือ พลักซ์ของการแพร่ขององค์ประกอบ i

สมการเสริม

พลังงานของอนุภาคซึ่งสัมพันธ์กับการชน และการเคลื่อนไหวเนื่องจากการกวัดแกว่งของอนุภาคถูกนำมาอธิบายถึงพฤติกรรมของวิภาคของแข็งผ่านทฤษฎีจลน์การไหลของของแข็ง

ความเค้นเทนเซอร์ (Stress tensor)

วิภาคแก๊ส

$$\bar{\tau}_g = \varepsilon_g \mu_g (\nabla \bar{v}_g + \nabla \bar{v}_g^T) - \varepsilon_g \left(\frac{2}{3} \mu_g \right) \nabla \cdot \bar{v}_g \bar{I} \quad (11)$$

วิภาคของแข็ง

$$\bar{\tau}_s = \varepsilon_s \mu_s (\nabla \bar{v}_s + \nabla \bar{v}_s^T) - \varepsilon_s \left(\xi_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \bar{v}_s \bar{I} \quad (12)$$

เมื่อ

ξ_s คือ ความหนืดรวม

μ_s คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้น

ความดันของอนุภาคจะประกอบด้วยสองพจน์ พจน์ที่หนึ่งเกี่ยวข้องกับ การชนกันของอนุภาคซึ่งจะมีผลสูงในบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคสูง และพจน์ที่สองจะเกี่ยวข้องกับ จลนศาสตร์ซึ่งจะมีผลสูงในบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคต่ำ

$$p_s = \varepsilon_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1 + e) \varepsilon_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (13)$$

เมื่อ

g_0 คือ ฟังก์ชันการกระจายของอนุภาคในแนวรัศมีซึ่งจะมีค่าสูง เมื่อสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมีค่าเข้าใกล้สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งขณะที่อัดตัวแน่น ($\varepsilon_{s,max} = 0.60$)

$$g_{0,ss} = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,max}} \right)^3 \right]^{-1} \quad (14)$$

e คือ Restitution Coefficient

ความหนืดเนื่องจากความเค้นจะประกอบด้วยพจน์ของจลนศาสตร์ การชน และ แรงเสียดทานซึ่งเกิดจากการ แลกเปลี่ยนโมเมนตัมของอนุภาคของแข็ง

$$\mu_s = \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s d_p g_0 (1 + e) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} \frac{10 \rho_s d_p \sqrt{\theta \pi}}{96(1+e)g_0 \varepsilon_s} \left[1 + \frac{4}{5} g_0 \varepsilon_s (1 + e) \right]^2 \quad (15)$$

เมื่อ

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง

สำหรับการบีบอัด และการขยายตัวของอนุภาคของแข็งจะใช้ความหนืดรวมของอนุภาคเป็นตัววัดความต้านทานของอนุภาค

$$\xi_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_s g_0 (1 + e) \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

$$\gamma_s = 3 \varepsilon_s^2 \rho_s g_0 \theta_s (1 - e^2) \left[\frac{4}{d_p} \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{1/2}\right] \quad (17)$$

พลังงานการกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ

$$k_s = \frac{150 d_p \rho_s \sqrt{\theta_s \pi}}{384 (1+e) g_0} \left[1 + \frac{6}{5} (1 + e) \varepsilon_s g_0\right]^2 + 2 \rho_s \varepsilon_s^2 d_p (1 + e) g_0 \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมัน

ในการจำลองการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์การศึกษาอัตราการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ ใช้ชุดสมการจากรูปแบบการแตกตัวของน้ำมันแบบ 4 lump ของ Lee และคณะ [8] โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการแตกตัวของ VGO ไปเป็นผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วยวิฏภาคของแก๊ส คือ VGO แก๊สโซลีน แก๊ส ไขมัน และ คาร์บอน และ วิฏภาคของแข็ง ประกอบไปด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ปรับปรุงมาจากงานของ Pitault และคณะ [9] และ Han และ Chung [10] ซึ่งจะถูกป้อนไปในโปรแกรม ANSYS FLUENT เพื่อให้ได้ค่า ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ โกล่เคียงกับงานวิจัยดังกล่าว สมการการแตกตัวของน้ำมัน และข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาเคมี แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมการการแตกตัวของน้ำมัน และข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาเคมี

Reaction	Pre-exponential factor (m_r^3/m_{cat}^3s) at 756 K	Activation energy (J/kmol)	Heat of reaction (kJ/kg)	Heat of formation (kJ/kmol)
1. VGO ---> gasoline	5.776×10^6	68.36×10^6	195	2.98×10^8
2. VGO ---> light gases	1.024×10^7	89.36×10^6	670	5.50×10^7
3. VGO ---> coke	2.732×10^4	64.68×10^6	745	3.75×10^6
4. Gasoline ---> light gases	0.889×10^2	52.8×10^6	512	0.0
5. Gasoline ---> coke	0.538×10^7	115.65×10^6	550	0.0

โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะถูกคำนวณด้วยสมการที่ (19) ถึง (22)

$$r_{ij} = -k_{ij} \left(\frac{C_j}{C_{j0}}\right)^n C_j \theta \varepsilon_s \quad \text{เมื่อ } i = 1-5 \quad (19)$$

$$k_{ij} = Kr_i^0 \exp\left(\frac{-E_i}{RT}\right) \quad (20)$$

$$\frac{C_j}{C_{j0}} = \frac{m_\infty y_{VGO}}{m_\infty - m_{steam}} \quad (21)$$

$$\emptyset = \frac{B_c + 1}{B_c + \exp(A_c C_{coke})} \quad (22)$$

เมื่อ

r_{ij} คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสมการเคมี i และ องค์ประกอบ j

$\frac{C_j}{C_{j0}}$ คือ ค่า Correction factor

m_∞ และ m_{steam} คือ อัตราการไหลโดยมวลของไอน้ำมันและไอน้ำ

y_{VGO} คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ VGO

k_{ij} คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

Kr_i^0 คือ Pre-exponential factor สำหรับปฏิกิริยาเคมี

E_i คือ พลังงานกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยา

\emptyset คือ Coke deposited

C_{coke} คือ Coke concentration (ร้อยละโดยมวล)

T คือ อุณหภูมิ

A_c และ B_c คือ ค่าคงที่เท่ากับ 4.29 และ 10.4 ตามลำดับ

การจำลองการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์

ในการจำลองการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ต้องทำการเขียนฟังก์ชันการคำนวณด้วยภาษาซีเพิ่มเติม และทำการเพิ่มฟังก์ชันลงใน User define function (UDF) โดยเขียนฟังก์ชันเกี่ยวกับสมการคลื่นกลแบบไซน์ เพื่อกำหนดค่าความถี่และแอมพลิจูดเพิ่มเข้าไปในโปรแกรม ANSYS FLUENT

$$V = A \sin \omega t \quad (23)$$

เมื่อ

V คือ ความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ

A คือ แอมพลิจูด

ω คือ ความเร็วเชิงมุม

สมมติฐานสำหรับการจำลอง

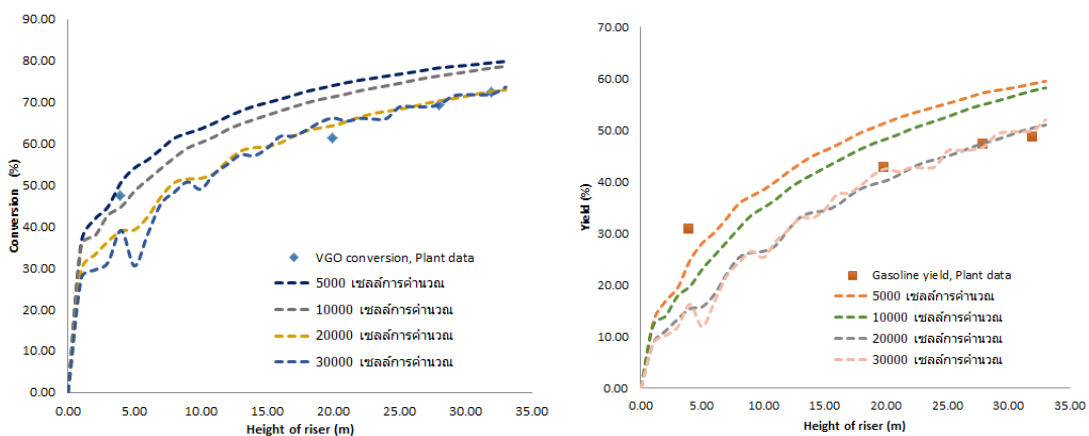
ในการสร้างแบบจำลองการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ในระบบสามมิติของกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมัน ในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบต มีสมมติฐานในการสร้างแบบจำลอง คือ

- แบบจำลองสามมิติ สำหรับปัญหาแบบไม่คงตัว (Transient)
- แก๊สในระบบประพุดิตัวเป็นแก๊สอุดมคติแบบอัดไม่ได้
- อนุภาคของแข็งมีขนาดและความหนาแน่นคงที่
- เงื่อนไขขอบเขตของผนังท่อโรเซอร์ คือ ไม่มีการสิ้นเปลืองสำหรับวัฏภาคแก๊ส และ สิ้นเปลืองบางส่วนสำหรับวัฏภาคของแข็ง

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

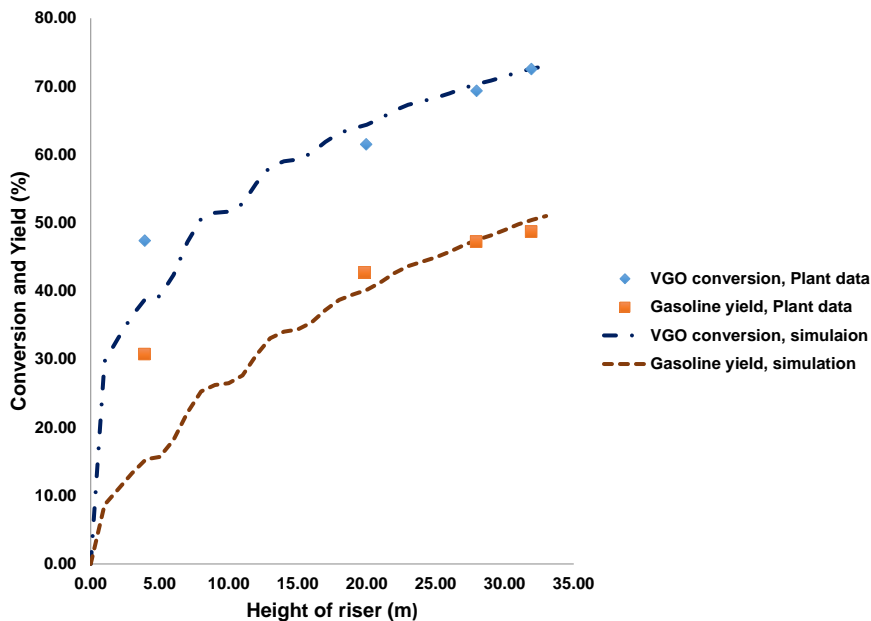
ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การหาขนาดพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Optimum grid) เป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำและใช้เวลาที่เหมาะสม ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ทำการหาเซลล์การคำนวณที่เหมาะสมสำหรับการจำลอง โดยใช้เซลล์ที่ใช้ในการจำลอง ทั้งหมด 4 ค่า คือ 5,000 10,000 20,000 และ 30,000 เซลล์ ตามลำดับ

จากรูปที่ 2 แสดงการหาเซลล์คำนวณที่เหมาะสมที่ขนาดเซลล์การคำนวณต่างๆ โดยใช้ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ความสูงต่างๆ ในท่อโรเซอร์ จากผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า ที่เซลล์คำนวณ 5,000 และ 10,000 เซลล์ ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างเมื่อเทียบกับเซลล์คำนวณ 20,000 และ 30,000 เซลล์ ดังนั้น เซลล์การคำนวณ 5,000 และ 10,000 เซลล์ ยังไม่เหมาะสมสำหรับการจำลองนี้ เนื่องจากเซลล์การคำนวณยังมีความละเอียดไม่เพียงพอ ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีความไม่ถูกต้องหรือ มีความแม่นยำต่ำ และเมื่อเพิ่มขนาดเซลล์คำนวณ 20,000 เซลล์ พบว่า ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์มีค่าใกล้เคียงกับขนาดเซลล์ 30,000 เซลล์ ดังนั้น ขนาดเซลล์คำนวณที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองคือ 20,000 เซลล์ เนื่องจากขนาดเซลล์ 20,000 เซลล์ ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่า และ ผลที่ได้ใกล้เคียงกับขนาดเซลล์ 30,000 เซลล์ โดยเซลล์คำนวณ 30,000 เซลล์ ใช้เวลาในการคำนวณ 216 ชั่วโมง ขณะที่ถ้าเซลล์คำนวณ 20,000 เซลล์ ใช้เวลาในการคำนวณ 168 ชั่วโมง



รูปที่ 2 เปรียบเทียบเซลล์การคำนวณขนาดต่างๆ ของร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ และ ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์

เมื่อนำผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Shah และ Utikar [6] ที่สภาวะในการดำเนินงานด้วยความเร็วแก๊สป้อนเข้าเท่ากับ 9.39 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิป้อนเข้า เท่ากับ 756 องศาเซลวิน ฟลักซ์โดยมวลของแข็ง เท่ากับ 470 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที และ ความดัน เท่ากับ 1 บรรยากาศ ดังรูปที่ 3 พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ให้ผลใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงว่า แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถทำนายอุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ



รูปที่ 3 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์กับงานวิจัยที่ผ่านมา

ผลิตภัณฑ์หลักที่สนใจในงานวิจัยนี้ คือ แก๊สโซลีน ซึ่งเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีมูลค่าทางการตลาดและมีความต้องการสูง ข้อมูลที่ได้จากการจำลองของโปรแกรม ANSYS FLUENT ได้มาในรูปแบบของความเข้มข้นของสารเคมีที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีในหน่วยของโมลลาร์ (M) คือ โมลต่อลิตร จึงต้องนำมาคำนวณร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ จากสมการดังต่อไปนี้

การคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้น (ไอน้ำมัน) เป็นผลิตภัณฑ์ (%Conversion)

$$\%Conversion = \frac{Reactant\ in\ \frac{(mol)}{L} - Reactant\ out\ \frac{(mol)}{L}}{Reactant\ in\ \frac{(mol)}{L}} \times 100 \quad (24)$$

เมื่อ

%Conversion คือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์

Reactant in คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นขาเข้า (โมลต่อลิตร)

Reactant out คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นขาออก (โมลต่อลิตร)

การคำนวณค่าร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)

$$\%Selectivity = \frac{Product\ A\ \frac{(mol)}{L}}{Total\ product\ \frac{(mol)}{L}} \times 100 \quad (25)$$

เมื่อ

%Selectivity A คือ ค่าร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ A (แก๊สโซลีน)

Product A คือ ผลิตภัณฑ์ A ที่เกิดขึ้น (โมลต่อลิตร)

Total product คือ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด (โมลต่อลิตร)

การคำนวณค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ (%Yield)

$$\%Yield\ A = \frac{\%Conversion \times \%Selectivity\ A}{100} \quad (26)$$

เมื่อ

%Yield A คือ ค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ A (แก๊สโซลีน)

หลังจากได้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่สามารถทำนายผลได้อย่างแม่นยำ สิ่งที่ต้องพิจารณาลำดับต่อไป คือ ค่าตัวแปรดำเนินการที่เหมาะสมในการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ ซึ่งในงานวิจัยจะทำการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการทั้งหมด 2 ชนิด คือ ความถี่และแอมพลิจูด ที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของการแตกตัวของไอน้ำมันและการเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าทางการตลาด คือ แก๊สโซลีน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้การออกแบบการทดลองวิธี 2^k แฟคทอเรียลแบบมีค่ากลาง เพื่อให้ได้การทดลองที่ครอบคลุมกับตัวแปรดำเนินการที่ต้องการศึกษามากที่สุด โดยกรณีศึกษาและตัวแปรดำเนินการต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3 แบ่งเป็นกรณีศึกษาที่ 1 2 3 และ 4 ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ พบว่า กรณีศึกษาที่ 3 มีค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์สูงสุด ซึ่งให้ค่าสูงกว่าการดำเนินการแบบการไหลป้อนเข้าแบบปกติ แต่จากตารางที่ 3 ยังไม่เพียงพอต่อการสรุปว่าตัวแปรดำเนินการใดบ้างที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์มากกว่ากัน จึงต้องนำผลของตัวแปรดำเนินการที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่อไป

ตารางที่ 3 ผลของตัวแปรดำเนินการต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์

กรณีศึกษา	ตัวแปรดำเนินการ		ร้อยละการเปลี่ยน	ร้อยละการเกิด
	แอมพลิจูด	ความถี่	สารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ (%Yield)	ผลิตภัณฑ์ (%Conversion)
1	7	0.3	53.1678	74.6068
2	8	0.3	52.5383	73.9125
3	7	0.5	53.2786	74.6884
4	8	0.5	52.7264	74.0611

ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ พบว่า แอมพลิจูดเป็นตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า p-value ที่แสดงในตารางนั้นมีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งตามทฤษฎีของการออกแบบการทดลองที่กำหนดค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตัวแปรใดที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ตัวแปรนั้นจะส่งผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง และ ตารางที่ 5 แสดงผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ พบว่า แอมพลิจูดเป็นตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า p-value ที่แสดงในตารางนั้นมีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งตามทฤษฎีของการออกแบบการทดลองที่กำหนดค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตัวแปรใดที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ตัวแปรนั้นจะส่งผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง นั้นหมายความว่า ความถี่ และ อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อตัวแปรตอบสนอง

อย่างไรก็ตาม ตารางที่ 4 และ ตารางที่ 5 จะสามารถบอกได้เพียงว่าตัวแปรดำเนินการตัวใดมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองเท่านั้น โดยไม่สามารถบอกได้ว่าตัวแปรดำเนินการส่งผลในเชิงบวกหรือเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งต้องนำค่าที่ได้ในแต่ละกรณีศึกษามาสร้างกราฟผลของตัวแปรดำเนินการต่อไป

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์

Source	Sum of squares	DF	Mean square	F Value	Prob > F
Amplitude	0.4367	1	0.4367	60.7246	0.0161
Residual	0.0144	2	0.0072		
Cor Total	0.4511	3			

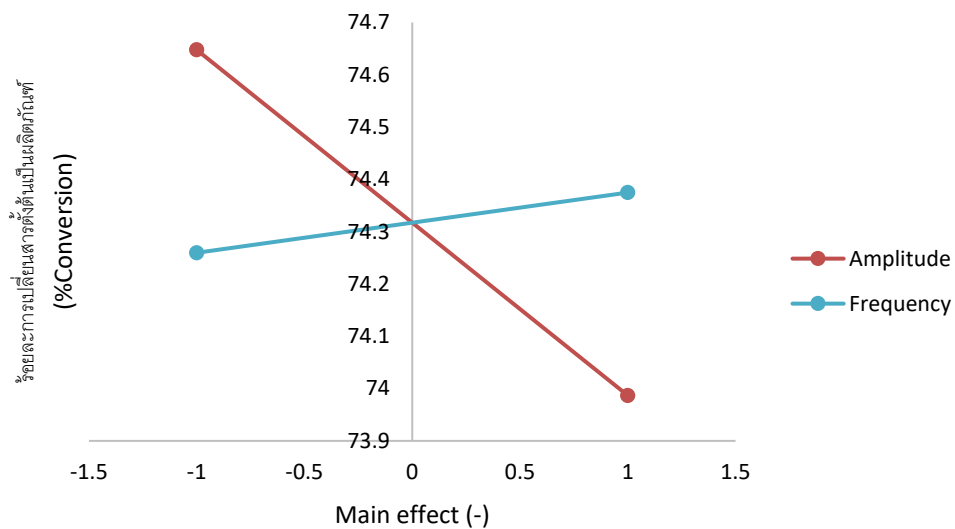
ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์

Source	Sum of squares	DF	Mean square	F Value	Prob > F
Amplitude	0.3491	1	0.3491	29.3006	0.0325
Residual	0.0238	2	0.0119		
Cor Total	0.3729	3			

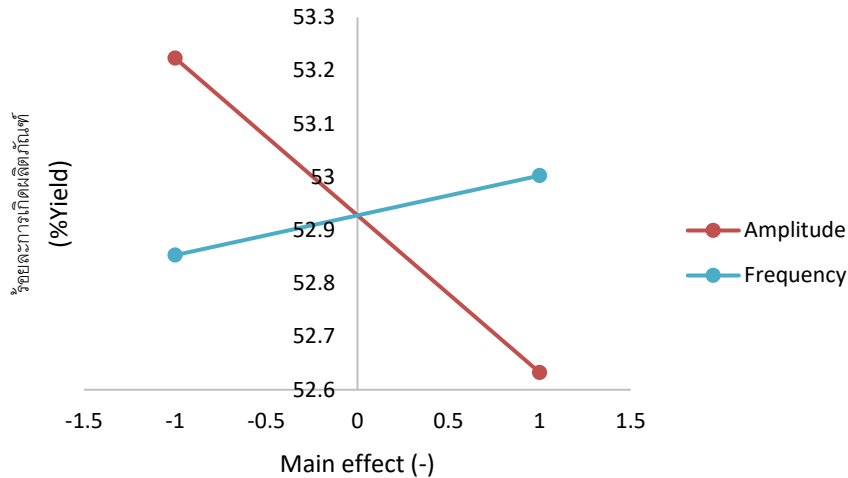
จากรูปที่ 4 แสดงผลของตัวแปรดำเนินการ แอมพลิจูดและความถี่ ต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ โดยแกนนอน เลข 1 แสดงถึงค่าของตัวแปรดำเนินการค่าสูง เลข -1 แสดงถึงตัวแปรดำเนินการค่าต่ำ และ เลข 0 แสดงถึงค่ากลางของตัวแปรดำเนินการ จากรูปที่ 4 แสดงผลของค่าตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาค่าของตัวแปร พบว่า ความชันของตัวแปรแอมพลิจูดมีค่า

สูงกว่าตัวแปรความถี่ แสดงว่า แอมพลิจูดเป็นตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ และมีผลต่อค่าตอบสนองเชิงลบ หมายความว่า เมื่อเพิ่มแอมพลิจูดค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์จะลดลง อันเป็นผลเนื่องมาจากการป้อนเข้าแบบพัลส์ที่แอมพลิจูดสูง เป็นการลดระยะเวลาการสัมผัสกันระหว่างไอน้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาในท่อไรเซอร์ ของแข็งและแก๊สจะออกจากท่อไรเซอร์ได้เร็วขึ้น ส่งผลให้เวลาในการผสมกันระหว่างแก๊สและของแข็งในท่อไรเซอร์ลดลง

จากรูปที่ 5 แสดงผลของตัวแปรดำเนินการ แอมพลิจูดและความถี่ ต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ โดยแกนนอน เลข 1 แสดงถึงค่าของตัวแปรดำเนินการค่าสูง เลข -1 แสดงถึงตัวแปรดำเนินการค่าต่ำ และ เลข 0 แสดงถึงค่ากลางของตัวแปรดำเนินการ จากรูปที่ 5 แสดงผลของค่าตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาผลของตัวแปร พบว่า ความชันของตัวแปรแอมพลิจูดมีค่าสูงกว่าตัวแปรความถี่ แสดงว่าแอมพลิจูดเป็นตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ และมีผลต่อค่าตอบสนองเชิงลบ หมายความว่า เมื่อเพิ่มแอมพลิจูดค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์จะลดลง อันเป็นผลเดียวกับข้างต้นเนื่องมาจากการป้อนเข้าแบบพัลส์ที่แอมพลิจูดสูง เป็นการลดระยะเวลาการสัมผัสกันระหว่างไอน้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาในท่อไรเซอร์ ของแข็งและแก๊สจะออกจากท่อไรเซอร์ได้เร็วขึ้น ส่งผลให้เวลาในการผสมกันระหว่างแก๊สและของแข็งในท่อไรเซอร์ลดลง โดยผลจากรูปที่ 4 และ 5 ที่ได้สอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 ผลของค่าตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์



รูปที่ 5 ผลของค่าตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาผลของความถี่และแอมพลิจูดของการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีในโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน จากการจำลองการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์โดยใช้ตัวแปรดำเนินการ 2 ตัวแปร คือ แอมพลิจูดและความถี่ แบ่งเป็นกรณีศึกษาทั้งหมด 4 กรณี พบว่า กรณีศึกษาที่ 3 ที่ใช้ค่าแอมพลิจูด เท่ากับ 7 และความถี่ เท่ากับ 0.5 ให้ผลร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน และผลของตัวแปรหลัก คือ แอมพลิจูด มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าแอมพลิจูดในการป้อนเข้าแบบพัลส์ให้ผลเชิงลบ ส่วนผลความถี่ และ อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อตัวแปรตอบสนอง ผลของการจำลองในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ออกแบบและดำเนินการกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาในโรงกลั่นน้ำมัน เพื่อเพิ่มศักยภาพของเครื่องปฏิกรณ์ให้สูงขึ้น และ จะนำไปสู่การเพิ่มมูลค่าทางการตลาดให้แก่ผลิตภัณฑ์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทุนวิจัย จาก สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้ง คณาจารย์ นิสิตระดับดุษฎีบัณฑิต ที่คอยช่วยเหลือรวมทั้งให้คำแนะนำในการทำวิจัยชิ้นนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Devahastin, S., & Mujumdar, A. S. (2001). Some hydrodynamic and mixing characteristics of a pulsed spouted bed dryer. *Powder Technology*, 117, 189–197.

- [2] Akhavan, A., van Ommen, J. R., Nijenhuis, J., Wang, X. S., Coppens, M.-O., & Rhodes, M. J. (2008). Improved drying in a pulsation-assisted fluidized bed. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48, 302–309.
- [3] Bizhaem, H. K., & Tabrizi, H. B. (2013). Experimental study on hydrodynamic characteristics of gas–solid pulsed fluidized bed. *Powder Technology*, 237, 14–23.
- [4] Bizhaem, H. K., Tabrizi, H. B. (2017). Investigating effect of pulsed flow on hydrodynamics of gas-solid fluidized bed using two-fluid model simulation and experiment. *Powder Technology*, 311, 328–340.
- [5] Jia, D., Cathary, O., Peng, J., Bi, X., Lim, C., Sokhansanj, S., Liu, Y., Wang, R., Tsutsumi, A. (2015). Fluidization and drying of biomass particles in a vibrating fluidized bed with pulsed gas flow, *Fuel Processing Technology*, 138 471–482.
- [6] Shah, M. T., Utikar, R. P. (2017). CFD study: Effect of pulsating flow on gas–solid hydrodynamics in FCC riser, *Particuology*, 31, 25–34.
- [7] Nayak, S. V., Joshi, S. L., & Ranade, V. V. (2005). Modeling of vaporization and cracking of liquid oil injected in a gas–solid riser. *Chemical Engineering Science*, 60, 6049–6066.
- [8] Lee, L. S., Chen, Y. W., Huang, T. N., & Pan, W. Y. (1989). Four-lump kinetic model for fluid catalytic cracking process. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 67, 615–619.
- [9] Pitault, I., Forissier, M., & Bernard, J.-R. (1995). Détermination de constantes cinétiques du craquage catalytique par la modélisation du test de microactivité (MAT). *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 73, 498–504.
- [10] Han, I.-S., & Chung, C.-B. (2001b). Dynamic modeling and simulation of a fluidized catalytic cracking process. Part II: Property estimation and simulation. *Chemical Engineering Science*, 56, 1973–1990.