

การจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบด  
แบบติดตั้งแผ่นปะทะ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CFD SIMULATION OF SORPTION-ENHANCED STEAM METHANE REFORMING IN  
BAFFLED FLUIDIZED BED REACTOR



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science

Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

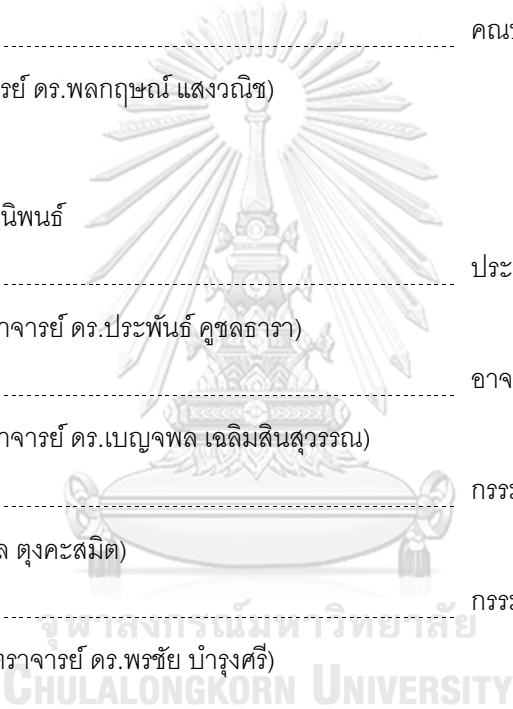
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มการดูดซับใน เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ
โดย	น.ส.วทันยา ไยคำ
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชดารา)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)	
.....	กรรมการ
(ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย บำรุงศรี)	



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วทันยา ไยดำ : การจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์  
 ฟลูอิดไรส์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ. ( CFD SIMULATION OF SORPTION-ENHANCED STEAM  
 METHANE REFORMING IN BAFFLED FLUIDIZED BED REACTOR) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ.  
 ดร.เบญจพล เกลิมสินสุวรรณ

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในโรงงานปิโตรเคมีเป็นอย่างยิ่งและเป็น  
 กระบวนการผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สธรรมชาติ โดยมีเทนจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำร่วมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล  
 เกิดเป็นไฮโดรเจน ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ผ่านการกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่มาจากน้ำมันดิบ เพื่อนำมาใช้  
 เป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารเคมี นอกจากนี้ไฮโดรเจนยังถูกจัดอยู่ในพลังงานทางเลือกที่กำลัง  
 ได้รับความสนใจในปัจจุบัน จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและปรับปรุงปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ  
 ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเพิ่มขึ้น การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองหน้าที่ที่  
 สามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเป็นตัวดูดซับในเวลาเดียวกัน สมดุลปฏิกิริยาจะเปลี่ยนไปในทิศทางที่เกิด  
 ไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ ได้แก่ โดโลไมต์ และ แคลเซียมอะลูมินेट โดยเรียกปฏิกิริยานี้ว่า  
 ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ งานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิง  
 คำนวณของการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรส์เบดแบบติดตั้งแผ่น  
 ปะทะ เพื่อช่วยลดการเกิดฟองแก๊ส เพิ่มการสัมผัสระหว่างแก๊สและของแข็ง ลดการย้อนกลับของของแข็ง และ  
 เพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ พิจารณาผลของการเพิ่มจำนวนของแผ่นปะทะและศึกษาตัวแปร  
 ดำเนินการต่างๆ พบว่า การติดตั้งแผ่นปะทะจำนวนสองแผ่น ส่งผลให้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้น  
 เป็น 0.93 และ ตัวแปรดำเนินการที่เหมาะสมได้แก่ ความเร็วที่ 0.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิที่ 923 เคลวิน  
 ความสูงของเบดที่ 35 เมตร และ สัดส่วนของไอน้ำและคาร์บอนที่ 4.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิ ลายมือชื่อนิสิต .....

เมอร์

ปีการศึกษา 2562 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5972404023 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: SE-SMR, CFD, Hydrogen, Bubbling fluidized bed reactor, Computational fluid dynamics

Watanya Yaidam : CFD SIMULATION OF SORPTION-ENHANCED STEAM METHANE REFORMING IN BAFFLED FLUIDIZED BED REACTOR. Advisor: Assoc. Prof. Benjapon Chalerm-sinsuwan, Ph.D.

Steam methane reforming (SMR) is an important reaction in petrochemical industries and in the production process of hydrogen from natural gas. Methane reacts with steam and nickel catalysts and converts to hydrogen for quality improvement by eliminating various contaminants in crude oil. Moreover, hydrogen is a precursor for chemical synthesis and is an alternative energy that is currently interesting. From previous research studies, the SMR process was improved to increase the desired product. Adsorption of carbon dioxide by a bifunctional catalyst can act as a catalyst and a sorbent at the same time. Equilibrium of the chemical reaction is shifted to the increase of the hydrogen product. The most popular catalysts are dolomite and calcium aluminate. This reaction is called sorption-enhanced steam methane reforming (SE-SMR). This study investigated the computational fluid dynamics simulation of SE-SMR in a baffled fluidized bed reactor to reduce gas bubbles, to reduce the back mixing of particles, to increase the contact area between gas and solids and to increase the efficiency of the reaction. From the effect of the number of plates, it found the optimized number of baffled plates is 2 which gave the mole fraction of hydrogen product of 0.93. The optimized operating parameters were velocity at 0.1 m/s, temperature at 923 K, height of the bed at 35 m and the steam and carbon ratio at 4.0.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science  
Student's Signature .....

Academic Year: 2019  
Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำจาก รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ตรวจสอบ และแก้ไขร่างวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา ที่กรุณาให้เกียรติเป็นประธาน โดยมี อาจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย บำรุงศรี เป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงนิสิตระดับดุษฎีบัณฑิตที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ เมื่อผู้เขียนได้สอบถามหรือร้องขอความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ธุรการ ของหลักสูตรปริญญาโทและวิทยาศาสตรบัณฑิตและเจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษาของคณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความสะดวกด้านอำนวยความสะดวก และประสานงาน ในการทำวิทยานิพนธ์ให้ผู้เขียนตลอดมาตลอดจนค้นคว้าหาข้อมูลในการจัดทำวิทยานิพนธ์ของผู้เขียนครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ทำยนี้ผู้เขียนขอโน้มรำลึกถึงอำนาจบารมีของคุณพระศรีรัตนตรัย และสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายที่อยู่ในสากลโลก อันเป็นที่พึ่งให้ผู้เขียนมีสติปัญญาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้เขียนขอให้เป็นกตเวทิตาแต่บิดา มารดา ครอบครัวของผู้เขียน ตลอดจนผู้เขียนหนังสือ และบทความต่าง ๆ ที่ให้ความรู้แก่ผู้เขียนจนสามารถให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

วทันยา ไยดำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# สารบัญ

	หน้า
.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ค
..... ง	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญรูปภาพ .....	1
สารบัญตาราง.....	5
บทที่ 1 บทนำ.....	6
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	6
1.2 วัตถุประสงค์.....	8
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	8
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย .....	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	10
1.7 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัย .....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	12
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	12
2.1.1 กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ (Steam methane reforming, SMR).....	12
2.1.2 กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ (Sorption enhanced steam methane reforming, SE-SMR) .....	14

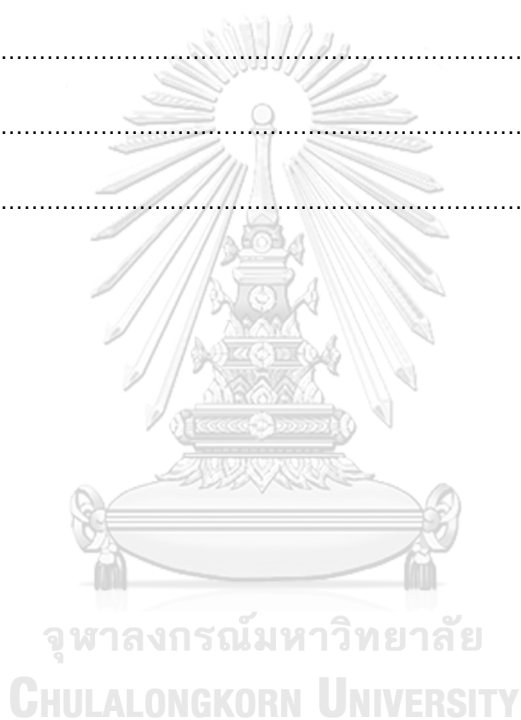
2.1.3	กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง.....	17
2.1.3	กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน .....	17
2.1.5	ข้อดีและข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิโดซ์เบด .....	18
2.1.6	กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ.....	20
2.1.7	ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ (SMR) และกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ (SE-SMR) .....	21
2.1.7.1	แคลเซียมออกไซด์.....	21
2.1.7.2	ลิเทียมออกไซด์.....	21
2.1.7.3	โคโลไมต์.....	21
2.1.7.4	ผงซีเถ้า .....	22
2.1.8	ประเภทของฟลูอิโดเซชัน .....	23
2.1.9	รูปแบบการไหลของฟลูอิโดเซชัน .....	25
2.1.10	การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็ง.....	26
2.1.11	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) .....	29
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	33
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย .....	36
3.1	แบบจำลองการไหลเชิงคำนวณ.....	36
3.2	การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม GAMBIT .....	37
3.2.1	การสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบสองมิติ .....	37
3.2.2	การสร้างหรือติดตั้งแผ่นปะทะในเครื่องปฏิกรณ์แบบสองมิติ .....	37
3.3	สมการอนุพันธ์.....	39



3.3.1	สมการอนุรักษ์มวล.....	39
3.3.2	สมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....	39
3.3.3	สมการอนุรักษ์พลังงาน.....	41
3.3.4	สมการความสมดุลของมวลสารทางเคมี.....	41
3.4	สมการเสริม.....	42
3.4.1	ค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างภูมิภาคของแข็งและภูมิภาคแก๊ส.....	42
3.4.2	ค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างภูมิภาคของแข็งและภูมิภาคแก๊ส.....	43
3.4.3	สมการอุณหภูมิแกรนูลาร์.....	44
3.4.4	ความเค้นเทนเซอร์ของภูมิภาคของแข็ง.....	45
3.4.5	สมการฟังก์ชันการกระจายของอนุภาคในแนวรัศมี.....	45
3.4.6	พลังงานกระจายการชน.....	45
3.4.7	สมการความดันของภูมิภาคของแข็ง.....	45
3.4.8	สมการความหนืดเฉือนของภูมิภาคของแข็ง.....	46
3.4.9	สมการความหนืดรวมของภูมิภาคของแข็ง.....	46
3.5	อัตราการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ.....	47
3.6	อัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนั่น, CBN.....	49
3.7	การเขียนคำสั่งจากจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ.....	50
3.8	การจำลองของไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT.....	51
3.9	ขั้นตอนการทดลอง.....	52
3.9.1	การจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่อง ปฏิกรณ์แบบฟลูอิด์เบด.....	52
3.9.2	การจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่อง ปฏิกรณ์แบบฟลูอิด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ.....	55
บทที่ 4	ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล.....	57

4.1 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ .....	58
4.1.1 การหาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด .....	58
4.1.2 การแสดงผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาอาร์พอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำแบบไม่มีการติดตั้งแผ่นปะทะ .....	59
4.1.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลของสัดส่วนโดยโมลของมีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ระหว่างผลจากต้นแบบ [2] และผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ .....	60
4.2 ผลการทดลองตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่อการจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด .....	61
4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาอาร์พอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด .....	62
4.2.2 ผลของความเร็วต่อการเกิดปฏิกิริยาอาร์พอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด .....	63
4.2.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนต่อการเกิดปฏิกิริยาอาร์พอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด .....	64
4.2.4 ผลของความสูงของเบดต่อการเกิดปฏิกิริยาอาร์พอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด .....	66
4.3 ผลการจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ .....	67
4.3.1 ผลของการติดตั้งแผ่นปะทะต่อการเกิดปฏิกิริยาอาร์พอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด .....	67
4.3.2 การเปรียบเทียบตัวดำเนินการต่างๆ ที่มีการติดตั้งแผ่นปะทะในเครื่องปฏิกรณ์.....	72
4.3.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาอาร์พอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ .....	73
4.3.2.2 ผลของความเร็วต่อการเกิดปฏิกิริยาอาร์พอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ .....	74

4.3.2.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนต่อการเกิดปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิ่ง มีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบ ติดตั้งแผ่นปะทะ .....	77
4.3.2.4 ผลของความสูงของเบดต่อการเกิดปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่ เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ....	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	82
5.1 สรุปผลงานวิจัย .....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	84
บรรณานุกรม .....	85
ประวัติผู้เขียน.....	90



## สารบัญรูปร่าง

รูปที่ 2. 1 กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ [6].....	12
รูปที่ 2. 2 แผนผังกระบวนการผลิตในโรงงานกลั่นน้ำมัน [7] .....	13
รูปที่ 2. 3 แบบจำลองตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ ด้วยการดูดซับ [8].....	15
รูปที่ 2. 4 ปฏิกิริยาของกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ [9] .....	15
รูปที่ 2. 5 สัดส่วนโดยโมลของ ไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ของ SMR และ SE-SMR ที่เวลา 60 วินาที และอุณหภูมิ 625 องศาเซลเซียส [2] .....	16
รูปที่ 2. 6 สัดส่วนโดยโมลของ ไฮโดรเจน สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบมีตัวดูดซับ และปราศจากตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ พิจารณาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [2] .....	16
รูปที่ 2. 7 การทำงานของตัวดูดซับแบบต่อเนื่องและแบบหมุนเวียนด้วยตัวเอง [10] .....	17
รูปที่ 2. 8 ประเภทของฟลูอิดไอเซชันแบบสองวัฏภาค (a) ฟลูอิดไอเซชันแบบของเหลว-ของแข็ง และ (b) ฟลูอิดไอเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง [13].....	24
รูปที่ 2. 9 รูปแบบการไหลของฟลูอิดไอเซชัน [14] .....	26
รูปที่ 2. 10 การแบ่งประเภทของอนุภาคของแข็งแบบ Geldart [16] .....	28
รูปที่ 2. 11 การใช้ซีเอฟดีทำนายทิศทางและลักษณะการกระจายตัวของควันที่เกิดจากการเผา น้ำมันในกรงแบกแดดช่วงสงครามอิรัก (ซ้าย) ภาพถ่ายทางอากาศแสดงการกระจายของควัน (ขวา) พฤติกรรมที่จำลองได้ด้วยซีเอฟดี ซึ่งช่วยให้การจัดการด้านมลภาวะเป็นไปอย่างมีแบบแผน เช่น การวางแผนอพยพผู้คน การควบคุมการแพร่กระจาย เป็นต้น [17].....	30
รูปที่ 2. 12 การจำลองการไหลของอากาศผ่านสไปรอลเลอร์ของรถยนต์สูตรหนึ่ง นำไปสู่การปรับปรุง รูปทรงของสไปรอลเลอร์ให้มีความเหมาะสม (ขวา) และ พฤติกรรมที่จำลองได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ซีเอฟ ดี STAR CCM+ ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับการทดสอบจริง (ซ้าย) [17].....	30
รูปที่ 2. 13 การใช้ซีเอฟดีช่วยในด้านการเกษตรกรรม เพื่อทำนายการกระจายอุณหภูมิของอากาศ ภายในและรอบโรงเรือนเพาะปลูก ช่วยออกแบบรูปทรงโรงเรือนเพื่อให้การระบายอากาศและ ควบคุมอุณหภูมิเหมาะสมต่อการเพาะปลูก (ซ้าย) และผลจำลองการไหลของอากาศโดยใช้ซีเอฟดี ของโรงเรือนเพาะปลูกพีช (ขวา) [17].....	31

รูปที่ 2. 14 การใช้ด้านวิศวกรรมโยธาได้นำซีเอฟดีไปช่วยในการทำนายผลกระทบของลมที่เกิดขึ้นเมื่อไหลผ่านตึกสูง เพื่อให้ประกอบการออกแบบรูปทรงและโครงสร้างในการสร้างตึกสูง (ซ้าย) และภาพถ่าย (ขวา) ผลจำลองการไหลผ่านตัวอาคารขนาดใหญ่ [17] .....	31
รูปที่ 2. 15 การใช้ด้านกลศาสตร์ชีวภาพได้นำวิธีซีเอฟดีไปช่วยทำนายระบบภายในร่างกาย เช่น การกระจายของอากาศที่ไหลผ่านเข้าสู่ปอด ความเค้นบนผนังเส้นเลือดหัวใจ เพื่อให้แพทย์ได้เข้าใจกระบวนการที่เกิดขึ้น เป็นข้อมูลนำไปสู่การวางแผนการรักษาและการเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมปลอดภัย (ซ้าย) จำลองการแพร่กระจายของอนุภาคอากาศในท่อลมปอด และ (ขวา) การนำซีเอฟดีไปจำลองการไหลของน้ำผ่านลำตัวนักว่ายน้ำ (ANSYS FLUENT) ผลวิเคราะห์นำไปสู่การออกแบบท่าทางการว่ายน้ำที่เหมาะสมที่ช่วยลดแรงต้านที่จะเกิดขึ้น รวมถึงการออกแบบชุดและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการแข่งขัน [17] .....	32
รูปที่ 3. 1 ลำดับขั้นตอนของการทดลองการจำลองซีเอฟดีด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT [18]	36
รูปที่ 3. 2 (a.) ภาพแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด (b.1-4) ภาพแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ .....	38
รูปที่ 4. 1 การเปรียบเทียบระหว่างขนาดของเซลล์ที่จำนวนต่างๆ และสัดส่วนโดยโมลของมีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน .....	58
รูปที่ 4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมลของไฮโดรเจนและเวลาของ Time step ที่สภาวะอุณหภูมิ 923 เคลวิน ความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที อัตราส่วนของไอน้ำ และคาร์บอนที่ 4.0 และความสูงของเบดที่ 30 เซนติเมตร .....	59
รูปที่ 4. 3 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ระหว่างผลจากต้นแบบ [2] และผลจากงานวิจัยนี้ .....	60
รูปที่ 4. 4 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 823 ถึง 1023 เคลวิน .....	62
รูปที่ 4. 5 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่ความเร็วตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 เมตรต่อวินาที .....	63

รูปที่ 4. 6 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่ สัดส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนตั้งแต่ 1.5 ถึง 4.0.....	64
รูปที่ 4. 7 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่ ความสูงของเบดตั้งแต่ 15 ถึง 35 เซนติเมตร .....	66
รูปที่ 4. 8 สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนและจำนวนของแผ่นปะทะที่ถูกติดตั้งในเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดไชน์เบด ที่อุณหภูมิ 923 K ที่ความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่ 4.0 และความสูงของเบด 30 เซนติเมตร.....	67
รูปที่ 4. 9 ความดันลดในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด ที่อุณหภูมิ 923 K ที่ความเร็ว 0.2 เมตรต่อ วินาที อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่ 4.0 และความสูงของเบด 30 เซนติเมตร .....	68
รูปที่ 4. 10 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา (a.) ไม่มีการติดตั้งแผ่นปะทะ (b.) ติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 1 แผ่น (c.) ติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น (d.) ติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 3 แผ่น และ (e.) ติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 4 แผ่น.....	72
รูปที่ 4. 11 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่ อุณหภูมิตั้งแต่ 823 ถึง 1023 เคลวิน และแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น .....	73
รูปที่ 4. 12 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่ ความเร็วตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.3 เมตรต่อวินาที และแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น .....	74
รูปที่ 4. 13 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความเร็ว 0.1-0.3 เมตรต่อวินาที ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด แบบมีการติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น เวลา 30 วินาที .....	76
รูปที่ 4. 14 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่ อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอน ตั้งแต่ 1.5 ถึง 4.0 และแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น .....	77
รูปที่ 4. 15 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ภาวะอัตราส่วนของไอน้ำต่อ คาร์บอน ตั้งแต่ 1.5-4.0 ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบมีการติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น .....	78
รูปที่ 4. 16 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวดูดซับ ที่ภาวะอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอน ตั้งแต่ 1.5-4.0 ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบมีการติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น .....	79

รูปที่ 4. 17 คอนทัวร์สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่ความสูงของเบด ตั้งแต่ 15 ถึง 35 เซนติเมตร ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบมีการติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น ..... 80

รูปที่ 4. 18 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ภาวะความสูงของเบดตั้งแต่ 15 – 35 เซนติเมตร ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบมีการติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น..... 81



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2. 1 การเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ .....	18
ตารางที่ 2. 2 ผลการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้ศึกษากระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในภาวะดำเนินการต่างๆ [12].....	22
ตารางที่ 2. 3 การเปรียบเทียบประเภทของอนุภาคของแข็งแต่ละชนิด [15].....	27
ตารางที่ 3. 1 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด.....	38
ตารางที่ 3. 2 ตัวแปรดำเนินการต่างๆที่ใช้ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ [2] .....	51
ตารางที่ 3. 3 ตัวแปรของการจำลองซีเอฟดี [2].....	52
ตารางที่ 3. 4 ตัวแปรดำเนินการที่ต้องการทดสอบในแบบจำลอง [2].....	53
ตารางที่ 3. 5 การจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด .....	54
ตารางที่ 3. 6 การจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ.....	56



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มในการใช้พลังงานจากปิโตรเลียมเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามความต้องการของมนุษย์ และนับวันราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกมีความผันผวนค่อนข้างสูง เนื่องจากสถานการณ์เศรษฐกิจโลกที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้จะมีการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมในภาคอุตสาหกรรมแล้วนั้น เชื้อเพลิงจากปิโตรเคมียังถูกนำไปใช้ในชีวิตประจำวันภายในครัวเรือนด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมองหาแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ภายในประเทศให้มากขึ้น ซึ่งหนึ่งในนั้นคือพลังงานไฮโดรเจน เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบตามธรรมชาติหลากหลายประเภท อาทิ วัสดุชีวมวล แก๊สชีวภาพ แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน อ้างอิงจากรายงานเศรษฐกิจของไฮโดรเจนของปี 2004 พบว่า การผลิตไฮโดรเจนอยู่ที่ประมาณ 50 ล้านตัน โดยการใช้วัตถุดิบจากปิโตรเลียมสูงถึง 170 ล้านตัน ทั้งนี้อัตราการเติบโตของการผลิตแก๊สไฮโดรเจนอยู่ที่ร้อยละ 10 ต่อปี [1] ส่งผลให้แก๊สไฮโดรเจนเป็นพลังงานทางเลือกอีกชนิดหนึ่งที่นักวิจัยทั่วโลกได้ให้ความสำคัญและความสนใจในการศึกษาและพัฒนา นอกจากนี้แก๊สไฮโดรเจนซึ่งถือได้ว่าเป็นพลังงานเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูง สะอาด และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงได้รับความสนใจและยอมรับว่าเป็นแหล่งของพลังงานเชื้อเพลิงที่สำคัญอย่างมากในอนาคต ประโยชน์ของแก๊สไฮโดรเจนถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงของรถไฟฟ้ และในปัจจุบันกระบวนการเปลี่ยนรูปสารไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำ เป็นกระบวนการที่นิยมที่สุดสำหรับการผลิตพลังงานไฮโดรเจน โดยกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก และมีการใช้งานมากถึงร้อยละ 40 ทั่วโลก ได้แก่ กระบวนการปฏิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยน้ำ ( steam methane reforming, SMR ) แต่ปัญหาหลักที่สำคัญมากของกระบวนการนี้คือ การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อนหรือปรากฏการณ์เรือนกระจก โดยการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลจะก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึงร้อยละ 75 ในบรรยากาศ [1] รวมทั้งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเดินไปข้างหน้าเพื่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการน้อยลง ดังนั้น จึงมีงานวิจัยพยายามปรับปรุงปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลผลิตของ

แก๊สไฮโดรเจนที่เพิ่มมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา ปรับปรุงตัวแปรดำเนินการต่างๆ และรูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์ แต่ก็ต้องเจอกับปัญหาของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ในโรงงานไฮโดรเจนมีต้นทุนค่อนข้างสูง [2] อาจจะไม่เหมาะสมหากจะทำการใดๆที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปฏิกรณ์ในกระบวนการผลิต และจะต้องมีผลข้อมูลยืนยันที่แน่ชัด

การพัฒนาปฏิริยารีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับเป็นทางเลือกใหม่ที่ได้รับ ความสนใจในปัจจุบัน เพื่อช่วยเพิ่มผลิตผลแก๊สไฮโดรเจน โดยการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สมดุลปฏิริยารีฟอร์มมิ่งมีเทนดำเนินไปในทิศทางเกิดผลิตภัณฑ์สูงขึ้น นอกจากนี้ตัวดูดซับถูกออกแบบและพัฒนาให้สามารถทำหน้าที่ได้สองหน้าที่ คือ ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งมีเทนและทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับในงานวิจัยที่ผ่านมา มีความนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วย นิกเกิลในแคลเซียมอะลูมินา ( [3], [4] ) นอกจากชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว ปริมาณของโลหะนิกเกิลก็ส่งผลต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการด้วย เช่นเดียวกัน [4] พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของโลหะนิกเกิลที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 10 ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนที่เพิ่มสูงขึ้นในสภาวะเดียวกัน และในส่วนของตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์และโดโลไมต์ [5] นอกจากนี้ ในปัจจุบัน มีการศึกษาปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ และ ศึกษาชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรเซด [5] และเครื่องปฏิกรณ์แบบจุลภาค โดยคุณหมุมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่เหมาะสมควรอยู่ที่ 873 เคลวิน และความดันที่  $1.013 \times 10^5$  ปาสกาล สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรเซดที่ใช้ตัวดูดซับเป็นโดโลไมต์ ทำให้ได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนมากกว่าร้อยละ 98 [5] นอกจากนี้แล้วมีการเปรียบเทียบผลการทดลองในขนาดห้องปฏิบัติการ กิ่งอุตสาหกรรม และอุตสาหกรรม เพื่อศึกษาความแตกต่างในระดับขนาดของการทดลองที่แตกต่างกัน [2]

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นทางเลือกใหม่ที่สามารถพัฒนาระบบการผลิตได้ เพราะ เครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีราคาสูง และต้นทุนของการศึกษาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับความเสี่ยงในต้นทุนของเครื่องปฏิกรณ์และการลดกำลังการผลิตของผลิตภัณฑ์ที่อาจจะส่งผลต่อกับกระบวนการผลิตด้วย ทำให้วิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมกันมาก เพื่อสร้างความมั่นใจก่อนที่จะปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่เกี่ยวข้อง กับอุปกรณ์ที่มีมูลค่าสูงในการลงทุน

ดังนั้น การศึกษาการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรเซดแบบติดตั้งแผ่นปะทะจะถูกพิจารณา เพื่อให้

ตัวเร่งเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และส่งผลให้สมดุลปฏิกิริยาดำเนินไปทิศทางการเกิดการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเพิ่มขึ้น โดยการติดตั้งแผ่นปะทะช่วยแก้ปัญหาของการเกิดฟองแก๊ส และการเลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด จะช่วยเพิ่มการสัมผัสระหว่างแก๊สและของแข็ง ลดการย้อนกลับของของแข็ง นอกจากนี้ จะศึกษาปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ เปรียบเทียบกับแบบไม่มีการติดตั้งแผ่นปะทะ และเปรียบเทียบผลการเพิ่มจำนวนของแผ่นปะทะ และศึกษาตัวแปรดำเนินการต่างๆ อย่างเช่น อุณหภูมิ ความเร็วของแก๊สเข้าเครื่องปฏิกรณ์ สัดส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอน และความสูงของเบดที่จะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยทำการพิจารณาผลที่ได้จากสัดส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ
2. ศึกษาผลของการติดตั้งแผ่นปะทะ ที่มีผลต่อสัดส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด
3. ศึกษาผลตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. จำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสองมิติ ด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT โดยเครื่องปฏิกรณ์เป็นท่อทรงกระบอกสูง 1 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร ที่อุณหภูมิ 923 เคลวิน ความเร็วของแก๊ส 0.2 เมตรต่อวินาที และอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนที่ 4.0 โดยใช้ผลการทดลองของ [2] เป็นต้นแบบ และ

พิจารณาที่สัดส่วนโดยโมลแบบแห้งของมีเทน ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์

2. จำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ เปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ กระบวนการปฏิกริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับแบบปราศจากการ ติดตั้งแผ่นปะทะ และเปรียบเทียบผลการเพิ่มจำนวนของแผ่นปะทะตั้งแต่ 1 ถึง 4 แผ่น
3. ศึกษาตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่ม ด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ ทำการปรับอุณหภูมิ ระหว่าง 873-1023 องศาเซลวิน ปรับความเร็วของแก๊สเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ระหว่าง 0.1-0.3 เมตรต่อวินาที ปรับอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอน ระหว่าง 1.5 – 4.0 และ ปรับความสูงของเบด ระหว่าง 15-35 เซนติเมตร เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดเปรียบเทียบกับแบบ ปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะ

#### 1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิง คำนวณ ปฏิกริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ แก๊สไฮโดรเจน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบมีการติดตั้งแผ่นปะทะ
2. ได้ทราบผลของตัวแปรดำเนินการและการติดตั้งแผ่นปะทะต่อปฏิกริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

## 1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อดังนี้ แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่างๆ แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบมีการติดตั้งแผ่นปะทะ
2. จำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสองมิติกับโปรแกรม ANSYS FLUENT โดยเครื่องปฏิกรณ์เป็นท่อทรงกระบอกสูง 1 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร องค์ประกอบของแก๊สมีเทนร้อยละ 20 และไอน้ำร้อยละ 80 ที่อุณหภูมิ 923 เคลวิน ความเร็วของแก๊ส 0.2 เมตรต่อวินาที และอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนที่ 4.0 โดยใช้ผลการทดลองของ [2] เป็นต้นแบบ และพิจารณาที่สัดส่วนโดยโมลแบบแห้งของมีเทน ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์
3. จำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ เปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์กระบวนการปฏิกริยารีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับแบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะ และเปรียบเทียบการเพิ่มจำนวนของแผ่นปะทะตั้งแต่ 1 ถึง 4 แผ่น
4. ศึกษาตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกริยารีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ ทำการปรับอุณหภูมิระหว่าง 873-1023 เคลวิน ปรับความเร็วของแก๊สเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ระหว่าง 0.1-0.3 เมตรต่อวินาที ปรับอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอน ระหว่าง 1.5 – 4.0 และ ปรับความสูงของเบด ระหว่าง 15-30 เซนติเมตร เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดเปรียบเทียบกับแบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะ
5. วิเคราะห์ผล สรุปผล เขียนรายงาน และวิทยานิพนธ์

## 1.7 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีการดำเนินงานวิจัย และลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎี และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 แบบจำลองของไหลเชิงคำนวณ การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม GAMBIT อัตราการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น สมการอนุพันธ์ การเขียนชุดคำสั่งจำลองพลศาสตร์ของปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำ การจำลองของไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT และขั้นตอนการทดลอง

บทที่ 4 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลการทดลองตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่อการจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคต์เบด ผลการจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคต์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

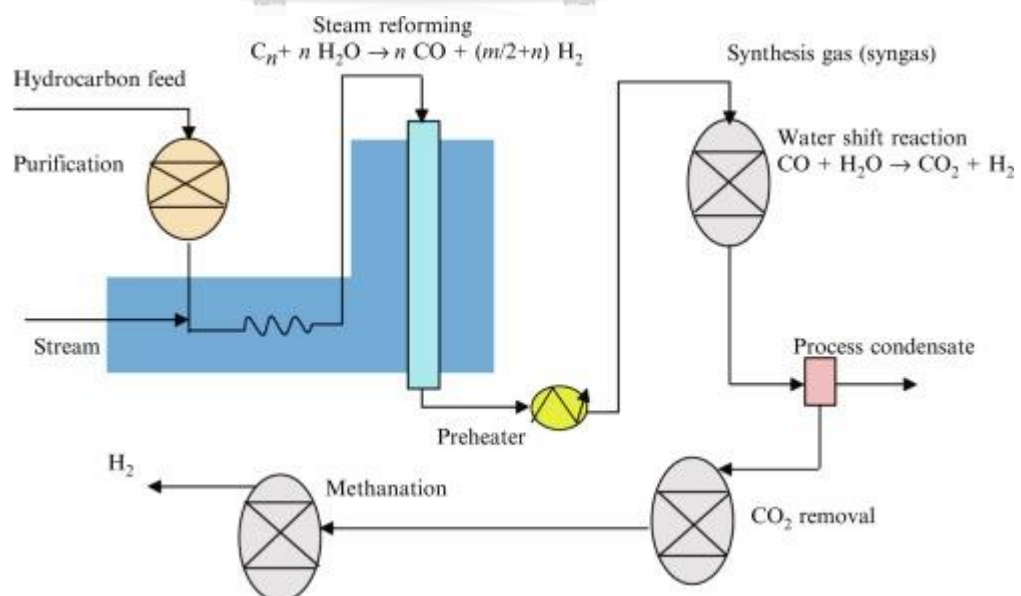
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

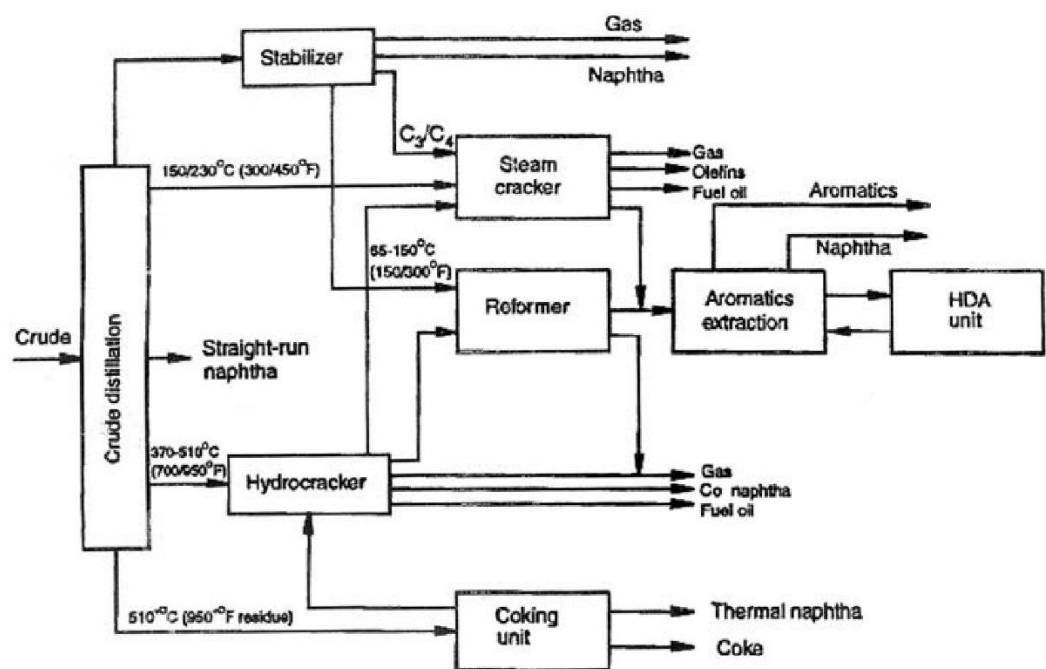
##### 2.1.1 กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ (Steam methane reforming, SMR)

คือ การทำปฏิกิริยากันระหว่างแก๊สมีเทนและไอน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิสูง ความดันสูง โดยอุณหภูมิของไอน้ำประมาณ 700-1,000 องศาเซลเซียส และความดันอยู่ที่ 3-25 บาร์ สารไฮโดรคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาสามารถใช้ได้หลายชนิด แล้วแต่แหล่งวัตถุดิบของประเทศที่สามารถผลิตได้ เช่น แก๊สธรรมชาติ แก๊สชีวภาพ หรือเอทานอล ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจน ที่ดึงมาจากน้ำและสารไฮโดรคาร์บอน ส่วนออกซิเจนและคาร์บอนจะรวมตัวกันอยู่ในรูปแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ และยังสามารถทำปฏิกิริยาด้วยไอน้ำอีกรอบ และเกิดผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นไอ (Water gas shift, WGS) ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ [6]

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำเป็นปฏิกิริยาที่มีส่วนสำคัญในโรงงานปิโตรเคมีเป็นอย่างยิ่ง โดยสัดส่วนทางการตลาดพบว่า โรงกลั่นน้ำมันมีความต้องการใช้ไฮโดรเจนค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับปริมาณความต้องการของไฮโดรเจนทั้งหมดถึงร้อยละ 95 ไฮโดรเจนถูกนำไปใช้ในหน่วยการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่มาจากน้ำมันดิบ อาทิเช่น หน่วยการแตกตัวโมเลกุลของน้ำมัน หน่วยการบำบัดด้วยไฮโดรเจน และ หน่วยกำจัดซัลเฟอร์ เป็นต้น ตามรูปที่ 2.2 เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตรงตามคุณสมบัติที่ลูกค้าต้องการ



CHULALONGKORN UNIVERSITY

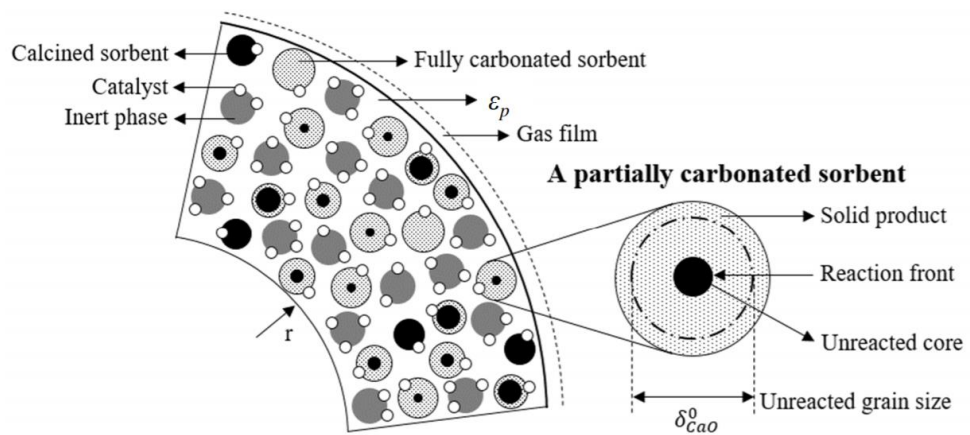
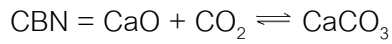
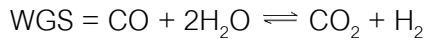
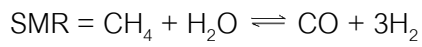
รูปที่ 2. 2 แผนผังกระบวนการผลิตในโรงงานกลั่นน้ำมัน [7]



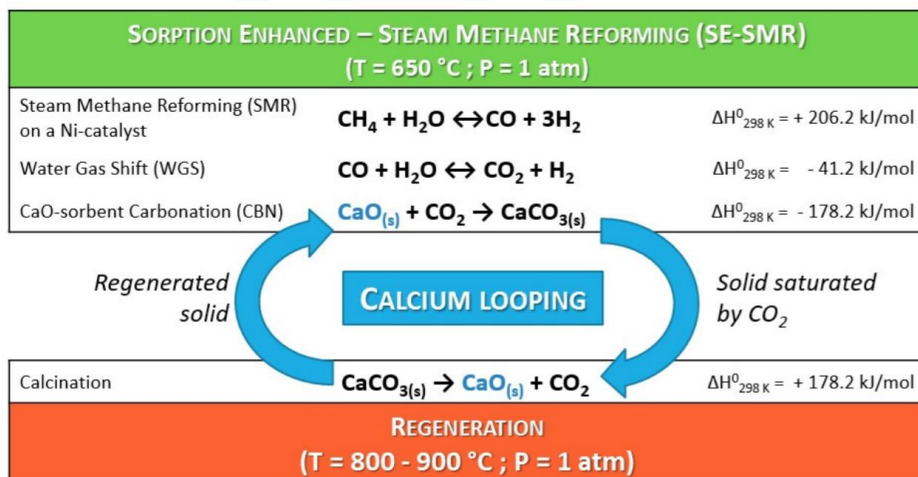
### 2.1.2 กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ (Sorption enhanced steam methane reforming, SE-SMR)

คือ กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำทั่วไป แต่มีการเพิ่มหน้าที่ของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มเติมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ในระหว่างเกิดปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์สองตัวคือแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ในระบบมีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นสมดุลของปฏิกิริยาเคมีจะเดินไปข้างหน้าเกิดเป็นผลิตภัณฑ์หรือทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนได้เพิ่มขึ้น ซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อดีประการหนึ่งจากการเพิ่มการดูดซับเข้าไปในระบบ จากรูปที่ 2.3 ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะมีวัสดุของของแข็งที่ทำหน้าที่สองอย่างไปพร้อมกัน คือ ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิง และทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตัวดูดซับมีทั้งการดูดซับแบบธรรมชาติ เช่น หินปูน หรือ โดโลไมต์ เป็นต้น และ แบบสังเคราะห์ เช่น นิกเกิลและแคลเซียมออกไซด์บนแคลเซียมอะลูมิเนต เป็นต้น ส่วนใหญ่ตัวดูดซับแบบสังเคราะห์ถูกพัฒนาให้สามารถทำหน้าที่สองอย่างในตัวเดียวกัน แบ่งออกเป็นแคลเซียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ ส่วนนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และแคลเซียมอะลูมิเนตเป็นตัวรองรับ ทั้งสามตัวนี้จะถูกออกแบบผสมกัน เพื่อนำมาใช้งานในกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ โดยเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดความเสื่อมสภาพอันเกิดจากคาร์บอนเกาะบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาและการดูดซับลดน้อยลง ดังนั้น จากรูปที่ 2.4 จึงมีการฟื้นฟูตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการนำไปเผาเพื่อกำจัดคาร์บอนที่ผิวออกไปก่อน และนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับไปใช้งานได้ใหม่ อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยที่ทำการศึกษถึงจำนวนรอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกใช้แล้วเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ จากรูปที่ 2.5 ซึ่งให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่าง SE-SMR และ SMR พบว่า ที่ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ 1 เมตร สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนสำหรับปฏิกิริยา SE-SMR มีความเข้มข้นมากกว่าใน SMR อย่างเห็นได้ชัดเจน (สีแดงเส้นประและเส้นทึบ) ตามลำดับ ในขณะที่สัดส่วนโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยา SE-SMR มีค่าความเข้มข้นที่ต่ำมากๆ จากการที่มีการเพิ่มด้วยการดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้าเกิดเป็นไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 2.6 ซึ่งให้เห็นถึงแนวโน้มของเครื่องปฏิกรณ์เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ การเกิดปฏิกิริยาที่มีตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์มีแนวโน้มที่ลดลง ในขณะที่เดียวกันสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่มีตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ ที่ภาวะอุณหภูมิเดียวกัน สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนจะต่ำกว่าแบบที่มีตัวดูดซับอย่างเห็นได้ชัด

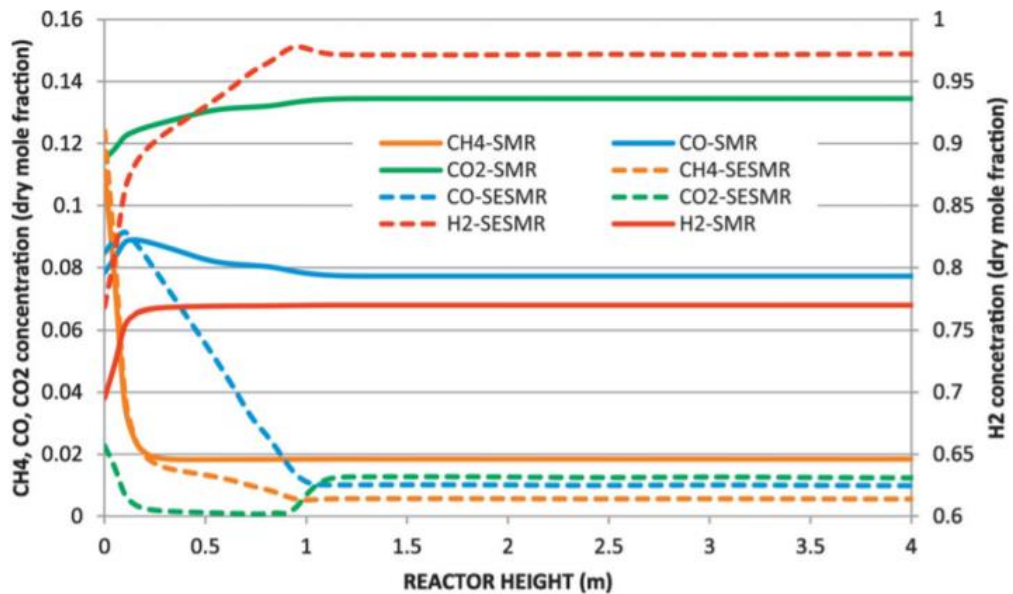
สมการปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้



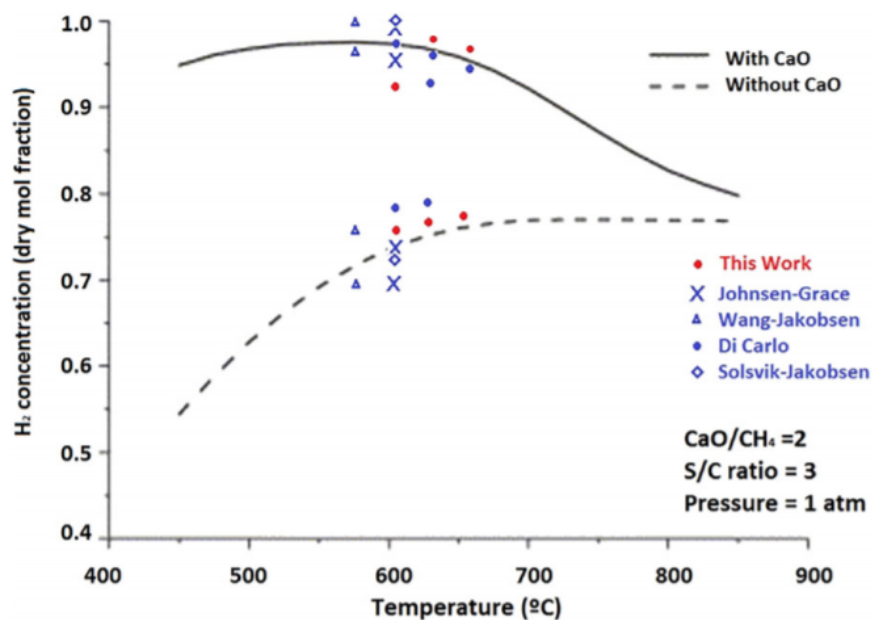
รูปที่ 2. 3 แบบจำลองตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการรีฟอร์มมีเทนด้วยไอน้ำ  
เพิ่มด้วยการดูดซับ [8]



รูปที่ 2. 4 ปฏิกิริยาของกระบวนการรีฟอร์มมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ [9]



รูปที่ 2. 5 สัดส่วนโดยโมลของ ไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์ ของ SMR และ SE-SMR ที่เวลา 60 วินาที และอุณหภูมิ 625 องศาเซลเซียส [2]



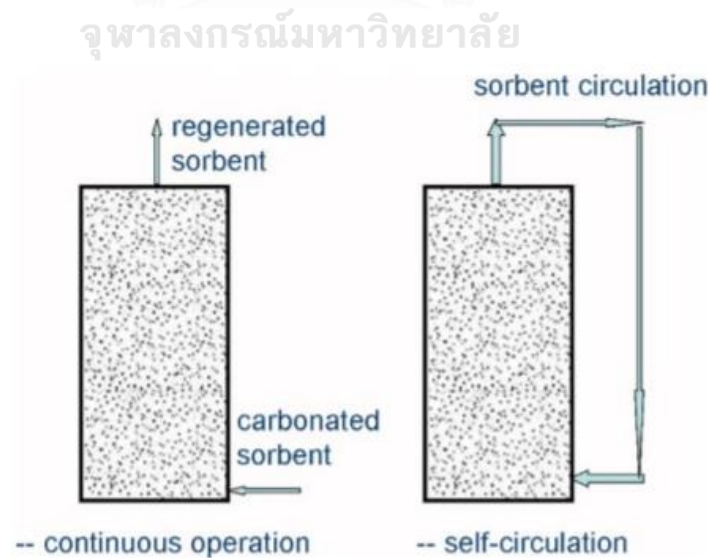
รูปที่ 2. 6 สัดส่วนโดยโมลของ ไฮโดรเจน สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบมีตัวดูดซับ และปราศจากตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ พิจารณาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [2]

### 2.1.3 กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง

ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดแบบวนรอบ คือ มีการทำงานทั้ง 2 กระบวนการในเครื่องปฏิกรณ์ตัวเดียวกัน และมีตัวดูดซับอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยการทำงานจะปล่อยให้เกิดกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำก่อนในช่วงแรก แต่เมื่อถึงจุดอิ่มตัว ที่ตัวดูดซับเริ่มเสื่อมประสิทธิภาพแล้วและต้องการคืนสภาพของตัวดูดซับ ระบบป้อนสารตั้งต้นมีเทนและไอน้ำจะถูกปิดลง และเปลี่ยนภาวะให้ความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเพื่อเกิดการคายคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับ เมื่อถึงจุดหนึ่งกระบวนการก็จะถูกสลับมาป้อนสารตั้งต้นเหมือนเดิมวนรอบแบบนี้ไปเรื่อยๆ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในช่วงของการเกิดปฏิกิริยา SE-SMR อยู่ที่ 480-580 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสำหรับการฟื้นฟูตัวดูดซับอยู่ที่ 800-1000 องศาเซลเซียส

### 2.1.3 กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน

ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียนเกิดการดำเนินงานสองแบบเช่นเดียวกับในระบบข้างต้น แต่จะมีเครื่องปฏิกรณ์แยกออกเป็นสองคอลัมน์ตามภาวะของอุณหภูมิที่แตกต่างกันของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำและการฟื้นฟูตัวดูดซับ ตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2. 7 การทำงานของตัวดูดซับแบบต่อเนื่องและแบบหมุนเวียนด้วยตัวเอง [10]

จะเห็นได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์มีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงขอแสดงการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ของทั้งสองแบบ ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์

ลักษณะเฉพาะ	เบดนิ่ง	ฟลูอิไดซ์เบด
อนุภาคของแข็ง	อนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ	อนุภาคของแข็งขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ
ความดันลด	ความดันลดมีค่าต่ำ*	ความดันลดมีค่าสูง*
อุณหภูมิ	ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์สูง	ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ต่ำ
ร้อยละการเปลี่ยนเมื่อเกิดปฏิกิริยา	ร้อยละการเปลี่ยนมีค่าสูง สามารถมีค่าร้อยละการเปลี่ยนได้ถึง 100	ร้อยละการเปลี่ยนมีค่าได้ทั้งสูงและต่ำขึ้นอยู่กับความเร็วของไหลป้อนเข้า

หมายเหตุ \*ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของแข็งป้อนเข้า

#### 2.1.5 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด

CHULALONGKORN UNIVERSITY

งานวิจัยนี้มีความสนใจศึกษากระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด จึงพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดดังต่อไปนี้

ข้อดี คือ

1. มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็งสูง และ มีการกวนผสมภายในสูง เนื่องจากความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการ ทำให้แก๊สและอนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่ปั่นป่วนภายในกระบวนการ

2. มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็งที่เฉพาะเจาะจง คือ อนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงและต่ำ จะอยู่ที่บริเวณด้านล่างและด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ ตามลำดับ
3. เป็นกระบวนการที่สามารถแยกอนุภาคของแข็งที่ผ่านการดำเนินการหรือการเกิดปฏิกิริยาแล้วได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ โดยอนุภาคที่ผ่านการดำเนินการแล้วจะมีขนาดเล็กกลงและลอยออกบริเวณด้านบนกระบวนการ
4. เป็นตัวกลางถ่ายโอนความร้อนที่ดี มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเบด และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูง
5. เป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานในการดำเนินการต่ำ เพราะมีแรงต้านทานภายในกระบวนการต่ำ
6. เป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องและดำเนินการได้ง่าย
7. เป็นกระบวนการที่มีความยืดหยุ่นในการดำเนินงานสูง มีช่วงความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการกว้าง จึงสามารถใช้งานได้กับเชื้อเพลิงหลายชนิด

ข้อเสีย คือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. อนุภาคของแข็งมีเวลาอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์สั้น เนื่องจากเป็นการไหลของของไหลและอนุภาคของแข็งไปในทิศทางเดียวกันเป็นส่วนมาก
2. เกิดฟองแก๊สขนาดใหญ่ภายในกระบวนการในบางรูปแบบการไหลหรือช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน ซึ่งจะลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหล
3. การผสมเกิดขึ้นได้ดีในทิศทางตามแนวแกนมากกว่าการผสมในทิศทางตามแนวรัศมี จึงอาจเกิดความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิผลิตผลิตภัณฑ์ของกระบวนการ

4. กระบวนการมีข้อจำกัด อนุภาคของแข็งจะหลุดออกจากกระบวนการที่ความเร็วของไหล บ่อน้ำกระบวนการสูง ดังนั้น ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อดักเก็บและบ่อน อนุภาคของแข็งที่หลุดออกกลับเข้ามาในกระบวนการ
5. อนุภาคของแข็งในกระบวนการมีขนาดลดลงเรื่อยๆ ซึ่งเกิดจากการชนกันของอนุภาค ของแข็งหรือปฏิกิริยาเคมีภายในกระบวนการ
6. เครื่องปฏิกรณ์จะเกิดการสั่นและสึกกร่อน เนื่องจากการชนของอนุภาคของแข็งกับผนัง เครื่องปฏิกรณ์
7. ไม่สามารถใช้งานกับอนุภาคของแข็งที่เปียกหรือเหนียว เพราะจะเกิดการรวมตัวกันเป็น อนุภาคขนาดใหญ่

#### 2.1.6 กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ

เนื่องจากข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่ก่อให้เกิดฟองแก๊สขนาดใหญ่ภายใน กระบวนการ ซึ่งจะลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหล ดังนั้น [11] จึงมีงานวิจัย ที่ผ่านมาได้กล่าวว่า การติดตั้งแผ่นปะทะเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด จะสามารถช่วยให้ ลดการเกิดฟองแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้ลดน้อยลงได้ ตลอดจนลดการย้อนกลับของอนุภาค ของแข็งซึ่งเป็นสาเหตุทำให้การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ลดน้อยลง เนื่องจากอนุภาคที่ถูกทำ ปฏิกิริยาแล้วเกิดการเสื่อมสภาพ แทนที่จะถูกนำไปผ่านการฟื้นฟูกลับถูกนำมาใช้งานทำปฏิกิริยา กับของไหลอีกครั้ง ดังนั้น การปรับปรุงความสามารถของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้ง แผ่นปะทะ เป็นอีกหนทางหนึ่งที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายและมีต้นทุนในการติดตั้งอยู่ใน เกณฑ์ที่ไม่สูงมาก เพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนได้มากยิ่งขึ้น

### 2.1.7 ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ (SMR) และกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ (SE-SMR)

สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำในทางการค้า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการส่วนใหญ่จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบโลหะเป็นนิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา แต่การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา จะมีการใช้องค์ประกอบโลหะและตัวรองรับที่แตกต่างกันไป เพื่อให้เหมาะสมกับปฏิกิริยายิ่งขึ้นและคำนึงถึงต้นทุนและความยั่งยืนของการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำงานได้ในสองหน้าที่ด้วยกัน คือ ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับในเวลาเดียวกัน ดังนั้น อีกสิ่งหนึ่งที่ต้องให้ความสนใจเพิ่มเติมคือวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกนำไปเพิ่มกับตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับ ซึ่งจะขอแจกแจงตัวดูดซับที่ถูกนำมาศึกษาในกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ ดังต่อไปนี้

#### 2.1.7.1 แคลเซียมออกไซด์

หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ปูนขาว ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตหรือหินปูนได้ โดยแคลเซียมออกไซด์ราคาต้นทุนต่ำ สามารถหาใช้งานได้ง่าย และมีความสามารถในการดูดซับได้ดี [8] แต่ว่าก็ยังคงมีข้อเสียที่มีความเสถียรภาพต่ำ เนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพได้ไว ต้องมีการฟื้นฟูสภาพเพื่อที่จะนำกลับไปใช้งานได้ใหม่อีกครั้ง ดังนั้น ในปัจจุบันยังคงมีการศึกษาถึงจำนวนความสามารถในการกลับมาใช้ซ้ำและนับจำนวนครั้งเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 2.1.7.2 ลิเทียมออกไซด์

เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานเป็นตัวดูดซับในกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ แต่ว่ายังคงดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในปริมาณต่ำ

#### 2.1.7.3 โดโลไมต์

มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นตัวดูดซับที่ได้รับความนิยมในการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ปัจจุบัน มีการนำโดโลไมต์มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพร่วมกับ



ตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์ชนิดต่างๆ และศึกษาการใช้งานในกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ

#### 2.1.7.4 ผงซีเถ้า

เป็นวัสดุของเสียที่แทบจะไม่มีมูลค่าและสามารถหาใช้งานได้ง่ายจากโรงไฟฟ้า ในผงซีเถ้ามีองค์ประกอบของอะลูมินา ซิลิกา แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ รวมทั้งสารประกอบอัลคาไลน์ ที่มีคุณสมบัติสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ เพื่อช่วยลดต้นทุนในเรื่องของราคาตัวดูดซับ จึงมีงานวิจัยศึกษานำผงซีเถ้ามาใช้งานในกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับด้วย แต่อาจจะไม่ถึงขั้นใช้งานเป็นตัวดูดซับเพียงอย่างเดียว แต่ว่าใช้งานเพิ่มเติมเข้าไปเพื่อช่วยลดคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบได้ และลดต้นทุนในการใช้งานตัวดูดซับของการผลิตไฮโดรเจน

จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับจะต้องมีการทำงานตลอดเวลาหากมีการป้อนสารตั้งต้นเข้าไป ดังนั้นปัญหาของการใช้งานจริงในกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับนั้น จะมีข้อจำกัดอยู่ที่ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่ใช้งานแล้วว่าจะสามารถใช้งานได้นานเท่าไรถึงจะคุ้มค่าสำหรับต้นทุนในการผลิตไฮโดรเจน หลังจากนั้น ตัวดูดซับจะต้องถูกนำกลับมาฟื้นฟูสภาพและสามารถกลับไปใช้งานใหม่

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2. 2 ผลการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้ศึกษากระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในภาวะดำเนินการต่างๆ [12]

ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (เมกะปาสคาล)
เบดนิ่ง	-	Hydrotalcite	450-490	0.22-0.89
เบดนิ่ง	Ni	Hydrotalcite	428-467	0.31-0.72
เบดนิ่ง	Ni	Hydrotalcite	500	0.1-0.5
เบดนิ่ง	Ni	Hydrotalcite	400-490	0.2-0.44
เบดนิ่ง	Ni	Hydrotalcite	450	0.45

ชนิดของเครื่อง ปฏิกรณ์	ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ตัวดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (เมกะปาสคาล)
เบดนิ่ง	Ni	K-modified HTC	505	0.2-0.4
เบดนิ่ง	Ni	CaO	660-750	0.3-1.5
เบดนิ่ง/ (ฟลูอิ ไดซ์เบด)	Ni	Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> , LiZrO <sub>3</sub>	575	1-2
เบดนิ่ง	Ni	CaO, Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> , Li <sub>2</sub> ZrO <sub>3</sub> , K-doped, Na <sub>2</sub> ZrO <sub>3</sub>	575	1-2.5
เบดนิ่ง	Rh	HTCs	400	0.1
เบดนิ่ง	Rh/Ce $\alpha$ Zr1- $\alpha$ O <sub>2</sub>	K-promoted HTC, Li <sub>2</sub> ZrO <sub>3</sub>	450-600	0.46-1.5
เบดนิ่ง	Ni/MgO	K-promoted HTC, Li <sub>2</sub> ZrO <sub>3</sub>	500	0.46
ฟลูอิไดซ์เบด	Ni	CaO	575, 600, 627	0.1-1.5
เบดนิ่ง	Ni/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -doped- Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	300-500	0.2-0.8
ฟลูอิไดซ์เบด	Ni/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FA	300-500	0.2-0.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 2.1.8 ประเภทของฟลูอิไดเซชัน

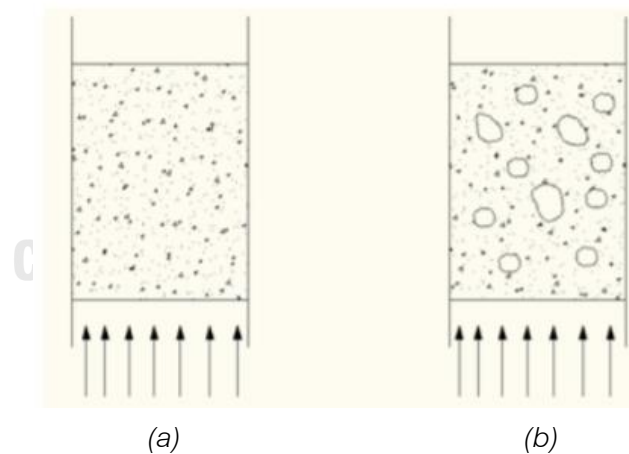
#### 1. ฟลูอิไดเซชันแบบสองวัฏภาค

คือ ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะประกอบด้วยสารสองสถานะ คือ ของแข็งและของไหล ซึ่งของไหลในที่นี้อาจจะหมายถึงได้ทั้งแก๊สหรือของเหลวก็ได้ อย่างไรก็ตาม ฟลูอิไดซ์เบดประเภทนี้ จะถูกแบ่งย่อยออกได้อีกสองแบบเป็น ฟลูอิไดเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง และ ฟลูอิไดเซชันแบบของเหลว-ของแข็ง โดยพบว่ากระบวนการที่ของไหลในกระบวนการเป็นของเหลว การขยายตัวของอนุภาคของแข็งจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของอนุภาคของแข็งจะเป็นไปอย่างช้าๆ และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนกระบวนการที่

ของไหลเป็นแก๊ส แก๊สส่วนหนึ่งทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็งเช่นเดียวกับของเหลว แต่ก็ยังมีแก๊สอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองแก๊สเกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้น การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งจะเกิดความปั่นป่วน มีความไม่สม่ำเสมอ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยความแตกต่างกันระหว่างสองแบบนี้ เกิดจากความแตกต่างกันในคุณสมบัติทางกายภาพของของไหล อย่างเช่น ความหนืด และความหนาแน่น เป็นต้น

## 2. ฟลูอิดเซชันแบบสามวัฏภาค

คือ เป็นฟลูอิดเซชันที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่ประกอบไปด้วย 3 สถานะ ได้แก่ ของแข็งของเหลว และแก๊ส เครื่องปฏิกรณ์ประเภทนี้จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน ในเครื่องปฏิกรณ์ตัวที่หนึ่ง จะเกิดปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง และจะมีหัวฉีดของเหลวฉีดพ่นของเหลวเข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์และในกระบวนการจะมีการให้ถ่ายโอนเปลี่ยนของเหลวที่ถูกฉีดพ่นลงมาให้กลายเป็นไอแก๊ส และเกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ อนุภาคของแข็งที่ผ่านการใช้งานจะถูกนำไปฟื้นฟูสภาพในเครื่องปฏิกรณ์ชุดที่สองเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 2. 8 ประเภทของฟลูอิดเซชันแบบสองวัฏภาค (a) ฟลูอิดเซชันแบบของเหลว-ของแข็ง และ (b) ฟลูอิดเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง [13]

### 2.1.9 รูปแบบการไหลของฟลูอิดเซชัน

มีความแตกต่างกันไปในแต่ละรูปแบบ เนื่องจาก ความเร็วของของไหลที่ถูกบ้อนเข้าไปแตกต่างกัน หากมีความเร็วของของไหลสูง กระบวนการจะเกิดความปั่นป่วนและความไม่สม่ำเสมอภายในเครื่องปฏิกรณ์

#### แบบที่ 1 เบดนิ่ง

จุดเด่นของการไหลแบบนี้คือ อนุภาคของแข็งยังคงอยู่กับที่ เนื่องจากอัตราการบ้อนหรือความเร็วของของไหลบ้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ไม่เพียงพอ

#### แบบที่ 2 ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส

มีการบ้อนความเร็วเริ่มต้นเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ และส่งผลให้อนุภาคของแข็งเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ โดยจุดที่อนุภาคของแข็งเริ่มขยับตัว เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน โดยจะมีลักษณะเด่นคือ จะเริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้น แต่ว่าลักษณะของการเกิดฟองแก๊สก็จะมี ความแตกต่างกันไปตามขนาดของอนุภาคของแข็ง ซึ่งจะมีการอธิบายในหัวข้อถัดไป

#### แบบที่ 3 ฟลูอิดเซชันแบบที่มีการไหลแบบสลัก

มีลักษณะการไหลที่ฟองแก๊สขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในกระบวนการจะรวมตัวกันจนเป็นฟองแก๊สขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์

#### แบบที่ 4 ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน

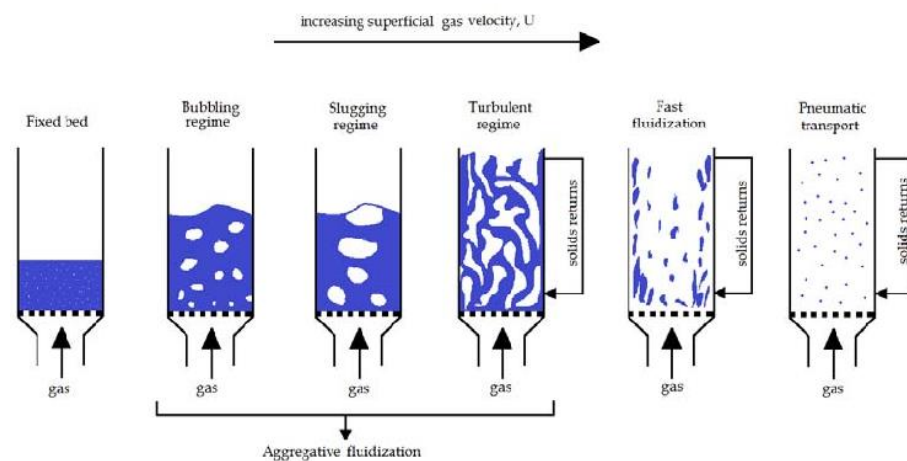
จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลบ้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่าอยู่ระหว่างความเร็วสองค่า คือ ความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวัดแกว่งในกระบวนการมีค่าสูงที่สุดและความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวัดแกว่งมีค่าต่ำที่สุดจนเข้าสู่ สภาวะคงตัว โดยลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์จะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ อนุภาคของแข็งจะหนาแน่นอยู่ในส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ แต่จะเบาบางในส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์

แบบที่ 5 ฟลูอิดิเซชันแบบฟลูอิดิเซชันความเร็วสูง

จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วขนส่ง โดยบริเวณกลางของเครื่องปฏิกรณ์จะมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งเบาบาง แต่ที่บริเวณผนังของเครื่องปฏิกรณ์จะมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งมากกว่า

แบบที่ 6 ฟลูอิดิเซชันแบบเบาบาง

จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการขนส่งด้วยลม โดยอนุภาคของแข็งทั้งหมดจะถูกพาออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์ จะเคลื่อนที่แยกออกจากกันเป็นอนุภาคของแข็งเดี่ยวกระจายตัวอยู่ในกระแสของไหล ซึ่งจะมีสัดส่วนระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลประมาณ 1 ต่อ 20



CHULALONGKORN UNIVERSITY

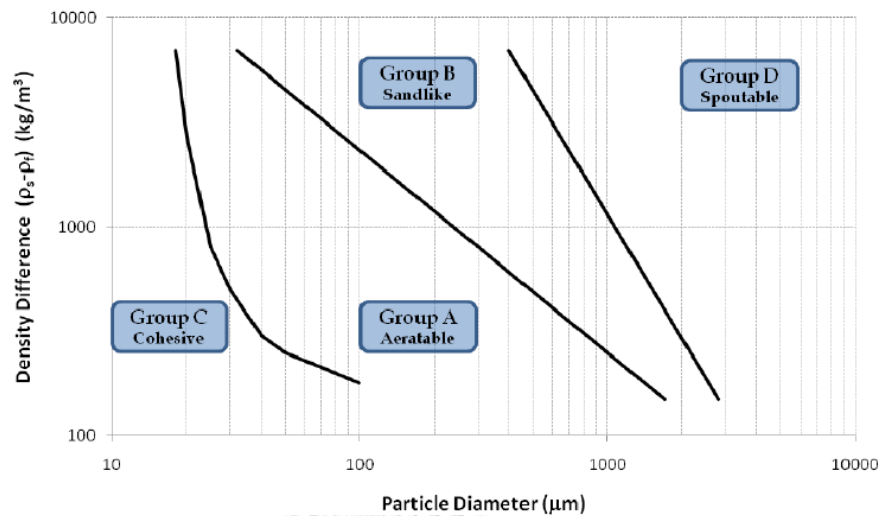
รูปที่ 2.9 รูปแบบการไหลของฟลูอิดิเซชัน [14]

#### 2.1.10 การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็ง

จะส่งผลต่อลักษณะการไหลที่เกิดภายในกระบวนการฟลูอิดิเซชัน โดยวิธีการของ Geldart ถูกนำมาใช้ในการแบ่งประเภทของอนุภาคของแข็งจากความสัมพันธ์ของผลต่างความหนาแน่นอนุภาคของแข็งและของไหลและขนาดอนุภาคของแข็ง โดยขอแสดงการเปรียบเทียบของแต่ละประเภทตามตารางด้านล่าง

ตารางที่ 2. 3 การเปรียบเทียบประเภทของอนุภาคของแข็งแต่ละชนิด [15]

Group	C	A	B	D
Particle size for density= 2,500 kg/m <sup>3</sup>	< 20 μm	20-90 μm	90-650 μm	>650 μm
Channeling	Severe	Little	Negligible	Negligible
Spoutability	None	None	Shallow bed	Readily
Expansion	Low	High	Medium	Medium
Minimum bubbling velocity, U <sub>mb</sub>	No bubble	>U <sub>mf</sub>	=U <sub>mf</sub>	=U <sub>mf</sub>
Bubble shape	Only channel	Flat base spherical	Rounded with small	Rounded
Solid mixing	Very low	high	Medium	Low
Gas back-mixing	Very low	High	Medium	Low
Slugging mode	Flat raining plugs	Axisymmetric	Mostly Axisymmetric	Mostly wall slugs
Effect of particle size on hydrodynamics	Unknown	Appreciable	Minor	Unknown



รูปที่ 2. 10 การแบ่งประเภทของอนุภาคของแข็งแบบ Geldart [16]

1) การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งสำหรับกลุ่ม A

อนุภาคของแข็งประเภทนี้ เมื่อความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ถึงความเร็วต่ำสุดที่จะส่งผลให้ในช่วงแรกฟลูอิดเซชันยังไม่เกิดฟองแก๊สในทันที แต่จะเกิดการขยายตัวของเบดก่อน แล้วจึงเริ่มเกิดฟองแก๊สหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟองแก๊ส อย่างเช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

2) การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งสำหรับกลุ่ม B

เกิดในกระบวนการฟลูอิดเซชันได้ดีมาก จะเริ่มเกิดฟองแก๊สในกระบวนการทันที เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นทำให้มีแรงระหว่างอนุภาคลดลง โดยส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้งานในกระบวนการเผาไหม้หรือผลิตแก๊ส

3) การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งสำหรับกลุ่ม C

อนุภาคของแข็งประเภทนี้จะมีขนาดเล็กมาก ซึ่งส่งผลให้อนุภาคแบบนี้เกิดกระบวนการฟลูอิดเซชันได้ยาก เนื่องจากแรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งมีค่าใกล้เคียงกับแรงดึงดูดของโลกที่กระทำต่ออนุภาคของแข็งนั้นๆ ดังนั้น การนำไปใช้งานของอนุภาคกลุ่ม C จึงค่อนข้างเป็นไปได้ยากและมีข้อจำกัดต่างๆ และเป็นลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบไม่ต่อเนื่องหรือการทำงานแบบกะ

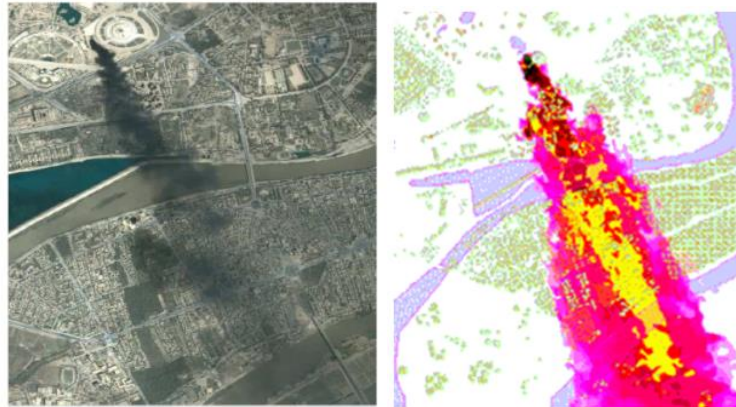
#### 4) การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งสำหรับกลุ่ม D

อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้มีขนาดใหญ่มาก จึงมีความต้องการความเร็วที่สูงมากในการใช้งาน อย่างเช่นเมล็ดข้าวและเมล็ดกาแฟที่ถูกลำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบแห้ง

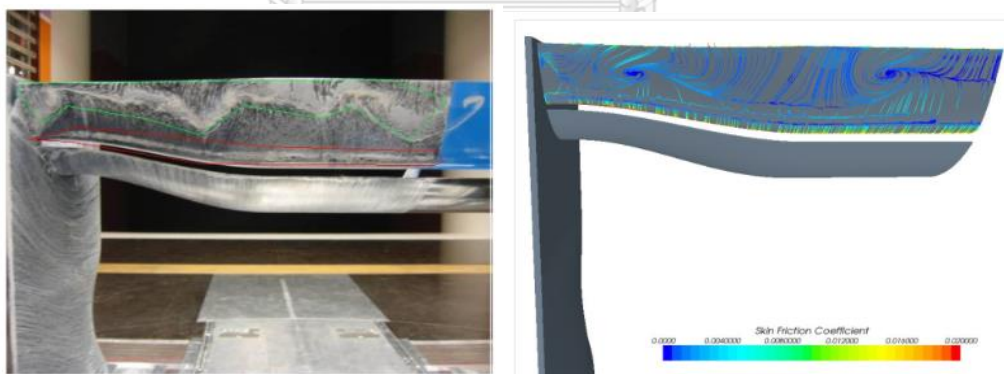
#### 2.1.11 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือที่มีชื่อเรียกย่อว่า ซีเอฟดี คือการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยหาผลเฉลยและจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้น กระบวนการทางซีเอฟดีถูกพัฒนาขึ้นในปี 1930 สำหรับจำลองการไหลรอบทรงกระบอกสองมิติ จากนั้นเมื่อเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มีความก้าวหน้ามากขึ้น จึงได้มีการพัฒนาสู่การจำลองแบบสามมิติโดยบริษัทและองค์กรต่างๆ อาทิเช่น โบอิง ล็อกฮีท ดักลาส แม็คโดเนล นาซา เป็นต้น ทุกวันนี้ ซีเอฟดีถูกนำไปใช้ในการพัฒนาเรือดำน้ำ ผีเสื้อ อากาศยาน รถยนต์ เฮลิคอปเตอร์ การจำลองรถไฟความเร็วสูง เรือยอร์ชสำหรับการแข่งขัน และอื่นๆ อีกมากมาย ความสำเร็จของซีเอฟดี ส่งผลให้มีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อแก้ปัญหาในภาคอุตสาหกรรมและงานวิจัยต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น การไหลของอากาศผ่านรถยนต์และอากาศยานเพื่อหาแรงยกและแรงต้าน การไหลของกระแสน้ำผ่านลำเรือ การเผาไหม้ภายในกระบอกสูบและกังหันแก๊ส การไหลของของไหลผ่านปั๊มและเครื่องอัดไอ การหล่อเย็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการทางด้านเคมี การไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านตึกตัวอาคาร การกระจายของมลภาวะในอากาศและน้ำ การทำนายสภาพอากาศ การไหลของเลือดในระบบหมุนเวียนของร่างกาย เป็นต้น ปัจจุบัน ซีเอฟดีถูกพัฒนาไปถึงขั้นใช้ทำนายการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์และทรานสิชันเพื่อให้ได้ความสมจริงของการจำลอง การไหลที่นำไปสู่การออกแบบที่มีประสิทธิภาพขึ้น ตัวอย่างการใช้ซีเอฟดี ดังรูปที่ 2.11-2.15

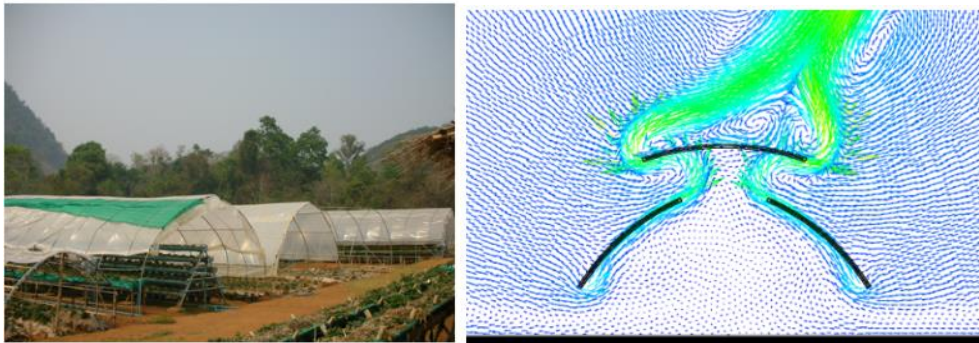




รูปที่ 2. 11 การใช้ซีเอฟดีทำนายทิศทางและลักษณะการกระจายตัวของควันที่เกิดจากการเผาบน้ำมันในกรุงแบกแดดช่วงสงครามอิรัก (ซ้าย) ภาพถ่ายทางอากาศแสดงการกระจายของควัน (ขวา) พฤติกรรมที่จำลองได้ด้วยซีเอฟดี ซึ่งช่วยให้การจัดการด้านมลภาวะเป็นไปอย่างมีแบบแผน เช่น การวางแผนอพยพผู้คน การควบคุมการแพร่กระจาย เป็นต้น [17]

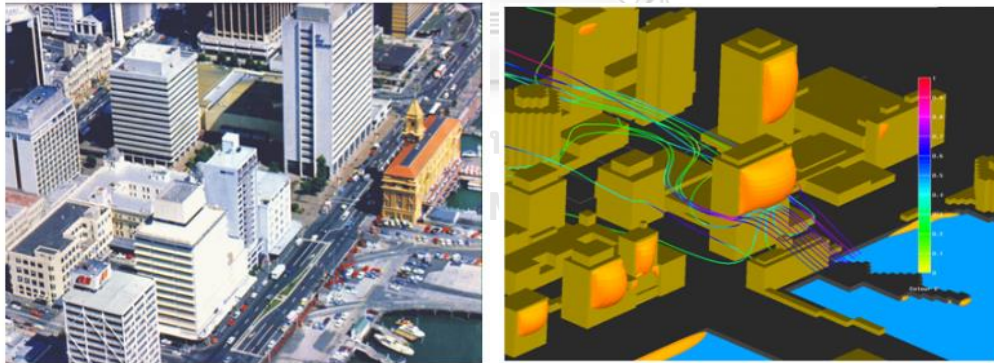


รูปที่ 2. 12 การจำลองการไหลของอากาศผ่านสเปอเรียลเลอร์ของรถยนต์สูตรหนึ่ง นำไปสู่การปรับปรุงรูปทรงของสเปอเรียลเลอร์ให้มีความเหมาะสม (ขวา) และพฤติกรรมที่จำลองได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ซีเอฟดี STAR CCM+ ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับการทดสอบจริง (ซ้าย) [17]

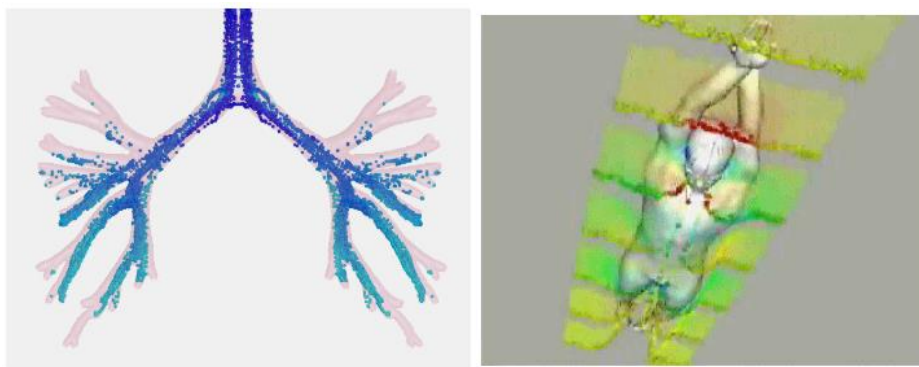


รูปที่ 2. 13 การใช้ซีเอฟดีช่วยในด้านการเกษตรกรรม เพื่อทำนายการกระจาย  
อุณหภูมิของอากาศภายในและรอบโรงเรือนเพาะปลูก ช่วยออกแบบรูปทรงโรงเรือน  
เพื่อให้การระบายอากาศและควบคุมอุณหภูมิเหมาะสมต่อการเพาะปลูก (ซ้าย)  
และผลจำลองการไหลของอากาศโดยใช้ซีเอฟดีของโรงเรือนเพาะปลูกพีช (ขวา)

[17]



รูปที่ 2. 14 การใช้ด้านวิศวกรรมโยธาได้นำซีเอฟดีไปช่วยในการทำนาย  
ผลกระทบของลมที่เกิดขึ้นเมื่อไหลผ่านตึกสูง เพื่อให้ประกอบการออกแบบรูปทรง  
และโครงสร้างในการสร้างตึกสูง (ซ้าย) และภาพถ่าย (ขวา) ผลจำลองการไหลผ่าน  
ตัวอาคารขนาดใหญ่ [17]



รูปที่ 2. 15 การใช้ด้านกลศาสตร์ชีวภาพได้นำวิธีซีเอฟดีไปช่วยทำนายระบบภายในร่างกาย เช่น การกระจายของอากาศที่ไหลผ่านเข้าสู่ปอด ความเค้นบนผนังเส้นเลือดหัวใจ เพื่อให้แพทย์ได้เข้าใจกระบวนการที่เกิดขึ้น เป็นข้อมูลนำไปสู่การวางแผนการรักษาและการเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมปลอดภัย (ซ้าย) จำลองการแพร่กระจายของอนุภาคอากาศในท่อลมปอด และ (ขวา) การนำซีเอฟดีไปจำลองการไหลของน้ำผ่านลำตัวนักว่ายน้ำ (ANSYS FLUENT) ผลวิเคราะห์นำไปสู่การออกแบบท่าทางการว่ายน้ำที่เหมาะสมที่ช่วยลดแรงต้านที่จะเกิดขึ้น รวมถึงการออกแบบชุดและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการแข่งขัน [17]

ANSYS FLUENT เป็นโปรแกรมที่ใช้กระบวนการทางเชิงตัวเลขและขั้นตอนวิธีการในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของไหลและปฏิกิริยาเคมีด้วยคอมพิวเตอร์ได้ในระยะเวลาอันสั้น ทำให้สามารถศึกษากระบวนการต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว ประโยชน์ของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คือศึกษาแนวโน้มการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์และสามารถสังเกตการณ์ภาพการไหลของของไหลได้จากภาพสองมิติและสามมิติผ่านทางคอมพิวเตอร์ได้ตามระยะเวลาที่ต้องการ ก่อนที่จะเกิดการทดลองหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการจริงๆ เพื่อสร้างความเชื่อมั่นและความมั่นใจ รวมทั้งช่วยเรื่องในการลดต้นทุนในการออกแบบ ทดลอง พัฒนา ปรับปรุง และลดความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้นได้เป็นอย่างมาก แต่ว่าผลลัพธ์ที่ได้ก็เป็นเพียงการประมาณการณ์เท่านั้น โดยความท้าทายของการใช้งานขึ้นอยู่กับค่าและเทียบผลกับต้นแบบการทดลองจริงให้ได้ผลวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงสมจริงมากที่สุด ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองแบบจำลองด้วยกัน คือ

- a) แบบจำลองแบบออยเลอร์-ออยเลอร์ พิจารณาอนุภาคของแข็งเสมือนกับเป็นของไหลอีกหนึ่งวัฏภาค
- b) แบบจำลองออยเลอร์-ลาگرانเจียน จะพิจารณาอนุภาคของแข็งเป็นของแข็งจริงๆ และทำการแก้สมการของอนุภาคของแข็งแต่ละเม็ด

สมการคำนวณพื้นฐานที่ใช้ในวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน สำหรับระบบการไหลระหว่างแก๊สและอนุภาคของแข็ง สมการอนุรักษ์ทั้งสามสมการของแต่ละวัฏภาค จะถูกพิจารณาร่วมกับทฤษฎีจลน์ การไหลของอนุภาคของแข็ง ซึ่งทฤษฎีนี้เป็นทฤษฎีที่พัฒนามาจากทฤษฎีจลน์การไหลของแก๊ส แต่ทำการเพิ่มสมการอนุรักษ์อุณหภูมิแก๊สและเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การคืนสภาพ เพื่อจำลองปรากฏการณ์จริงที่เกิดขึ้นในระบบ

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cao และคณะ (2015) ทำการศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อเปรียบเทียบถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีนิกเกิลและโรเดียมเป็นองค์ประกอบ สำหรับใช้ในการผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเมทานอลด้วยไอน้ำ (steam methanol reforming, SMR) ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบจุลภาค โดยมีระบบที่แตกต่างกันคือ แบบมีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เครื่องปฏิกรณ์มีความยาวเท่ากับ 55 มิลลิเมตร อุณหภูมิเท่ากับ 873-1,173 เคลวิน และเวลาในการทำปฏิกิริยา (Gas Hour Space Velocity, GHSV) เท่ากับ 11,500-120,000  $\text{h}^{-1}$  จากผลการทดลองหากเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองพบว่า ที่พื้นที่ผิวเท่ากันตัวเร่งปฏิกิริยาโรเดียมจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า แต่เมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลจะมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับตัวเร่งปฏิกิริยาโรเดียมภายใต้สภาวะเดียวกัน

Ma และคณะ (2017) ทำการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลสาร โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสองมิติแบบปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเมทานอลด้วยไอน้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาเมมเบรน และเปรียบเทียบการไหลของแก๊สฮีเลียม

และแก๊สสารตั้งต้น แบบไหลในทิศทางเดียวกันและไหลแบบสวนทาง พบว่า แบบการไหลในทิศทางเดียวกัน ในช่วงเริ่มต้นสัดส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนที่ผ่านเมมเบรนมาจะมีปริมาณเจือจาง เพราะเป็นการช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดเป็นไฮโดรเจนไม่รวดเร็วเกินไป ทำให้สารตั้งต้นค่อยๆ เกิดปฏิกิริยาและแก๊สไฮโดรเจนถึงค่อยผ่านเมมเบรน ทำให้ได้สัดส่วนโดยโมลที่สูงกว่าแบบสวนทางกัน แต่ก็ยังพบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิมีช่วงของอุณหภูมิต่ำเป็นช่วงกว้าง ซึ่งส่งผลไม่ดีต่อการเกิดปฏิกิริยาอีพอร์มิงที่ต้องการอุณหภูมิสูงในการเกิดปฏิกิริยา แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นแบบสวนทางกันพบว่าให้ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ดีกว่า

Carlo และคณะ (2017) ทำการศึกษารีพอร์มิงมีเทนด้วยไอน้ำร่วมกับการดูดซับ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการเป็นการเพิ่มผลิตภัณท์ไฮโดรเจนให้มากขึ้นและยังช่วยลดมลภาวะทางอากาศด้วยการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เครื่องปฏิกรณ์ใช้การบรรจุของแข็งอยู่ภายในคือ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่ได้สองหน้าที่ คือ ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ และส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอีพอร์มิง การพัฒนาวัสดุให้มีหน้าที่ที่ต้องการได้หลายอย่างภายในอนุภาคเดียวกันจะช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ ลดความต้านทานความร้อน และยังลดปริมาณของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ โดยทำการศึกษแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบฟองแก๊สสองมิติระดับกึ่งอุตสาหกรรม พบว่า สัดส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความสอดคล้องไปในทางเดียวกันกับผลการทดลองของเครื่องปฏิกรณ์แบบจุลภาคในงานวิจัยก่อนหน้านี และพัฒนาภาวะการดำเนินการต่างๆ ให้ได้ผลผลิตที่ดีขึ้นคือ ได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

## CHULALONGKORN UNIVERSITY

Herce และคณะ (2017) ทำการศึกษารีพอร์มิงมีเทนด้วยไอน้ำร่วมกับการดูดซับ เพื่อผลิตไฮโดรเจนร่วมกับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบจำลองแบบออยเลอร์-ออยเลอร์ ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบฟองแก๊ส ตัวดูดซับที่ใช้เป็นโคโลไมต์และตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ร่วมด้วย ซึ่งทำการศึกษเครื่องปฏิกรณ์ขนาดกึ่งโรงงานอุตสาหกรรมและขนาดห้องปฏิบัติการ เครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองขนาดให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับผลของงานวิจัยที่ผ่านมา การรีพอร์มิงมีเทนด้วยไอน้ำร่วมกับการดูดซับได้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนสูงถึงร้อยละ 90-96 (แบบแห้ง) เมื่อเปรียบเทียบกับรีพอร์มิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปราศจากตัวดูดซับได้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเพียงร้อยละ 76-78 (แบบแห้ง) และ

ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในระบบของกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำร่วมกับการดูดซับเท่ากับ 625 องศาเซลเซียส

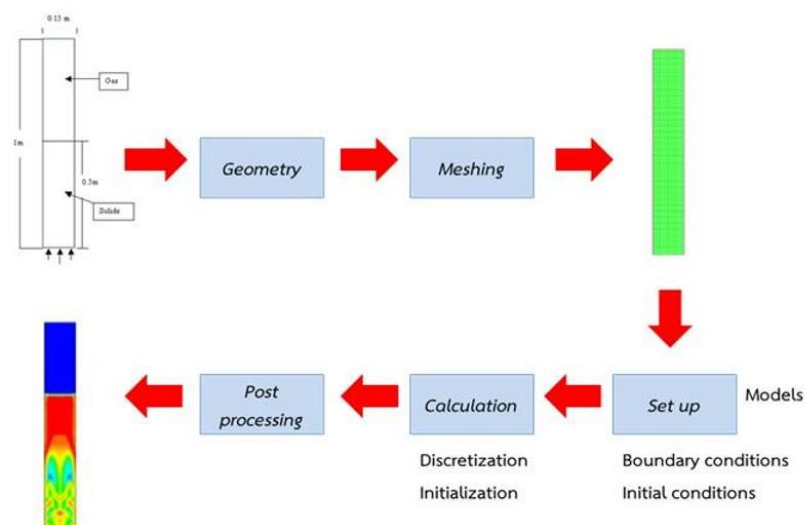
Abbas และ Mahmud (2017) ทำการศึกษารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำร่วมกับการดูดซับด้วยเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีนิกเกิล/อะลูมินาร้อยละ 18 โดยมวล และใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ศึกษาแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่งแบบไม่มีการสูญเสียความร้อน การศึกษาแบบจำลองนี้มีจุดมุ่งหมายศึกษาการถ่ายโอนมวลและการถ่ายโอนพลังงานของทั้งวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของแข็งในทิศทางตามแนวแกนของเครื่องปฏิกรณ์ ภาวะของความดันและอุณหภูมิที่ศึกษาจะเป็นสภาวะที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ผลการทดลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าสมมูลจากการคำนวณและข้อมูลของแบบจำลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา การเปลี่ยนแปลงของของมีเทนและไฮโดรเจนที่สภาวะความดัน 30 บาร์ 923 องศาเซลวิน และอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 3 พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงของมีเทนและไฮโดรเจน เท่ากับ ร้อยละ 65 และร้อยละ 85 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับผลก่อนหน้าที่อยู่ที่ร้อยละ 24 และร้อยละ 49 ตามลำดับ

Yang และคณะ (2015) ทำการศึกษากการจำลองการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองแก๊สร่วมกับการติดตั้งแผ่นปะทะ เพื่อพิจารณาการกระจายตัวของแก๊สและการลดการเกิดฟองแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยศึกษาจากพฤติกรรมการกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สทั้งก่อนและหลังใส่แผ่นปะทะ พบว่า เมื่อมีการใส่แผ่นปะทะจะทำให้การกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สมีความสม่ำเสมอขึ้น แก๊สกระจายตัวผ่านรูแผ่นปะทะทำให้เกิดการความปั่นป่วน ของแก๊สและแก๊สมีโอกาสสัมผัสกันในทุกๆชั้นของแผ่นปะทะ และในบริเวณรูแผ่นปะทะจะส่งผลให้ความเร็วของแก๊สสูงขึ้นกว่าบริเวณอื่น และค่าเฉลี่ยความเร็วของอนุภาคแก๊สยังคงต่ำกว่าค่าเฉลี่ยในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบปกติ สรุปได้ว่ากาใส่แผ่นปะทะเข้าไปช่วยยับยั้งการเกิดการย้อนกลับของของแก๊สได้

### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แบบจำลองการไหลเชิงคำนวณ

แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ของกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดได้ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ โดยนำต้นแบบตัวแปรต่างๆ และขนาดของเครื่องปฏิกรณ์มาจาก [2], [3] เพื่อศึกษาผลตัวแปรดำเนินการต่างๆ และศึกษาการจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ เปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ของกระบวนการ SE-SMR แบบปกติ โดยทำการเปรียบเทียบการเพิ่มจำนวนของแผ่นปะทะตั้งแต่ 1 ถึง 4 แผ่น พิจารณาที่สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจน ซึ่งแผ่นปะทะที่นำมาทำการทดลองเป็นลักษณะตามที่มีการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมและสามารถหาใช้งานได้ง่ายทั่วไป ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม GAMBIT ในการวาดรูปเครื่องปฏิกรณ์และออกแบบแผ่นปะทะสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด และใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิด์เบด โดยขั้นตอนของการทดลองแบบจำลองซีเอฟดี ลักษณะการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3. 1 ลำดับขั้นตอนของการทดลองการจำลองซีเอฟดีด้วยโปรแกรม ANSYS

FLUENT [18]

## 3.2 การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม GAMBIT

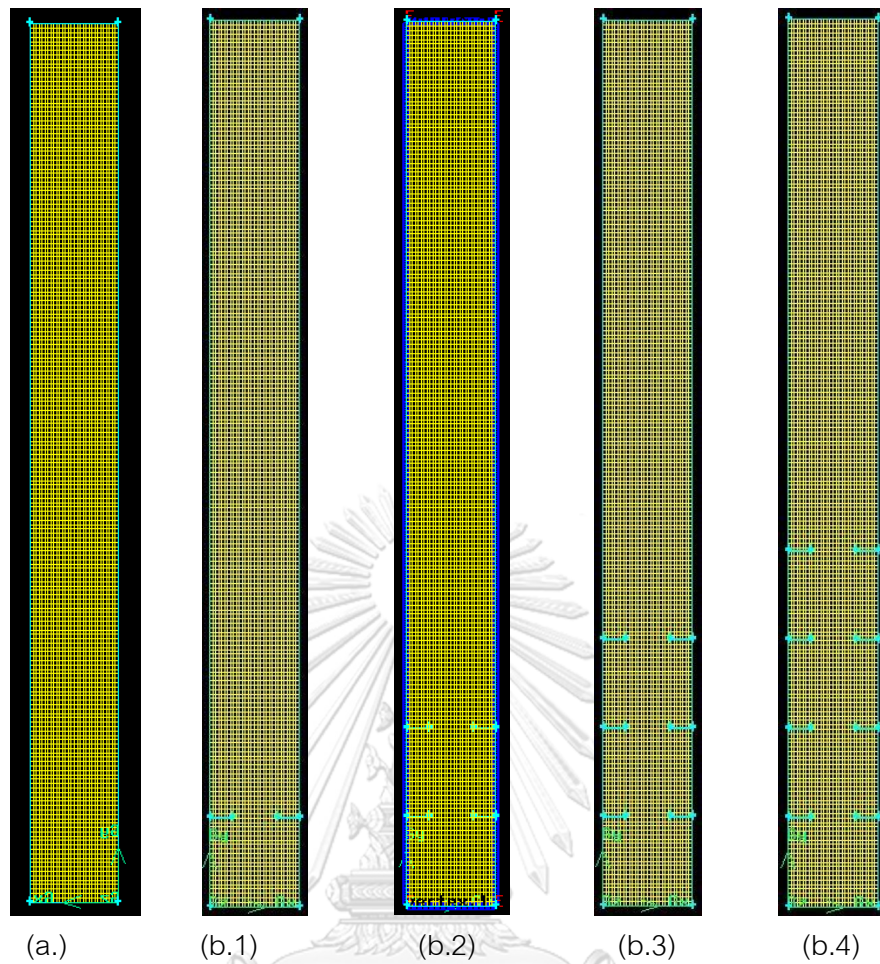
### 3.2.1 การสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบสองมิติ

สร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบสองมิติจาก [2] ด้วยโปรแกรม GAMBIT โดยให้ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ที่ 1 เมตร และความกว้างของเครื่องปฏิกรณ์ที่ 0.1 เมตร จากนั้นตั้งค่าเซลล์แบบ Quad โดยมีการเปรียบเทียบที่จำนวนเซลล์แตกต่างกัน มีการตั้งค่าเซลล์ที่ 3,000, 6,000, 9,000 และ 12,000 เซลล์ เพื่อทำการเปรียบเทียบหาจำนวนเซลล์ที่ต่ำที่สุดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง และทำการตั้งค่าขอบเขตที่ทางเข้าของแก๊สเป็นความเร็วขาเข้า ส่วนทางออกของแก๊สให้ทำการตั้งค่าเป็นความดันขาออก ซึ่งจะสามารถเห็นภาพสองมิติของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรม GAMBIT ได้ ตามรูปที่ 3.2 (a.)

### 3.2.2 การสร้างหรือติดตั้งแผ่นปะทะในเครื่องปฏิกรณ์แบบสองมิติ

งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบรูปทรงของแผ่นปะทะโดยเลือกใช้ขนาดความสูง 0.0012 เมตร และความกว้าง 0.025 เมตร ติดตั้งบริเวณด้านข้างของทั้งสองด้านของเครื่องปฏิกรณ์ และระยะห่างของแผ่นปะทะอยู่ที่ 10 เซนติเมตร ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการติดตั้งแผ่นปะทะตั้งแต่ 1-4 แผ่นตามรูปที่ 3.2 (b.1-b.4) ทำการตั้งค่าจำนวนเซลล์ที่ 6,000 เซลล์ และตั้งค่าขอบเขตทางเข้าของแก๊สเป็นความเร็วขาเข้า และทางออกของแก๊สให้กำหนดการตั้งค่าเป็นความดันขาออก





รูปที่ 3. 2 (a.) ภาพแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด (b.1-4)  
ภาพแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ

ตารางที่ 3. 1 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด

ตัวแปรดำเนินการจำลอง	ค่าที่ใช้ในการจำลอง
Reactor diameter (m)	0.1
Reactor height (m)	1.0
Plate width (m)	0.025
Plate height (m)	0.0012
Inlet boundary conditions	Velocity
Outlet boundary conditions	Pressure

### 3.3 สมการอนุรักษ์

#### 3.3.1 สมการอนุรักษ์มวล

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g \vec{v}_g) = 0 \quad (3.1)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (3.2)$$

เมื่อ

$\epsilon_g$  คือ สัดส่วนปริมาตรของวัฏภาคของแก๊ส

$\epsilon_s$  คือ สัดส่วนปริมาตรของวัฏภาคของแข็ง

$\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง

$\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแก๊ส

$\vec{v}_s$  คือ ความเร็วของวัฏภาคของแข็ง

$\vec{v}_g$  คือ ความเร็วของวัฏภาคของแก๊ส

$t$  คือ เวลา

#### 3.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\epsilon_g \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \epsilon_g \rho_g \vec{g} + \sum_{s=1}^n (K_{sg} (\vec{v}_s - \vec{v}_g) + \dot{m}_{sg} \vec{v}_{sg} - \dot{m}_{gs} \vec{v}_{gs}) \quad (3.3)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\varepsilon_s \nabla P - \nabla P_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \varepsilon_s \rho_s \vec{g} + \sum_{l=1}^n (K_{ls}(\vec{v}_l - \vec{v}_s) + \dot{m}_{ls} \vec{v}_{ls} - \dot{m}_{sl} h_{sl}) \quad (3.4)$$

เมื่อ

$\bar{\tau}_g$  คือ ความเค้นเทนเซอร์ของวัฏภาคของแก๊ส

$\bar{\tau}_s$  คือ ความเค้นเทนเซอร์ของวัฏภาคของแข็ง

$p$  คือ ความดันของวัฏภาคแก๊ส

$P_s$  คือ ความดันของวัฏภาคของแข็ง

$\vec{g}$  คือ แรงโน้มถ่วง

$K_{sg} \equiv K_{gs}$  คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างวัฏภาคแก๊สและของแข็ง

$K_{ls} \equiv K_{sl}$  คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างวัฏภาคของแข็งใดๆและของแข็ง

$l$  คือ วัฏภาคของแข็งใดๆ

$\dot{m}_{sg}$  คือ การถ่ายเทมวลสารจากวัฏภาคของแข็งไปยังวัฏภาคแก๊ส

$\dot{m}_{gs}$  คือ การถ่ายเทมวลสารจากวัฏภาคแก๊สไปยังวัฏภาคของแข็ง

$\dot{m}_{ls} \equiv \dot{m}_{sl}$  คือ การถ่ายเทมวลสารจากวัฏภาคของแข็งใดๆไปยังวัฏภาคของแข็ง

$\vec{v}_{sg}$  คือ ความเร็วระหว่างวัฏภาคของแข็งไปยังวัฏภาคแก๊ส

$\vec{v}_{gs}$  คือ ความเร็วระหว่างวัฏภาคแก๊สไปยังวัฏภาคของแข็ง

$\vec{v}_l$  คือ ความเร็วของวัฏภาคของแข็งใดๆ

$\vec{v}_{ls}$  คือ ความเร็วระหว่างวัฏภาคของแข็งใดๆไปยังวัฏภาคของแข็ง

$h_{sl}$  คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัฏภาคของแข็งและวัฏภาคของแข็งใดๆ

## 3.3.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

วัฏภาคของแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_g H_g + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g H_g)) = \varepsilon_g \frac{\partial P_g}{\partial t} + \bar{\tau}_g : \nabla \vec{v}_g + Q_{gs} \quad (3.5)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s H_s + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s H_s)) = \varepsilon_s \frac{\partial P_s}{\partial t} + \bar{\tau}_s : \nabla \vec{v}_s + Q_{sg} \quad (3.6)$$

เมื่อ

$H_g$  คือ เอนทาลปีจำเพาะของวัฏภาคแก๊ส

$H_s$  คือ เอนทาลปีจำเพาะของวัฏภาคของแข็ง

$Q_{gs}$  คือ ปริมาณของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของแข็ง

$Q_{sg}$  คือ ปริมาณของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัฏภาคของแข็งและวัฏภาคแก๊ส

## 3.3.4 สมการความสมดุลของมวลสารทางเคมี

วัฏภาคของแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_g y_{mg}) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g y_{mg}) = \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g D_m \nabla y_{mg}) - \dot{m}_m \quad (3.7)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s y_{ms}) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s y_{ms}) = \varepsilon_s M_{w,m} [\rho_{s,0} \sum_{r=1}^2 v_{mr} r_r + v_{m3} r_3] + \dot{m}_m \quad (3.8)$$

เมื่อ

$y_{mg}$  คือ สัดส่วนโดยมวลของแก๊ส

$y_{ms}$  คือ สัดส่วนโดยมวลของของแข็ง

$D_m$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลโดยการแพร่ของโมเลกุล

$\dot{m}_m$  คือ ฟลักซ์การถ่ายเทมวลชนิดสารเคมี

$M_{w,m}$  คือ น้ำหนักมวลโมเลกุล

$v_{mr}$  คือ สัมประสิทธิ์ปริมาณสัมพันธ์ของปฏิกิริยาใดๆ

$r_r$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาใดๆ

### 3.4 สมการเสริม

#### 3.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างวัฏภาคของแข็งและวัฏภาคแก๊ส

$$K_{sg} \equiv K_{gs} = \frac{\varepsilon_s \rho_s f}{\tau_s} \quad (3.9)$$

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18 \mu_g} \quad (3.10)$$

เมื่อ

$\tau_s$  คือ เวลาผ่อนคลายอนุภาค

สมการของ Syamlal-O'Brien model

$$K_{sg} = \frac{3\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g}{4v_{r,s}^2 d_s} C_D \left( \frac{Re_p}{V_{r,s}} \right) |\vec{v}_s - \vec{v}_g| \quad (3.11)$$

$$C_D = \left( 0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{\frac{Re_p}{v_{r,s}}}} \right)^2 \quad (3.12)$$

สำหรับระบบเป็นเนื้อเดียวกัน

$$\begin{aligned}
 K_{sg_{hom}}(\varepsilon_g, \varepsilon_s, Re_s) & \\
 &= 180 \frac{\mu_g \varepsilon_s^2}{d_p^2 \varepsilon_g} + 18 \frac{\mu_g \varepsilon_g^2 \varepsilon_s (1 + 1.5\sqrt{\varepsilon_s})}{d_p^2} \\
 &+ 0.31 \frac{\mu_g \varepsilon_s Re_s [\varepsilon_g^{-1} + 3\varepsilon_g \varepsilon_s + 8.4 Re_s^{-0.343}]}{d_p^2 \varepsilon_g [1 + 10^3 \varepsilon_s Re_s^{-0.5-2\varepsilon_s}]}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

เมื่อ

$v_{r,s}$  คือ ความสัมพันธ์ความเร็วเทอร์มินัลสำหรับเฟสของแข็ง

$C_D$  คือ ฟังก์ชันแดริค

#### 3.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างภูมิภาคของแข็งและภูมิภาคแก๊ส

$$h_{sg} \equiv h_{gs} = \frac{k_g Nu_s}{d_s} \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned}
 Nu_s &= (7 - 10\varepsilon_g + 5\varepsilon_g^2) \left(1 + 0.7 Re_s^{0.2} Pr^{\frac{1}{3}}\right) + (1.33 - \\
 &2.4\varepsilon_g + 1.2\varepsilon_g^2) Re_s^{0.7} Pr^{1/3}
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

$$Re_s = \frac{\rho_g \varepsilon_g d_p |\bar{v}_g - \bar{v}_s|}{\mu_g} \tag{3.16}$$

เมื่อ

$h_{gs} \equiv h_{sg}$  คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างภูมิภาคของแก๊สและภูมิภาคของแข็ง

$Nu_s$  คือ ตัวเลขนัสเซิลท์

$d_s$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

$Re_s$  คือ ตัวเลขเรย์โนลด์

$Pr$  คือ ตัวเลขพรันด์เทิล

### 3.4.3 สมการอุณหภูมิแกรนูลาร์

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s \theta_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = (-p_s I + \bar{\tau}_s) : \nabla \cdot \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \varphi_{gs} \quad (3.17)$$

เมื่อ

$\theta_s$  คือ อุณหภูมิแกรนูลาร์

$(-p_s I + \bar{\tau}_s) : \nabla \cdot \vec{v}_s$  คือ การสร้างพลังงานโดยเทนเซอร์ความเครียดที่เป็นของแข็ง

$\nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s)$  คือ การแพร่ของพลังงาน

$k_{\theta_s}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่

$\gamma_{\theta_s}$  คือ การสลายตัวของพลังงาน

$\varphi_{gs}$  คือ การแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างภูมิภาคของแก๊สและภูมิภาคของแข็ง

สมการสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของอุณหภูมิแกรนูลาร์

$$k_{\theta_s} = \frac{150 \rho_p d_p \sqrt{\pi \theta_s}}{384 (1 + e_{ss}) g_{ss}^0} \left[ 1 + \frac{6}{5} \varepsilon_s g_{ss}^0 (1 + e_{ss}) \right]^2 + 2 \rho_s d_p \varepsilon_s^2 g_{ss}^0 (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.18)$$

เมื่อ

$g_{ss}^0$  คือ ฟังก์ชันการกระจายของอนุภาคในแนวรัศมี

$e_{ss}$  คือ สัมประสิทธิ์การคืนสภาพ

## 3.4.4 ความเค้นเทนเซอร์ของวัสดุภาคของแข็ง

$$\bar{\tau}_s = \varepsilon_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \varepsilon_s \left( \lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (3.19)$$

เมื่อ

 $\bar{I}$  คือ ความเค้นเทนเซอร์เปียงเบน

## 3.4.5 สมการฟังก์ชันการกระจายของอนุภาคในแนวรัศมี

$$g_{ss}^0 = \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (3.20)$$

## 3.4.6 พลังงานกระจายการชน

$$\gamma_{\theta s} = \frac{12(1+e_{ss}^2)g_{ss}^0}{d_p \sqrt{\pi}} \rho_s \varepsilon_s^2 \theta_s^{\frac{3}{2}} \quad (3.21)$$

เมื่อ

 $\gamma_{\theta s}$  คือ พลังงานกระจายการชน

## 3.4.7 สมการความดันของวัสดุภาคของแข็ง

$$p_s = p_s \varepsilon_s \theta_s + 2\rho_s \varepsilon_s^2 g_{ss}^0 (1 + e_{ss}) \theta_s \quad (3.22)$$



## 3.4.8 สมการความหนืดเฉือนของวัฏภาคของแข็ง

$$\mu_s = \mu_s^{coll} + \mu_s^{kin} + \mu_s^{fric} \quad (3.23)$$

$$\mu_s^{coll} = \frac{4}{5} \rho_s \varepsilon_s d_p g_{ss}^0 (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.24)$$

$$\mu_s^{kin} = \frac{10 \varepsilon_s \rho_s d_p \sqrt{\theta_s \pi}}{96 \varepsilon_s g_{ss}^0 (1 + e_{ss})} \left[ 1 + \frac{4}{5} \varepsilon_s g_{ss}^0 (1 + e_{ss}) \right]^2 \quad (3.25)$$

$$\mu_s^{fric} = \frac{p_s \sin \varphi}{2 \sqrt{I_{2D}}} \quad (3.26)$$

เมื่อ

$\mu_s$  คือ ความหนืดเฉือนของวัฏภาคของแข็ง

$\mu_s^{coll}$  คือ ความหนืดของวัฏภาคของแข็งที่เกิดการชนกัน

$\mu_s^{kin}$  คือ ความหนืดของวัฏภาคของแข็งจลนพลศาสตร์

$\mu_s^{fric}$  คือ ความหนืดของวัฏภาคของแข็งที่เสียดทาน

$I_{2D}$  คือ ความเค้นเทนเซอร์เบี่ยงเบนของลำดับที่สองคงที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 3.4.9 สมการความหนืดรวมของวัฏภาคของแข็ง

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_p g_{ss}^0 (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.27)$$

เมื่อ

$\lambda_s$  คือ ความหนืดรวมของวัฏภาคของแข็ง

### 3.5 อัตราการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ

งานวิจัยนี้เลือกอัตราการเกิดปฏิกิริยาจาก [2] ในการตั้งค่าในโปรแกรม ANSYS FLUENT ซึ่งมีสมการของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เกิดขึ้นในกระบวนการ มีดังต่อไปนี้



จากสมการปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำเพิ่มด้วยการดูดซับ

ปฏิกิริยาที่ 3.28 หรือเรียกว่า ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ เป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างมีเทนและไอน้ำเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดอย่างสมบูรณ์ได้ต้องอยู่ในภาวะที่มีอุณหภูมิสูงในระดับหนึ่ง เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

ปฏิกิริยาที่ 3.30 เรียกว่า ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นไอ เกิดจากผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากปฏิกิริยาที่ 3.28 สามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน

และ ปฏิกิริยาที่ 3.29 เป็นปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำรวมกับปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นไอ

ดังนั้นจากสมการดังกล่าวทั้ง 3 สมการ สามารถแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังต่อไปนี้  
อัตราการเกิดปฏิกิริยา โดย [2] และ [19]

$$R_1 = \frac{k_1}{P_{H_2}^{2.5}(\text{DEN})^2} \cdot (P_{CH_4} P_{H_2O} - \frac{P_{H_2}^3 P_{CO}}{K_I}) \quad (3.31)$$

$$R_2 = \frac{k_2}{P_{H_2}^{3.5}(\text{DEN})^2} \cdot (P_{CH_4} P_{H_2O}^2 - \frac{P_{H_2}^4 P_{CO_2}}{K_{II}}) \quad (3.32)$$

$$R_3 = \frac{k_3}{P_{H_2}(\text{DEN})^2} \cdot (P_{CO} P_{H_2O} - \frac{P_{H_2} P_{CO}}{K_{III}}) \quad (3.33)$$

$$DEN = 1 + K_{CO}P_{CO} + K_{H_2}P_{H_2} + K_{CH_4}P_{CH_4} + \frac{K_{H_2O}P_{H_2O}}{P_{H_2}} \quad (3.34)$$

เมื่อ

ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา  $SMR_1$ ,  $SMR_2$  และ WGS ( $k_j$ )

$$k_1 = 9.708 \times 10^{-4} \exp \left[ \frac{-240100}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{648} \right) \right] \quad (3.35)$$

$$k_2 = 1.156 \times 10^{-4} \exp \left[ \frac{-243900}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{648} \right) \right] \quad (3.36)$$

$$k_3 = 1.2597 \times 10^{-6} \exp \left[ \frac{-67130}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{648} \right) \right] \quad (3.37)$$

ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา  $SMR_1$ ,  $SMR_2$  และ WGS

$$K_I = \frac{101325^2}{\exp(0.2513Z^4 - 0.3665Z^3 - 0.58101Z^2 - 27.1337Z - 3.277)} \quad (3.38)$$

$$K_{II} = K_I K_{III} \quad (3.39)$$

$$K_{III} = \exp(-0.29353Z^3 + 0.63508Z^2 + 4.1778Z + 0.31688) \quad (3.40)$$

ค่าคงที่สมดุลของสารเคมีใดๆ ( $K_i$ )

$$K_{CO} = 4.091 \times 10^{-4} \exp \left[ \frac{70650}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{648} \right) \right] \quad (3.41)$$

$$K_{H_2} = 2.960 \times 10^{-7} \exp \left[ \frac{82900}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{648} \right) \right] \quad (3.42)$$

$$K_{CH_4} = 1.791 \times 10^{-6} \exp \left[ \frac{38280}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{823} \right) \right] \quad (3.43)$$

$$K_{H_2O} = 0.4152 \exp \left[ \frac{-88680}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{823} \right) \right] \quad (3.44)$$

$P_{H_2}$  คือ ความดันของไฮโดรเจน

$P_{CH_4}$  คือ ความดันของมีเทน

$P_{H_2O}$  คือ ความดันของไอน้ำ

$P_{CO}$  คือ ความดันของคาร์บอนมอนอกไซด์

$P_{CO_2}$  คือ ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์

### 3.6 อัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน, CBN

ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน เป็นปฏิกิริยาที่เพิ่มตัวดูดซับเข้าไปในกระบวนการเพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาเดินไปข้างหน้า โดยเป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างของ 2 วัฏภาค คือ ของแข็งและของไหลที่อยู่ในสถานะแก๊ส แสดงสมการของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันดังต่อไปนี้



ปฏิกิริยาที่ 3.45 แคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนส่งผลให้อุณหภูมิภายในกระบวนการลดลง และจากสมการดังกล่าว สามารถแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจาก [19] ได้ดังต่อไปนี้

$$R_4 = k_4 \left( P_{CO_2} - P_{CO_2,eq} \right)^n S_0 (1 - X_{CaO}) \quad (3.46)$$

ที่

ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดสมดุล ( $P_{CO_2,eq}$ )

สำหรับ  $T > 1,173.15 \text{ K}$ ;

$$P_{CO_2,eq} = 1.216 \times 10^{12} \exp \left[ \frac{-19130}{T} \right] \quad (3.47)$$

สำหรับ  $T \leq 1,173.15 \text{ K}$ ;

$$P_{CO_2,eq} = 4.1918 \times 10^{12} \exp \left[ \frac{-20474}{T} \right] \quad (3.48)$$

ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา CBN

สำหรับ  $(P_{CO_2} - P_{CO_2,eq}) > 10,000 \text{ Pa}$ ;

$$k_4 = 1.04 \times 10^{-6} \exp \left[ \frac{-20400}{RT} \right] \quad (3.49)$$

$n = 0$

สำหรับ  $0 < (P_{CO_2} - P_{CO_2,eq}) \leq 10,000 \text{ Pa}$ ;

$$k_4 = 1.04 \times 10^{-10} \exp \left[ \frac{-20400}{RT} \right] \quad (3.50)$$

$n = 1$

สำหรับ  $(P_{CO_2} - P_{CO_2,eq}) \leq 0 \text{ Pa}$  แสดงว่าไม่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในระบบ

เมื่อ

$R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

$n$  คือ ระดับของความดันย่อย

### 3.7 การเขียนคำสั่งจากจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอีพอร์มิงมีเทนด้วยไอน้ำ

ในงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรม visual C++ ในการเขียนคำสั่ง เพื่อที่จะกำหนดปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยปฏิกิริยาที่เราสนใจมีทั้งหมด 4 ปฏิกิริยาที่กล่าวไว้ข้างต้น

### 3.8 การจำลองของไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอส์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ โดยการจำลองใช้ระบบ 2 มิติ กระบวนการเป็นฟลูอิดไอส์เบดแบบสองวัฏภาค คือ มีของไหลที่เป็นแก๊สผสม ได้แก่ มีเทน ไอน้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน และส่วนของแข็งจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ นิกเกิลและโคโลไมต์ โดยที่นิกเกิลทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และโคโลไมต์ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 ไมครอน และการป้อนแก๊สเข้าเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านล่าง จะมีส่วนประกอบของสารตั้งต้น ได้แก่ มีเทน ร้อยละ 20 และไอน้ำร้อยละ 80 ในภาวะที่ไม่คงตัว (Transient) นอกจากนั้นแล้วความสูงของเบดถูกตั้งค่าเริ่มต้นไว้ที่ 0.3 เมตร จะเป็นระยะที่ต้องการให้ของแข็งหรือตัวเร่งปฏิกิริยาบรรจุในความสูงดังกล่าว และอุณหภูมิที่เลือกให้อยู่ที่ 923 เคลวิน ความเร็วที่ 0.2 เมตรต่อวินาที ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบการไหลและปฏิกิริยาเคมีของงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองแบบออยเลอร์-ออยเลอร์พิจารณาอนุภาคของแข็งเสมือนกับเป็นของไหลอีกหนึ่งวัฏภาค และศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้จากตารางด้านล่าง

โดยผลของการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT จะถูกนำมาพิจารณาที่สัดส่วนโดยโมลแบบแห้งของมีเทน ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 3. 2 ตัวแปรดำเนินการต่างๆที่ใช้ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอส์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ [2]

ตัวแปรดำเนินการจำลอง	ค่าที่ใช้ในการจำลอง
Dolomite particle diameter ( $\mu\text{m}$ )	225
Ni-Cat. particle diameter ( $\mu\text{m}$ )	225
Dolomite particle density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2200
Ni-Cat. particle density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2100
Static bed height (cm)	10-35

ตัวแปรดำเนินการจำลอง	ค่าที่ใช้ในการจำลอง
Reforming temp. (K)	823-1023
Superficial gas velocity (m/s)	0.1-0.3
Steam to carbon molar feed ratio	1.5-4.0

ตารางที่ 3. 3 ตัวแปรของการจำลองซีเอฟดี [2]

Flow field	Transient
Gas composition	20% CH <sub>4</sub> , 80% H <sub>2</sub> O
Grid number cells	3000, 6000, 9000, 12000
Restitution coefficient	0.9
Time step (s)	0.001
Drag model	Syamlal-O'Brien

### 3.9 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.9.1 การจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคด์เบด

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 19R1 ในการทดลอง โดยเริ่มต้นจากการสร้าง case ของการจำลอง ด้วยการนำ mesh ที่ได้ถูกวาดไว้ด้วยโปรแกรม GAMBIT และคำสั่งที่ถูกเขียนด้วยภาษาซี มาทำการ compile รวมกันเป็น case ที่จะถูกนำมาใช้ในการตั้งค่าต่างๆต่อไป โดยเริ่มแรกทำการตั้งค่าเปรียบเทียบแบบจำลองตาม [2], [3] เป็นต้นแบบ และพิจารณาผลสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน หลังจากนั้นจะทำการศึกษาตัวแปรดำเนินการต่างๆ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3. 4 ตัวแปรดำเนินการที่ต้องการทดสอบในแบบจำลอง [2]

อุณหภูมิ (เคลวิน)	823, 873, 923, 973, 1023
ความเร็วของแก๊ส (เมตรต่อวินาที)	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.30
ความสูงของเบด (เซนติเมตร)	15, 20, 25, 30, 35
อัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอน (-)	1.5, 1.85, 2.33, 3.0, 4.0





ตารางที่ 3. 5 การจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่อง  
ปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด

ลำดับที่	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)	อัตราส่วนไอน้ำ ต่อคาร์บอน	ความสูงของเบด (เซนติเมตร)
1.1	823	0.2	4	30
1.2	873	0.2	4	30
1.3	923	0.2	4	30
1.4	973	0.2	4	30
1.5	1023	0.2	4	30
2.1	923	0.1	4	30
2.2	923	0.15	4	30
2.3	923	0.2	4	30
2.4	923	0.25	4	30
2.5	923	0.3	4	30
3.1	923	0.2	1.5	30
3.2	923	0.2	1.85	30
3.3	923	0.2	2.33	30
3.4	923	0.2	3	30
3.5	923	0.2	4	30
4.1	923	0.2	4	15
4.2	923	0.2	4	20
4.3	923	0.2	4	25
4.4	923	0.2	4	30
4.5	923	0.2	4	35

### 3.9.2 การจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคต์แบบติดตั้งแผ่นปะทะ

นำกรณีศึกษาที่ได้จากหัวข้อ 3.7.1 ติดตั้งแผ่นปะทะโดยใส่จำนวนแผ่นปะทะตั้งแต่ 1 2 3 และ 4 แผ่น เพื่อที่เปรียบเทียบระหว่างแบบไม่ติดตั้งแผ่นปะทะและแบบติดตั้งแผ่นปะทะ ซึ่งพิจารณาที่ผลสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนสูงที่สุด รวมทั้งพิจารณาผลสัดส่วนโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน โดยสรุปการจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคต์แบบติดตั้งแผ่นปะทะ ดังต่อไปนี้



ตารางที่ 3. 6 การจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่อง  
ปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ

ลำดับที่	จำนวนแผ่น ปะทะ	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)	อัตราส่วนไอน้ำ ต่อคาร์บอน	ความสูงของ เบด (เซนติเมตร)
5.1	1	923	0.2	4	30
5.2	2	923	0.2	4	30
5.3	3	923	0.2	4	30
5.4	4	923	0.2	4	30
6.1	2	823	0.2	4	30
6.2	2	873	0.2	4	30
6.3	2	923	0.2	4	30
6.4	2	973	0.2	4	30
6.5	2	1023	0.2	4	30
7.1	2	923	0.1	4	30
7.2	2	923	0.15	4	30
7.3	2	923	0.2	4	30
7.4	2	923	0.25	4	30
7.5	2	923	0.3	4	30
8.1	2	923	0.2	1.5	30
8.2	2	923	0.2	1.85	30
8.3	2	923	0.2	2.33	30
8.4	2	923	0.2	3	30
8.5	2	923	0.2	4	30
9.1	2	923	0.2	4	15
9.2	2	923	0.2	4	20
9.3	2	923	0.2	4	25
9.4	2	923	0.2	4	30
9.5	2	923	0.2	4	35

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

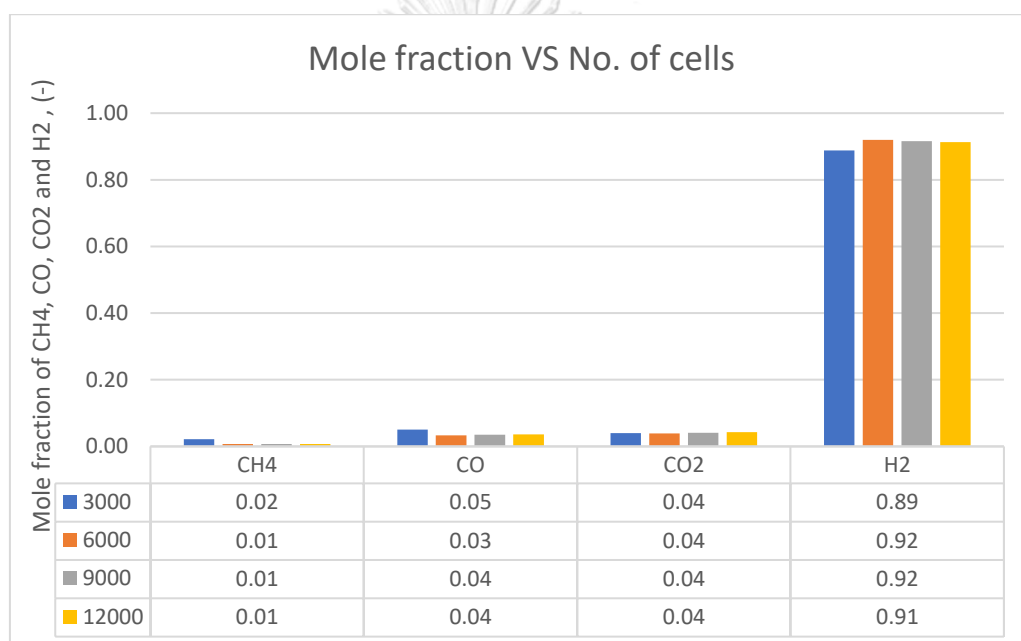
งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการติดตั้งแผ่นปะทะ ที่มีผลต่อสัดส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบด โดยผลการวิจัยมีการศึกษาเป็นไปตามลำดับขั้นตอนที่ได้นำเสนอตามบทข้างต้นดังต่อไปนี้

- 1) ผลการจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดแบบสองมิติ ตั้งค่าตามแบบงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วของ [2], [3] เพื่อเป็นต้นแบบในการนำมาใช้งาน หาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมและระยะเวลาที่เหมาะสม จากนั้นเทียบผลการจำลองระหว่างของต้นแบบ [2] และของการทดลองเพื่อปรับตั้งค่าให้ผลการวิจัยออกมาใกล้เคียงกันมากที่สุด
- 2) ผลจากตัวแปรดำเนินการต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็ว อัตราส่วนระหว่างไอน้ำและคาร์บอน และความสูงของเบด ที่มีผลต่อการจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบด
- 3) ผลการจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะตั้งแต่ 1-4 แผ่น เพื่อหาจำนวนแผ่นปะทะที่มีผลสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนสูงที่สุด
- 4) ผลจากตัวแปรดำเนินการต่างๆ สำหรับการจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะที่จำนวนแผ่นที่มีผลสัดส่วนโดยโมลมากที่สุด ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็ว อัตราส่วนระหว่างไอน้ำและคาร์บอน และความสูงของเบด

#### 4.1 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

##### 4.1.1 การหาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิโดซ์เบด

จำนวนเซลล์ที่ถูกตั้งค่าสำหรับแบบจำลองพลศาสตร์เชิงคำนวณ มีผลต่อผลลัพธ์ของการทดลอง ผลที่ได้จะมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับค่าที่ตั้งค่าของจำนวนเซลล์ งานวิจัยนี้จึงพิจารณาที่จำนวนกริดทั้งหมด 4 ค่า คือ 3,000, 6,000, 9,000 และ 12,000 เซลล์ โดยผลการทดลองแสดงตามรูปด้านล่าง ดังต่อไปนี้



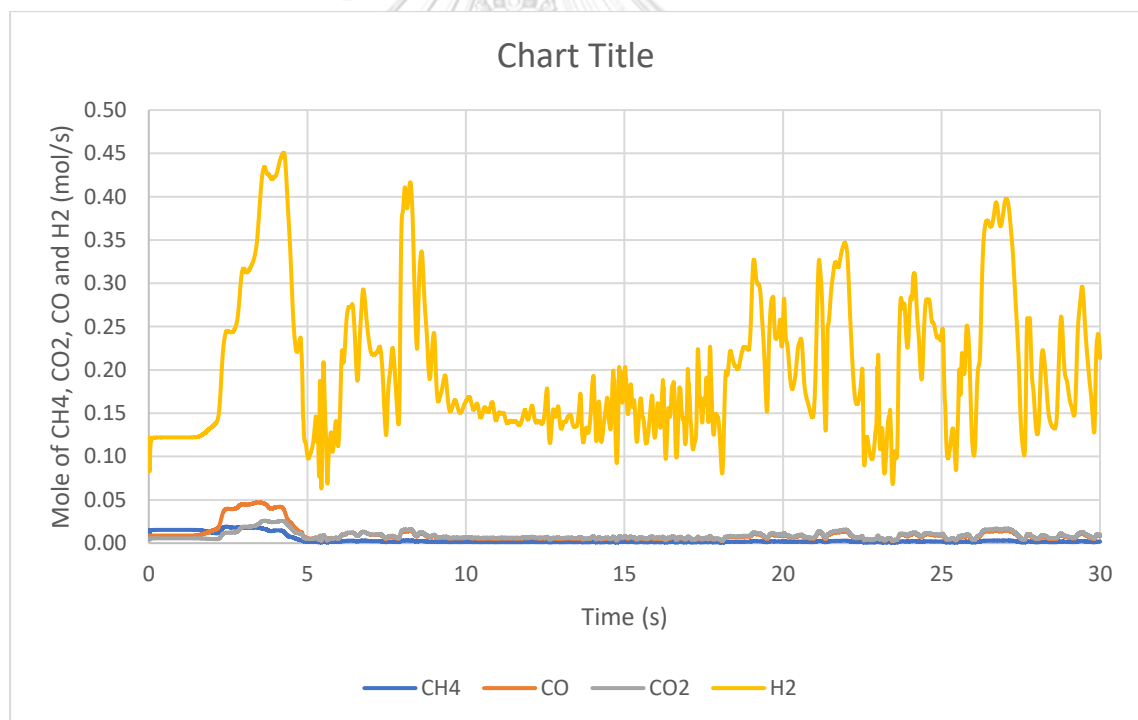
รูปที่ 4. 1 การเปรียบเทียบระหว่างขนาดของเซลล์ที่จำนวนต่างๆ และสัดส่วนโดยโมลของมีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน

จำนวนเซลล์ที่ต่ำที่สุดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง จากรูปที่ 4.1 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์กับสัดส่วนโดยโมลของมีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน จำนวนของเซลล์ที่ 3,000, 6,000, 9,000 และ 12,000 เซลล์ ได้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเท่ากับ 0.89, 0.92, 0.92 และ 0.91 ตามลำดับ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าผลที่เซลล์จำนวน 6,000 เซลล์ เป็นจำนวนเซลล์ที่น้อยที่สุดที่เมื่อเพิ่มจำนวนเซลล์แล้ว

ผลของสัดส่วนโดยโมลของสารแต่ละชนิดได้ค่าใกล้เคียงเดิม ดังนั้นจะถูกนำมาใช้พิจารณาในลำดับขั้นต่อไป

#### 4.1.2 การแสดงผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาฟรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบไม่มีการติดตั้งแผ่นปะทะ

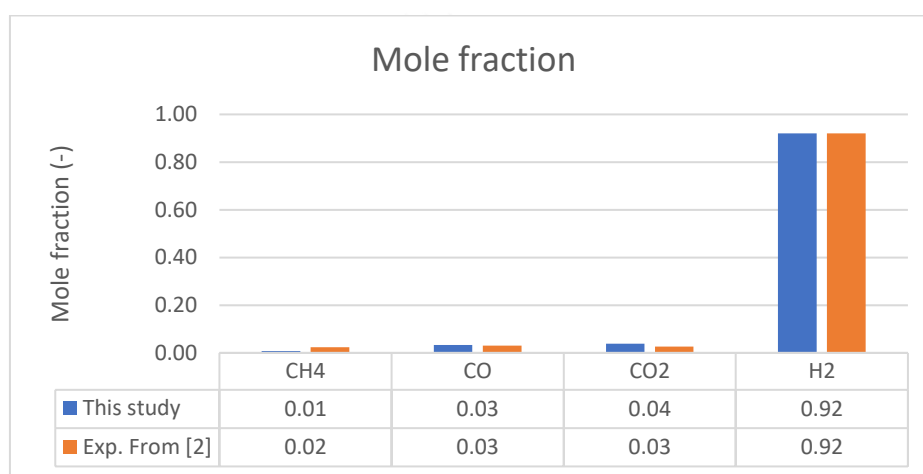
เวลาทั้งหมดที่ใช้สำหรับการทดลองจากต้นแบบ [2] คือที่ 30 วินาที ซึ่งผลการทดลองจะพิจารณาที่จำนวนโมลของไฮโดรเจนที่เข้าสู่สถานะเสมือนคงตัว ซึ่งจากการทดลองได้ยึดถือตามต้นแบบโดยทำการทดลองที่ time step เท่ากับ 0.001 และจำนวนของ time step เท่ากับ 30,000 step หรือเป็นเวลา 30 วินาที



รูปที่ 4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมลของไฮโดรเจนและเวลาของ Time step ที่สภาวะอุณหภูมิ 923 เคลวิน ความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที อัตราส่วนของไอน้ำและคาร์บอนที่ 4.0 และความสูงของเบดที่ 30 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.2 หากพิจารณาที่โมลของไฮโดรเจนพบว่า การเกิดไฮโดรเจนเริ่มเข้าสู่สภาวะเสถียรณค่าตัว ที่ประมาณ 20 วินาที โดยค่าเฉลี่ยของจำนวนโมลของไฮโดรเจนอยู่ที่ประมาณ 0.2 mol/s ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะใช้ช่วงตั้งแต่ 20 ถึง 30 วินาที เป็นค่าเฉลี่ยสำหรับศึกษาสัดส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ในการทดลองต่อไป

#### 4.1.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลของสัดส่วนโดยโมลของมีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ระหว่างผลจากต้นแบบ [2] และผลที่ได้จากงานวิจัยนี้



รูปที่ 4. 3 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ระหว่างผลจากต้นแบบ [2] และผลจากงานวิจัยนี้

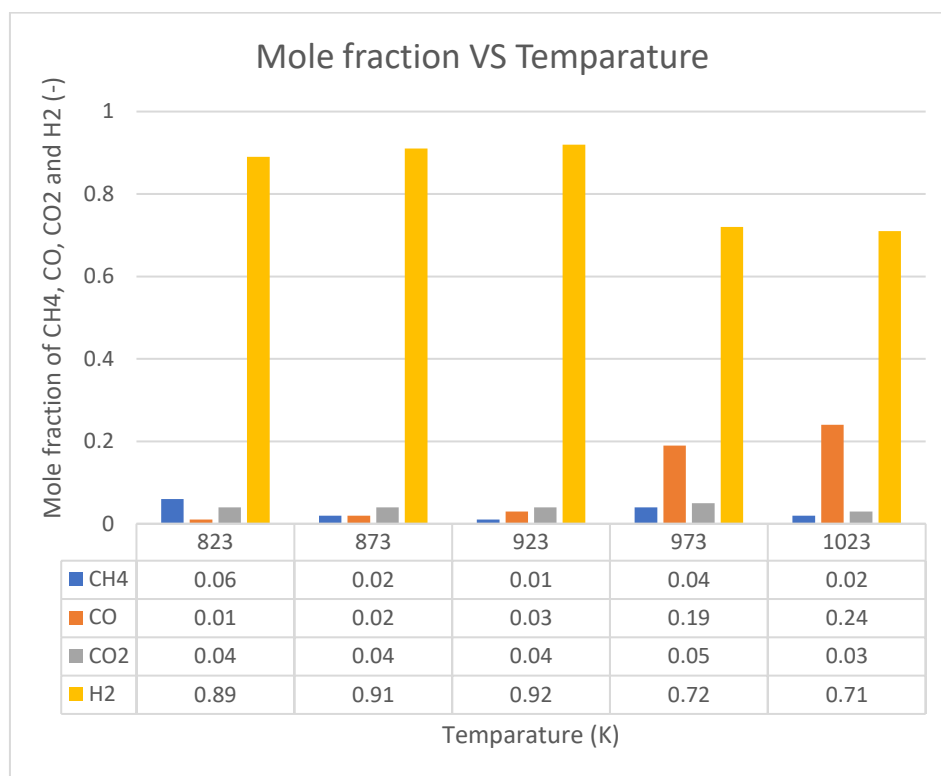
จากรูปที่ 4.3 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบของผลการทดลองกับผลจากต้นแบบ [2] พบว่า เมื่อเลือกใช้จำนวนเซลล์ที่ 6,000 เซลล์ และ ตัวแทนค่าเฉลี่ยที่ 20-30 วินาที ผลของสัดส่วนโดยโมลมีความใกล้เคียงกับต้นแบบ จะเห็นได้จากตารางแสดงผลพบว่า สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน จากต้นแบบอยู่ที่ 0.92, 0.03 และ 0.03 ตามลำดับ ในขณะที่ผลจากการทดลองได้สัดส่วนโดยโมลอยู่ที่ 0.92, 0.04 และ 0.03 ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นั้น มีความเหมาะสมที่จะถูกนำไปใช้ในงานวิจัยขั้นต่อไปได้

#### 4.2 ผลการทดลองตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่อการจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิง มีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด

เนื่องจากได้จำนวนเซลล์ที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้นแล้วที่ 6,000 เซลล์ และ ใช้ผลเฉลี่ยที่ 20 ถึง 30 วินาที ได้ผลที่ตรงกันกับต้นแบบแล้วนั้น สิ่งที่ถูกพิจารณาต่อจากนี้คือตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยา ซึ่งอุณหภูมิเป็นตัวแปรหลักที่หลายๆงานวิจัยได้ให้ความสำคัญและพิจารณาศึกษา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นตามด้วยเช่นเดียวกัน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นแล้วยังมีตัวแปรอื่นๆ ที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจน ไม่ว่าจะเป็นเวลาที่ของแข็งและแก๊สเกิดการสัมผัสกัน รวมทั้งในเรื่องของความเร็วของแก๊ส และความสูงของเบดที่มีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกัน เมื่อความสูงของเบดเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความเร็วของแก๊สลดลงก็จะช่วยเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนให้สูงขึ้น [20] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิตั้งแต่ 823 ถึง 1023 องศาเซลเซียส ความเร็วของแก๊สตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.3 เมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างไอน้ำและคาร์บอนที่ 1.5 ถึง 4.0 และความสูงของเบดที่ 15 ถึง 35 เซนติเมตร



#### 4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบด

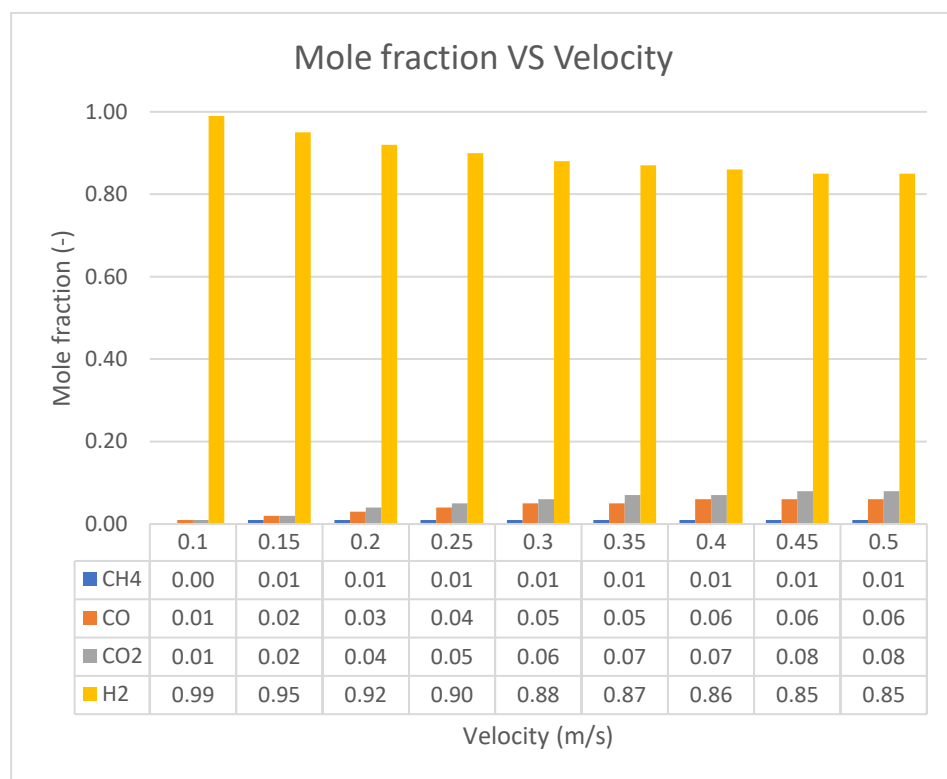


รูปที่ 4.4 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 823 ถึง 1023 เคลวิน

งานวิจัยที่ผ่านมาได้อ้างว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรหลักที่สำคัญสำหรับปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำ [2] จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจาก 823 K ไปยัง 923 K สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น เพราะปฏิกิริยา CBN เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และ เกิดปฏิกิริยา WGS ได้ดี เนื่องจากทั้งสองปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ชอบเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่อุณหภูมิสูง [1] แต่หากทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไป 973 K และ 1023 K ผลปรากฏว่าสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนลดลง เนื่องจากในระบบมีการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น จากปฏิกิริยา SMR ชอบเกิดปฏิกิริยาในที่มีอุณหภูมิสูง และ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวดูดซับเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำลง [21] ดังนั้นอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์จะต้องอยู่ในช่วงที่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาของทั้งสามปฏิกิริยา เพื่อให้อยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้จึงพบว่า

คุณสมบัติที่เหมาะสมแก่การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วยไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรส์เบดอยู่ที่ 923 K ได้ผลของสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนที่ 0.92 ซึ่งสอดคล้องเช่นเดียวกันกับ [1]

#### 4.2.2 ผลของความเร็วต่อการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรส์เบด

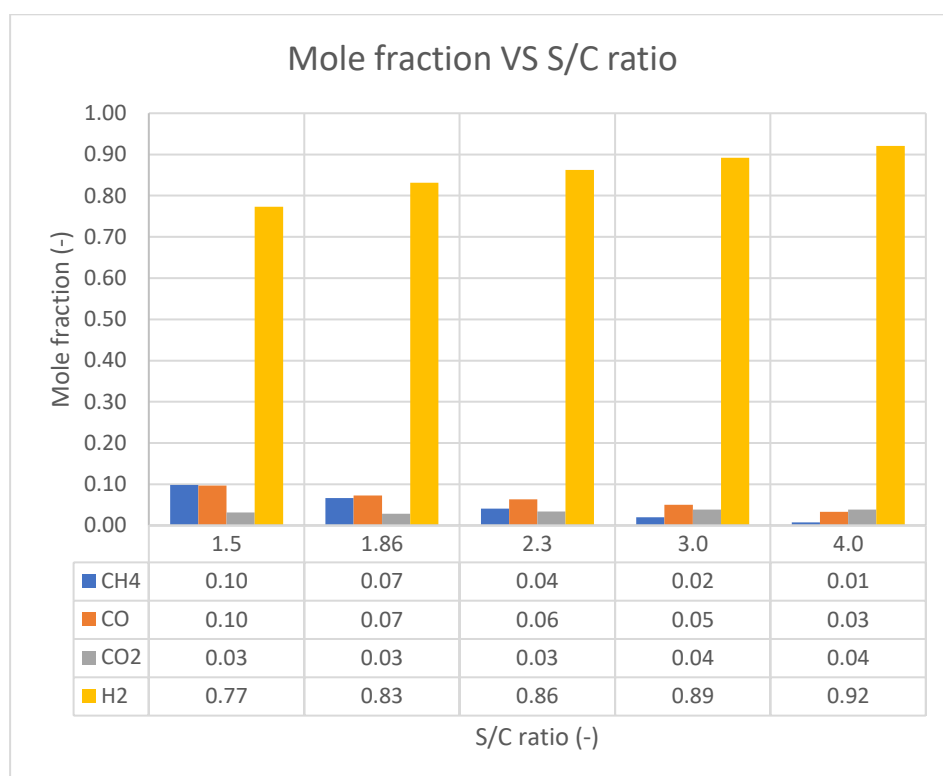


รูปที่ 4.5 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่ความเร็วตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 เมตรต่อวินาที

ความเร็วของแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างเห็นได้ชัด จากรูปที่ 4.5 จะสังเกตได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มความเร็วของแก๊สให้สูงขึ้น จะส่งผลให้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนลดลง ในขณะที่สัดส่วนโดยโมลของผลิตภัณฑ์ของผลพลอยได้จะเพิ่มสูงขึ้น เพราะว่าเมื่อแก๊สเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง เวลาการสัมผัสกันระหว่างแก๊สในเครื่องปฏิกรณ์และตัวเร่ง

ปฏิกิริยารวมทั้งตัวดูดซับต่ำลง [3] จากการทดลองจะพบว่า ที่ความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที จะได้ค่าสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนอยู่ที่ 0.99

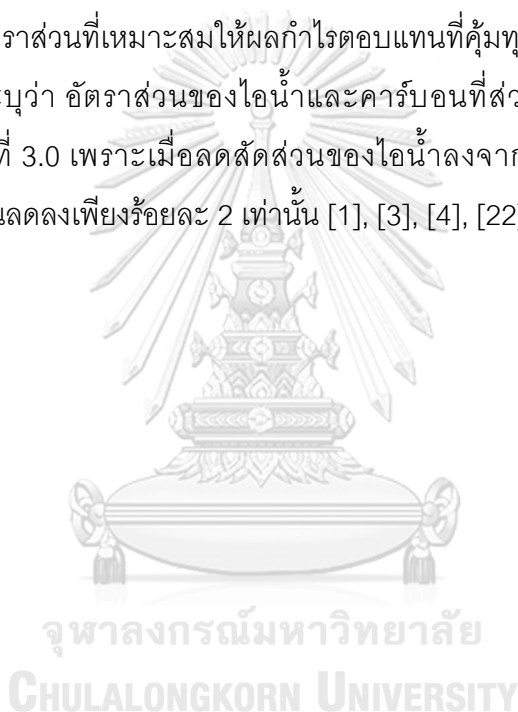
#### 4.2.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนต่อการเกิดปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบด



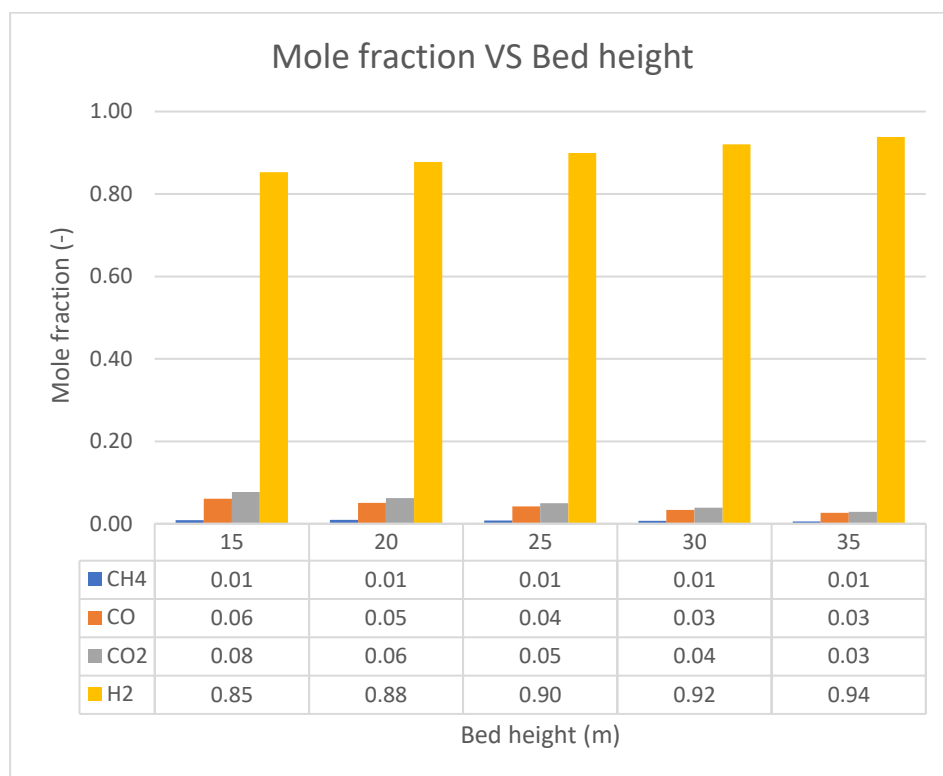
รูปที่ 4. 6 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่สัดส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนตั้งแต่ 1.5 ถึง 4.0

อัตราส่วนของสารที่ถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างกันก็จะส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ต้องการและผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ที่เกิดขึ้น จากสมการก่อนหน้านี้นี้แสดงให้เห็นได้ว่าไอน้ำเป็นสารตั้งต้นของทั้งปฏิกิริยา SMR และ WGS ดังนั้น ปริมาณของไอน้ำควรมากเกินพอสำหรับทั้งสองปฏิกิริยา จากรูปที่ 4.6 ซึ่งให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาทั้งสองดำเนินการไปทางด้านขวาเกิดเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น [22] เนื่องจากในกระบวนการมี

การป้อนไอน้ำเข้าไปมากเกินไปที่จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยา SMR และ ปฏิกิริยา WGS เกิดการเลือกเกิดของไฮโดรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และอีกผลพลอยได้ในเชิงบวกต่อการมีสัดส่วนของไอน้ำในระบบคือ ช่วยลดโอกาสของการเกิดการสะสมของคาร์บอนบนพื้นผิวของอนุภาคของแข็งหรือตัวเร่งปฏิกิริยา [1] แสดงว่าสัดส่วนของไอน้ำเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนที่ 4.0 ให้ผลของสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนมากที่สุดที่ 0.92 แต่อีกแง่มุมหนึ่งพบว่า ความชันของกราฟสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนยังไม่ค่อยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นอาจจะต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมในเรื่องของต้นทุนสารตั้งต้น เชื้อเพลิง และพลังงานที่จะถูกใช้ในกระบวนการผลิต เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้รับ อัตราส่วนที่เหมาะสมให้ผลกำไรตอบแทนที่คุ้มทุนมากกว่ากัน [22, 23] โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาระบุว่า อัตราส่วนของไอน้ำและคาร์บอนที่ส่วนใหญ่ถูกเลือกใช้ในงานอุตสาหกรรมนั้นคือที่ 3.0 เพราะเมื่อลดสัดส่วนของไอน้ำลงจาก ร้อยละ 80 เป็น ร้อยละ 75 ปริมาณของไฮโดรเจนลดลงเพียงร้อยละ 2 เท่านั้น [1], [3], [4], [22]



#### 4.2.4 ผลของความสูงของเบดต่อการเกิดปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด



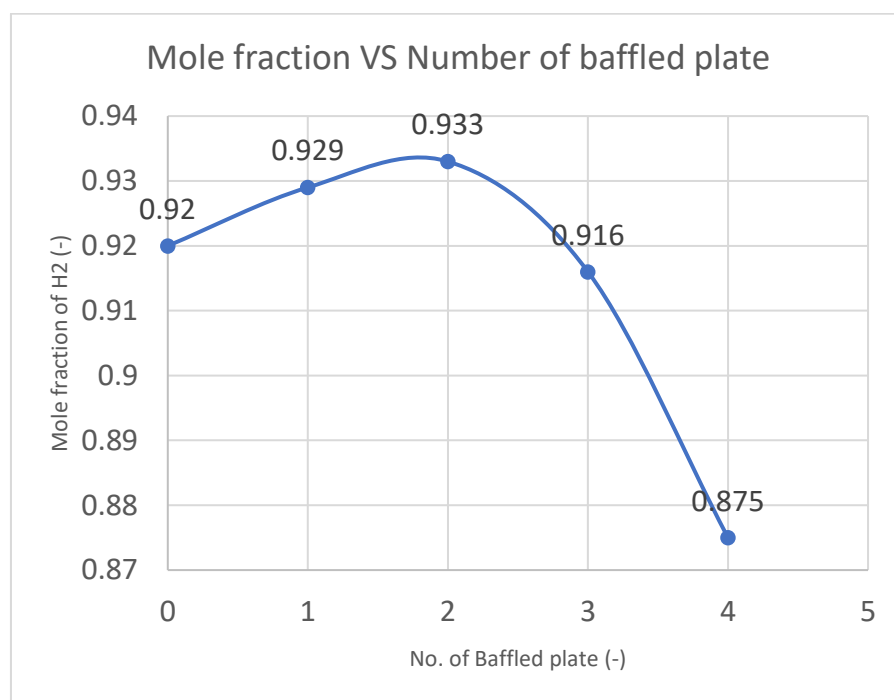
รูปที่ 4. 7 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่ความสูงของเบดตั้งแต่ 15 ถึง 35 เซนติเมตร

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากรูปที่ 4.7 ความสูงเบดช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำได้ดี เมื่อมีพื้นที่ของเบดที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น ส่งผลให้โอกาสในการสัมผัสกันระหว่างของแข็งและของไหลเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ผลของการทดลองชี้ให้เห็นว่า ปฏิกิริยา SMR และ WGS เกิดปฏิกิริยาได้ดี เนื่องจากการการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ช่วยส่งผลให้ปฏิกิริยาเดินไปข้างหน้า ได้ปริมาณของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

### 4.3 ผลการจำลองซีเอฟดีของรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ

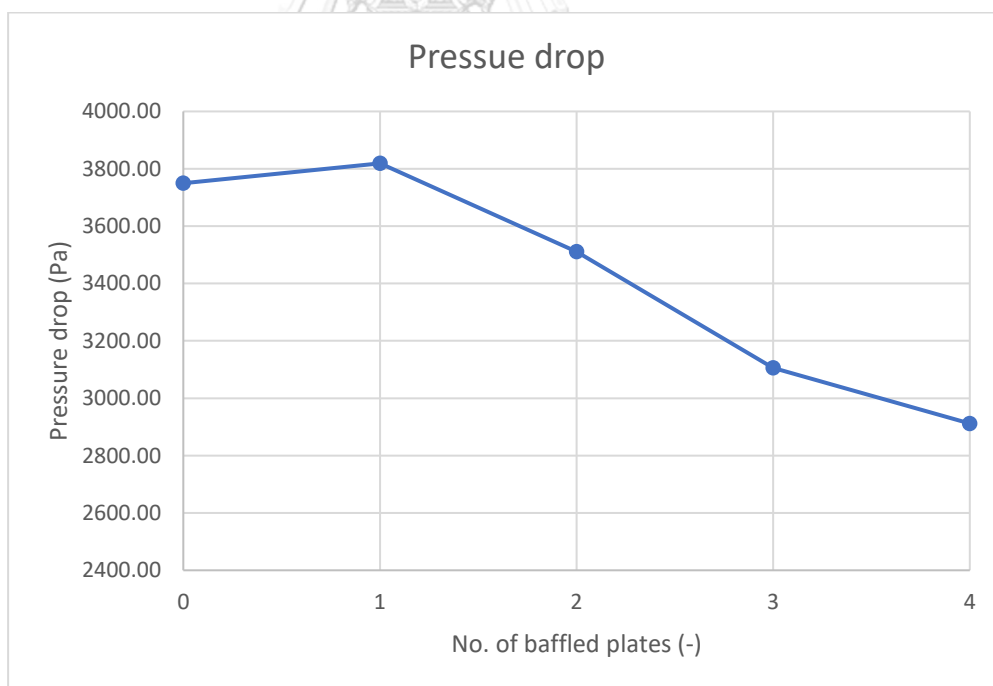
4.3.1 ผลของการติดตั้งแผ่นปะทะต่อการเกิดปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด



รูปที่ 4. 8 สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนและจำนวนของแผ่นปะทะที่ถูกติดตั้งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด ที่อุณหภูมิ 923 K ที่ความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่ 4.0 และความสูงของเบด 30 เซนติเมตร

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการติดตั้งแผ่นปะทะเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อช่วยลดการเกิดการย้อนกลับของของแข็ง ลดการเกิดและขนาดของฟองแก๊สในกระบวนการ และเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟองแก๊สให้ดียิ่งขึ้น การติดตั้งแผ่นปะทะเพิ่มเติมมีความแตกต่างจากแบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะอย่างมีนัยสำคัญ ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการติดตั้งแผ่นปะทะในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด ลักษณะหรือรูปร่างของแผ่นปะทะอาจจะแตกต่างกันออกไป ตามแต่ว่านักวิจัยได้ออกแบบ [24], [25] การติดตั้งแผ่นปะทะเป็นการเปลี่ยนทิศทางการไหลภายในเบด เมื่อฟองแก๊สชนกับแผ่นปะทะจะเกิดการแตกออกเป็นขนาดที่

ได้ทดลอง ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้ ในการพัฒนาแบบจำลอง CFD ของ SE-SMR ที่ติดตั้งแผ่นปะทะในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด รูปที่ 4.8 การติดตั้งแผ่นปะทะส่งผลให้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น โดยเมื่อมีการติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนอยู่ที่ 0.933 และหลังจากเพิ่มจำนวนของแผ่นปะทะที่ 3 และ 4 แผ่น พบว่า ปฏิกริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ มีแนวโน้มเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่จำนวน 4 แผ่นปะทะสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนลดลงไปถึง 0.875 ซึ่งต่ำกว่าแบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะ เนื่องจากด้านใต้ของแผ่นปะทะพบว่า มีช่องว่างเกิดขึ้นในทุกๆชั้นของแผ่นปะทะ และ ผลแสดงความดันลดของการติดตั้งแผ่นปะทะในรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า การติดตั้งแผ่นปะทะที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ความดันลดต่ำลง เนื่องจากของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ นอกจากจำนวนของแผ่นปะทะที่จะส่งผลต่อการเกิดปฏิกริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์แล้ว ยังมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาถึงตัวแปรอื่นๆ ของแผ่นปะทะ ไม่ว่าจะเป็น ลักษณะของแผ่นปะทะ อย่างเช่น ครึ่งวงกลม สี่เหลี่ยม และแนวในการติดตั้ง รวมทั้งแผ่นปะทะมีการเจาะรูเพื่อช่วยในเรื่องของความดันลดลง เป็นต้น [26]



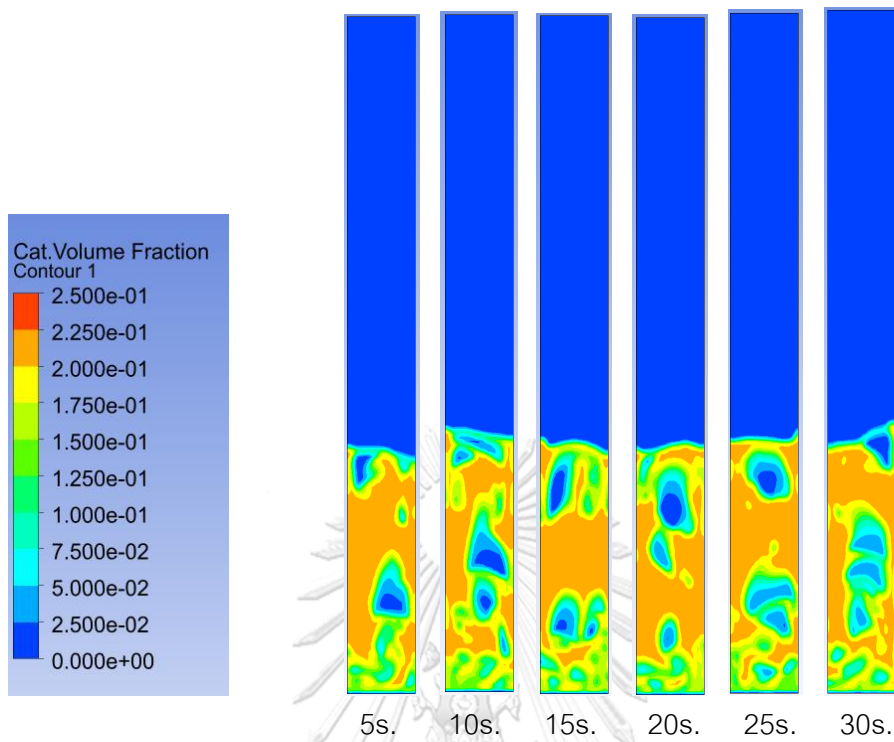
รูปที่ 4. 9 ความดันลดในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ที่อุณหภูมิ 923 K ที่ความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่ 4.0 และความสูงของเบด 30 เซนติเมตร

เพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจนมากขึ้น โดยพิจารณาที่สัดส่วนปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา จากรูปที่ 4.10 แสดงผล contours สัดส่วนโดยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการติดตั้งแผ่นปะทะตั้งแต่ 1-4 แผ่น และแบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอุทกพลศาสตร์ พบว่า เมื่อทำการติดตั้งแผ่นปะทะ ส่งผลช่วยให้การเกิดฟองแก๊สในกระบวนการมีขนาดฟองแก๊สที่เล็กลง เนื่องจากเมื่อฟองแก๊สชนกับแผ่นปะทะหรือผ่านรูแผ่นปะทะทำให้ฟองแก๊สเกิดการแตกออกเป็นฟองแก๊สขนาดเล็กลง ซึ่งมีความสอดคล้องตรงกันกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ [25], [27] และบริเวณด้านล่างของแผ่นปะทะ ความหนาแน่นของแก๊สจะเจือจางลง ในขณะที่ของแข็งที่เคลื่อนที่ด้วยแก๊สจะมีความหนาแน่นสูงที่ด้านบนของแผ่นปะทะ [24] แต่ที่เห็นอย่างชัดเจนคือ เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นปะทะเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ พบว่า ความหนาแน่นของของแข็งลดน้อยลงตามจำนวนแผ่นปะทะ และของแข็งจะมีความหนาแน่นอยู่บริเวณช่วงขอบผนังของเครื่องปฏิกรณ์

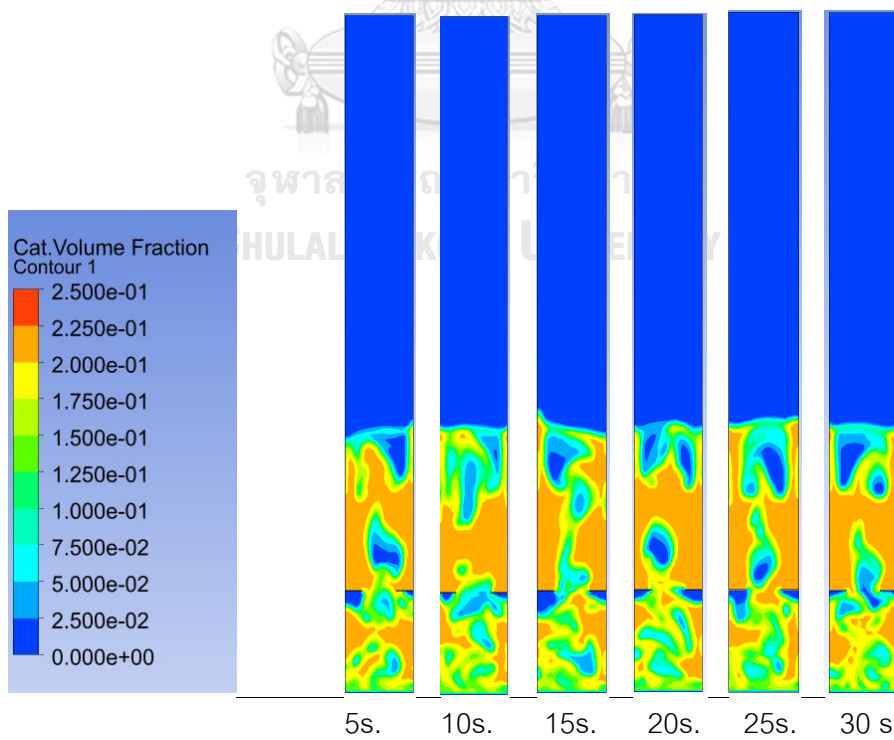




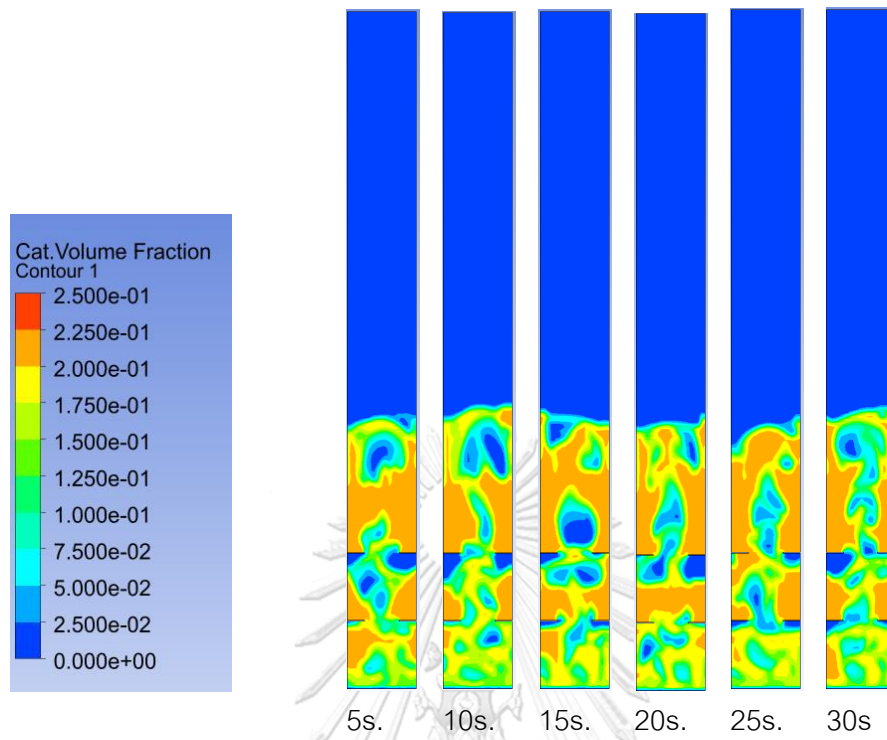
a)



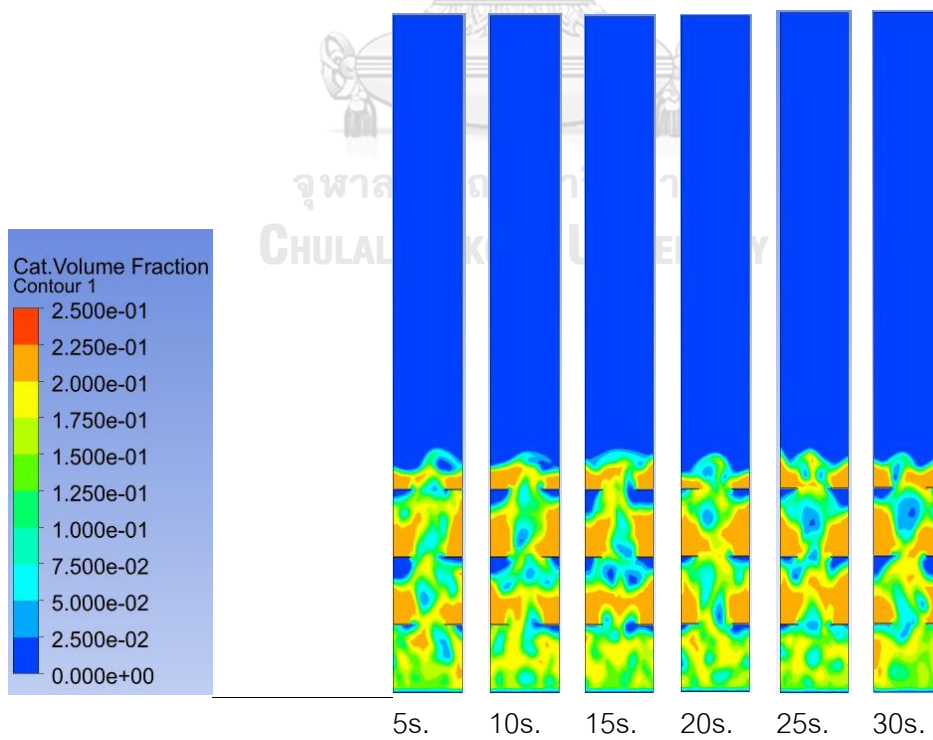
b)



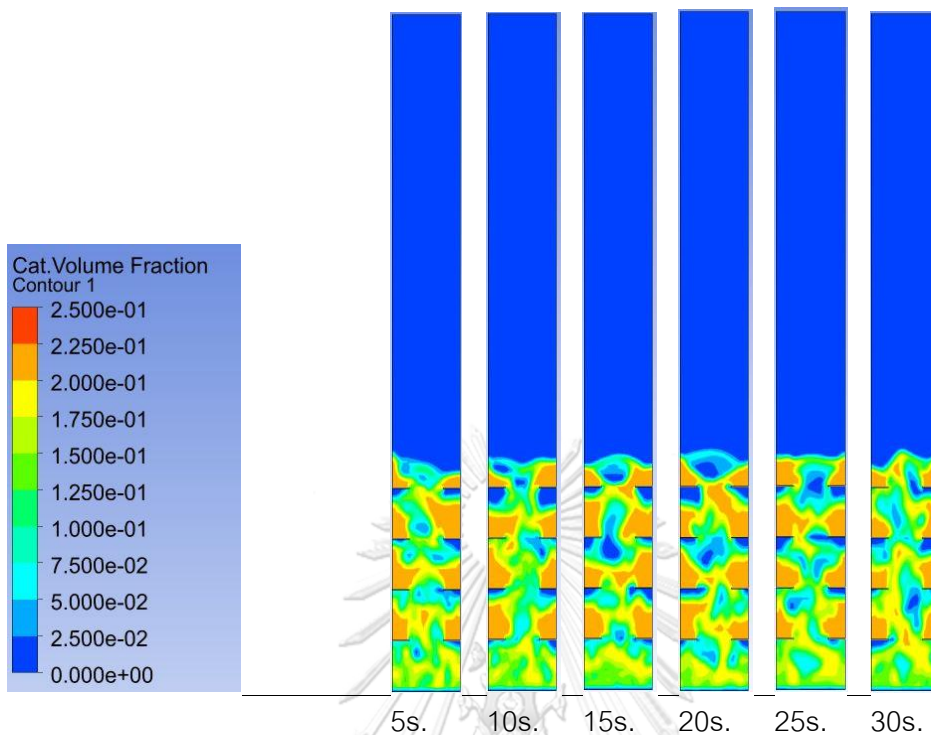
c)



d)



e)



รูปที่ 4. 10 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา

(a.) ไม่มีการติดตั้งแผ่นปะทะ (b.) ติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 1 แผ่น

(c.) ติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น (d.) ติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 3 แผ่น

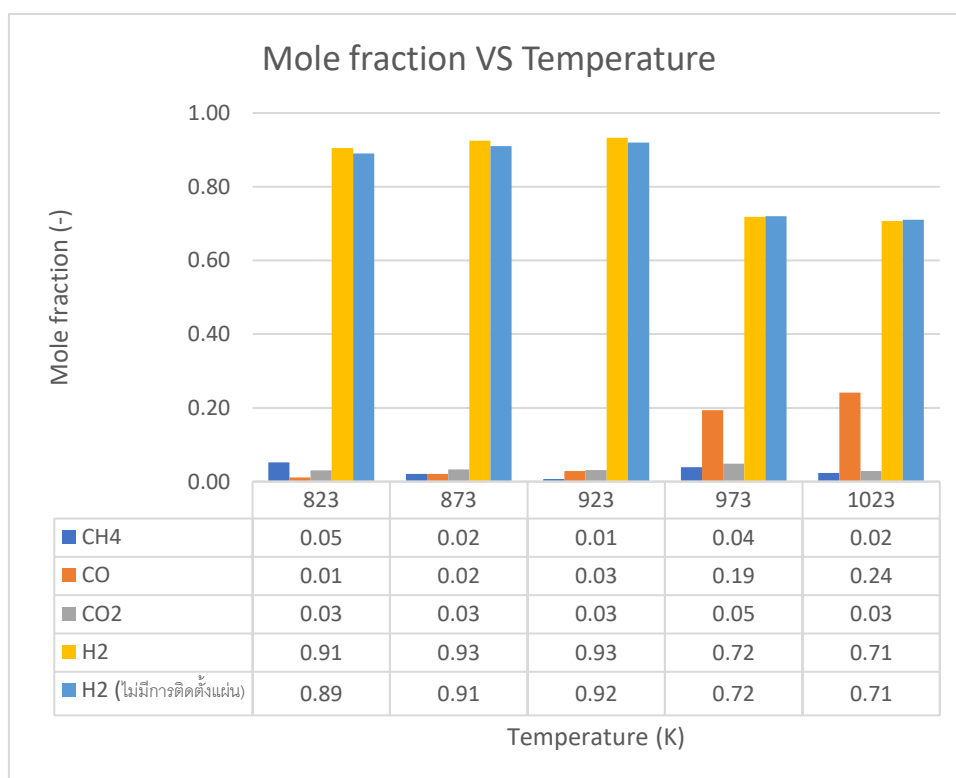
และ (e.) ติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 4 แผ่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.3.2 การเปรียบเทียบตัวดำเนินการต่างๆ ที่มีการติดตั้งแผ่นปะทะในเครื่องปฏิกรณ์

เนื่องจากการทดลองก่อนหน้านี้พบว่า การใส่แผ่นปะทะเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์จำนวน 2 แผ่นที่ติดกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองด้าน จะช่วยให้ได้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนมากที่สุด ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงความแตกต่างของตัวแปรดำเนินการต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันว่ามีความแตกต่างหรือมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับเครื่องปฏิกรณ์ที่ปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะหรือไม่ และจะส่งผลดีมาน้อยเพียงใด หากในสถานการณ์จริง มีความต้องการลงทุนติดตั้งแผ่นปะทะ สามารถนำการทดลองนี้ใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาและตัดสินใจได้ในอนาคต

4.3.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ

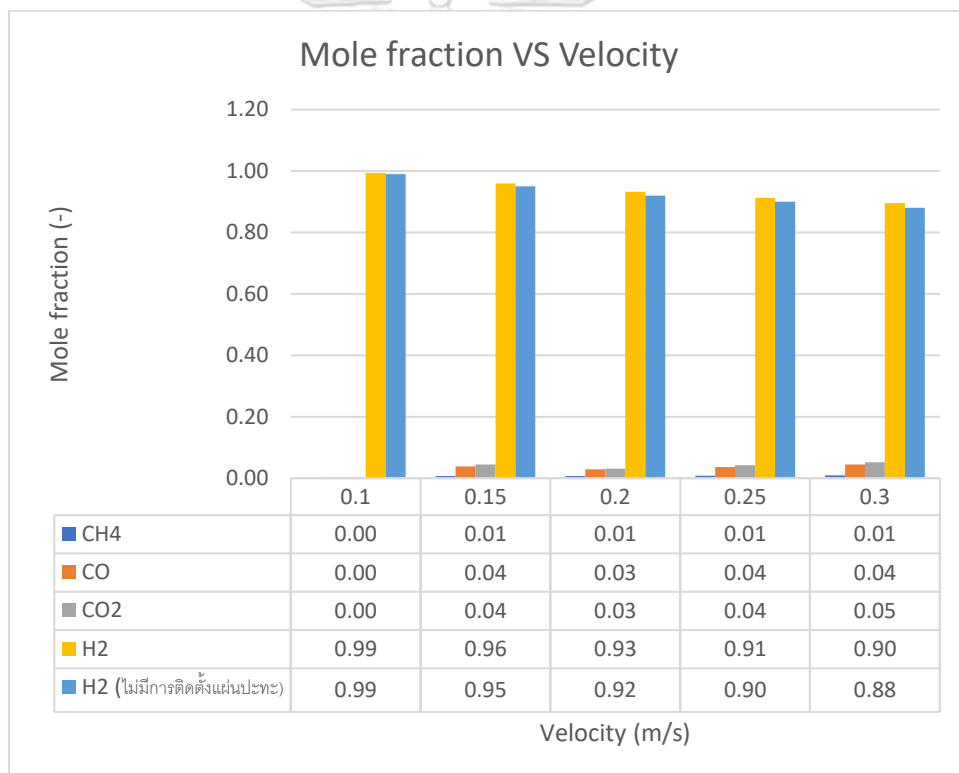


รูปที่ 4.11 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 823 ถึง 1023 เคลวิน และแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น

จากรูปที่ 4.11 สามารถอธิบายว่า ถึงแม้จะมีการติดตั้งแผ่นปะทะเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ แต่ตัวแปรดำเนินการอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ 823 ถึง 1023 K ยังคงมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับแบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะ คือ ที่อุณหภูมิ 923 K เป็นอุณหภูมิที่ให้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนที่สูงที่สุดอยู่ที่ 0.93 สำหรับอัตราส่วนไอน้ำและคาร์บอนเท่ากับ 4.0 ในขณะที่งานวิจัยที่ผ่านมาของ [28] ได้บอกไว้ว่า อุณหภูมิ 923 K ได้ผลของสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนสูงที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 87.3 ในภาวะอัตราส่วนไอน้ำและคาร์บอนเท่ากับ 3.0 แสดงว่า นอกจากอุณหภูมิแล้วนั้น ตัวแปรสัดส่วนของไอน้ำที่ถูกป้อนเข้าก็มีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ซึ่งจะถูกกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป ทั้งนี้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 973 K แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนลดลง

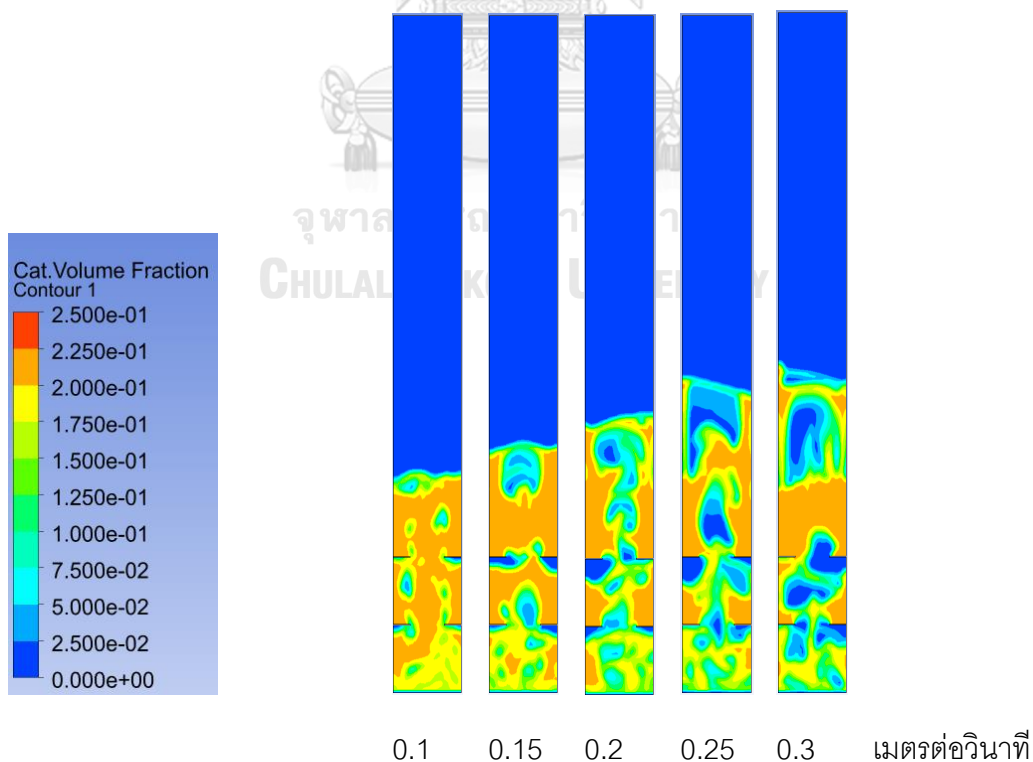
และ คาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งตรงกันกับใน [3] และ[28] ด้วยเหตุผลที่ว่า ในกระบวนการต้องการดูดซับของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยา WGS เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินการไปทางขวาเกิดเป็นไฮโดรเจนมากขึ้น ที่อุณหภูมิสูงสามารถเกิดปฏิกิริยา SMR ได้ดีกว่าปฏิกิริยา WGS เพราะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน แต่ปฏิกิริยา WGS และ CBN เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของทั้งWGS และ CBN จึงลดลง

#### 4.3.2.2 ผลของความเร็วต่อการเกิดปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ



รูปที่ 4. 12 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่ความเร็วตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.3 เมตรต่อวินาที และแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น

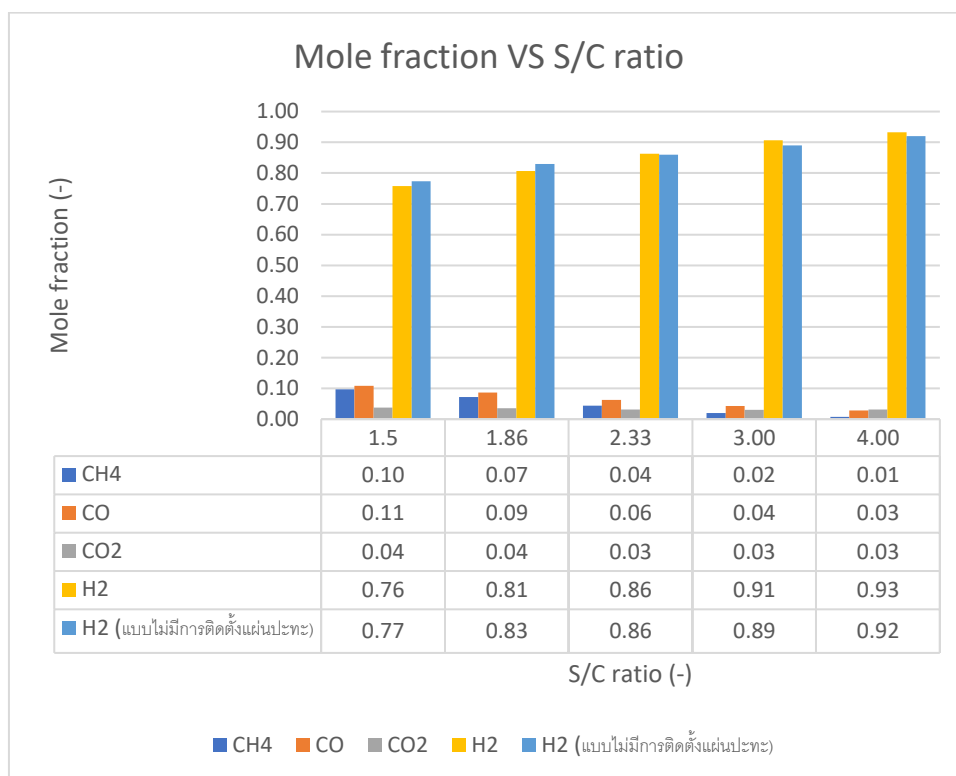
ความเร็วของแก๊สในระบบที่มีการติดตั้งแผ่นปะทะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับแบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะ สังเกตได้จากความเร็วที่เท่ากันส่งผลแนวโน้มของสัดส่วนของไฮโดรเจนไปในทิศทางเดียวกัน รวมทั้งสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนก็มีค่าใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 4.12 ที่ความเร็วของแก๊สเท่ากับ 0.1 เมตรต่อวินาที ในทั้งสองแบบ คือ แบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะและแบบมีการติดตั้งแผ่นปะทะ จำนวน 2 แผ่น พบว่า ได้ผลของสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนอยู่ที่ 0.99 และ 0.99 ตามลำดับ ดังนั้น จากผลการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่า ที่ความเร็วของแก๊ส 0.1 เมตรต่อวินาที เป็นความเร็วที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบทั้งปราศจากการติดตั้งและมีการติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น นอกจากนั้น [5] ได้อธิบายไว้ว่า เมื่อความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป ในความเป็นจริง แต่ละโรงงานอุตสาหกรรมจะดำเนินการ SE-SMR ในภาวะต่างๆที่ขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องจักรด้วย ว่าทนต่อภาวะใดๆได้บ้าง ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงการใช้งานของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม และทดลองปรับความเร็วให้เหมาะสม สามารถใช้ผลการทดลองจากงานวิจัยเป็นแนวทางในการปรับตั้งค่าภาวะต่างๆในกระบวนการผลิตให้เกิดประสิทธิภาพได้



รูปที่ 4. 13 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา  
ที่ความเร็ว 0.1-0.3 เมตรต่อวินาที ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์แบบมีการติดตั้ง  
แผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น เวลา 30 วินาที

เมื่อวิเคราะห์ผลจากรูปที่ 4.13 สามารถอธิบายได้ว่า ความเร็วของแก๊สมีผลต่อการสัมผัสกันระหว่างของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและของไหลที่เป็นแก๊สเข้าไปทำปฏิกิริยาอีพอกซีในเครื่องปฏิกรณ์ ถ้าใช้ความเร็วของแก๊สต่ำจะช่วยทำให้ระยะเวลาที่ของแข็งและของไหลสัมผัสกันยาวนานขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความเร็วของแก๊สที่ต่ำที่สุดคือ 0.1 เมตรต่อวินาที พบว่า ปริมาณฟองแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วสูง เมื่อความเร็วของแก๊สสูงขึ้น จะเกิดการขยายตัวของฟองแก๊สขนาดใหญ่ในเครื่องปฏิกรณ์ งานวิจัยของ [3], [18], [29] อธิบายไว้ว่า เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊ส ทำให้เกิดการรวมตัวของฟองแก๊สที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาลดลงเพราะพื้นที่ของการสัมผัสกันลดน้อยลง ความเข้มข้นของไฮโดรเจนจึงลดลง รวมทั้ง [25] ได้กล่าวถึงการเกิดปรากฏการณ์การย้อนกลับของของแข็ง ที่ขึ้นไปยังส่วนด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์เมื่อใช้ความเร็วของแก๊สสูง นอกจากนั้น พบว่า เบดเกิดการขยายตัวสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีการเกิดฟองแก๊สขนาดใหญ่ขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของของแข็งค่อนข้างเจือจางในส่วนตรงกลางของเครื่องปฏิกรณ์ แต่จะมีความหนาแน่นบริเวณขอบผนังของเครื่องปฏิกรณ์แทน หมายความว่า ในส่วนตรงกลางมีการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากกว่าที่บริเวณขอบผนัง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องและเป็นไปตามงานวิจัยที่ผ่านมา [2], [24] และเมื่อของแข็งไหลผ่านช่องว่างของแผ่นปะทะ จะพบว่าความเร็วของแก๊สลดลงหากเปรียบเทียบกับแบบปราศจากแผ่นปะทะ ทำให้เวลาที่สัมผัสกันนานมากขึ้น

4.3.2.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนต่อการเกิดปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิ่ง มีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ

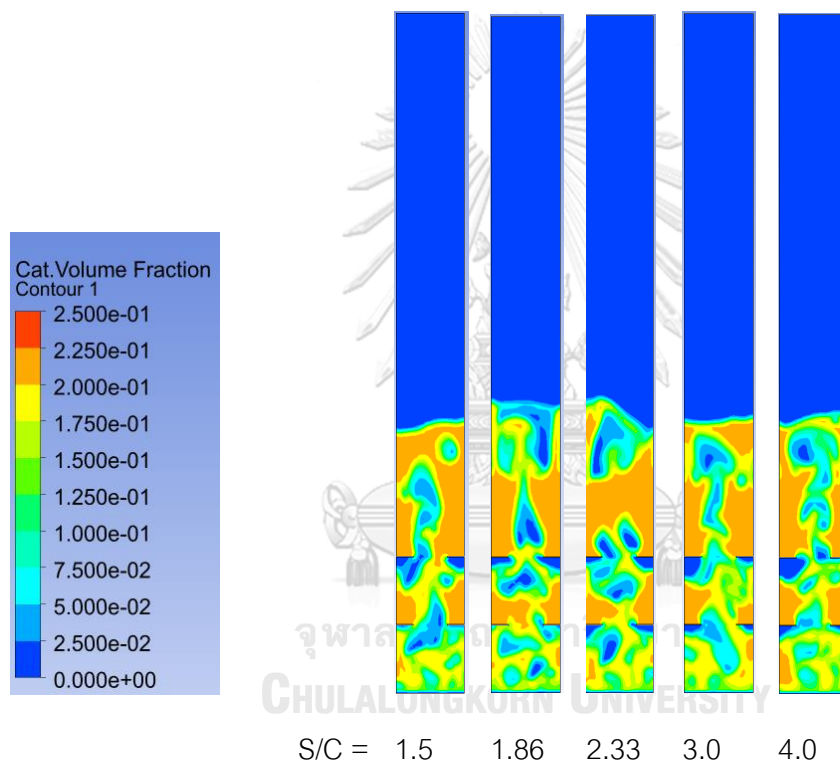


รูปที่ 4. 14 สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอน ตั้งแต่ 1.5 ถึง 4.0 และแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น

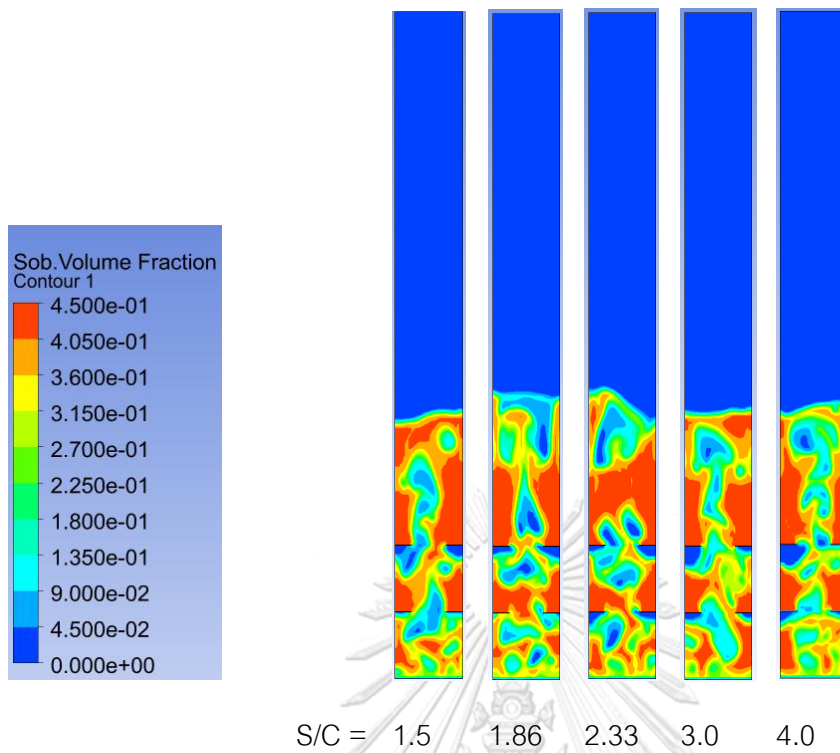
อัตราส่วนของไอน้ำส่งผลให้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น มีความสอดคล้องเช่นเดียวกันกับแบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะ ความเข้มข้นของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่ออัตราส่วนของไอน้ำที่เพิ่มมากขึ้น แต่ที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนอีกกรณีหนึ่งคือเมื่อใช้อัตราส่วนที่ 1.5, 1.86, 2.33, 3.0 และ 4.0 พบว่า สำหรับการติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น ได้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนอยู่ที่ 0.76, 0.81, 0.86, 0.91 และ 0.93 ตามลำดับ และสำหรับแบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะ ได้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนอยู่ที่ 0.77, 0.83, 0.86, 0.89 และ 0.92 ตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่าการติดตั้งแผ่นปะทะที่อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนต่ำกว่า 1.86



จะส่งผลให้ได้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนน้อยกว่าในแบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะ แต่หากใช้อัตราส่วนที่มากกว่า 3.0 ในการติดตั้งแผ่นปะทะ จะทำให้ได้ไฮโดรเจนมากกว่า ซึ่งมีความสอดคล้องตรงกันกับ [28], [26] และเมื่อพิจารณาที่รูป 4.14 ซึ่งให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีความหนาแน่นเฉื่อยสูงเมื่อผ่านช่องว่างของแผ่นปะทะเช่นเดียวกับตัวดูดซับของรูปที่ 4.15 โดยหากพิจารณาที่อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนจาก 4.0 ลดลงไป 3.0 จะส่งผลให้ได้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนนั้นลดลงร้อยละ 2 ในขณะที่หากลดอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนไปที่ 1.5 พบว่าสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนลดลงอย่างเห็นได้ชัดถึงร้อยละ 18

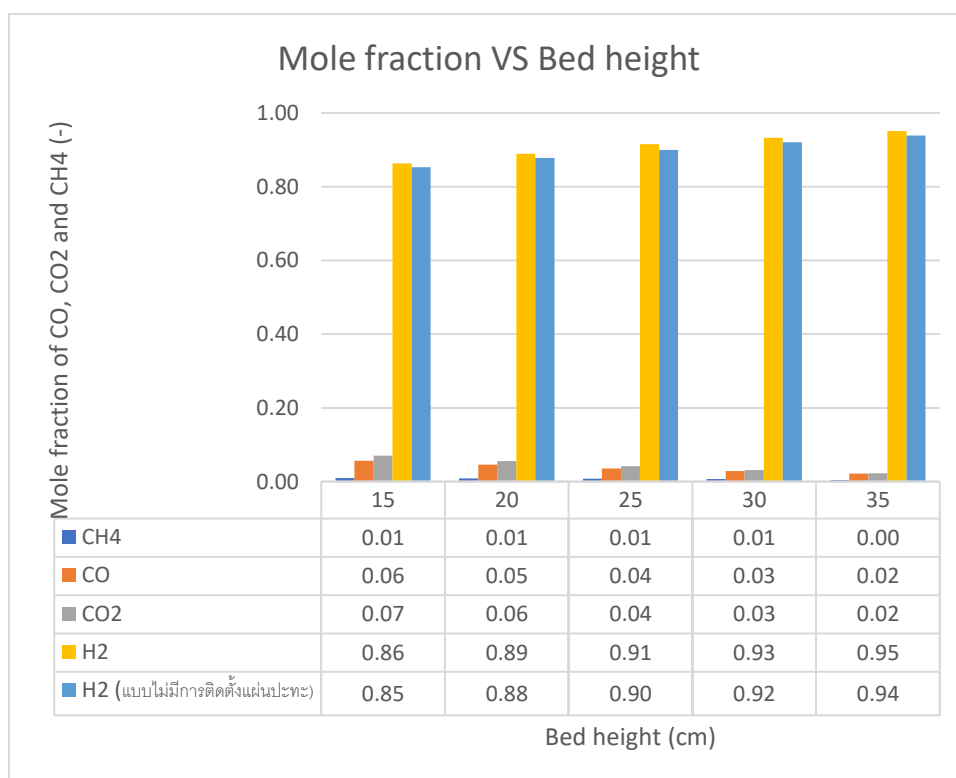


รูปที่ 4. 15 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ภาวะอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอน ตั้งแต่ 1.5-4.0 ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบมีการติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น



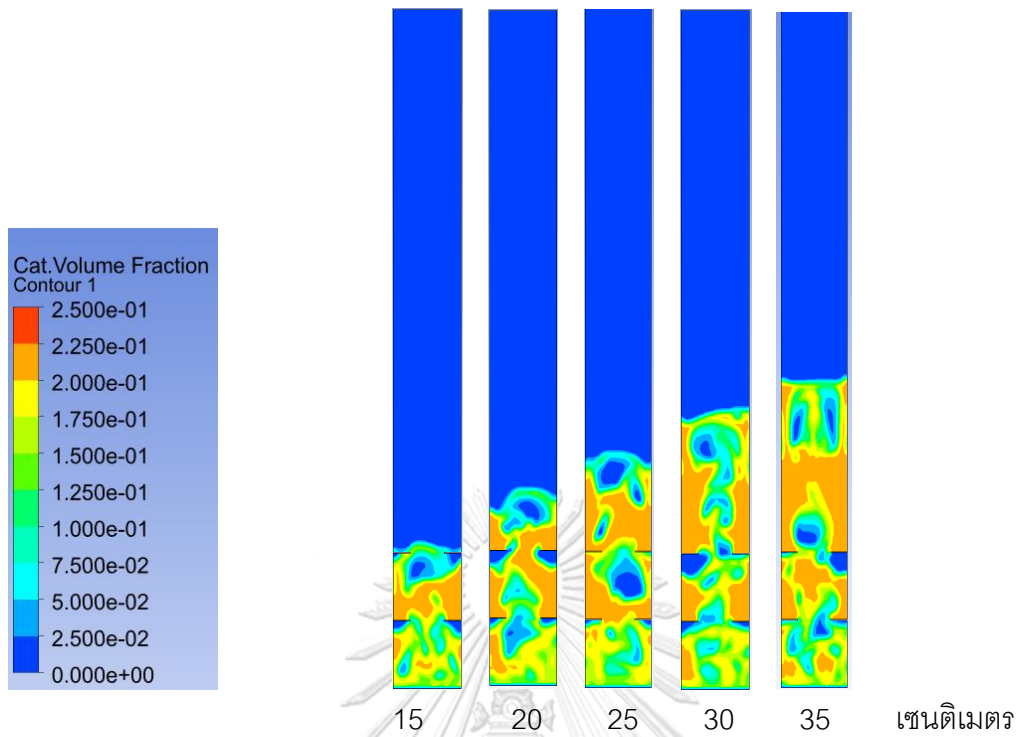
รูปที่ 4. 16 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวดูดซับ ที่ภาวะอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอน ตั้งแต่ 1.5-4.0 ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบมีการติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น

4.3.2.4 ผลของความสูงของเบตต่อการเกิดปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่ม ด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตแบบติดตั้งแผ่นปะทะ



รูปที่ 4. 17 คอนทัวร์สัดส่วนโดยโมลของมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่ความสูงของเบต ตั้งแต่ 15 ถึง 35 เซนติเมตร ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตแบบมีการติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น

ความสูงของเบตระหว่างปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะและมีการติดตั้งแผ่นปะทะ ให้ผลที่สอดคล้องไปในทางเดียวกัน คือ หากเพิ่มความสูงมากขึ้นก็เท่ากับว่าพื้นที่ระหว่างของแข็งและของไหลจะสัมผัสกันมีโอกาสมากขึ้น เพราะมีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น เช่นเดียวกัน จากรูปที่ 4.17 ถึงแม้ว่าภายในเครื่องปฏิกรณ์จะมีการติดตั้งแผ่นปะทะ พบว่า ณ ที่ภาวะเดียวกันกับการไม่ติดตั้งแผ่นปะทะ ผลของสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนสูงกว่าในแบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะ พิจารณาเพิ่มเติมจากรูปที่ 4.18 การติดตั้งแผ่นปะทะช่วยเปลี่ยนแปลงทิศทางของการไหลและเกิดการไหลแบบปั่นป่วนภายในเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลให้เกิดโอกาสในการสัมผัสกันมากขึ้นระหว่างของแข็งและของไหล รวมทั้งอาจมีส่วนในการช่วยลดการเกิดการย้อนกลับของของแข็งได้



รูปที่ 4. 18 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ภาวะ  
ความสูงของเบดตั้งแต่ 15 – 35 เซนติเมตร ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบมี  
การติดตั้งแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหรือซีเอฟดีของปฏิกริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ โดยใช้การคำนวณโปรแกรม GAMBIT สำหรับการวาดรูปและตั้งค่าจำนวนเซลล์ และโปรแกรม ANSYS FLUENT ในการทดลองศึกษาการจำลองซีเอฟดี โดยขนาดของแผ่นปะทะที่ถุ๊กนำมาใช้ในงานวิจัยนี้อ้างอิงมาจากค่าในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี แผ่นปะทะที่เลือกใช้มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร และความกว้าง 25 มิลลิเมตร เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ติดตั้งที่ขอบด้านข้างทั้งสองด้านของเครื่องปฏิกรณ์ และตั้งค่าเซลล์ที่จำนวน 6,000 เซลล์ ที่ทางเข้าแบบ Inlet velocity และ ทางออกแบบ Outlet pressure และเวลาที่ใช้เป็นตัวแทนในการเฉลี่ยค่าต่างๆ ใช้เวลาที่ 20-30 วินาที ซึ่งการตั้งค่าดังกล่าวสามารถดำเนินการทดลองตัวแปรต่างๆในแบบจำลองซีเอฟดีของปฏิกริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับต่อไปได้ เพื่อพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของปฏิกริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ ศึกษาผลของการติดตั้งแผ่นปะทะที่มีผลต่อสัดส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ของปฏิกริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด และศึกษาผลตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่อปฏิกริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะ

จากงานวิจัยนี้ สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของ SE-SMR ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบมีการติดตั้งแผ่นปะ พบว่า การติดตั้งแผ่นปะทะเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ช่วยเปลี่ยนทิศทางการไหลภายในเบด ฟองแก๊สเกิดการแตกออกเมื่อชนหรือทะลุผ่านรูของแผ่นปะทะ หากเพิ่มจำนวนแผ่นปะทะยิ่งส่งผลให้ฟองแก๊สมีขนาดเล็กกลง และ ส่งผลช่วยลดการเกิดการย้อนกลับของของแข็งสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนสูงสุด 0.933 ที่จำนวนแผ่นปะทะ 2 แผ่น และหลังจากเพิ่มจำนวนของแผ่นปะทะที่ 3 และ 4 แผ่น กลับพบว่า ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากบริเวณข้างใต้ของแผ่นปะทะเกิดช่องว่าง ทำให้การพื้นที่ของการสัมผัสกันลดน้อยลง

นอกจากนี้ได้ศึกษาผลตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาอีพอร์มมิงมีเทนด้วย ใอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบติดตั้งแผ่นปะทะและแบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะ พบว่า

1. อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในสมการ SMR, WGS และ CBN การติดตั้งแผ่นปะทะเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับแบบปราศจากการติดตั้งแผ่นปะทะ อุณหภูมิตั้งแต่ 973 K แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนลดลง เพราะว่า ปฏิกิริยา SMR เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ทำให้ที่อุณหภูมิสูงเกิดปฏิกิริยา SMR ได้ดี เกิดผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น ปริมาณของไฮโดรเจนจะลดลง ส่วนปฏิกิริยา WGS และ CBN อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เพราะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ชอบเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่าปฏิกิริยา SMR ดังนั้นอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์จะต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับทั้งสามปฏิกิริยา สำหรับงานวิจัยนี้ พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 923 K จะทำให้ได้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนที่ 0.92
2. ความเร็วของแก๊สมีผลต่อการสัมผัสกันระหว่างของแข็งและของไหล เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สจะส่งผลให้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนลดลง เพราะระยะเวลาของการสัมผัสกันระหว่างของแข็งและของไหลเกิดขึ้นสั้นลง และเกิดการรวมตัวฟองแก๊สขนาดใหญ่กระจายตัวเป็นบริเวณกว้างภายในเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลให้เบดเกิดการขยายตัวสูงขึ้น จากงานวิจัยนี้ได้ข้อสรุปว่า ความเร็วที่ 0.1 เมตรต่อวินาที เป็นความเร็วที่เหมาะสมที่สุด ได้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนที่ 0.99 แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นควรพิจารณาถึงสถานการณ์จริงว่า กระบวนการผลิตอาจไม่สามารถลดความเร็วของแก๊สให้ต่ำมากได้ แต่งานวิจัยนี้ช่วยให้เห็นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงที่ความเร็วของแก๊สเปลี่ยนไป
3. สมการ SMR และ WGS มีไอน้ำเป็นองค์ประกอบหลักของปฏิกิริยา ดังนั้นอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน จะส่งผลกระทบต่อสมดุลของปฏิกิริยาเคมีทั้งสอง เมื่อสัดส่วนของไอน้ำที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินการไปทางขวา เกิดสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น มีการเลือกเกิดเป็นไฮโดรเจนที่สูงขึ้น และช่วยลดโอกาสของการเกิดการสะสม

คาร์บอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลของการทดลองจะพบว่าอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่เท่ากับ 4.0 จะเกิดสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนที่สูงที่สุด

4. ความสูงของเบดที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้การขยายตัวและเพิ่มปริมาณของเบดสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้ดี รวมทั้งระยะเวลาที่ของแข็งและของไหลจะสัมผัสกัน และ พื้นที่ในการสัมผัสกันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ในงานวิจัยนี้ ความสูงของเบดที่ 35 เซนติเมตร เป็นความสูงที่ให้ผลสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนที่สูงที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งที่จะใช้พัฒนาการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้ได้สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนที่มากที่สุด โดยเน้นพิจารณาที่การติดตั้งแผ่นปะทะและตัวแปรดำเนินการต่างๆ ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ค่อนข้างสะดวกและทราบผลได้อย่างรวดเร็ว เพื่อตอบโจทย์ในเรื่องระยะเวลาที่กระชับของกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม แต่ยังคงมีข้อสันนิษฐานอื่นหรือตัวแปรอื่นๆที่สามารถช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้น ขอแนะนำให้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับรูปแบบของแผ่นปะทะชนิดต่างๆ หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่แตกต่างกัน รวมทั้งการเพิ่มหน่วยการฟื้นฟูสภาพควบคู่กับชนิดของเครื่องปฏิกรณ์รีฟอร์มเมอร์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่น่าสนใจ ทำการศึกษาระยะเวลาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะยังคงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพก่อนจะต้องถูกนำไปฟื้นฟู และจำนวนรอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บรรณานุกรม

1. Abbas, S., V. Dupont, and T. Mahmud, *Modelling of H<sub>2</sub> production via sorption enhanced steam methane reforming at reduced pressures for small scale applications*. International Journal of Hydrogen Energy, 2019. **44**(3): p. 1505-1513.
2. Herce, C., C. Cortés, and S. Stendardo, *Computationally efficient CFD model for scale-up of bubbling fluidized bed reactors applied to sorption-enhanced steam methane reforming*. Fuel Processing Technology, 2017. **167**: p. 747-761.
3. Di Carlo, A., et al., *Sorption enhanced steam methane reforming on catalyst-sorbent bifunctional particles: A CFD fluidized bed reactor model*. Chemical Engineering Science, 2017. **173**: p. 428-442.
4. Chanburanasiri, N., et al., *Hydrogen production via sorption enhanced steam methane reforming process using Ni/CaO multifunctional catalyst*. Industrial & engineering chemistry research, 2011. **50**(24): p. 13662-13671.
5. Johnsen, K., et al., *Sorption-enhanced steam reforming of methane in a fluidized bed reactor with dolomite as CO<sub>2</sub>-acceptor*. Chemical Engineering Science, 2006. **61**(4): p. 1195-1202.
6. Abdi, H., R. Rasouli Nezhad, and M. Salehimaleh, *Chapter 5 - Fuel Cells*, in *Distributed Generation Systems*, G.B. Gharehpetian and S.M. Mousavi Agah, Editors. 2017, Butterworth-Heinemann. p. 221-300.
7. สำนักงานกลางจังหวัด. ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LIQUEFIED PETROLEUM GAS; LPG). 2563 24 มกราคม 2563; Available from: [http://www.cbwmthai.org/test/Activity\\_Detail.aspx?id=39](http://www.cbwmthai.org/test/Activity_Detail.aspx?id=39).
8. Aloisi, I., et al., *Sorption enhanced catalytic steam methane reforming: experimental data and simulations describing the behaviour of bi-functional particles*. Chemical Engineering Journal, 2017. **314**: p. 570-582.
9. Di Giuliano, A., et al., *Sorption enhanced steam methane reforming by Ni–CaO materials supported on mayenite*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(19): p. 13661-13680.



10. Wang, Y., et al., *SE-SMR process performance in CFB reactors: Simulation of the CO<sub>2</sub> adsorption/desorption processes with CaO based sorbents*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011. 5(3): p. 489-497.
11. Chen, H.Z., J. Liu, and Z.K. Guo. *Kinetics analysis and process simulation for sorption-enhanced steam methane reforming*. in *Advanced Materials Research*. 2012. Trans Tech Publ.
12. Robert Cherbanski, E.M., *SORPTION-ENHANCED STEAM METHANE REFORMING (SE-SMR) – A REVIEW: REACTOR TYPES, CATALYST AND SORBENT CHARACTERIZATION, PROCESS MODELING*. Chemical and Process Engineering, 2018. , 39 (4): p. 427–448.
13. Rawin Surbkar, T.W., Sunate Surbkar, ที่มาของสมการ Ergun เพื่อการคำนวณความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไรส์สำหรับอนุภาคของแข็ง *Foundation of the Ergun equation for the calculation of minimum fluidizing velocity of solid particles*. Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering, 2012. g Vol. 18: p. 24–33.
14. Germán González Silva, N.P.J.a.O.F.S., *Fluid Dynamics of Gas – Solid Fluidized Beds*, in *Advanced Fluid Dynamics*, P.H.W. Oh, Editor. 2012, InTech. p. 272 pages.
15. Chalermssinsuwan, B., *Fluidization*. 2017.
16. Yehuda, T. and H. Kalman, *Geldart classification for wet particles*. Powder Technology, 2020. 362: p. 288-300.
17. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเบื้องต้น . 2556 2/2556; Available from: <http://eng.sut.ac.th/me/2014/document/CFD.php>.
18. Phuakpunk, K., *Computational Fluid Dynamics Study of Sorption Enhanced Steam Reforming of Methane/Ethanol In Circulating Fluidized Bed System*, in *Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering*. 2017, Chulalongkorn University. p. 185.
19. Phuakpunk, K., et al., *Parametric study of hydrogen production via sorption enhanced steam methane reforming in a circulating fluidized bed riser*. Chemical Engineering Science, 2018. 192: p. 1041-1057.

20. Herce, C., C. Cortés, and S. Stendardo, *Numerical simulation of a bubbling fluidized bed reactor for sorption-enhanced steam methane reforming under industrially relevant conditions: Effect of sorbent (dolomite and  $\text{CaO-Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ) and operational parameters*. Fuel processing technology, 2019. **186**: p. 137-148.
21. Diglio, G., et al., *Modelling of sorption-enhanced steam methane reforming in a fixed bed reactor network integrated with fuel cell*. Applied energy, 2018. **210**: p. 1-15.
22. Antzara, A., et al., *Thermodynamic analysis of hydrogen production via chemical looping steam methane reforming coupled with in situ  $\text{CO}_2$  capture*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015. **32**: p. 115-128.
23. Abbas, S., V. Dupont, and T. Mahmud, *Kinetics study and modelling of steam methane reforming process over a  $\text{NiO/Al}_2\text{O}_3$  catalyst in an adiabatic packed bed reactor*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(5): p. 2889-2903.
24. Yang, S., H. Li, and Q. Zhu, *Experimental study and numerical simulation of baffled bubbling fluidized beds with Geldart A particles in three dimensions*. Chemical Engineering Journal, 2015. **259**: p. 338-347.
25. Yang, S., et al., *Simulation of hydrodynamics in gas-solid bubbling fluidized bed with louver baffles in three dimensions*. Powder technology, 2016. **296**: p. 37-44.
26. Wang, Y., Z. Chao, and H.A. Jakobsen, *3D simulation of bubbling fluidized bed reactors for sorption enhanced steam methane reforming processes*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2010. **2**(2-3): p. 105-113.
27. Yang, Z., Y. Zhang, and H. Zhang, *CPFD simulation on effects of louver baffles in a two-dimensional fluidized bed of Geldart A particles*. Advanced Powder Technology, 2019. **30**(11): p. 2712-2725.
28. Abbas, S., V. Dupont, and T. Mahmud, *Modelling of  $\text{H}_2$  production in a packed bed reactor via sorption enhanced steam methane reforming process*. International journal of hydrogen energy, 2017. **42**(30): p. 18910-18921.
29. Johnsen, K., et al., *Modeling of sorption-enhanced steam reforming in a dual fluidized bubbling bed reactor*. Industrial & engineering chemistry research, 2006.

45(12): p. 4133-4144.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วทันยา ไยดำ
วัน เดือน ปี เกิด	28 มีนาคม 2533
สถานที่เกิด	สระบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	789/324 ตีคอนโดนครระยอง ตำบลเนินพระ อำเภอเมืองระยอง จังหวัดระยอง 21000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY