

การควบคู่ของปฏิกิริยาเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นมีเทน
และปฏิกิริยาการเปลี่ยนมีเทนเป็นเบนซีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การควบคุมของปฏิบัติการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นมีเทน
และปฏิบัติการการเปลี่ยนมีเทนเป็นเบนซีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Coupling of CO₂ Methanation and Methane Dehydroaromatization
in a Membrane Reactor



A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Bachelor of Engineering in Chemical Engineering
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การควบคุมของปฏิกิริยาเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นมีเทน
และปฏิกิริยาการเปลี่ยนมีเทนเป็นเบนซีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน
โดย นายสุรกาญต์ ปัญจนาท
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร



ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงกมล ณ ระนอง)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การควบคุมของปฏิกิริยาเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นมีเทน และปฏิกิริยาการเปลี่ยนมีเทนเป็นเบนซีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน
โดย นายสุรกาญต์ ปัญจนนท์
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน คาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมากถูกปล่อยออกมาสู่ชั้นบรรยากาศอย่างเปล่าประโยชน์ วิธีการหนึ่งที่จะใช้ประโยชน์จากคาร์บอนไดออกไซด์คือการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นมีเทน (CO_2 methanation) ซึ่งมีเทนถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ เชื้อเพลิงสำหรับการผลิตไฟฟ้า และวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลาสติก อย่างไรก็ตาม มูลค่าทางการตลาดของมีเทนมีค่าไม่สูงนัก จึงมีการคิดเปลี่ยนมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้นผ่านปฏิกิริยาเปลี่ยนมีเทนเป็นเบนซีน (Methane dehydroaromatization) ปฏิกิริยาดังกล่าวให้ไฮโดรเจนเป็นผลพลอยได้ การกำจัดไฮโดรเจนทำให้สมดุลเลื่อนไปทางฝั่งผลิตภัณฑ์ อีกทั้งไฮโดรเจนยังเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นมีเทน จึงเลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน งานวิจัยถูกทำขึ้นโดยการสร้างแบบจำลองเพื่อที่จะประเมินผลกระทบของสภาวะการทำงานในการผลิตมีเทนในระบบแบบอุณหภูมิกิ่งที่และแบบอุณหภูมิจึงที่ โดยพิจารณาที่ค่าการแปลงผันทางเคมี (X) ค่าผลได้ (Y) และค่าการเลือกเกิด (S) ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำงานอันประกอบด้วยเวลาเชิงสเปซ ($W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4\text{in}}$) ระหว่าง 100 ถึง 800 $\text{kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$ อุณหภูมิขาเข้า (T_0) ระหว่าง 300 ถึง 700 $^\circ\text{C}$ และความดันขาเข้า (P_0) ระหว่าง 1 และ 10 atm ที่มีต่อพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนผลการจำลอง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าทั้งในสภาวะแบบอุณหภูมิกิ่งที่และแบบอุณหภูมิจึงที่ เมื่อเพิ่มเวลาเชิงสเปซ ส่งผลให้ได้ค่าผลได้ของมีเทนเพิ่ม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขาเข้า ได้ค่าการแปลงผันทางเคมี ค่าผลได้ที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ แต่ค่าการเลือกเกิดของเอทิลีนและเบนซีนลดลง และเมื่อเพิ่มความดันขาเข้าได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิขาเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Coupling of CO₂ Methanation and Methane
Dehydroaromatization in a Membrane Reactor

By Mr.Surakan Panchanon

Degree Bachelor of Engineering

Program Chemical Engineering

Year 2018

Advisor Assoc.Prof.Dr.Duangkamol Na Ranong

ABSTRACT

At present, a large amount of carbon dioxide is uselessly emitted into the atmosphere so one method of carbon dioxide utilization is to convert carbon dioxide to methane used as vehicle fuel, fuel for electricity production and raw material for plastic production. However, methane is not costly in the market. Methane dehydroaromatization enables methane to convert into high value product, namely benzene. The reaction also produces hydrogen as by-product. The removal of hydrogen shifts equilibrium to the productivity. Moreover, hydrogen is used as a reactant in CO₂ methanation. Therefore, the membrane reactor is chosen. The research was done by simulation to evaluate the effects of operating conditions on methane production in both isothermal and adiabatic system by considering X_i , Y_i and S_i . The objective of this research is to study the effects of operating conditions comprised of space time ($W/F_{CH_4,in}$) from 100 to 800 kg*s/mol, inlet temperature (T_0) from 300 to 700 °C and inlet pressure (P_0) from 1 to 10 atm on the performance of a membrane reactor. The results showed that in both isothermal and adiabatic operations the increase of $W/F_{CH_4,in}$ improved Y_{CH_4} and increasing T_0 gave higher conversion (X_{CO_2} and X_{CH_4}) and lower $S_{C_2H_4}$ and $S_{C_6H_6}$ compared to operation in the packed bed reactor. The results of increasing P_0 corresponded with ones in case of increasing T_0 .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีจากความกรุณาจาก รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง อาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า ซึ่งให้คำแนะนำ การสอน การฝึกคิดอย่างมีระบบ การฝึกมองหลายๆด้าน แนวทางที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินชีวิตต่อไปในอนาคต ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ และผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์ กรรมการในการตรวจเล่มปริญญาโท

ขอขอบคุณนางสาวธนัชพร ภมรสูทรที่ให้คำแนะนำและสอนข้าพเจ้าในการใช้โปรแกรม

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้คำปรึกษาในรูปแบบการเขียนเล่ม

และขอขอบคุณบิดา มารดา และพี่น้องของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจแก่

ข้าพเจ้า

สุรกาญต์ ปัญจานนท์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป	VII
สัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ปฏิกิริยาเปลี่ยนเปลี่ยน CO ₂ เป็น CH ₄	3
2.2 ปฏิกิริยาเปลี่ยนเปลี่ยน CH ₄ เป็น C ₆ H ₆	4
2.3 หลักการพิจารณาการเลือกโมเดล	5
2.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน.....	6
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	10
3.1 หลักการประเมินพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์.....	10
3.2 วิธีวิจัย	11
บทที่ 4 ผลการจำลอง.....	16
4.1 การประเมินความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง	16
ปฏิกิริยาเปลี่ยนเปลี่ยน CO ₂ เป็น CH ₄ (CO ₂ Methanation: SR).....	16
ปฏิกิริยาเปลี่ยนเปลี่ยน CH ₄ เป็น C ₆ H ₆ (Methane Dehydroaromatization: MDA)	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการจำลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตบรจ.....	18
4.2.1 ผลการจำลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตบรจในสภาวะแบบอุณหภูมิคงที่.....	18
4.3 ผลการจำลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน.....	26
4.3.1 ผลการจำลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนในสภาวะอุณหภูมิคงที่.....	26
4.3.2 ผลการจำลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่.....	34
4.4 การเปรียบเทียบพฤติกรรมในสภาวะอุณหภูมิคงที่ระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตบรจและ เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	50
5.1.1 อิทธิพลของ Space time ที่มีต่อพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน	50
5.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิขาเข้าที่มีต่อพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน.....	50
5.1.3 อิทธิพลของความดันขาเข้าที่มีต่อพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง	52
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก.....	55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สูตรการคำนวณเพื่อประเมินพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์.....	14
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรควบคุมในการศึกษา.....	15
ตารางที่ 3.3 การปรับเปลี่ยนตัวแปรสภาวะในการศึกษาด้วยแบบจำลองอุณหภูมิคงที่และอุณหภูมิไม่คงที่.....	15
ตาราง ก 1 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณกับค่าที่ได้จากงานวิจัย	55



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 รูปร่างเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนประเภทต่างๆ	6
รูปที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน	11
รูปที่ 4.1 ความสอดคล้องของผลการทดลองกับผลการคำนวณโดยใช้ parameter ที่ประมาณในงานวิจัยนั้นเปรียบเทียบกับ parameter ที่ Miguel นำเสนอที่อุณหภูมิต่างๆ.....	16
รูปที่ 4.2 ความสอดคล้องของผลการจำลองของ Y. Zhu และคณะ [11] กับผลการจำลองโดยใช้ parameter ที่ Y. Zhu นำเสนอโดยใช้โปรแกรมที่อุณหภูมิ 725 °C	17
รูปที่ 4.3 อิทธิพลของ T_0 และ P_0 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ CO_2 Methanation	18
รูปที่ 4.4 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $X_{CH_4,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ Methane Dehydroaromatization.....	19
รูปที่ 4.5 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $S_{C_2H_4,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ Methane Dehydroaromatization	20
รูปที่ 4.6 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $S_{C_6H_6,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ Methane Dehydroaromatization.....	21
รูปที่ 4.7 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $S_{C_{10}H_8,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ Methane Dehydroaromatization	22
รูปที่ 4.8 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $Y_{C_2H_4,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ Methane Dehydroaromatization.....	23
รูปที่ 4.9 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $Y_{C_6H_6,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ Methane Dehydroaromatization.....	24
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $Y_{C_{10}H_8,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ Methane Dehydroaromatization. 25	25
รูปที่ 4.11 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $X_{CO_2,sr}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน	26
รูปที่ 4.12 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $X_{CH_4,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน	27
รูปที่ 4.13 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $S_{C_2H_4,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $S_{C_6H_6,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน.....	29
รูปที่ 4.15 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $S_{C_{10}H_8,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน.....	30
รูปที่ 4.16 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $Y_{C_2H_4,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน.....	31
รูปที่ 4.17 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $Y_{C_6H_6,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน.....	32
รูปที่ 4.18 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $Y_{C_{10}H_8,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน.....	33
รูปที่ 4.19 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $X_{CO_2,sr}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน.....	34
รูปที่ 4.20 โปรไฟล์ของอุณหภูมิ (a) tube และ (b) shell ตามความยาวของเครื่องปฏิกรณ์.....	35
รูปที่ 4.21 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $X_{CH_4,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน.....	36
รูปที่ 4.22 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ที่มีต่อ X_{CH_4} ที่ $P_0 = 1$ atm และ $T_0 = 500$ °C.....	37
รูปที่ 4.23 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ที่มีต่อ $S_{C_2H_4}$ ที่ $P_0 = 1$ atm และ $T_0 = 500$ °C.....	38
รูปที่ 4.24 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ที่มีต่อ $Y_{C_2H_4}$ ที่ $P_0 = 1$ atm และ $T_0 = 500$ °C.....	38
รูปที่ 4.25 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ที่มีต่อ $S_{C_6H_6}$ ที่ $P_0 = 1$ atm และ $T_0 = 500$ °C.....	39
รูปที่ 4.26 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ที่มีต่อ $Y_{C_6H_6}$ ที่ $P_0 = 1$ atm และ $T_0 = 500$ °C.....	39
รูปที่ 4.27 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ที่มีต่อ $S_{C_{10}H_8}$ ที่ $P_0 = 1$ atm และ $T_0 = 500$ °C.....	40
รูปที่ 4.28 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ที่มีต่อ $Y_{C_{10}H_8}$ ที่ $P_0 = 1$ atm และ $T_0 = 500$ °C.....	40
รูปที่ 4.29 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ X_{CH_4} ที่ $P_0 = 1$ atm และ $W_{cat}/F_{CH_4,in} = 200$ kg*s/mol.....	41
รูปที่ 4.30 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ $S_{C_2H_4}$ ที่ $P_0 = 1$ atm และ $W_{cat}/F_{CH_4,in} = 200$ kg*s/mol.....	42
รูปที่ 4.31 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ $Y_{C_2H_4}$ ที่ $P_0 = 1$ atm และ $W_{cat}/F_{CH_4,in} = 200$ kg*s/mol.....	42
รูปที่ 4.32 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ $S_{C_6H_6}$ ที่ $P_0 = 1$ atm และ $W_{cat}/F_{CH_4,in} = 200$ kg*s/mol.....	43
รูปที่ 4.33 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ $Y_{C_6H_6}$ ที่ $P_0 = 1$ atm และ $W_{cat}/F_{CH_4,in} = 200$ kg*s/mol.....	43
รูปที่ 4.34 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ $S_{C_{10}H_8}$ ที่ $P_0 = 1$ atm และ $W_{cat}/F_{CH_4,in} = 200$ kg*s/mol.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.35 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ $Y_{C_{10}H_8}$ ที่ $P_0 = 1 \text{ atm}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$ 44

รูปที่ 4.36 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ X_{CH_4} ที่ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$ 45

รูปที่ 4.37 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ $S_{\text{C}_2\text{H}_4}$ ที่ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$ 46

รูปที่ 4.38 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ $Y_{\text{C}_2\text{H}_4}$ ที่ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$ 46

รูปที่ 4.39 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ $S_{\text{C}_6\text{H}_6}$ ที่ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$ 47

รูปที่ 4.40 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ $Y_{\text{C}_6\text{H}_6}$ ที่ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$ 47

รูปที่ 4.41 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ $S_{\text{C}_{10}\text{H}_8}$ ที่ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$ 48

รูปที่ 4.42 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ $Y_{\text{C}_{10}\text{H}_8}$ ที่ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$ 48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

a	คือ	อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร	m^{-1}
C_{p_i}	คือ	ความจุความร้อนเชิงโมลของสาร i	$J/(mol \cdot K)$
F_i	คือ	อัตราการไหลเชิงโมลของสาร i ออกจากระบบ	mol/s
F_{i0}	คือ	อัตราการไหลเชิงโมลของสาร i เข้าสู่ระบบ	mol/s
H_i	คือ	เอนทัลปีของสาร i	J/mol
$H_{i,M}$	คือ	เอนทัลปีของสาร i ฝังภายในเมมเบรน	J/mol
$H_{i,P}$	คือ	เอนทัลปีของสาร i ฝังภายนอกเมมเบรน	J/mol
J_i	คือ	อัตราการแพร่ของสาร i	$mol/(m^3 \cdot s)$
N_i	คือ	จำนวนโมลของสาร i	mol
R_i	คือ	อัตราการเกิดของสาร i	$mol/(m^3 \cdot s)$
T	คือ	อุณหภูมิ	K
T_{ext}	คือ	อุณหภูมิภายนอก	K
t	คือ	เวลา	s
U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	$W/(m^2 \cdot K)$
V	คือ	ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์	m^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_6H_6 แล้ว เล็งเห็นว่า การกำจัด H_2 ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของปฏิกิริยาเปลี่ยน CH_4 เป็น C_6H_6 เป็นการเลื่อนสมดุลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์มากขึ้น H_2 นี้สามารถถูกใช้ป้อนสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเปลี่ยน CO_2 เป็น CH_4 ได้ อีกทั้ง H_2 นี้สามารถถูกใช้ป้อนสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเปลี่ยน CO_2 เป็น CH_4 ได้ จึงคิดที่จะสร้างโมเดลเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนโดยให้ปฏิกิริยาเปลี่ยน CO_2 เป็น CH_4 อยู่ในส่วนท่อและปฏิกิริยาเปลี่ยน CH_4 เป็น C_6H_6 อยู่ในส่วนเปลือก มีเมมเบรนที่ให้ H_2 ผ่านได้เพียงอย่างเดียว และพิจารณาอิทธิพลของสภาวะการดำเนินไปของปฏิกิริยา (ได้แก่ เวลาเชิงสเปซ (Space time) อุณหภูมิ (T_0) และความดัน (P_0) ที่ปากทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์) ดังนั้น โครงการนี้จึงมุ่งที่จะประเมินพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนโดยศึกษาอิทธิพลของเวลาเชิงสเปซ อุณหภูมิขาเข้าและความดันขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์ที่มีผลต่อค่าการแปลงผันทางเคมีของสารตั้งต้น ค่าผลได้ และค่าการเลือกเกิดของสารผลิตภัณฑ์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อประเมินพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์เคมีสำหรับปฏิกิริยาเปลี่ยน CO_2 เป็น CH_4 และปฏิกิริยาเปลี่ยน CH_4 เป็น C_6H_6 โดยศึกษาอิทธิพลของเวลาเชิงสเปซ อุณหภูมิขาเข้าและความดันขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์ที่มีต่อค่าการแปลงผันทางเคมี ค่าผลได้ และค่าการเลือกเกิด

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองแบบ 1 มิติ และสมมติให้ปฏิกิริยาเชิงเร่งแบบวิวิธพันธุ์เป็น pseudo-homogeneous

1.3.2 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนที่ใช้เป็นแบบปฏิบัติงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่และอุณหภูมิไม่คงที่

1.3.3 ปรับเวลาเชิงสเปซระหว่าง 100 ถึง 800 $kg \cdot s/mol$ ปรับอุณหภูมิขาเข้าระหว่าง 200 ถึง 700 $^{\circ}C$ และความดันขาเข้าระหว่าง 1 ถึง 10 atm

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบอิทธิพลของสภาวะการทำปฏิกิริยาต่อค่าการแปลงผันทางเคมี (Conversion) ค่าผลได้

(Yield) และค่าการเลือกเกิด (Selectivity) ในช่วงที่ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปฏิกริยาเปลี่ยนเปลี่ยน CO₂ เป็น CH₄

ปฏิกริยาดังกล่าวเกิดจาก CO₂ ทำปฏิกริยากับ H₂ และได้ผลิตภัณฑ์เป็น CH₄ และ H₂O ธรรมชาติของปฏิกริยาเป็นปฏิกริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ ปฏิกริยาดังกล่าวถูกทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ โดยมีตัวเร่งปฏิกริยาที่นิยมใช้คือตัวเร่งปฏิกริยาที่มีนิกเกิลเป็นหลักและตัวเร่งปฏิกริยาที่มีรูทีเนียมเป็นหลัก ตัวเร่งปฏิกริยาที่มีนิกเกิลเป็นหลักมีข้อดีคือสามารถทนอุณหภูมิที่สูงได้ แต่มีข้อเสียคือจะเสื่อมสภาพเมื่อถูกสัมผัสกับสารประกอบกำมะถันและสารหนู [7] ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกริยาที่มีรูทีเนียมเป็นหลักมีข้อดีคือเป็นตัวเร่งที่ทำหน้าที่ได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิต่ำ แต่มีข้อเสียคือมีราคาแพงกว่าแบบนิกเกิล [7] ในทางอุตสาหกรรมจึงเลือกใช้แบบที่มีนิกเกิลเป็นหลัก ปฏิกริยาดังกล่าวมักถูกทำที่อุณหภูมิในช่วงที่ไม่สูงกว่า 350 °C เนื่องจากที่สภาวะอุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกริยาข้างเคียงคือ ปฏิกริยาย้อนกลับของ CO₂ Methanation และปฏิกริยาย้อนกลับของ water gas shift (Reverse water gas shift: RWGS) โดยที่ทั้งคู่เป็นปฏิกริยาดูดความร้อนแบบผันกลับได้ ปฏิกริยาทั้งคู่ทำให้ค่าผลได้ของ CH₄ ลดลง [8]

ปฏิกริยาเปลี่ยน CO₂ เป็น CH₄ ประกอบด้วย



ในการศึกษา มีความจำเป็นต้องทราบสมการกฏอัตราเพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ที่ต้องการ ในปฏิกริยาเปลี่ยน CO₂ เป็น CH₄ มีผู้ศึกษาและสร้างสมการกฏอัตราเป็นจำนวนมาก สมการกฏอัตราดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกริยา ในที่นี้ใช้ตัวเร่งปฏิกริยาที่มีนิกเกิลเป็นหลัก ดังนั้นจึงเลือกใช้สมการอัตรา (2.3) จาก Miguel และคณะ [7] สมการดังกล่าวเกิดจากการตัดพจน์ของการครอบคลุมพื้นที่บนตัวเร่งปฏิกริยาของ H₂ และ CO จากสมการกฏอัตรา (2.2) ของ Koschany และคณะ [10] เนื่องจากการตัดพจน์ดังกล่าวให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลของผลการทดลองมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_{CH_4} = \frac{k_{sr1} P_{CO_2}^{0.5} P_{H_2}^{0.5}}{\left(1 + K_{OH} \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}^{0.5}} + K_{H_2}^{0.5} P_{H_2}^{0.5} + K_{mix} P_{CO_2}^{0.5}\right)^2} \left(1 - \frac{P_{CH_4} P_{H_2}^2}{P_{CO_2} P_{H_2}^4 K_{eq, sr1}}\right) \quad (2.2)$$

$$r_{CH_4} = \frac{k_{sr1} P_{CO_2}^{0.5} P_{H_2}^{0.5}}{\left(1 + K_{OH} \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}^{0.5}}\right)^2} \left(1 - \frac{P_{CH_4} P_{H_2}^2}{P_{CO_2} P_{H_2}^4 K_{eq, sr1}}\right) \quad (2.3)$$

2.2 ปฏิกริยาเปลี่ยนเปลี่ยน CH₄ เป็น C₆H₆

ปฏิกริยาดังกล่าวเกิดจาก CH₄ ทำปฏิกริยาบนตัวเร่งปฏิกริยากลายเป็น C₆H₆ ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาดูดความร้อนแบบผันกลับได้ โดยทั่วไปจะถูกทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุโดยมีตัวเร่งปฏิกริยาที่นิยมใช้คือ โลหะ เช่น โมลิบดีนัม ทังสแตน ทองแดง ซึ่งถูกรองรับบนซีโอไลต์ โลหะกลุ่มนี้ว่องไวที่สุดสำหรับปฏิกริยานี้ ซีโอไลต์ซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงสามารถเพิ่มค่าการเลือกเกิดของ C₆H₆ ได้ [Karakaya] แต่ปฏิกริยานี้มีข้อจำกัดคือต้องทำที่อุณหภูมิสูงในช่วง 627 ถึง 827 °C และถูกจำกัดด้วยสมดุล นำมาซึ่งค่าการแปลงผันทางเคมีที่ต่ำ (ประมาณ 12% [11] ที่อุณหภูมิ 727 °C)

อ้างอิงตามงานวิจัยของ Karakaya และคณะ [12] ขั้นตอนการเกิดปฏิกริยานี้ประกอบด้วยขั้นตอนย่อย 54 ขั้นตอน แต่ถูกลดรูปให้เหลือ 3 ขั้นตอนปฏิกริยาย่อยเพื่อนำสมการกฏอัตราใช้การคำนวณผลลัพธ์ที่ต้องการโดย Y. Zhu และคณะ [13] ซึ่งประกอบด้วยปฏิกริยาหลัก 2 ปฏิกริยาและปฏิกริยาข้างเคียง 1 ปฏิกริยา

ปฏิกริยาหลัก ได้แก่



ปฏิกริยาข้างเคียง



ใช้สมการอัตราการเกิดปฏิกริยาจาก Y. Zhu และคณะ [10]

$$r_{C_2H_4} = k_{mda1} P_{CH_4} \left(1 - \frac{P_{C_2H_4} P_{H_2}^2}{P_{CH_4}^2 K_{eq, mda1}}\right) \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_{C_6H_6} = k_{mda2} P_{C_2H_4} \left(1 - \frac{P_{C_6H_6} P_{H_2}^3}{P_{C_2H_4}^3 K_{eq,mda2}} \right) \quad (2.8)$$

$$r_{C_{10}H_8} = k_{mda3} P_{C_2H_4} P_{C_6H_6} \left(1 - \frac{P_{C_{10}H_8} P_{H_2}^3}{P_{C_6H_6} P_{C_2H_4}^2 K_{eq,mda3}} \right) \quad (2.9)$$

2.3 หลักการพิจารณาการเลือกโมเดล

ในการเลือกโมเดลเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ โดยทั่วไปแล้วแบ่งโมเดลออกเป็น 3 แบบ ได้แก่

1. โมเดล 1 มิติ เป็นโมเดลในการศึกษาที่มีการคำนวณอัตราการไหลเชิงโมล อุณหภูมิ หรือความดันเพียงแกนเดียวกล่าวคือแกนความยาวของเครื่องปฏิกรณ์
2. โมเดล 2 มิติ เป็นโมเดลที่ถูกพัฒนาจากโมเดล 1 มิติโดยเพิ่มการคำนวณอัตราการไหลเชิงโมล อุณหภูมิ หรือความดันที่เปลี่ยนไปตามแนวรัศมี
3. โมเดล 3 มิติ เป็นโมเดลที่มีการคำนวณอัตราการไหลเชิงโมล อุณหภูมิ หรือความดันที่เปลี่ยนไปตามแนวแกน แนวรัศมี และแนวเชิงมุม

สำหรับการศึกษา เลือกใช้โมเดล 1 มิติเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ เป็นโมเดลอย่างง่ายและเป็นพื้นฐานในการเข้าใจโมเดลอื่นต่อไป ในการคำนวณอัตราการไหลเชิงโมล อุณหภูมิหรือความดันที่เปลี่ยนไปตามแนวแกนหรือความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ จำเป็นต้องสร้างสมการดุลโมลและสมการดุลพลังงานเพื่อใช้คำนวณค่าดังกล่าว

สมการดุลโมลสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ โดยมีสมมติฐานให้ให้ปฏิกิริยาที่เกิดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น pseudo-homogeneous

$$\frac{dF_i}{dV} = R_i \quad (2.10)$$

กรณีในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน มีสารที่แพร่เข้ามาในระบบจึงจำเป็นต้องเพิ่มพจน์ของการแพร่ ได้สมการดังนี้

$$\frac{dF_i}{dV} = R_i + J_i \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการดุลพลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ

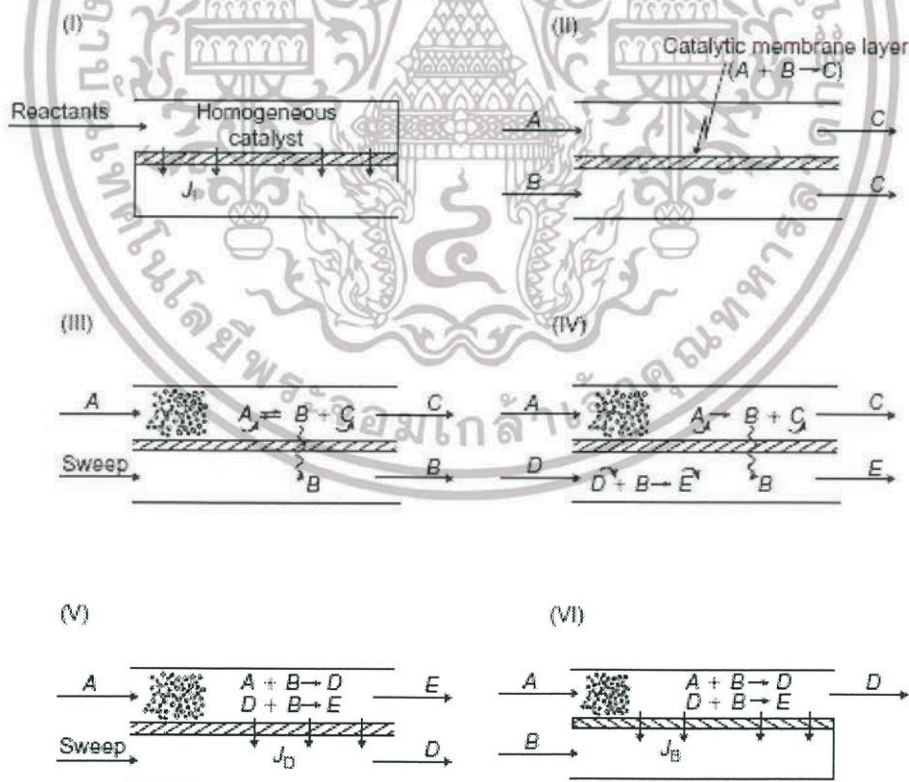
$$\sum F_i C_{p_i} \frac{dT}{dV} = -\sum H_i R_i \quad (2.12)$$

กรณีในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน สารที่แพร่เข้ามานั้นพาพลังงานมาด้วย จึงได้สมการดังนี้

$$\sum F_i C_{p_i} \frac{dT}{dV} = -\sum H_i R_i + Ua(T_{ext} - T) + J_i (H_{i,P} - H_{i,M}) \quad (2.13)$$

2.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน [6]

เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน คือการรวมกันของเครื่องปฏิกรณ์และหน่วยแยกที่เป็นเมมเบรน เมมเบรนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวกระจายสารตั้งต้นหรือเป็นชั้นเลือกผ่านและตัวเร่งปฏิกิริยา วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนขึ้นอยู่กับกระบวนการแยกสารที่ต้องการ อุณหภูมิขณะดำเนินการ แรงขับเคลื่อนที่ใช้เพื่อการแยกสาร ค่าการเลือกผ่าน และความเสถียรทางกลและความร้อน โดยทั่วไปแล้ว แนวคิดในการสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนสามารถแบ่งได้เป็น 6 กลุ่ม ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปร่างเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนประเภทต่างๆ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละแบบมีแนวคิดที่ ในการสร้าง ดังนี้

แบบ	แนวคิด
I	สารผลิตภัณฑ์จะถูกแยกออกมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวอย่างต่อเนื่อง
II	เมมเบรนทำหน้าที่เป็นชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา
III	การเอาเฉพาะสารผลิตภัณฑ์ B ออกช่วยเพิ่มความสามารถในการผลิตสาร B
IV	การให้เฉพาะสาร B ผ่านเพื่อมาทำปฏิกิริยาในปฏิกิริยาที่ 2
V	การเอาสารผลิตภัณฑ์ D ออกเพื่อหลีกเลี่ยงปฏิกิริยาที่จะเกิดต่อมาซึ่งไม่ต้องการ
VI	การเติมสารตั้งต้นผ่านเมมเบรนเพื่อได้ค่าการเลือกเกิดและค่าผลได้ที่สูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Miguel และคณะ [7] ศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา CO_2 Methanation บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะนิกเกิลเป็นหลักโดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งแบบอุณหภูมิคงที่ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 250 ถึง 350 °C ที่ความดันบรรยากาศ พบว่า เมื่อกำหนดให้สภาวะที่ทำการทดลองไม่ได้รับผลของความต้านทานจากการถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อน อัตราการเกิดแก๊สมีเทนสอดคล้องกับสมการอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่ถูกเสนอโดย Koschany และคณะ [9] ประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ปรากฏในสมการโดยไม่คิดพจน์ในส่วนของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ครอบคลุมพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

Andreina และคณะ [10] ศึกษาพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายท่อสำหรับปฏิกิริยาเปลี่ยนก๊าซ CO_2 เป็นก๊าซ CH_4 บนตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งประกอบด้วยนิกเกิล ซีเรียและอะลูมินาโดยใช้ซอฟต์แวร์ Ansys Fluent และทำการจำลองโดยกำหนดสภาวะต่างๆ ดังนี้ สารตั้งต้นมีก๊าซ CO_2 ก๊าซ H_2 และก๊าซ Ar เป็นองค์ประกอบในช่วงอุณหภูมิ 473 ถึง 623 K และช่วงความดัน 1 ถึง 30 atm พบว่าปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดที่ปากทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์ อุณหภูมิของผนังเป็นปัจจัยที่จะช่วยเพิ่มปริมาณก๊าซ CH_4 อุณหภูมิที่ต่ำของผนังช่วยเลื่อนสมดุลไปข้างหน้า ได้ค่าการแปลงผันทางเคมีที่สูงขึ้น แต่แทบไม่มีผลกระทบต่อบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา การเพิ่มความดันเพิ่มค่าการแปลงผันทางเคมีให้สูงขึ้นแต่ในทางกลับกันเป็นการเพิ่มต้นทุน อย่างไรก็ตามหากดำเนินปฏิกิริยาในสภาวะที่ความเร็วเชิงสเปซของก๊าซในเวลา 1 ชั่วโมง (Gas hourly space velocity: GHSV) ที่สูงสามารถลดต้นทุนด้วยการหลีกเลี่ยงการใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็นได้ แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นจาก GHSV ที่สูงก่อให้เกิดจุดความร้อนมากขึ้น จึงต้องลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลงเพื่อปลดปล่อยความร้อนดังกล่าว ท้ายที่สุดผู้เขียนได้เสนอให้ใช้ท่อของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 9.25 mm มีความยาว 250 mm โดยดำเนินปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเข้า 473 K อุณหภูมิของผนัง 373 K ความดันเข้า 5 atm และ GHSV 14,400 h^{-1} ได้ค่าการแปลงผันทางเคมี 0.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Y. Zhu และคณะ [11] ประเมินค่าพารามิเตอร์ของอาร์เรเนียสในช่วงอุณหภูมิ 948 ถึง 1,023 K จากค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 K โดยใช้โมเดลซึ่งประกอบไปด้วย 3 ปฏิกิริยาย่อยสำหรับปฏิกิริยาเปลี่ยนมีเทนเป็นเบนซีน (Methane dehydroaromatization: MDA) บนตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมที่ถูกรองรับด้วยซีโอไลต์ โมเดลดังกล่าวมี CH_4 เป็นสารตั้งต้น ได้เบนซีน (C_6H_6) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการและมีผลพลอยได้ซึ่งประกอบไปด้วยเอทิลีน (C_2H_4) ไฮโดรเจน (H_2) และแนฟทาซีน (C_{10}H_8) โมเดลสามารถยืนยันโปรไฟล์ความเข้มข้นของสารชนิดต่างๆภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุในสภาวะอุณหภูมิกงที่ได้ แต่ปฏิกิริยาข้างต้นถูกจำกัดด้วยสมดุล ดังนั้น จึงคิดปรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุให้มีผนังแบบเมมเบรนซึ่ง H_2 สามารถแพร่ออกมาได้เพื่อให้สมดุลเลื่อนไปทางฝั่งของสารผลิตภัณฑ์ ผลปรากฏว่าการกำจัด H_2 ออกทำให้ค่าการแปลงผันทางเคมีของ CH_4 ดีขึ้น แต่ทำให้ได้ค่าการเลือกเกิดของ C_6H_6 ตกลง และได้ค่าการเลือกเกิดของ C_{10}H_8 ที่สูงกว่าเบนซีน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 หลักการประเมินพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์

1.1 สร้างสมการดุลโมลของสารที่อยู่ในระบบสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีที่กำลังพิจารณา ยกตัวอย่างสมการดุลโมลของสาร i

$$F_{i0} - F_i + \int_0^V R_i dV = \frac{dN_i}{dt}$$

ปรับสมการดุลโมลเพื่อใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อพิจารณาเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตบรจในสภาวะคงตัว (Steady state) และสมมติให้ระบบเป็น pseudo-homogeneous phase จะได้

$$\frac{dF_i}{dV} = R_i$$

1.2 ศึกษาจลนพลศาสตร์หรือกลไกของปฏิกิริยาที่สนใจจากงานวิจัยเพื่อนำสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยามาใส่ในสมการดุลโมล รวมไปถึงข้อมูลที่จำเป็นต่อการแก้สมการ โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวอาจอยู่ในฟังก์ชันของค่าการแปลงผันทางเคมี ความเข้มข้น หรือความดันย่อย

1.3 ตั้งสมมติฐานที่จำเป็น เช่น ระบบมีอุณหภูมิคงที่หรือมีอุณหภูมิไม่คงที่ ระบบมีอัตราการไหลเชิงมวลคงที่หรือมีอัตราการไหลเชิงมวลไม่คงที่

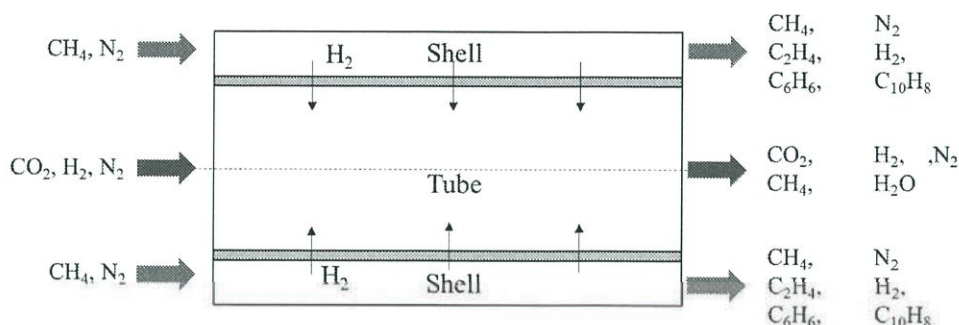
1.4 ใส่สมการสภาวะขอบเขต (Boundary condition equation)

1.5 คำนวณหาค่าอัตราการไหลเชิงโมลของสารแต่ละสารที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์โดยอาศัยวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical methods)

1.6 ทำการประเมินความสามารถของเครื่องปฏิกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีวิจัย



รูปที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

1. ศึกษาเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ (PBR) และเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน (MR) ซึ่งเป็นแบบที่มีปฏิกิริยาทั้งส่วนเปลือก (Shell) และส่วนท่อ (Tube) โดยมีโครงสร้างภายในประกอบด้วย

1.1 ส่วนท่อ ภายในมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีนิกเกิลเป็นหลักเพื่อใช้ทำปฏิกิริยาเปลี่ยน CO_2 เป็น CH_4 (CO_2 Methanation)

1.2 ส่วนเมมเบรน เมมเบรนทำมาจากแพลเลเดียม (Pd) ทำหน้าที่เป็นตัวเลือกให้ H_2 แพร่ผ่านได้เพียงอย่างเดียว

1.3 ส่วนเปลือก ภายในมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโมลิบดีนัมที่ถูกรองรับด้วยซีโอไลต์เพื่อใช้ทำปฏิกิริยาเปลี่ยน CH_4 เป็น C_6H_6 (Methane Dehydroaromatizaion)

และมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. เครื่องปฏิกรณ์ดำเนินปฏิกิริยาในสภาวะคงตัว (Steady state)
2. เครื่องปฏิกรณ์ดำเนินปฏิกิริยาในสภาวะความดันคงที่ (Isobaric state)
3. ปฏิกิริยาดำเนินในรูปแบบเนื้อเดียวเทียม (Pseudo-homogeneous)
4. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารตามแนวรัศมี (No radial variation)
5. ไม่มีความดันลดเกิดขึ้น (No pressure drop)

ในการจำลอง ใช้สมการดุลโมลและสมการดุลพลังงานที่สภาวะคงตัว ดังต่อไปนี้

ส่วนของท่อ (Tube: T)

สมการดุลโมล

$$\frac{dF_i^T}{dV^T} = R_i + j_i a^T \quad (3.1)$$

สมการดุลพลังงาน

$$\sum F_i^T C_{pi} \frac{dT^T}{dV^T} = -\sum H_i R_i + Ua^T (T^S - T^T) + j_i a^T (H_{H_2,S} - H_{H_2,T}) \quad (3.2)$$

ส่วนของเปลือก (Shell: S)

สมการดุลโมล

$$\frac{dF_i^S}{dV^S} = R_i + j_i a^S \quad (3.3)$$

สมการดุลพลังงาน

$$\sum F_i^S C_{pi} \frac{dT^S}{dV^S} = -\sum H_i R_i + Ua^S (T^T - T^S) + j_i a^S (H_{H_2,T} - H_{H_2,S}) \quad (3.4)$$

2. ในการศึกษาปฏิกิริยาในส่วนที่อ้างอิงข้อมูลของปฏิกิริยาเปลี่ยน CO_2 เป็น CH_4 (CO_2 Methanation: SR) จาก Miguel และคณะ [7]

ปฏิกิริยาเปลี่ยน CO_2 เป็น CH_4 (CO_2 Methanation) เป็นปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเพียงขั้นตอนเดียว



มีสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$r_{\text{CH}_4} = \frac{k_{sr1} p_{\text{CO}_2}^{0.5} p_{\text{H}_2}^{0.5}}{\left(1 + K_{\text{OH}} \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}^{0.5}}\right)^2} \left(1 - \frac{p_{\text{CH}_4} p_{\text{H}_2}^2}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}^4 K_{eq, sr1}}\right) \quad (3.6)$$

เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ Miguel เสนอให้ผลการจำลองที่เบี่ยงเบนไปจากผลการทดลอง จึงจำเป็นต้องทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ (Parameter estimation) ของระบบ SR โดยอ้างอิงผลการทดลองของ Miguel และคณะ [7] ดังต่อไปนี้

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิอ้างอิง 573 K (k_0)

และพลังงานก่อกัมมันต์ (E_a) โดยวิธีอัตราที่เวลาเริ่มต้น (Initial rate method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_{\text{CH}_4} = \frac{dY_{\text{CH}_4}}{d(W_{\text{cat}} / F_{\text{CO}_2})} \quad (3.7)$$

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของค่าคงที่สมดุลการดูดซับของไฮดรอกไซด์ (K_{OH}) และเอลทาลปีของการดูดซับ (ΔH) โดยวิธีปริมาณสารสัมพันธ์ที่ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล

หาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาจากงานวิจัยของ Peter และคณะ [13]

$$K_{eq, sr1} = \exp \left[\left(\frac{1.0}{1.987} \right) \left(\frac{56000}{(T^T)^2} + \frac{34633}{T^T} - 16.4 \ln(T^T) + 0.00557T^T \right) + 33.165 \right] \quad (3.8)$$

ปฏิกิริยาในส่วนเปลือก อ้างอิงข้อมูลของปฏิกิริยาเปลี่ยน CH_4 เป็น C_6H_6 (Methane Dehydroaromatization: MDA) จาก Y. Zhu และคณะ [11]

ปฏิกิริยาเปลี่ยน CH_4 เป็น C_6H_6 เป็นปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา 3 ขั้นตอน ได้แก่



มีสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

$$r_{\text{C}_2\text{H}_4} = k_{mda1} p_{\text{CH}_4} \left(1 - \frac{p_{\text{C}_2\text{H}_4} p_{\text{H}_2}^2}{p_{\text{CH}_4}^2 K_{eq,mda1}} \right) \quad (3.12)$$

$$r_{\text{C}_6\text{H}_6} = k_{mda2} p_{\text{C}_2\text{H}_4} \left(1 - \frac{p_{\text{C}_6\text{H}_6} p_{\text{H}_2}^3}{p_{\text{C}_2\text{H}_4}^3 K_{eq,mda2}} \right) \quad (3.13)$$

$$r_{\text{C}_{10}\text{H}_8} = k_{mda3} p_{\text{C}_2\text{H}_4} p_{\text{C}_6\text{H}_6} \left(1 - \frac{p_{\text{C}_{10}\text{H}_8} p_{\text{H}_2}^3}{p_{\text{C}_6\text{H}_6} p_{\text{C}_2\text{H}_4}^2 K_{eq,mda3}} \right) \quad (3.14)$$

3. สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน ใช้สมการอัตราการแพร่ผ่านของ H_2 จาก Shu และคณะ [14]

$$j_{\text{H}_2} = \frac{Q_0 \exp(-E_p / RT)}{\delta} \left(\sqrt{p_{\text{H}_2}^S} - \sqrt{p_{\text{H}_2}^T} \right) \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.สุดท้ายจึงทำการประเมินความสามารถของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุและแบบเมมเบรนตามสมการในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สูตรการคำนวณเพื่อประเมินพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์

Parameter	Tube (SR)	Shell (MDA)
Conversion (X)	$X_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CO}_2,\text{in}} - F_{\text{CO}_2}}{F_{\text{CO}_2,\text{in}}}$	$X_{\text{CH}_4} = \frac{F_{\text{CH}_4,\text{in}} - F_{\text{CH}_4}}{F_{\text{CH}_4,\text{in}}}$
Yield (Y)	$Y_{\text{CH}_4} = \frac{F_{\text{CH}_4}}{F_{\text{CO}_2,\text{in}}}$	$Y_{\text{C}_2\text{H}_4} = \frac{F_{\text{C}_2\text{H}_4}}{F_{\text{CH}_4,\text{in}}}$ $Y_{\text{C}_{10}\text{H}_8} = \frac{F_{\text{C}_{10}\text{H}_8}}{F_{\text{CH}_4,\text{in}}}$ $Y_{\text{C}_6\text{H}_6} = \frac{F_{\text{C}_6\text{H}_6}}{F_{\text{CH}_4,\text{in}}}$
Selectivity (S)		$S_{\text{C}_2\text{H}_4} = \frac{2F_{\text{C}_2\text{H}_4}}{F_{\text{CH}_4,\text{in}} - F_{\text{CH}_4}}$ $S_{\text{C}_6\text{H}_6} = \frac{6F_{\text{C}_6\text{H}_6}}{F_{\text{CH}_4,\text{in}} - F_{\text{CH}_4}}$ $S_{\text{C}_{10}\text{H}_8} = \frac{10F_{\text{C}_{10}\text{H}_8}}{F_{\text{CH}_4,\text{in}} - F_{\text{CH}_4}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรควบคุมในการศึกษา

ตัวแปรควบคุม	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
1. ส่วนประกอบของสายป้อนฝั่งท่อ			
- CO ₂	$y_{CO_2,in}$	0.04	-
- H ₂	$y_{H_2,in}$	10^{-5}	-
2. อัตราการไหลเชิงปริมาตรฝั่งท่อ	$V_{0,sr}$	3.85×10^{-6}	m ³ /s
3. เวลาเชิงสเปซในระบบ SR	$W_{cat}/F_{CO_2,in}$	200	kg*s/mol
4. ส่วนประกอบของสายป้อนฝั่งเปลือก			
- CH ₄	$y_{CH_4,in}$	0.95	-
5. อัตราการไหลเชิงปริมาตรฝั่งเปลือก	$V_{0,mda}$	2.06×10^{-6}	m ³ /s

ตารางที่ 3.3 การปรับเปลี่ยนตัวแปรสภาวะในการศึกษาด้วยแบบจำลองอุณหภูมิคงที่และอุณหภูมิไม่คงที่

ตัวแปรที่ศึกษา	สัญลักษณ์	สภาวะของเครื่องปฏิกรณ์	หน่วย
1. เวลาเชิงสเปซในระบบ MDA	$W_{cat}/F_{CH_4,in}$	100-800	kg*s/mol
2. อุณหภูมิขาเข้า	T_0	300-700	°C
3. ความดันขาเข้า	P_0	1-10	atm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

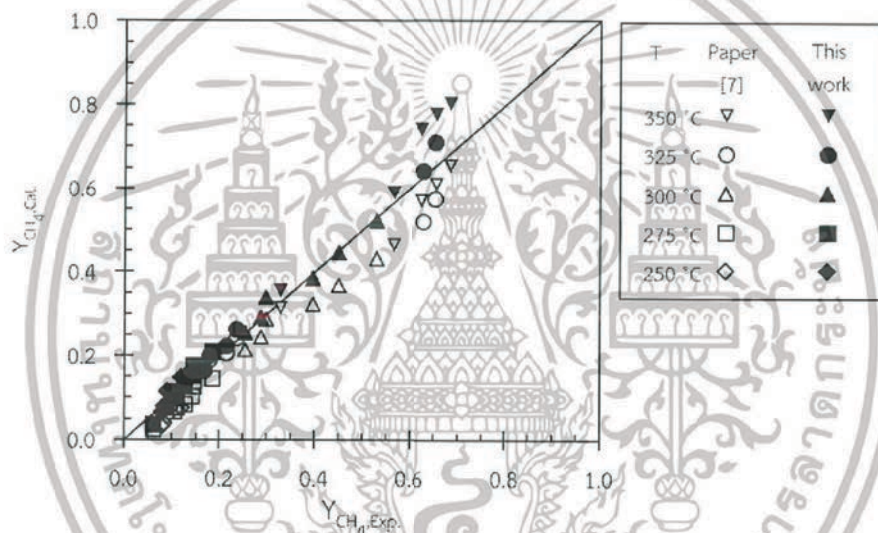
ผลการจำลอง

4.1 การประเมินความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

ปฏิกิริยาเปลี่ยนเปลี่ยน CO_2 เป็น CH_4 (CO_2 Methanation: SR)

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ประมาณในงานวิจัยได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับ

ผลการทดลองมากกว่าเมื่อใช้ parameter ที่ Miguel นำเสนอ



รูปที่ 4.1 ความสอดคล้องของผลการทดลองกับผลการคำนวณโดยใช้ parameter ที่ประมาณใน

งานวิจัยนั้นเปรียบเทียบกับ parameter ที่ Miguel นำเสนอที่อุณหภูมิต่างๆ: 350 °C (▽,▼),

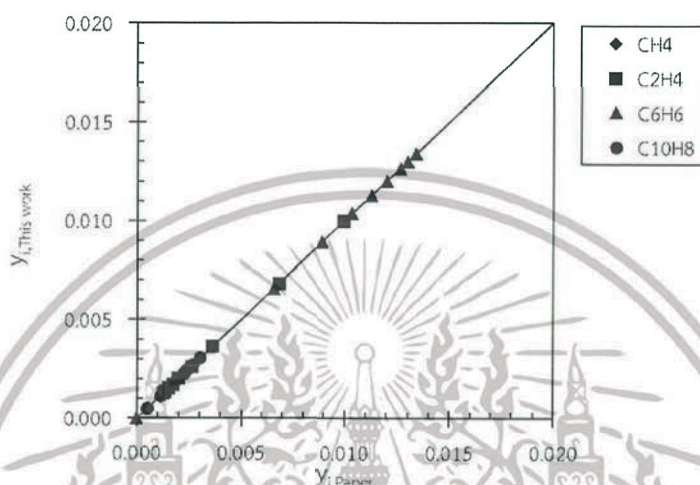
325 °C (○,●), 300 °C (△,▲), 275 °C (□,■) , 250 °C (◇,◆)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาเปลี่ยน CH_4 เป็น C_6H_6 (Methane Dehydroaromatization: MDA)

จากรูปที่ 4.2 พบว่าผลการจำลองจากการใช้พารามิเตอร์ที่ Y. Zhu นำเสนอสามารถยืนยัน

ผลการจำลองจากงานวิจัยของ Y. Zhu และคณะ [11] ได้อย่างแม่นยำ



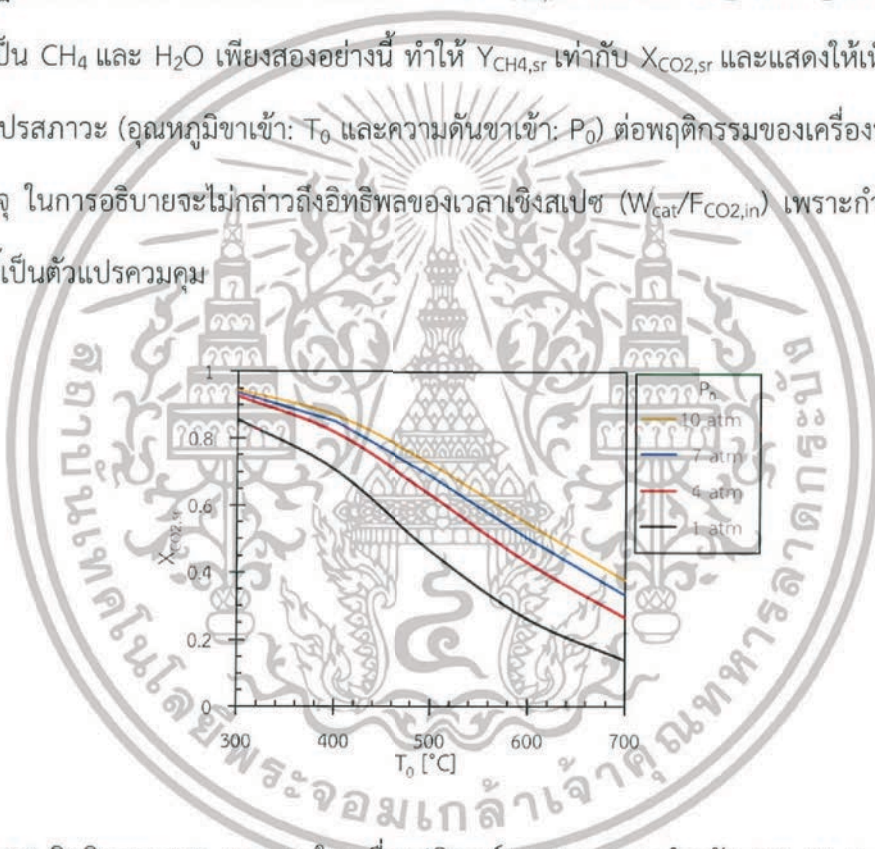
รูปที่ 4.2 ความสอดคล้องของผลการจำลองของ Y. Zhu และคณะ [11] กับผลการจำลองโดยใช้ parameter ที่ Y. Zhu นำเสนอโดยใช้โปรแกรมที่อุณหภูมิ 725 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการจำลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ

4.2.1 ผลการจำลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุในสภาวะแบบอุณหภูมิคงที่

ในการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับในแต่ละปฏิกิริยา มีจุดประสงค์เพื่อสร้างความเข้าใจธรรมชาติของแต่ละปฏิกิริยาและเห็นถึงข้อจำกัดของแต่ละปฏิกิริยา สำหรับปฏิกิริยาเปลี่ยน CO_2 เป็น CH_4 (CO_2 Methanation) จะพิจารณาความสามารถของเครื่องปฏิกรณ์จากการแปลงผันทางเคมีของ CO_2 ($X_{\text{CO}_2,\text{sr}}$) เนื่องจาก CO_2 และ H_2 ที่ทำปฏิกิริยาถูกเปลี่ยนเป็น CH_4 และ H_2O เพียงสองอย่างนี้ ทำให้ $Y_{\text{CH}_4,\text{sr}}$ เท่ากับ $X_{\text{CO}_2,\text{sr}}$ และแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรสภาวะ (อุณหภูมิขาเข้า: T_0 และความดันขาเข้า: P_0) ต่อพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ ในการอธิบายจะไม่กล่าวถึงอิทธิพลของเวลาเชิงสเปซ ($W_{\text{cat}}/F_{\text{CO}_2,\text{in}}$) เพราะกำหนดตัวแปรสภาวะนี้เป็นตัวแปรควบคุม



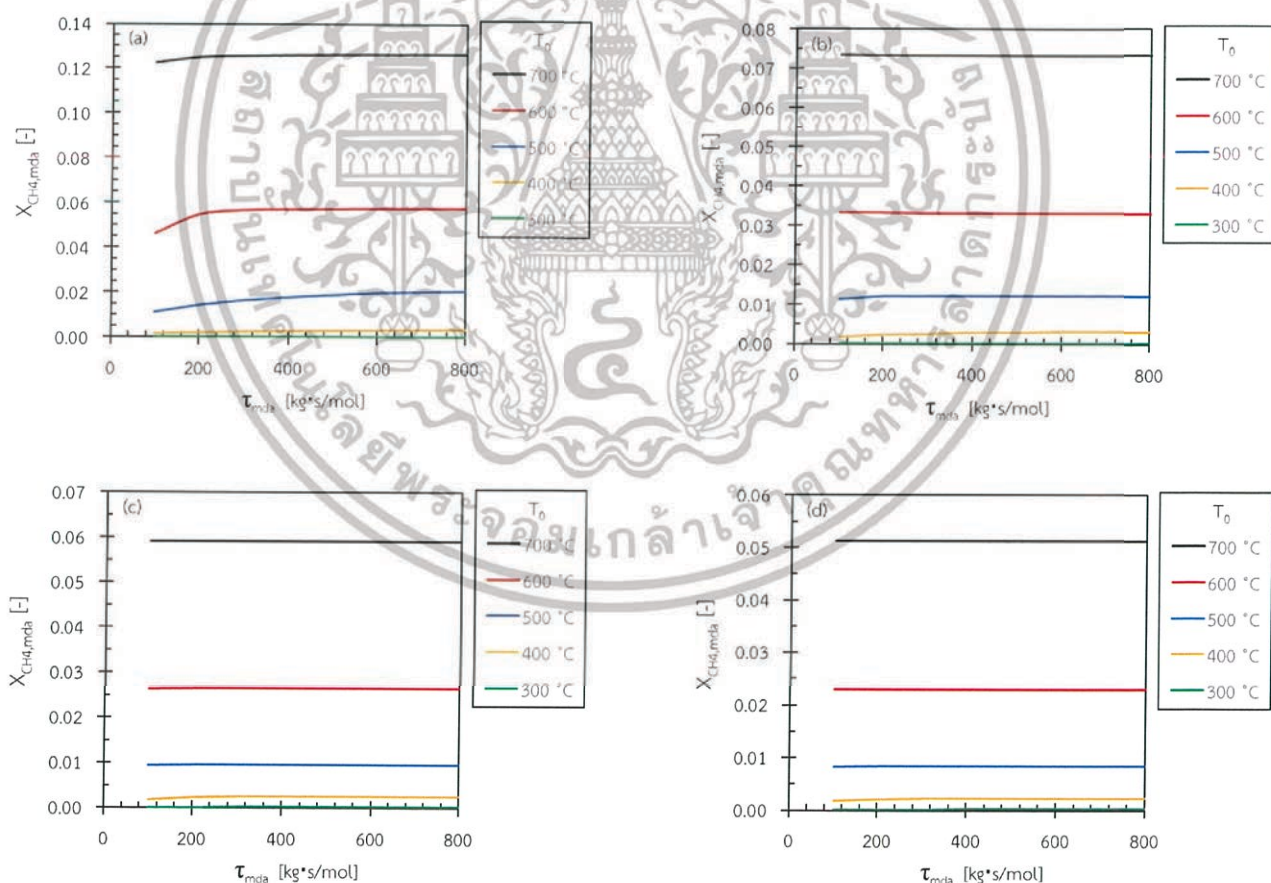
รูปที่ 4.3 อิทธิพลของ T_0 และ P_0 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ CO_2 Methanation

จากรูปที่ 4.3 แสดงถึง X_{CO_2} ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุในกรณีที่กำหนดให้ $y_{\text{H}_2,\text{sr}}$ เท่ากับ 4 เท่าของ $y_{\text{CO}_2,\text{sr}}$ พบว่าเมื่อเพิ่ม T_0 ทำให้ได้ X_{CO_2} ต่ำลง เพราะว่ธรรมชาติของปฏิกิริยา CO_2 Methanation เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ ทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วเมื่อเพิ่ม T_0 และพบว่าเมื่อเพิ่ม P_0 เป็นการรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์มากขึ้น เพราะเมื่อพิจารณาจากสมการเคมีของปฏิกิริยา เลขดุลโมลรวมฝั่งสารตั้งต้นมากกว่าเลขดุลโมลรวมฝั่งสารผลิตภัณฑ์ ทำให้การเพิ่ม P_0 เลื่อนสมดุลไปทางฝั่งของสารผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในการศึกษา กำหนดให้ $y_{H_2, sr}$ เท่ากับ 10^{-5} (สัดส่วนโดยโมลดังกล่าวถูกกำหนดให้น้อย เพราะต้องการให้ H_2 ในฝั่งเปลือก (MDA) แพร่เข้ามาสู่ฝั่งท่อ (SR) ของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน) H_2 ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา CO_2 Methanation กับ CO_2 ในอัตราส่วน 4:1 มีน้อยมาก ดังนั้น H_2 กลายเป็นสารกำหนดปฏิกิริยาแทน CO_2 จึงทำให้ได้ X_{CO_2} ต่ำมาก

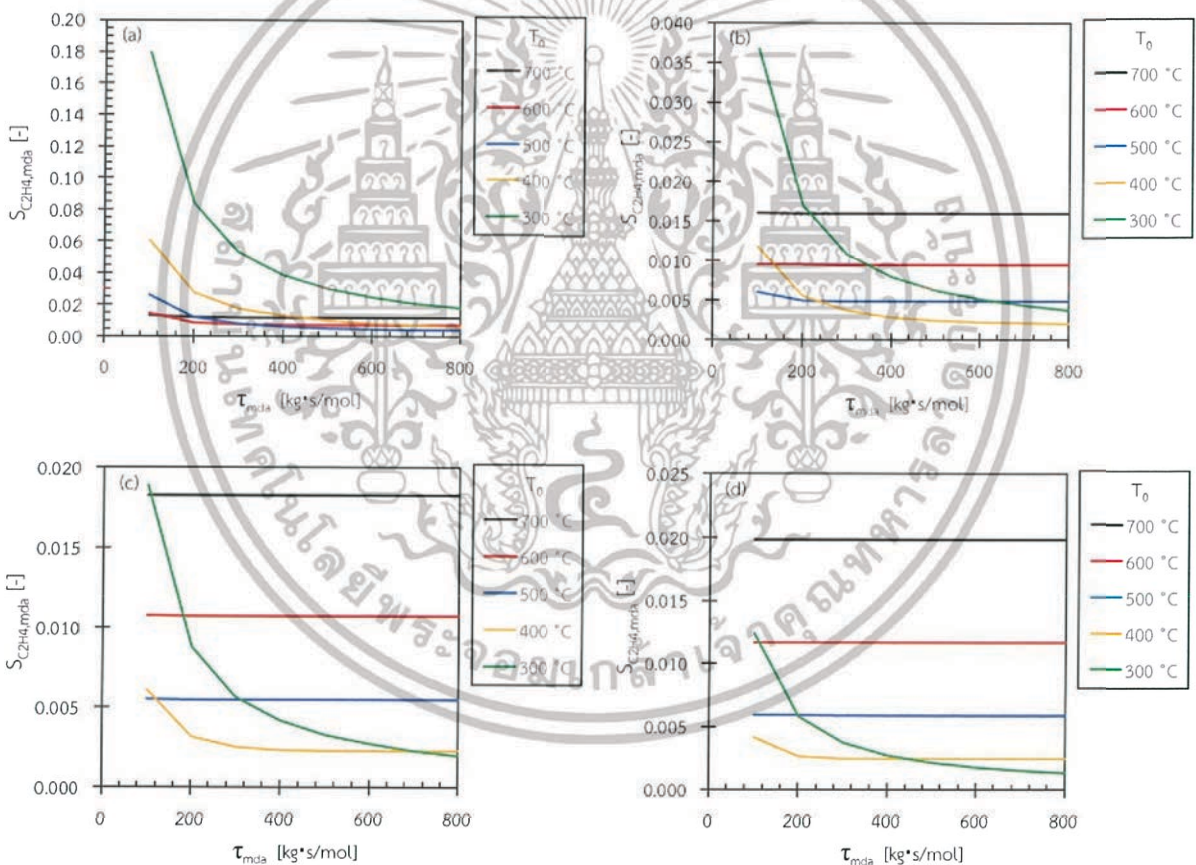
สำหรับปฏิกิริยาเปลี่ยน CH_4 เป็น C_6H_6 (Methane Dehydroaromatization: MDA) จะแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรสถานะ (เวลาเชิงสเปซในระบบMDA: $W_{cat}/F_{CH_4, in}$, อุณหภูมิเข้า: T_0 และความดันเข้า: P_0) ต่อพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ โดยพิจารณาค่าการแปลงผันทางเคมีของ CH_4 ($X_{CH_4, mda}$) ค่าการเลือกเกิด ($S_{i, mda}$) และค่าผลได้ ($Y_{i, mda}$) เมื่อ i คือ C_2H_4 , C_6H_6 และ $C_{10}H_8$



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4, in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm

ต่อ $X_{CH_4, mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ Methane Dehydroaromatization เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

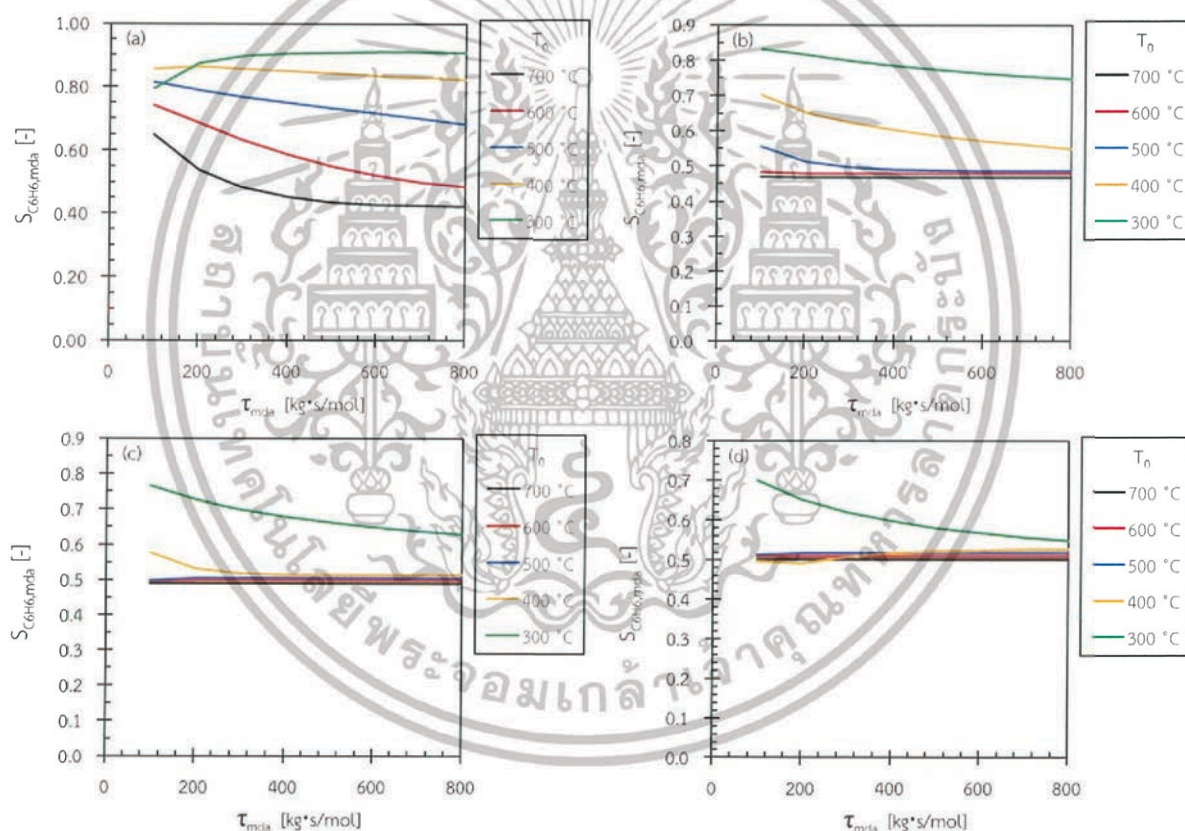
จากรูปที่ 4.4 แสดงถึง $X_{CH_4,mda}$ ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ พบว่าการเพิ่ม $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ส่งผลให้ $X_{CH_4,mda}$ เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเพราะว่าปฏิกิริยาถูกจำกัดด้วยสมดุลของปฏิกิริยา การเพิ่ม T_0 ทำให้ $X_{CH_4,mda}$ เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเพราะว่าธรรมชาติของปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนแบบผันกลับได้ ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ดีที่อุณหภูมิสูง และการเพิ่ม P_0 ทำให้ $X_{CH_4,mda}$ ลดลง เพราะว่าหากรวมสมการเคมีในปฏิกิริยาดังกล่าวจะพบว่าเลขดุลโมลรวมฝั่งสารตั้งต้นน้อยกว่าเลขดุลโมลรวมฝั่งสารผลิตภัณฑ์ ทำให้การเพิ่ม P_0 เลื่อนสมดุลไปทางฝั่งของสารตั้งต้น ปฏิกิริยาเกิดการย้อนกลับ ได้สารผลิตภัณฑ์น้อยลง



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $S_{C_2H_4,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ Methane Dehydroaromatization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึง $S_{C_2H_4,mda}$ ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ พบว่าการเพิ่ม $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ทำให้ $S_{C_2H_4,mda}$ ลดลงเพราะว่า C_2H_4 เป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นและถูกทำลายในปฏิกิริยาหลัก รวมไปถึงถูกใช้ในปฏิกิริยาข้างเคียง การเพิ่ม $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ เป็นการเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยา ทำให้ C_2H_4 ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์เหลือน้อยลง การเพิ่ม T_0 ทำให้ได้ $S_{C_2H_4,mda}$ สูงที่ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ สูงเนื่องจากธรรมชาติของปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนและที่ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ สูงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็ว และการเพิ่ม P_0 ทำให้ $S_{C_2H_4,mda}$ ลดลงเพราะว่าเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm

ต่อ $S_{C_6H_6,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ Methane Dehydroaromatization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 แสดงถึง $S_{C_6H_6,mda}$ ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ พบว่าการเพิ่ม $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ทำให้ $S_{C_6H_6,mda}$ ลดลงเพราะ C_6H_6 ที่เกิดในปฏิกิริยาหลักถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งทำให้เกิด $C_{10}H_8$ การเพิ่ม $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น C_6H_6 จึงลดลง การเพิ่ม T_0 ทำให้ $S_{C_6H_6,mda}$ ลดลงเพราะปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้ามากขึ้น C_6H_6 ที่เกิดมาถูกใช้ทำปฏิกิริยาข้างเคียงมากขึ้น และการเพิ่ม P_0 ทำให้ $S_{C_6H_6,mda}$ ลดลงเพราะว่าเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้ C_6H_6 เกิดน้อยลง

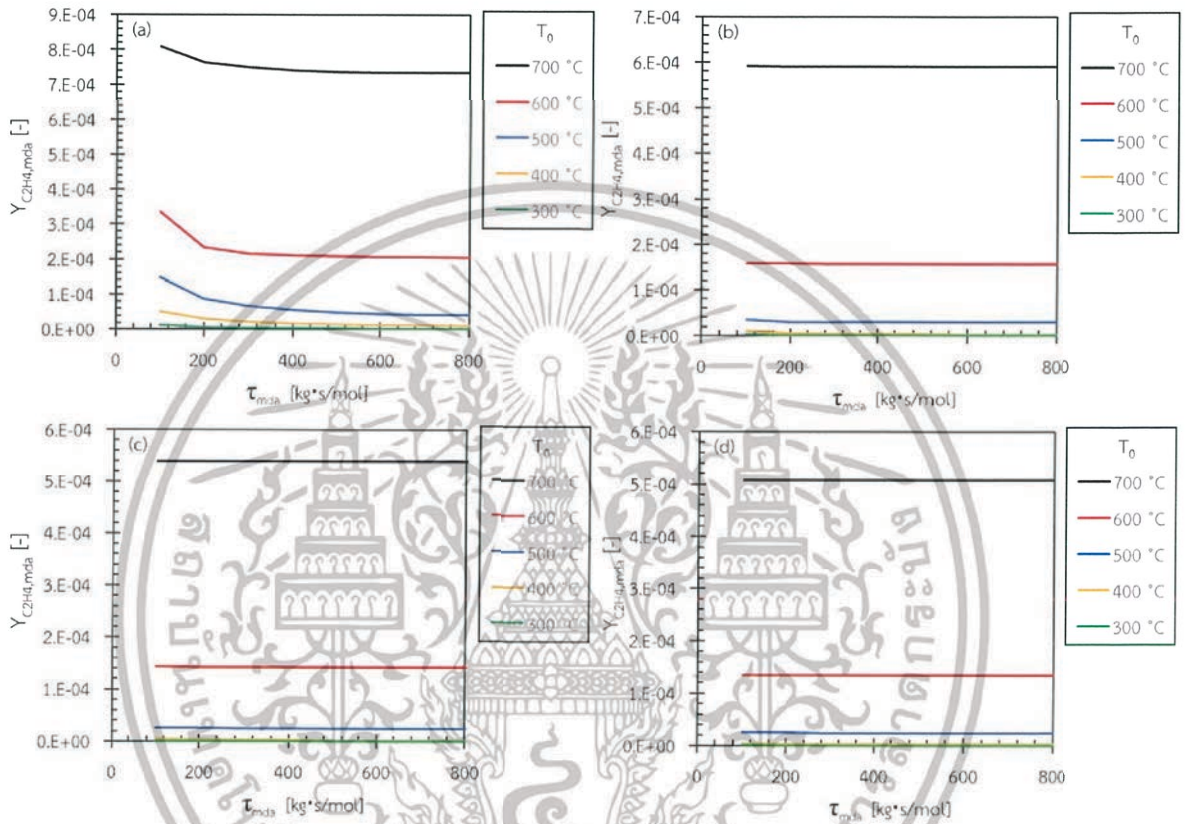


รูปที่ 4.7 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $S_{C_{10}H_8,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ Methane Dehydroaromatization

จากรูปที่ 4.7 แสดงถึง $S_{C_{10}H_8,mda}$ ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ พบว่าการเพิ่ม $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ทำให้ $S_{C_{10}H_8,mda}$ เพิ่มขึ้นเพราะว่าการเพิ่ม $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ เป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี $C_{10}H_8$ ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจาก C_2H_4 ทำปฏิกิริยากับ C_6H_6 ในปฏิกิริยาข้างเคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

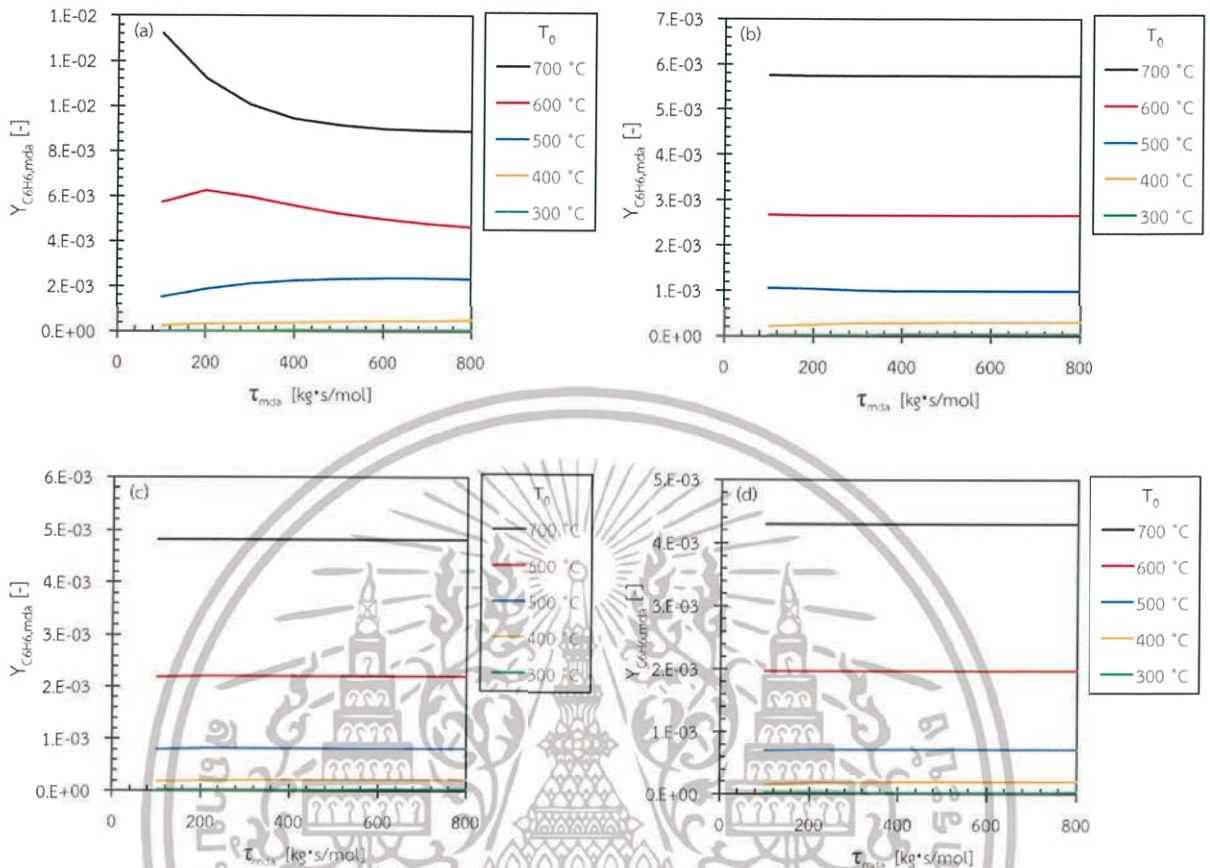
เกิดมากขึ้น การเพิ่ม T_0 ทำให้ $S_{C_{10}H_8, mda}$ เพิ่มขึ้นเพราะว่าปฏิกิริยาดูดความร้อนดำเนินไปได้ดีที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น $C_{10}H_8$ จึงเกิดมาก และการเพิ่ม P_0 ทำให้ $S_{C_{10}H_8, mda}$ ลดลงเพราะว่าเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้ $C_{10}H_8$ เกิดน้อยลง



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4, in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm

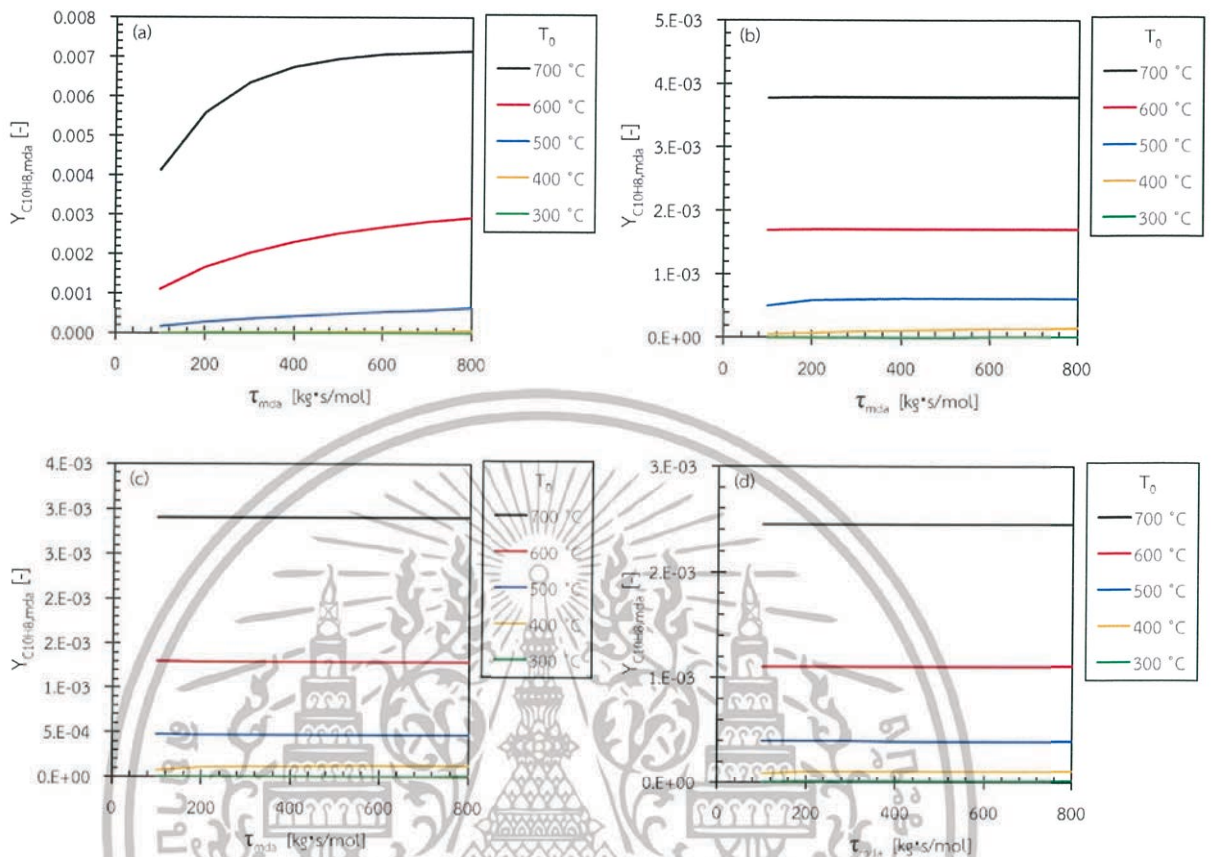
ต่อ $Y_{C_2H_4, mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ Methane Dehydroaromatization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 อธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $Y_{C_6H_6,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตบรจสำหรับ Methane Dehydroaromatization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



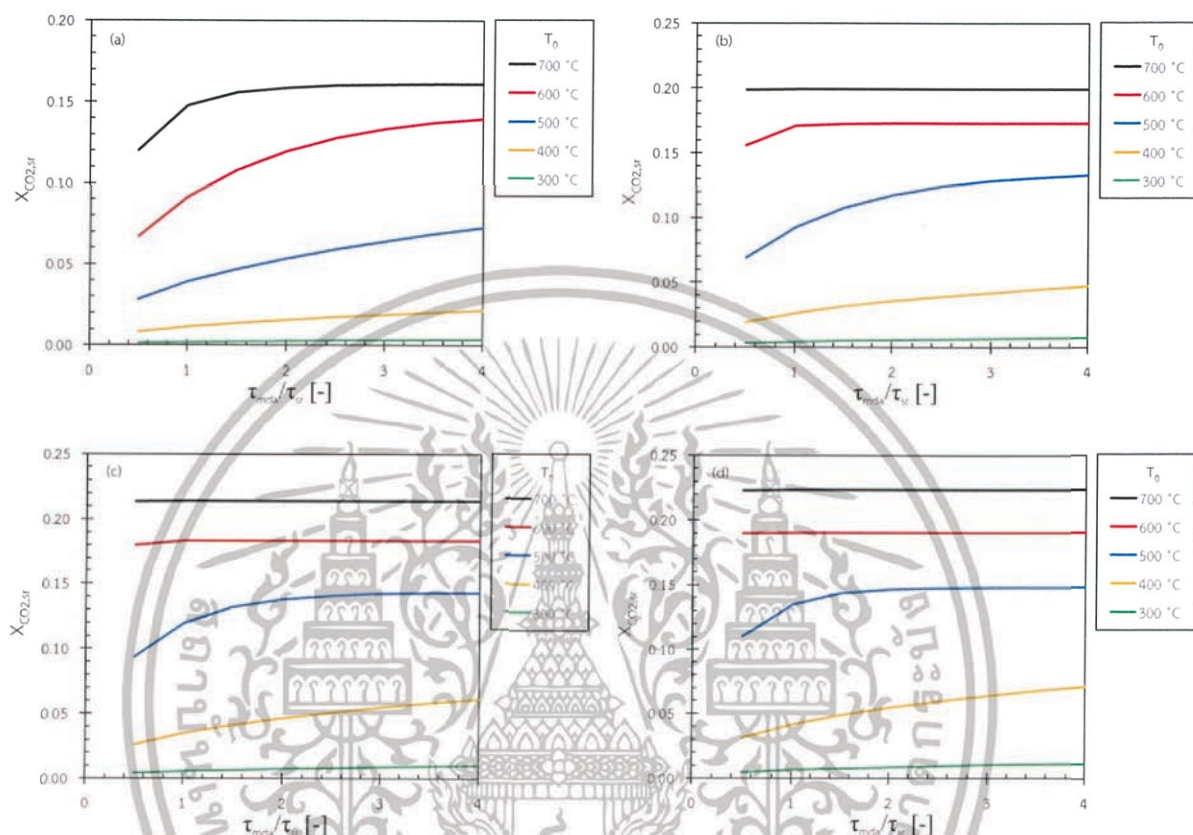
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $Y_{C_{10}H_{8,mda}}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับ Methane Dehydroaromatization

จากรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 แสดง $Y_{C_2H_4,mda}$, $Y_{C_6H_6,mda}$ และ $Y_{C_{10}H_{8,mda}}$ ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าอิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 ส่งผลต่อ $Y_{C_2H_4,mda}$, $Y_{C_6H_6,mda}$ และ $Y_{C_{10}H_{8,mda}}$ ในลักษณะเดียวกับค่าการเลือกเกิด ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยเพราะว่าปฏิกิริยา Methane Dehydroaromatization ถูกจำกัดด้วยสมดุล ดังนั้น เพื่อทำลายข้อจำกัดด้านสมดุล จึงมีการนำเมมเบรนมาใช้ เมมเบรนนี้ยอมให้ H_2 แพร่ผ่านได้เพียงอย่างเดียว ทำให้ H_2 ถูกกำจัดออก สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางฝั่งของผลิตภัณฑ์ เกิด C_2H_4 , C_6H_6 และ $C_{10}H_8$ มากขึ้น ในส่วนต่อไปเป็นการวิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการจำลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

4.3.1 ผลการจำลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนในสภาวะอุณหภูมิคงที่

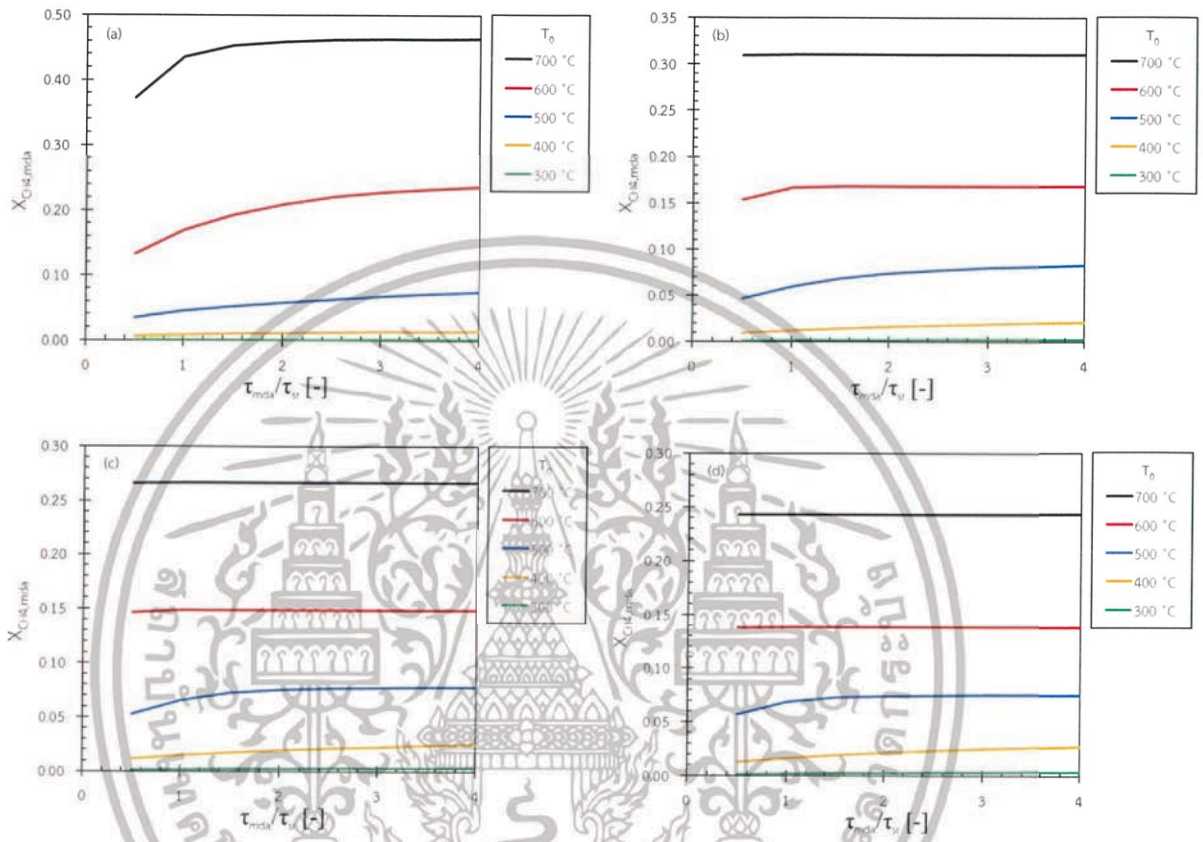


รูปที่ 4.11 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $X_{CO_2,sr}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

จากรูปที่ 4.11 แสดง $X_{CO_2,sr}$ บริเวณปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนที่อัตราส่วนระหว่าง τ_{mda} และ τ_{sr} เมื่อกำหนดให้ $\tau_{sr} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$ ตลอดช่วงการศึกษา พบว่าที่อัตราส่วนสูงขึ้น ทำให้ได้ $X_{CO_2,sr}$ เพิ่มขึ้นเพราะว่าเมื่อเพิ่ม τ_{mda} ทำให้ได้ H_2 ในฝั่งเปลือกมากขึ้น H_2 แพร่ผ่านเมมเบรนเข้าสู่ฝั่งท่อซึ่งมี H_2 น้อยกว่า ($y_{H_2,sr} = 10^{-5}$) H_2 ที่เข้ามาฝั่งท่อจะทำปฏิกิริยากับ CO_2 และผลิต CH_4 และ H_2O มากขึ้น การเพิ่ม T_0 ทำให้ได้ $X_{CO_2,sr}$ มากขึ้นเพราะในสภาวะท่อ CO_2 Methanation (SR) ต้องการ H_2 จากส่วนเปลือก (Methane Dehydroaromatization: MDA) ซึ่งระบบ MDA ผลิต H_2 ได้มากที่อุณหภูมิสูงๆ ถึงแม้ว่าธรรมชาติของระบบ SR เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

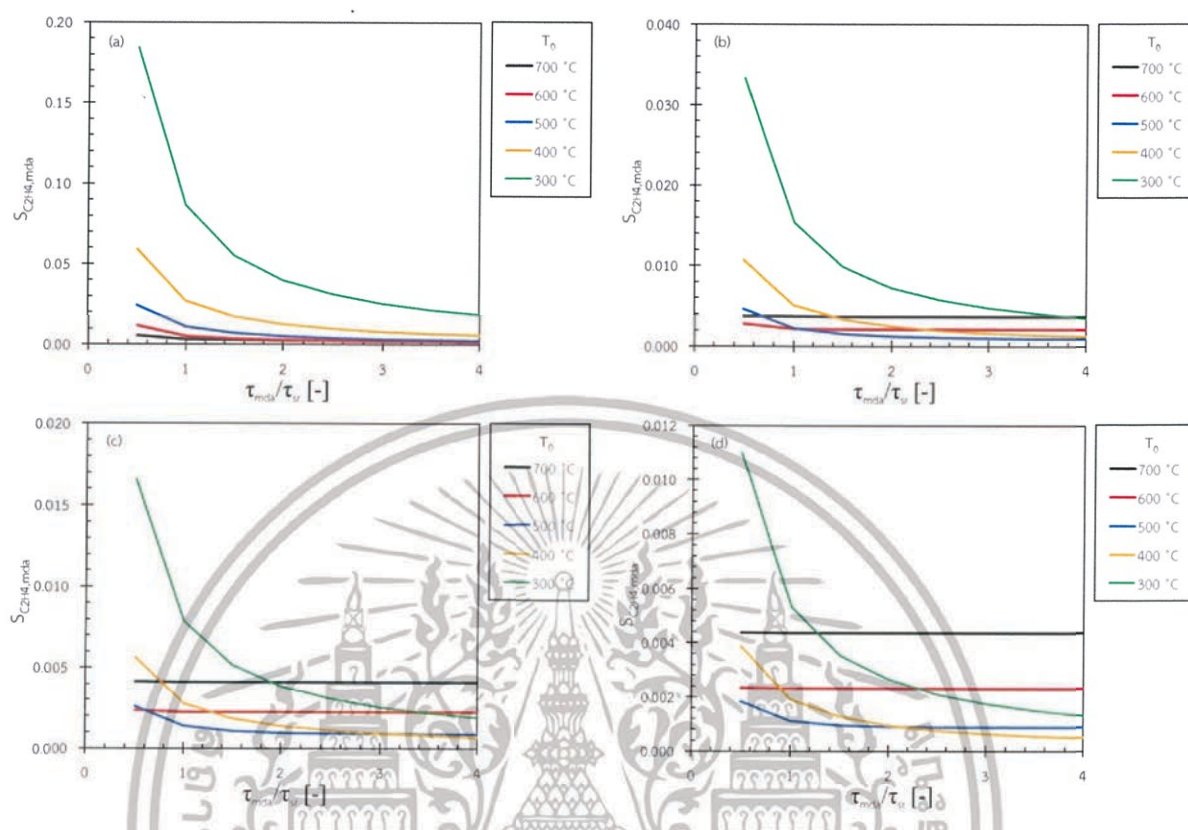
ร้อน และได้ $X_{CO_2, sr}$ ต่ำที่อุณหภูมิสูงก็ตาม และการเพิ่ม P_0 ทำให้ได้ $X_{CO_2, sr}$ มากขึ้นเพราะสมดุลในระบบ SR ถูกเลื่อนไปทางฝั่งผลิตภัณฑ์ (CH_4 และ H_2O) มากขึ้น



รูปที่ 4.12 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4, in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $X_{CH_4, mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

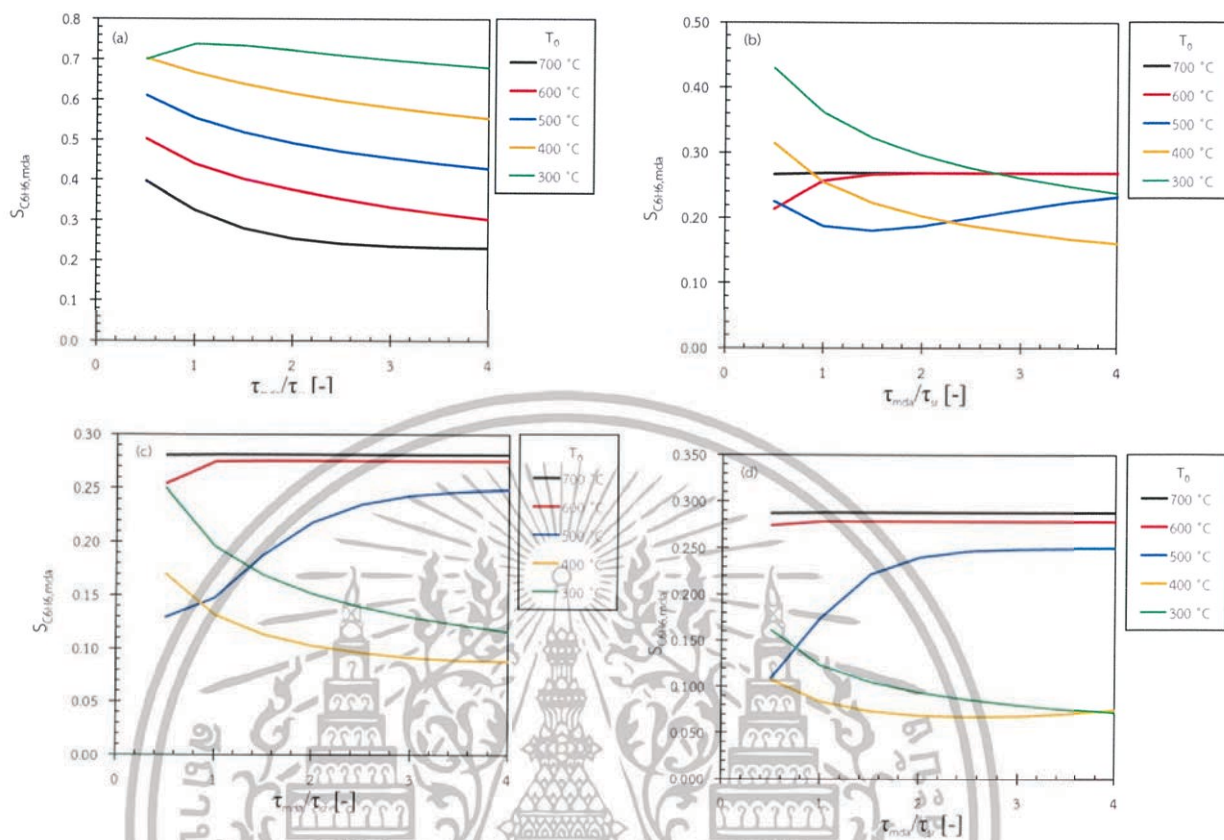
จากรูปที่ 4.11 แสดง $X_{CH_4, mda}$ บริเวณปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนที่อัตราส่วนระหว่าง τ_{mda} และ τ_{sr} เมื่อกำหนดให้ $\tau_{sr} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$ ตลอดช่วงการศึกษา พบว่าที่อัตราส่วนสูงชัน ทำให้ได้ $X_{CH_4, mda}$ เพิ่มขึ้นเพราะว่าการเพิ่ม $W_{cat}/F_{CH_4, in}$ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดมากขึ้น อีกทั้ง H_2 ถูกกำจัดผ่านเมมเบรน ทำให้สมดุลของระบบ MDA เลื่อนไปข้างหน้าทางฝั่งผลิตภัณฑ์มากขึ้น การเพิ่ม T_0 ทำให้ได้ $X_{CH_4, mda}$ เพิ่มขึ้นเนื่องจากระบบ MDA เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน และการเพิ่ม P_0 ทำให้ได้ $X_{CH_4, mda}$ ลดลงเพราะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $S_{C_2H_4,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

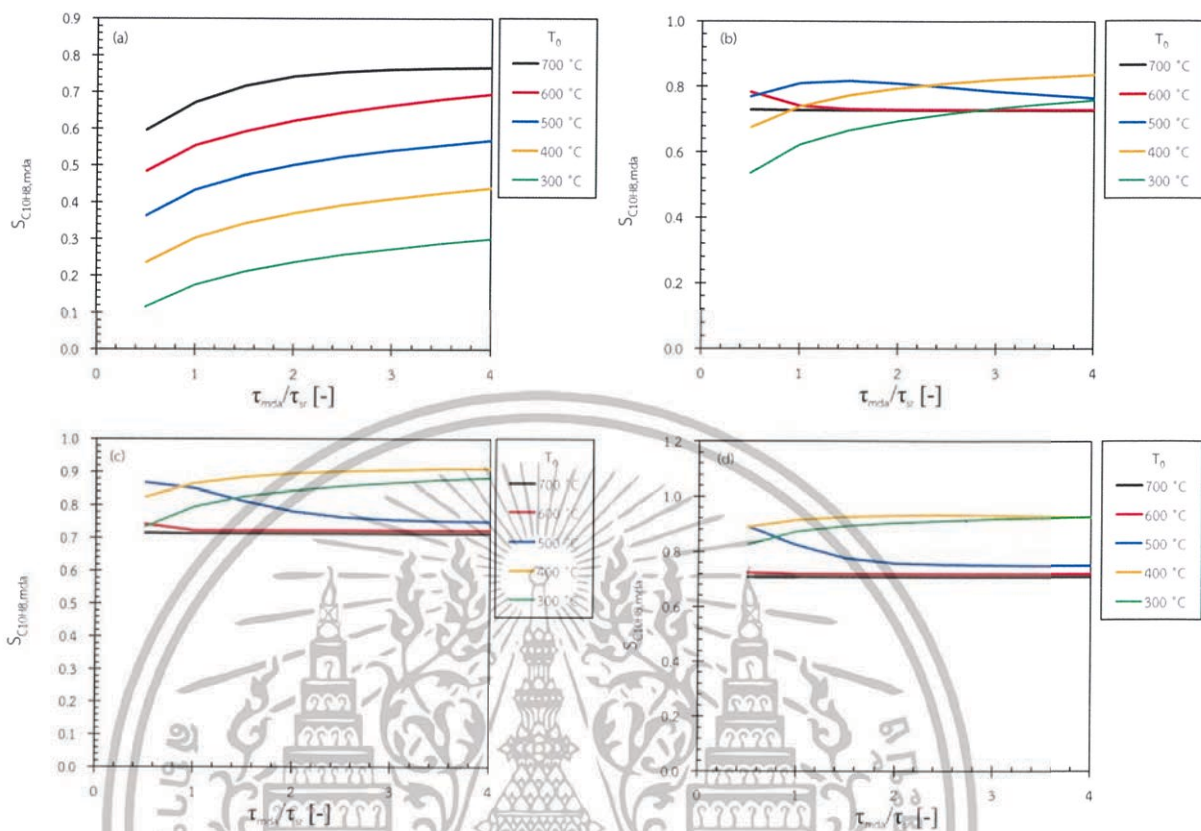
จากรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อเพิ่ม τ_{mda}/τ_{sr} ทำให้ $S_{C_2H_4,mda}$ ลดลง เพราะว่าการเพิ่ม τ_{mda}/τ_{sr} คือการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยามากขึ้น ส่งผลให้ C_2H_4 ซึ่งเป็นทั้งสารผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาหลักและสารตั้งต้นในปฏิกิริยาข้างเคียงลดลงตามการเกิดปฏิกิริยาที่มากขึ้น การเพิ่ม T_0 ทำให้ $S_{C_2H_4,mda}$ เข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นเพราะว่าปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วที่ T_0 สูง และการเพิ่ม P_0 ส่งผลให้ $S_{C_2H_4,mda}$ ลดลงเพราะว่าเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ



รูปที่ 4.14 อิทธิพลของ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $S_{\text{C}_6\text{H}_6,\text{mda}}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

จากรูปที่ 4.14 พบว่าที่ $P_0 = 1$ atm เมื่อเพิ่ม $\tau_{\text{mda}}/\tau_{\text{sr}}$ ทำให้ $S_{\text{C}_6\text{H}_6,\text{mda}}$ ลดลง และการเพิ่ม T_0 ยังส่งผลทำให้ $S_{\text{C}_6\text{H}_6,\text{mda}}$ ลดลงด้วย อย่างไรก็ตามที่ $P_0 = 4, 7$ และ 10 atm เมื่อเพิ่ม $\tau_{\text{mda}}/\tau_{\text{sr}}$ ที่ $T_0 = 300$ และ 400 °C ทำให้ $S_{\text{C}_6\text{H}_6,\text{mda}}$ ลดลงแต่เมื่อเพิ่ม $\tau_{\text{mda}}/\tau_{\text{sr}}$ ตั้งแต่ $T_0 = 500$ °C ขึ้นไป ทำให้ $S_{\text{C}_6\text{H}_6,\text{mda}}$ เพิ่มขึ้น และการเพิ่ม P_0 ส่งผลให้ $S_{\text{C}_6\text{H}_6,\text{mda}}$ ลดลงเพราะว่าเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ

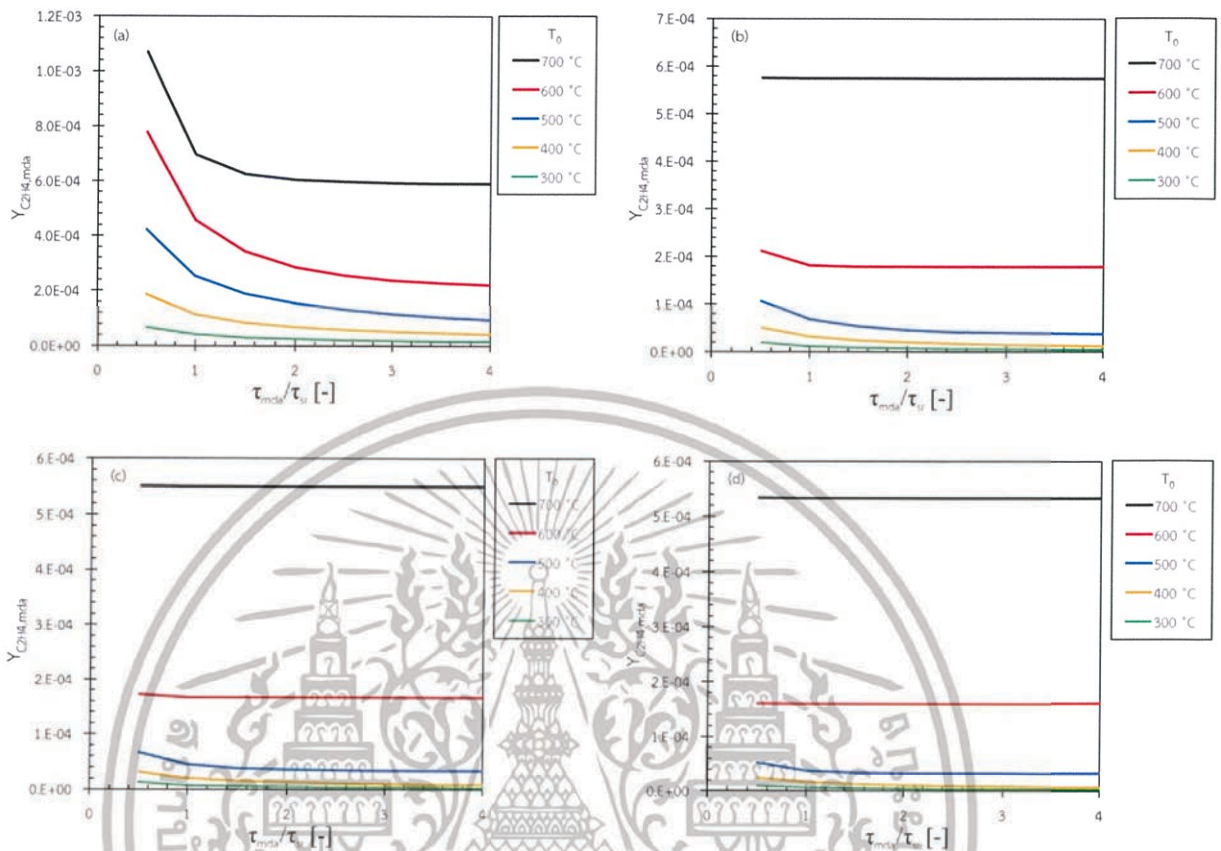
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $S_{C_{10}H_8,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

จากรูปที่ 4.15 พบว่าที่ $P_0 = 1$ atm เมื่อเพิ่ม τ_{mda}/τ_{sr} ทำให้ $S_{C_{10}H_8,mda}$ เพิ่มขึ้นและการเพิ่ม T_0 ส่งผลทำให้ $S_{C_{10}H_8,mda}$ เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่ม P_0 ขึ้นและพิจารณาที่ T_0 ตั้งแต่ 500 °C ขึ้นไป การเพิ่ม τ_{mda}/τ_{sr} ทำให้ $S_{C_{10}H_8,mda}$ ลดลง และการเพิ่ม P_0 ส่งผลให้ $S_{C_{10}H_8,mda}$ ลดลงเพราะว่าเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ

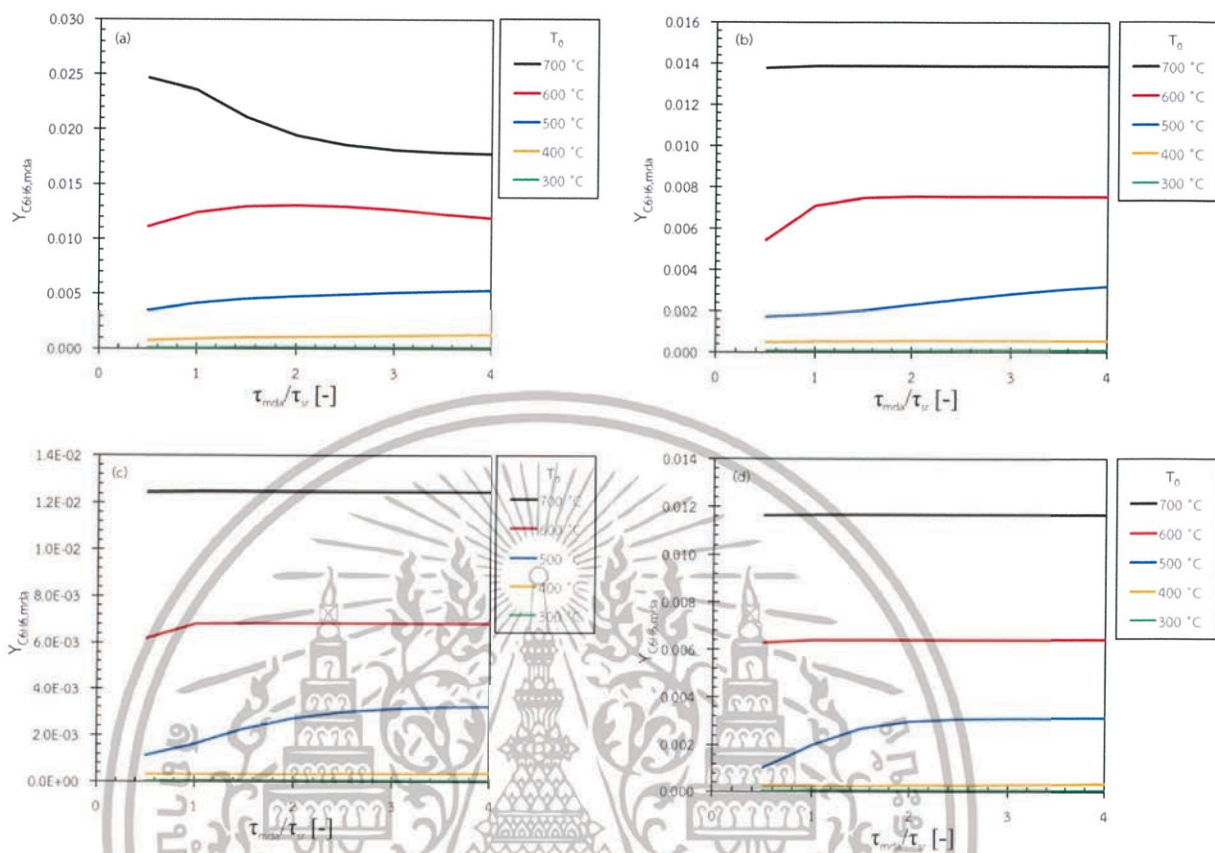
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,In}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $Y_{C_2H_4,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

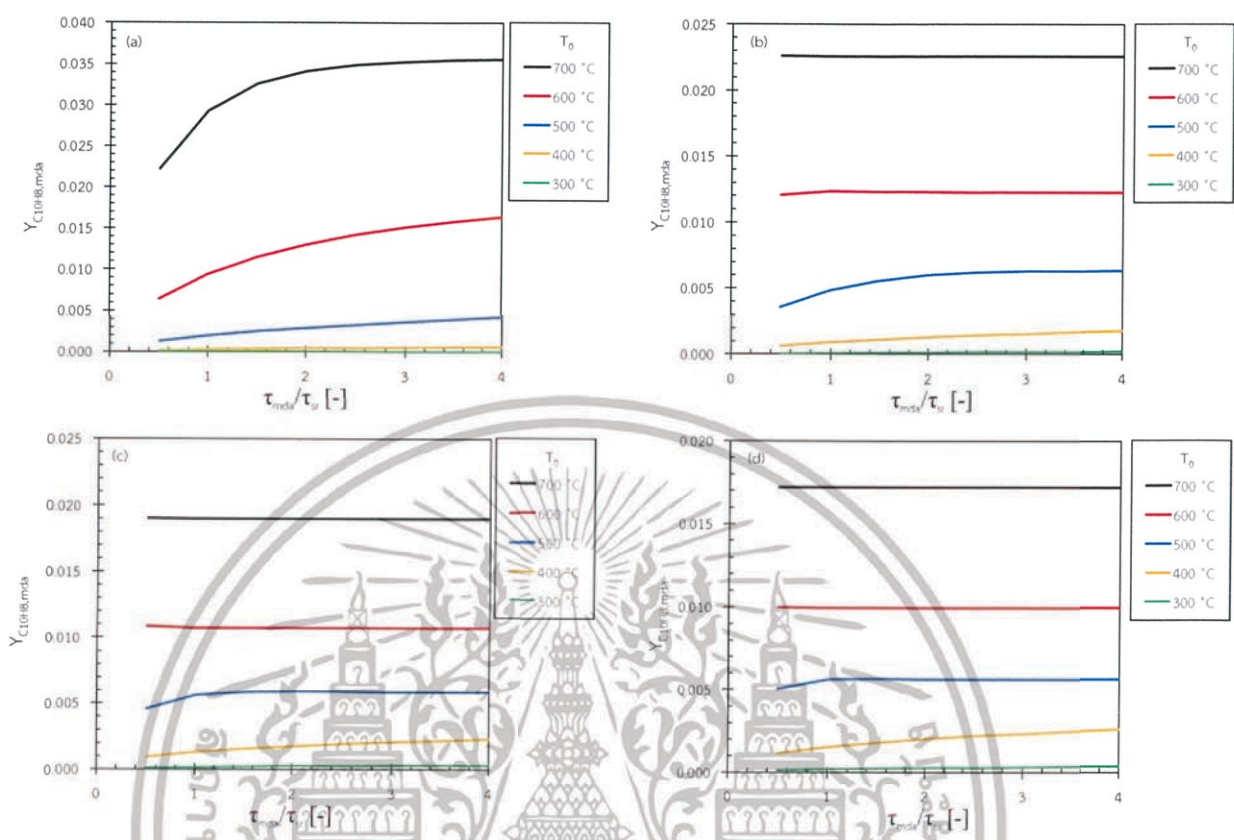
จากรูปที่ 4.16 สำหรับ (a), (b), (c) และ (d) การเพิ่ม τ_{mda}/τ_{sr} ส่งผลให้ได้ $Y_{C_2H_4,mda}$ ลดลง และการเพิ่ม T_0 ทำให้ได้ $Y_{C_2H_4,mda}$ มากขึ้น ในขณะที่การเพิ่ม P_0 ทำให้ได้ $Y_{C_2H_4,mda}$ ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $Y_{C_6H_6,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

จากรูปที่ 4.17 (a) สำหรับที่ช่วง T_0 300 ถึง 500 °C เมื่อเพิ่ม τ_{mda}/τ_{sr} เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ $Y_{C_6H_6,mda}$ เพิ่มขึ้น แต่สำหรับที่ T_0 สูงกว่า 500 °C เมื่อเพิ่ม τ_{mda}/τ_{sr} ทำให้ $Y_{C_6H_6,mda}$ ลดลง และจาก (b), (c) และ (d) สำหรับทุก T_0 เมื่อเพิ่ม τ_{mda}/τ_{sr} ทำให้ $Y_{C_6H_6,mda}$ เพิ่มขึ้น และการเพิ่ม P_0 ทำให้ได้ $Y_{C_6H_6,mda}$ ลดลง

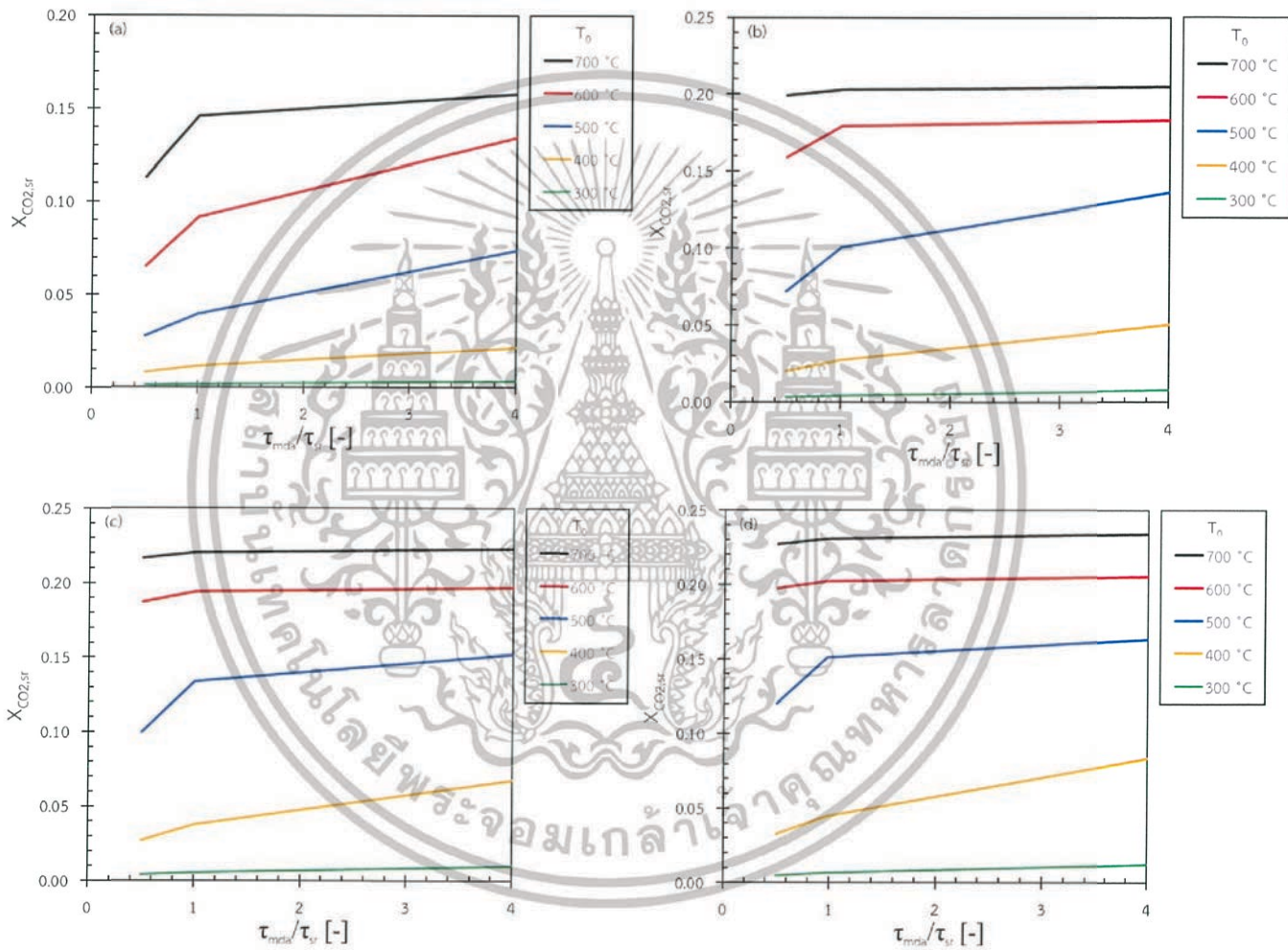


รูปที่ 4.18 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $Y_{C_{10}H_8,mda}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

จากรูปที่ 4.18 เมื่อเพิ่ม τ_{mda}/τ_{sr} เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ $Y_{C_{10}H_8,mda}$ เพิ่มขึ้นเพราะ $C_{10}H_8$ เป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ไม่ถูกใช้ทำปฏิกิริยาต่อ การเพิ่ม T_0 ทำให้ $Y_{C_{10}H_8,mda}$ เพิ่มขึ้นด้วยเหตุที่ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และการเพิ่ม P_0 ทำให้ $Y_{C_{10}H_8,mda}$ ลดลงเพราะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ

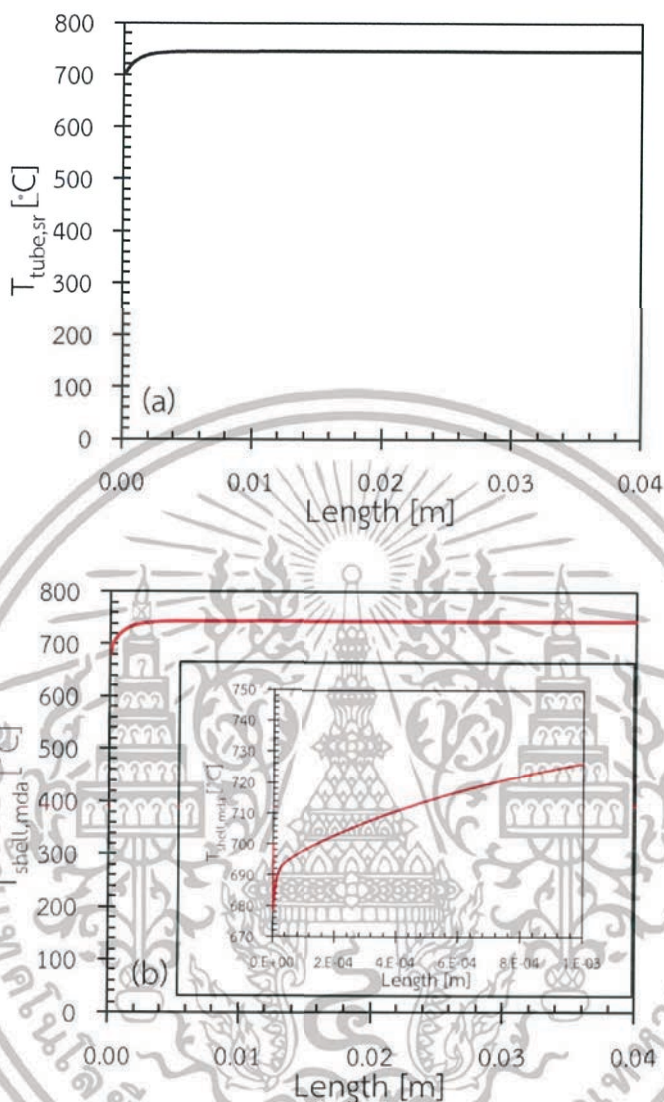
4.3.2 ผลการจำลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่

ในการศึกษา กำหนดให้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนมีผนังฉนวนผนังเปลือก ทำให้ไม่มีความร้อนถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อม มีเพียงการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างระบบ SR และระบบ MDA และ กำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นและความดันเริ่มต้นในระบบ SR และ MDA เท่ากับ T_0 และ P_0 ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $X_{CO_2,sr}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



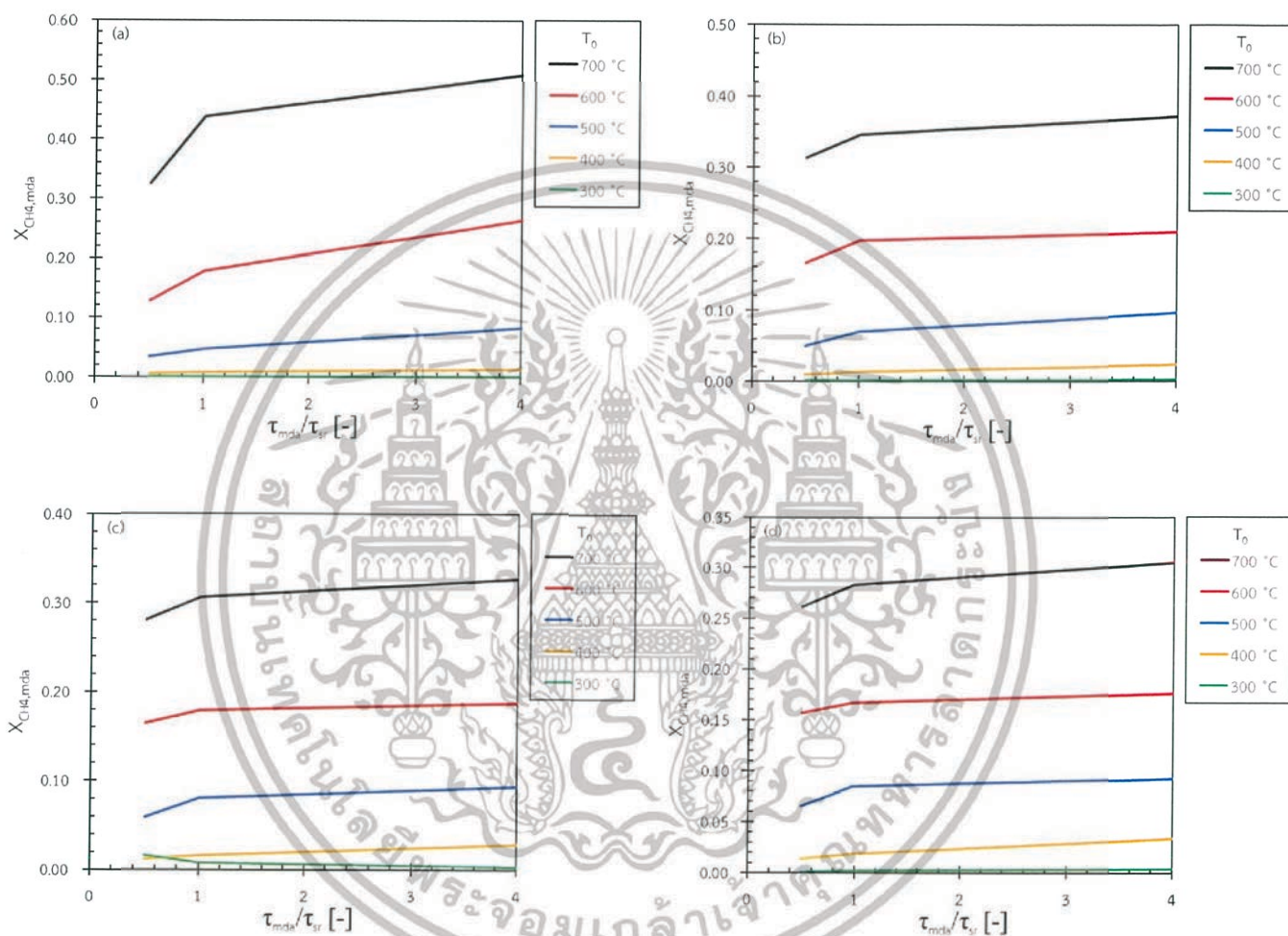
รูปที่ 4.20 โปรไฟล์ของอุณหภูมิ (a) tube และ (b) shell ตามความยาวของเครื่องปฏิกรณ์

แบบเมมเบรนที่ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}} = 800 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$ $T_0 = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $P_0 = 10 \text{ atm}$

จากรูปที่ 4.19 แสดง $X_{\text{CO}_2,\text{sr}}$ บริเวณปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนที่อัตราส่วนระหว่าง τ_{mda} และ τ_{sr} เมื่อกำหนดให้ $\tau_{\text{sr}} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$ ตลอดช่วงการศึกษา พบว่า $X_{\text{CO}_2,\text{sr}}$ มีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกับ $X_{\text{CO}_2,\text{sr}}$ ที่ได้จากสภาวะอุณหภูมิคงที่ เพื่อสร้างความเข้าใจ จึงขอยกตัวอย่างโปรไฟล์ของอุณหภูมิจากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าอุณหภูมิในส่วนของท่อเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพราะระบบ SR ซึ่งอยู่ในส่วนของท่อคายความร้อนออกมา แต่อุณหภูมิในส่วนของเปลือกลดลงเล็กน้อยก่อน

แล้วค่อยๆเพิ่มขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าระบบ MDA ซึ่งอยู่ในส่วนเปลือกดูดความร้อนเพื่อใช้ทำเอกสทรานเป็นเอกสทรานที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาบริเวณปากทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์ หลังจากนั้นจึงค่อยๆได้รับความร้อน และระบบทั้งสองค่อยๆเข้าสู่สมดุล ดังนั้น จึงเปรียบเสมือนกับดำเนินปฏิกิริยาที่สภาวะอุณหภูมิคงที่



รูปที่ 4.21 อิทธิพลของ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4, \text{in}}$, T_0 และ P_0 : (a) 1 atm, (b) 4 atm, (c) 7 atm และ (d) 10 atm ต่อ $X_{\text{CH}_4, \text{mda}}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

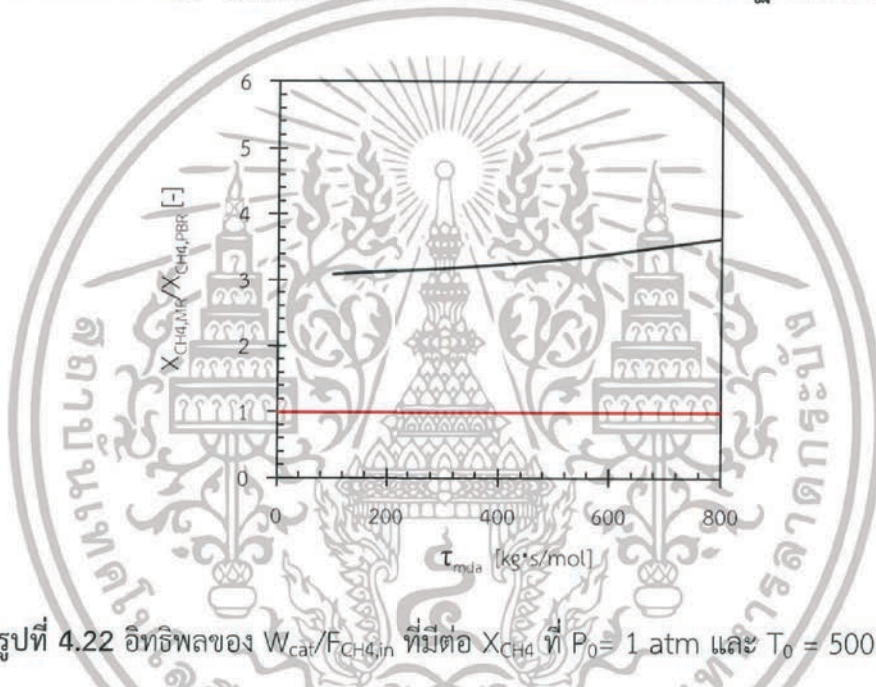
จากรูปที่ 4.21 แสดง $X_{\text{CH}_4, \text{mda}}$ บริเวณปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนที่อัตราส่วนระหว่าง τ_{mda} และ τ_{sr} เมื่อกำหนดให้ $\tau_{\text{sr}} = 200 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{mol}$ ตลอดช่วงการศึกษา พบว่าเมื่อเพิ่ม $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4, \text{in}}$ ทำให้ $X_{\text{CH}_4, \text{mda}}$ เพิ่มขึ้นไปในลักษณะเดียวกับในสภาวะแบบอุณหภูมิคงที่ และพบว่าแนวโน้มและผลที่ได้จากสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ในส่วนของการเลือกเกิดและค่าผลได้ของสารผลิตภัณฑ์เป็นไปในทิศทางเดียวกับสภาวะอุณหภูมิคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การเปรียบเทียบพฤติกรรมในสภาวะอุณหภูมิคงที่ระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุและเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

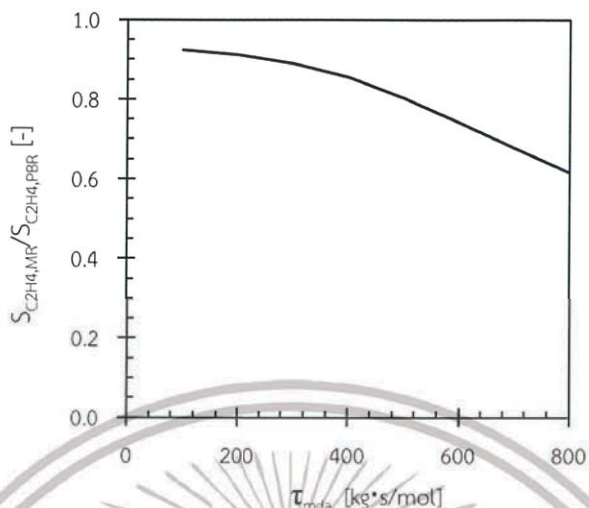
เส้นสีแดงเป็นเกณฑ์ตัดสินว่าหากผลลัพธ์ตกอยู่ในบริเวณเหนือเส้นสีแดงแสดงว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ผลที่ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ และในทางกลับกันหากผลลัพธ์ตกอยู่ใต้เส้นสีแดงแสดงว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ผลแย่กว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ

อิทธิพลของ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4, \text{in}}$ (T_{mda}) ที่มีต่อความสามารถของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

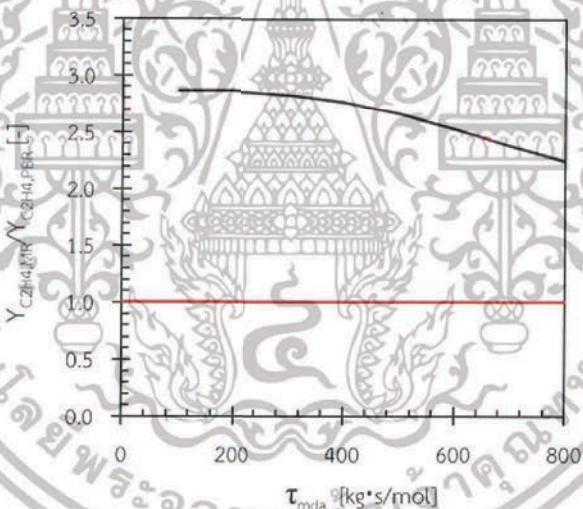


รูปที่ 4.22 อิทธิพลของ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4, \text{in}}$ ที่มีต่อ X_{CH_4} ที่ $P_0 = 1 \text{ atm}$ และ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

จากรูปที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบ X_{CH_4} ที่ปากทางออกกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนกับกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ เมื่อ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4, \text{in}}$ เปลี่ยนไป พบว่า X_{CH_4} กรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนมีค่ามากกว่ากรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุในทุกช่วงของ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4, \text{in}}$ เพราะว่า H_2 ในฝั่งเปลือกถูกจำกัดออกผ่านทางเมมเบรน ทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางฝั่งของผลิตภัณฑ์ และเมื่อเพิ่ม $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4, \text{in}}$ ทำให้ $X_{\text{CH}_4, \text{MR}} / X_{\text{CH}_4, \text{PBR}}$ สูงขึ้นเพราะเมื่อเพิ่ม $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4, \text{in}}$ เป็นการเพิ่มน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในระบบ MDA เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ CH_4 ในระบบ MDA ถูกใช้ทำปฏิกิริยามากขึ้น



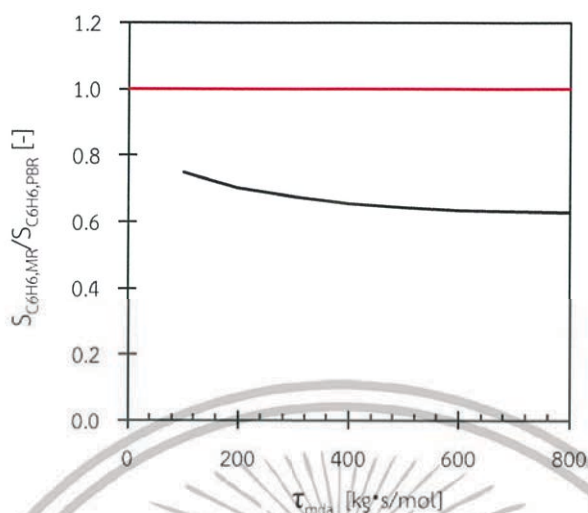
รูปที่ 4.23 อิทธิพลของ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}}$ ที่มีต่อ $S_{\text{C}_2\text{H}_4}$ ที่ $P_0 = 1 \text{ atm}$ และ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$



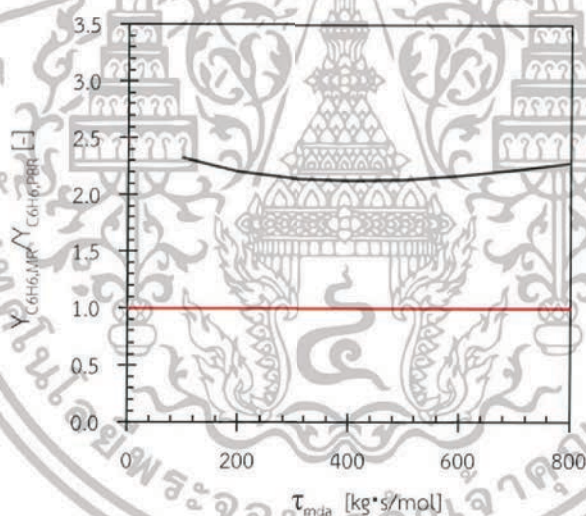
รูปที่ 4.24 อิทธิพลของ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}}$ ที่มีต่อ $Y_{\text{C}_2\text{H}_4}$ ที่ $P_0 = 1 \text{ atm}$ และ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

จากรูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบ $S_{\text{C}_2\text{H}_4}$ ที่ปากทางออกกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนกับกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ เมื่อ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}}$ เปลี่ยนไป พบว่าเมื่อเพิ่ม $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}}$ เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนซึ่งให้ $S_{\text{C}_2\text{H}_4}$ ที่ต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ จะมีค่าการเลือกเกิดลดลง อย่างไรก็ตาม $Y_{\text{C}_2\text{H}_4}$ (รูปที่ 4.24) ที่ได้เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนผลิต C_2H_4 ยังมีค่ามากกว่ากรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุในทุกค่าของ $W_{\text{cat}}/F_{\text{CH}_4,\text{in}}$ ที่นำมาเปรียบเทียบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



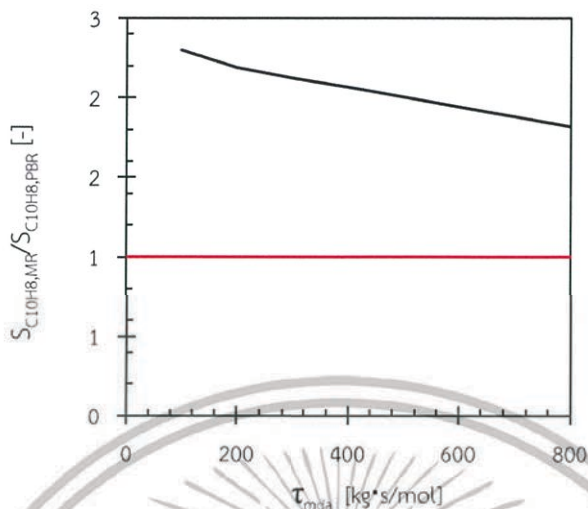
รูปที่ 4.25 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ที่มีต่อ $S_{C_6H_6}$ ที่ $P_0 = 1 \text{ atm}$ และ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$



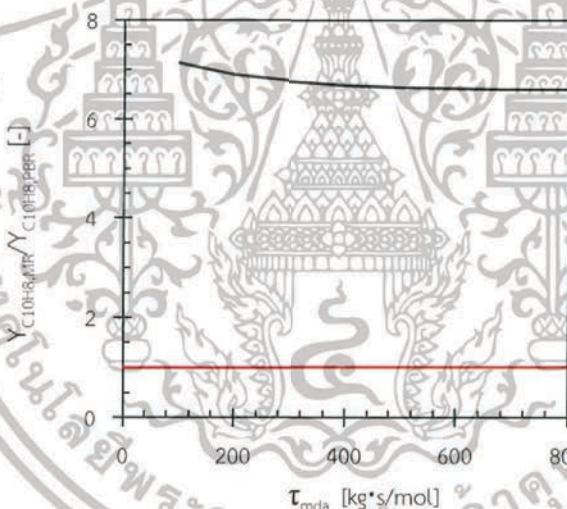
รูปที่ 4.26 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ที่มีต่อ $Y_{C_6H_6}$ ที่ $P_0 = 1 \text{ atm}$ และ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

จากรูปที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบ $S_{C_6H_6}$ ที่ปากทางออกกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนกับกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ เมื่อ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ เปลี่ยนไป พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ $S_{C_6H_6}$ ที่ต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุและมีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ใดๆก็ตาม $Y_{C_6H_6}$ (รูปที่ 4.26) ที่ได้เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนผลิต C_6H_6 มีค่ามากกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ และ $Y_{C_6H_6,MR}/Y_{C_6H_6,PBR}$ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม $W_{cat}/F_{CH_4,in}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ที่มีต่อ $S_{C_{10}H_8}$ ที่ $P_0 = 1 \text{ atm}$ และ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

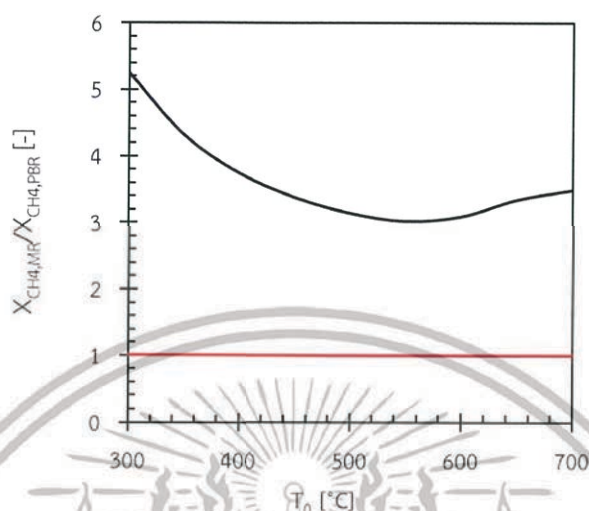


รูปที่ 4.28 อิทธิพลของ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ ที่มีต่อ $Y_{C_{10}H_8}$ ที่ $P_0 = 1 \text{ atm}$ และ $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบ $S_{C_{10}H_8}$ และ $Y_{C_{10}H_8}$ ที่ปากทางออกกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนกับกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุตามลำดับ เมื่อ $W_{cat}/F_{CH_4,in}$ เปลี่ยนไป พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ $S_{C_{10}H_8}$ และ $Y_{C_{10}H_8}$ ที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ และสัดส่วนของ $S_{C_{10}H_8}$ และ $Y_{C_{10}H_8}$ จะลดลงเมื่อเพิ่ม $W_{cat}/F_{CH_4,in}$

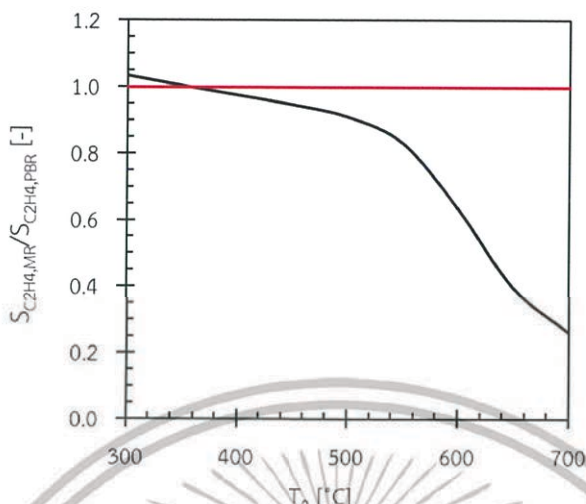
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อความสามารถของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

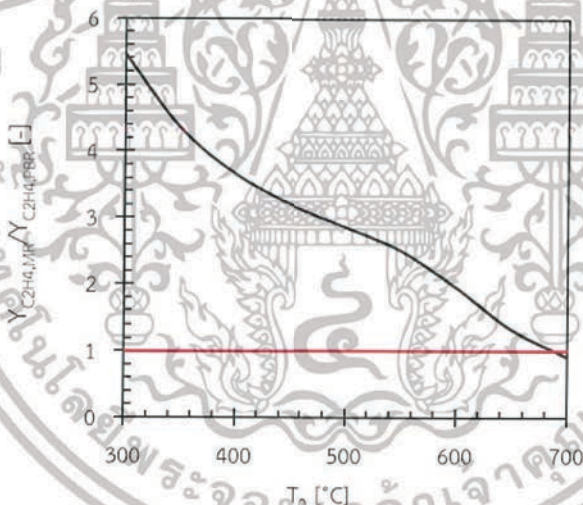


รูปที่ 4.29 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ X_{CH_4} ที่ $P_0 = 1$ atm และ $W_{cat}/F_{CH_4,in} = 200$ kg*s/mol

จากรูปที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบ X_{CH_4} ที่ปากทางออกกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนกับกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุที่ T_0 ต่างๆ พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ X_{CH_4} ที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุในทุกช่วงของ T_0 เพราะว่า H_2 ในฝั่งเปลือกถูกจำกัดออกผ่านทางเมมเบรน ทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางฝั่งของผลิตภัณฑ์ และเมื่อเพิ่ม T_0 สัดส่วน $X_{CH_4,MR}/X_{CH_4,PBR}$ จะลดลงและค่อยๆ เพิ่มขึ้น เพราะที่อุณหภูมิเข้าในช่วง 300 ถึง 600 °C ระบบ MDA ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนจะทำปฏิกิริยาได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเข้าสูง ดังนั้น หลังจากช่วง 600 °C สัดส่วน $X_{CH_4,MR}/X_{CH_4,PBR}$ จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเพราะระบบ MDA ทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น



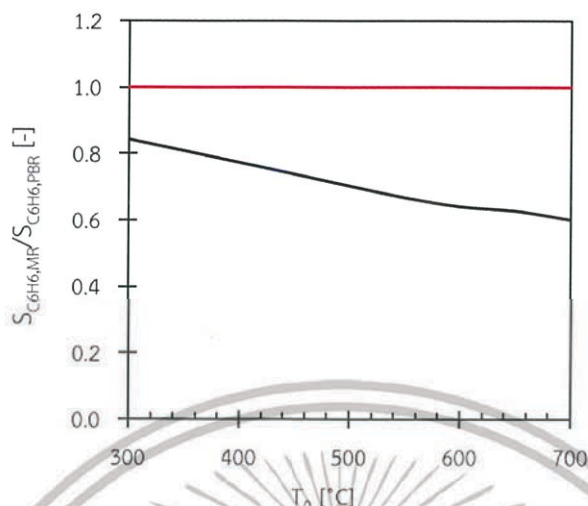
รูปที่ 4.30 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ $S_{C_2H_4}$ ที่ $P_0 = 1 \text{ atm}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{CH_4, \text{in}} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$



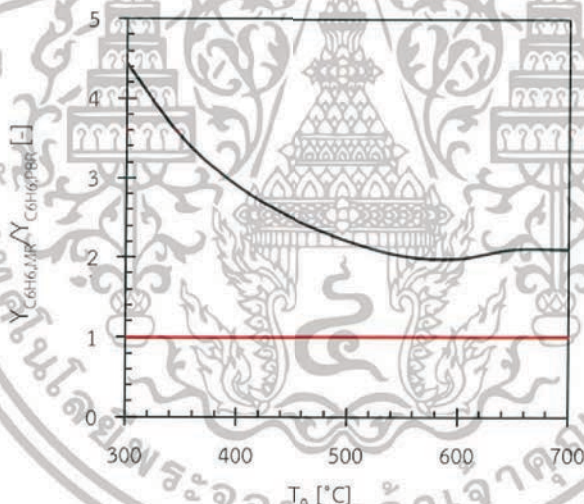
รูปที่ 4.31 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ $Y_{C_2H_4}$ ที่ $P_0 = 1 \text{ atm}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{CH_4, \text{in}} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$

จากรูปที่ 4.30 แสดงการเปรียบเทียบ $S_{C_2H_4}$ ที่ปากทางออกกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนกับกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ พบว่าเมื่อเพิ่ม T_0 เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนซึ่งให้ $S_{C_2H_4}$ ที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 350 °C จะมีค่าการเกิดลดลง และเมื่อเพิ่ม T_0 มากกว่า 350 °C จะทำให้ $S_{C_2H_4,MR}$ ต่ำกว่า $S_{C_2H_4,PBR}$ อย่างไรก็ตาม $Y_{C_2H_4}$ (รูปที่ 4.31) ที่ได้เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนผลิต C_2H_4 ยังมีค่ามากกว่ากรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุแต่สัดส่วน $S_{C_2H_4,MR}/S_{C_2H_4,PBR}$ จะลดลงเมื่อเพิ่ม T_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



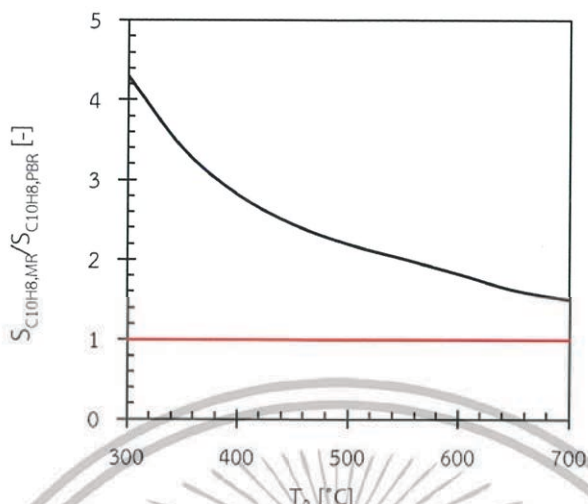
รูปที่ 4.32 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ $S_{C_6H_6}$ ที่ $P_0 = 1 \text{ atm}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{CH_4,\text{in}} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$



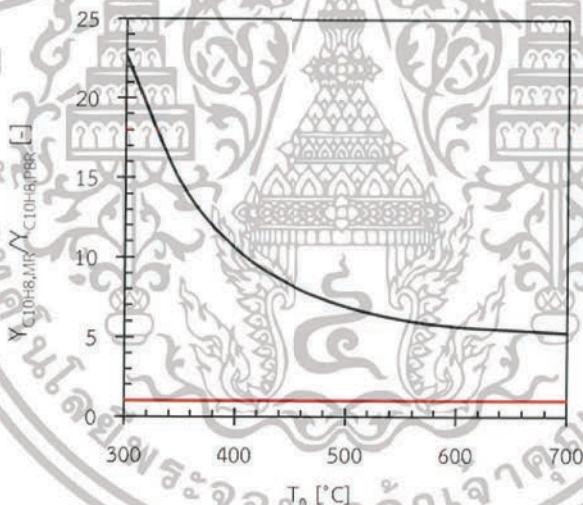
รูปที่ 4.33 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ $Y_{C_6H_6}$ ที่ $P_0 = 1 \text{ atm}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{CH_4,\text{in}} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$

จากรูปที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบ $S_{C_6H_6}$ ที่ปากทางออกกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนกับกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ $S_{C_6H_6}$ ที่ต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุและมีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม T_0 อย่างไรก็ตาม $Y_{C_6H_6}$ (รูปที่ 4.33) ที่ได้เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนผลิต C_6H_6 มีค่ามากกว่ากรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ โดยที่สัดส่วน $Y_{C_6H_6,MR}/Y_{C_6H_6,PBR}$ จะลดลงและค่อยๆ เพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกับรูปที่ 4.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ $S_{C_{10}H_8}$ ที่ $P_0 = 1$ atm และ $W_{cat}/F_{CH_4, in} = 200$ kg*s/mol

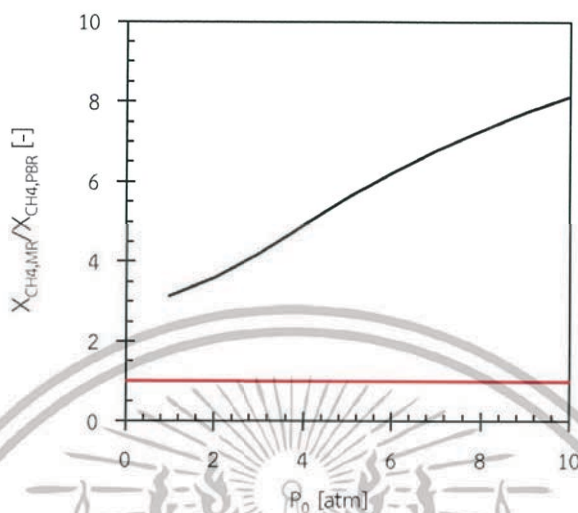


รูปที่ 4.35 อิทธิพลของ T_0 ที่มีต่อ $Y_{C_{10}H_8}$ ที่ $P_0 = 1$ atm และ $W_{cat}/F_{CH_4, in} = 200$ kg*s/mol

จากรูปที่ 4.34 และ 4.35 แสดงการเปรียบเทียบ $S_{C_{10}H_8}$ และ $Y_{C_{10}H_8}$ ที่ปากทางออกกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนกับกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุตามลำดับ พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ $S_{C_{10}H_8}$ และ $Y_{C_{10}H_8}$ ที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ และสัดส่วนของ $S_{C_{10}H_8}$ และ $Y_{C_{10}H_8}$ จะลดลงเมื่อเพิ่ม T_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

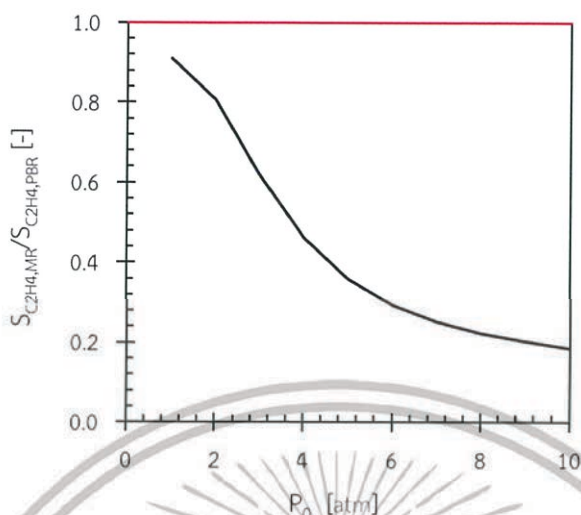
อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อความสามารถของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน



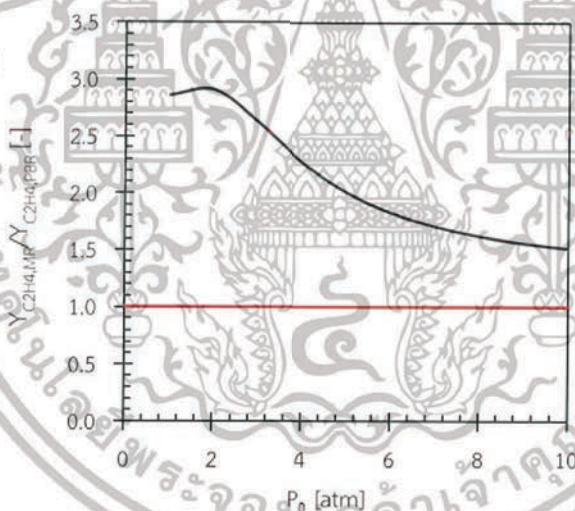
รูปที่ 4.36 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ X_{CH_4} ที่ $T_0 = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $W_{cat}/F_{CH_4,in} = 200\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$

จากรูปที่ 4.36 พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ X_{CH_4} ที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ และเมื่อเพิ่ม P_0 สัดส่วน $X_{CH_4,MR}/X_{CH_4,PBR}$ จะเพิ่มขึ้น หากพิจารณาในระบบ MDA ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุซึ่งมีการอธิบายอิทธิพลของตัวแปรสภาวะมาก่อนหน้านี้ การเพิ่ม P_0 ทำให้ $X_{CH_4,PBR}$ ลดลง แต่กรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน การเพิ่ม P_0 ส่งผลต่อระบบ SR ทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางฝั่งผลิตภัณฑ์มากขึ้น เมื่อระบบ SR ต้องการ H_2 มากขึ้น จะเกิดแรงขับเคลื่อน (Driving force) มากขึ้น ส่งผลให้ H_2 จากระบบ MDA ไหลเข้าสู่ฝั่งท่อมากขึ้น ทำให้ $X_{CH_4,MR}$ สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



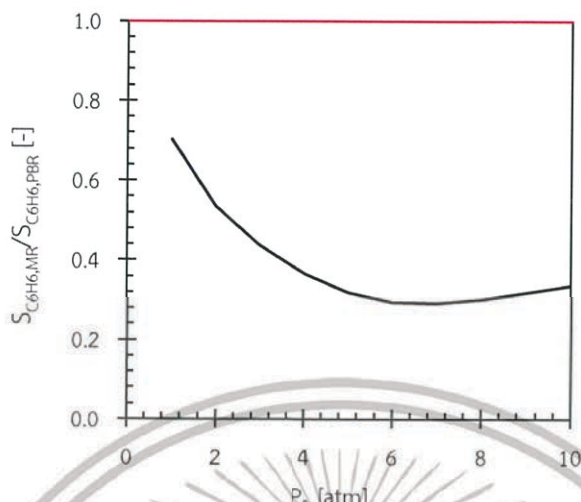
รูปที่ 4.37 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ $S_{C_2H_4}$ ที่ $T_0 = 500$ °C และ $W_{cat}/F_{CH_4,in} = 200$ kg*s/mol



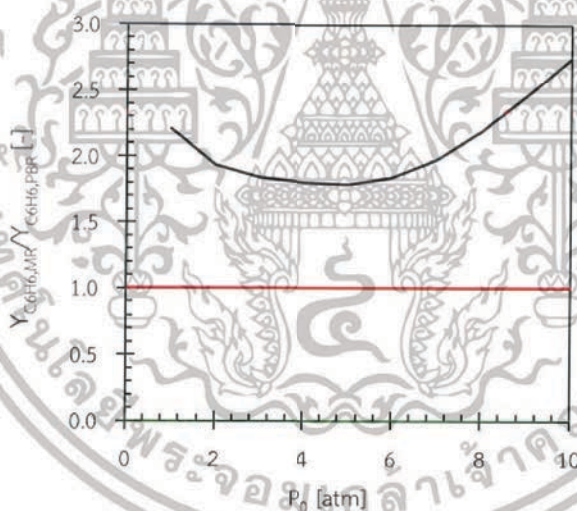
รูปที่ 4.38 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ $Y_{C_2H_4}$ ที่ $T_0 = 500$ °C และ $W_{cat}/F_{CH_4,in} = 200$ kg*s/mol

จากรูปที่ 4.37 พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนซึ่งให้ $S_{C_2H_4}$ ที่ต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุจะมีค่าการเกิดลดลงอีกเมื่อเพิ่ม P_0 อย่างไรก็ตาม $Y_{C_2H_4}$ (รูปที่ 4.38) ที่ได้เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนผลิต C_2H_4 ยังมีค่ามากกว่ากรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุแต่สัดส่วน $S_{C_2H_4,MR}/S_{C_2H_4,PBR}$ จะลดลงเมื่อเพิ่ม P_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



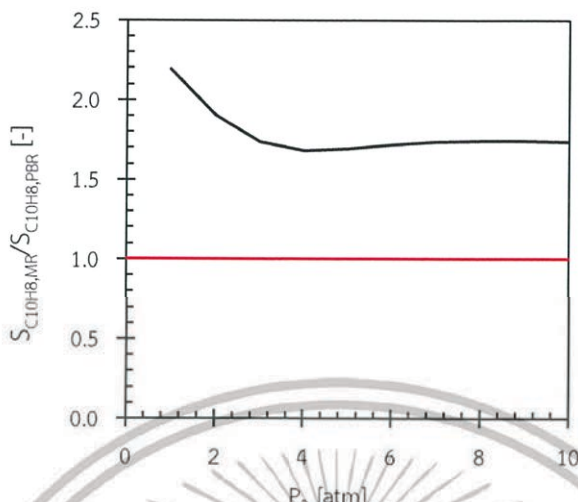
รูปที่ 4.39 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ $S_{C_6H_6}$ ที่ $T_0 = 500^\circ C$ และ $W_{cat}/F_{CH_4,in} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$



รูปที่ 4.40 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ $Y_{C_6H_6}$ ที่ $T_0 = 500^\circ C$ และ $W_{cat}/F_{CH_4,in} = 200 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$

จากรูปที่ 4.39 พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ $S_{C_6H_6}$ ที่ต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุและจะลดลงเมื่อเพิ่ม P_0 และค่อยๆ เพิ่มขึ้นที่ P_0 สูง อย่างไรก็ตาม $Y_{C_6H_6}$ (รูปที่ 4.40) ที่ได้เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนผลิต C_6H_6 มีค่ามากกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ โดยที่สัดส่วน $Y_{C_6H_6,MR}/Y_{C_6H_6,PBR}$ จะลดลงและค่อยๆ เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ $S_{C_{10}H_8}$ ที่ $T_0 = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{CH_4,\text{in}} = 200\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$



รูปที่ 4.42 อิทธิพลของ P_0 ที่มีต่อ $Y_{C_{10}H_8}$ ที่ $T_0 = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $W_{\text{cat}}/F_{CH_4,\text{in}} = 200\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{mol}$

จากรูปที่ 4.41 และ 4.42 แสดงการเปรียบเทียบ $S_{C_{10}H_8}$ และ $Y_{C_{10}H_8}$ ที่ปากทางออกกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนกับกรณีใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุตามลำดับ พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ $S_{C_{10}H_8}$ และ $Y_{C_{10}H_8}$ ที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ แต่สัดส่วนของ $S_{C_{10}H_8}$ จะลดลงเมื่อเพิ่ม P_0 อย่างไรก็ตามสัดส่วนของ $Y_{C_{10}H_8}$ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม P_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าการแปลงผันทางเคมี ค่าการเลือกเกิด และค่าผลได้ซึ่งได้จากการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนกรณีสภาวะอุณหภูมิตั้งที่และกรณีสภาวะอุณหภูมิตั้งที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะสังเกตเห็นว่าใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนกรณีสภาวะอุณหภูมิตั้งที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเพียงเล็กน้อย จึงไม่ได้นำมาเปรียบเทียบกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 อิทธิพลของ Space time ที่มีต่อพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

เมื่อเพิ่ม Space time เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ค่าการแปลงผันทางเคมีของ CO_2 และ CH_4 ค่าการเลือกเกิดของ C_{10}H_8 และค่าผลได้ของ C_2H_4 , C_6H_6 และ C_{10}H_8 ที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ แต่ได้ค่าการเลือกเกิดของ C_2H_4 และ C_6H_6 ที่ต่ำกว่า

5.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิขาเข้าที่มีต่อพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขาเข้า เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ค่าการแปลงผันทางเคมีของสารตั้งต้น ค่าผลได้ของสารผลิตภัณฑ์ และค่าการเลือกเกิดของ C_{10}H_8 ที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ แต่การเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ C_2H_4 และ C_6H_6 ลดลง ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนทั้งที่สภาวะแบบอุณหภูมิคงที่และสภาวะแบบอุณหภูมิไม่คงที่

5.1.3 อิทธิพลของความดันขาเข้าที่มีต่อพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน

เมื่อเพิ่มความดันขาเข้า เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนให้ค่าการแปลงผันทางเคมีของสารตั้งต้น ค่าผลได้ของสารผลิตภัณฑ์ และค่าการเลือกเกิดของ C_{10}H_8 ที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ แต่การเพิ่มความดันขาเข้าส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ C_2H_4 และ C_6H_6 ลดลง ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรนทั้งที่สภาวะแบบอุณหภูมิคงที่และสภาวะแบบอุณหภูมิไม่คงที่

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1.ควรศึกษาตัวแปรอื่นเพิ่มเติมที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน
- 2.ควรศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับเมมเบรนมากขึ้นเพื่อหาเมมเบรนที่สามารถให้ H_2 ผ่านได้มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Glen P. Peters et al. "Towards real-time verification of CO₂ emissions" **NATURE CLIMATE CHANGE**, vol. 7, December 2017. pp.848-852.
- [2] Martin Leduc., H. Damon Matthews. and Ramón de Elía. "Regional estimates of the transient climate response to cumulative CO₂ emissions" **NATURE CLIMATE CHANGE**, January 2016. pp.1-6.
- [3] Genovaitė Liobikienė., Mindaugas Butkus. "The European Union possibilities to achieve targets of Europe 2020 and Paris agreement climate policy" **Renewable Energy**, vol. 106, 2017. pp.298-309.
- [4] M.N. Anwar et al. "CO₂ capture and storage: A way forward for sustainable environment" **Journal of Environmental Management**, vol. 226, 2018. pp.131-144.
- [5] H. Scott Fogler. **Elements of Chemical Reaction Engineering**. Fourth Edition: PEARSON.
- [6] Endre Nagy. **Basic Equations of the Mass Transport through a Membrane Layer**. Elsevier.
- [7] C.V. Miguel., A. Mendes. and L.M. Madeira. "Intrinsic kinetics of CO₂ methanation over an industrial nickel-based catalyst" **Journal of CO₂ Utilization**, vol. 25, 2018. pp.128-136.
- [8] Gao J., Wang Y., Ping Y., Hu D., Xu G.; Gu F. "A thermodynamic analysis of methanation reactions of carbon oxides for the production of synthetic natural gas" **RSC Adv.** 2, 2012. 2538
- [9] Franz Koschany., David Schlereth. and Olaf Hinrichsen. "On the kinetics of the methanation of carbon dioxide on coprecipitated NiAl(O)_x" **Applied Catalysis B: Environmental**, vol. 181, 2016. pp.504-516.
- [10] Andreina Alarcón., Jordi Guilera. and Teresa Andreu. "CO₂ conversion to synthetic natural gas: Reactor design over Ni-Ce/Al₂O₃ catalyst" **Chemical Engineering Research and Design**, vol. 140, 2018. pp.155-165.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Y. Zhu., N. Al-ebbinni., R. Henney., C. Yi. and R. Barat. “Extension to multiple temperatures of a three-reaction global kinetic model for methane dehydroaromatization” **Chemical Engineering Science**, vol. 177, 2018. pp.132-138.
- [12] Canan Karakaya., Selene Hernández Morejudo., Huayang Zhu. and Robert J. Kee. “Catalytic Chemistry for Methane Dehydroaromatization (MDA) on a Bifunctional Mo/HZSM-5 Catalyst in a Packed Bed” **Industrial & Engineering Chemistry Research**, vol 55, 2016. pp.9895-9906.
- [13] Peter J. Lunde. and Frank L. Kester. “Rate of Methane Formation from Carbon Dioxide and Hydrogen Over a Ruthenium Catalyst” **JOURNAL OF CATALYSIS**, vol. 30, 1939. pp.423-429.
- [14] Jun Shu., Bernard P.A. Grandjean. and Serge Kaliaguine. “Methane steam reforming in asymmetric Pd- and Pd-Ag/porous SS membrane reactors” **Applied Catalysis A: General**, vol. 119, 1994. pp.305-325.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตาราง ก 1 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณกับค่าที่ได้จากงานวิจัย

พารามิเตอร์	งานวิจัย	การประมาณค่าพารามิเตอร์	หน่วย
$K'_{0,573K}$	0.008936	0.009469	$\text{mol.g}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{kPa}^{-1}$
E_a/R_{573K}	14,275	10,516	K
$K'_{0,\text{OH},573K}$	0.001326	0.0072	$\text{Pa}^{-0.5}$
$\Delta H/R_{573K}$	7,414	998.16	K



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้