

การจำลองปฏิบัติการปฏิรูปเอทานอลด้วยไอน้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อโดยใช้แบบจำลอง
2 มิติ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา พ.ศ.2563 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

SIMULATION OF ETHANOL STEAM REFORMING IN A TUBULAR REACTOR
USING A TWO-DIMENSIONAL MODEL



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG 2020 ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การจำลองปฏิกิริยาปฏิกิริยาเอทานอลด้วยไอน้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์
แบบท่อโดยใช้แบบจำลอง 2 มิติ

จัดทำโดย นายภาสวิชัย สถิตกิจพิเชษฐ์ เลขประจำตัว 60010789

ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

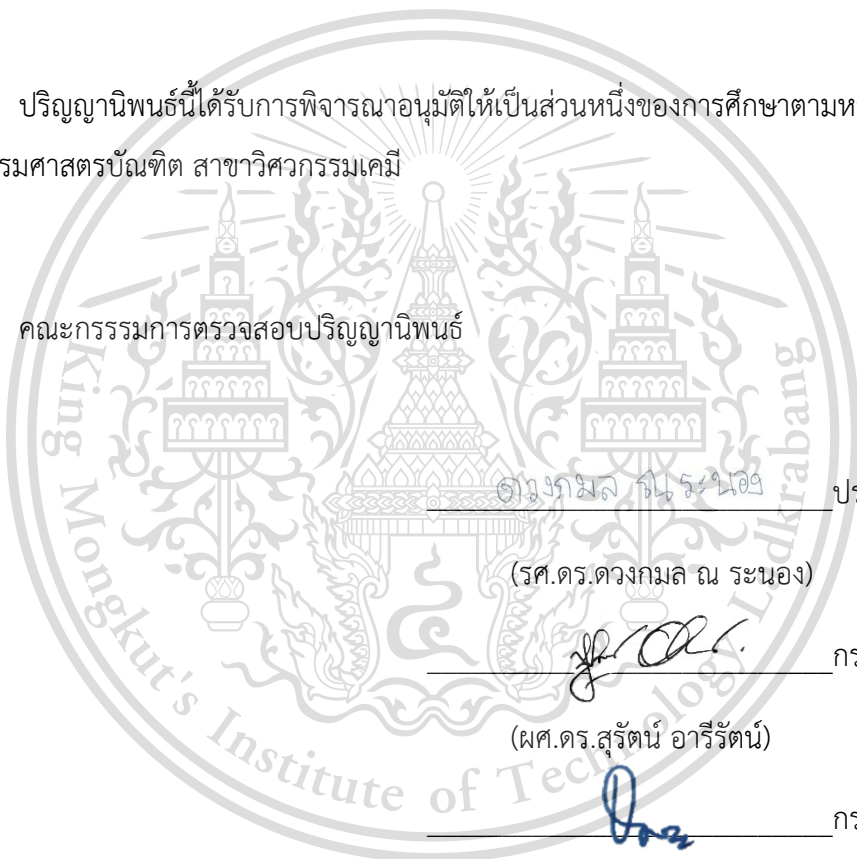
สาขา วิศวกรรมเคมี

พ.ศ. 2563

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



ดวงกมล ณ ระนอง

ประธานกรรมการ

(รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง)

กรรมการ

(ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

กรรมการ

(ผศ.ดร.อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	การจำลองปฏิกิริยาปฏิรูปเอทานอลด้วยไอน้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อโดยใช้แบบจำลอง 2 มิติ
จัดทำโดย	นายภาสวิชัย สติติกพิเชษฐ์ เลขประจำตัว 60010789
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ดวงกมล ณ रणอง
ปริญญาานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การมีอยู่อย่างจำกัดของแหล่งกำเนิดพลังงานทำให้ไม่รองรับความต้องการพลังงานของประชากรโลก ในอนาคต พลังงานไฮโดรเจนจึงเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สะอาด และสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาการจำลองเครื่องปฏิกรณ์เคมีสำหรับผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาปฏิรูปเอทานอลด้วยไอน้ำ เพื่อทำนายปริมาณสารผลิตภัณฑ์ และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิขาเข้าปฏิกรณ์, ความดันขาเข้าปฏิกรณ์, สัดส่วนป้อนของไอน้ำต่อเอทานอล และ อุณหภูมิภายนอกปฏิกรณ์ แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่ศึกษาคือเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลแบบราบเรียบที่ใช้ข้อมูลจลนพลศาสตร์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Rh (1%wt) MgAl₂O₄/Al₂O₃ เน้นทำนายการเปลี่ยนแปลงในแนวความยาว (axial axis) และแนวรัศมี (radial axis) ของปฏิกรณ์ ผลการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาจะดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้นภายในสภาวะอุณหภูมิขาสูง, ความดันขาต่ำ, สัดส่วนป้อนของไอน้ำต่อเอทานอลสูง และอุณหภูมิภายนอกปฏิกรณ์สูง ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิภายนอกปฏิกรณ์จะทำให้ปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพการผลิตสูงที่สุดในแนวความยาว และแนวรัศมีขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิขาเข้า, การลดความดันขาเข้า, และการเพิ่มสัดส่วนป้อนของไอน้ำต่อเอทานอล จะมีประสิทธิภาพการผลิตสูงเพียงแนวความยาวนอกจากนี้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในปฏิกรณ์ สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกสภาวะดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับผลิตสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการชนิดนั้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความเมตตากรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา
รองศาสตราจารย์ ดร. ดวงกมล ณ ระนอง ที่กรุณาเมตตาให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะแนวทางการแก้ไข
ปัญหา ให้ความรู้ทางวิชาการ แนวคิดอันเป็นประโยชน์ และประสบการณ์อันดียิ่งแก่ตัวข้าพเจ้า ตลอดจนการ
ติดตาม ห่วงใย ดูแลเอาใจใส่ จนสามารถทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ข้าพเจ้าขอกราบ
ขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นอัน
เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง สำหรับการจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง ที่ได้กรุณาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ คอยให้คำแนะนำช่วยเหลือ และมี
ความวิริยะอุตสาหะห่วงใยลูกศิษย์เสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แต่บิดามารดา
ครูบาอาจารย์อันเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่คอยสนับสนุนให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้
สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี หากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับ
และขออภัยมา ณ ที่นี้

ภาสวิญญ์ สติกิจพิเชษฐ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวความยาวและรัศมี	3
2.1.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบราบเรียบ.....	5
2.1.3 การประเมินประสิทธิภาพการผลิต.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.2.1 งานวิจัยการเกิดปฏิกิริยา ESR บนตัวเร่งชนิด Rh(1%wt)MgAl ₂ O ₄ /Al ₂ O ₃	8
2.2.2 งานวิจัยการศึกษาแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ 2 มิติ สำหรับการผลิตไฮโดรเจนโดยปฏิกิริยา ESR บนตัวเร่งชนิด Ni-based.....	8
2.2.3 งานวิจัยการศึกษาแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ สำหรับปฏิกิริยาการผลิต DME บนตัวเร่งชนิด Cu/Al ₂ O ₃	9
2.3 สรุปผลการศึกษาจากงานวิจัย	10
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 สร้างแบบจำลองขั้นต้น.....	11
3.1.1 รวบรวมข้อมูลตัวแปรและสมการสำหรับเขียนแบบจำลอง.....	11
3.1.2 ตรวจสอบผลของแบบจำลองกับผลการทดลองจริง.....	13
3.2 นำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้.....	13
3.3 ประเมินประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์.....	14
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	15
4.1 ผลการตรวจสอบแบบจำลอง.....	15
4.2 แบบจำลองปฏิกรณ์แบบ adiabatic laminar flow.....	17
4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิขาเข้าต่อประสิทธิภาพการผลิต.....	24
4.2.1 อิทธิพลของความดันขาเข้าต่อประสิทธิภาพการผลิต.....	30
4.2.1 อิทธิพลของสัดส่วนป้อนไอน้ำกับเอทานอลต่อประสิทธิภาพการผลิต.....	34
4.3 แบบจำลองปฏิกรณ์แบบ non-adiabatic laminar flow.....	37
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	43
ภาคผนวก.....	44
อภิธานศัพท์.....	43
บรรณานุกรม.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การดุลโมลของปฏิกิริยาแบบท่อในแนว r, z และทิศทางโมลฟลักซ์	3
รูปที่ 2.2 การดุลพลังงานของปฏิกิริยาแบบท่อในแนว r, z และทิศทางฟลักซ์พลังงาน	4
รูปที่ 3.1 (ก) geometry และ (ข) mesh ของแบบจำลอง	13
รูปที่ 4.1 ผลการคำนวณจากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง	15
รูปที่ 4.2 surface temperature กรณี adiabatic	17
รูปที่ 4.3 axial temperature profile กรณี adiabatic	18
รูปที่ 4.4 radial temperature profile กรณี adiabatic	18
รูปที่ 4.5 total heat of reaction กรณี adiabatic	19
รูปที่ 4.6 radial velocity profile กรณี adiabatic	20
รูปที่ 4.7 EtOH surface conversion กรณี adiabatic	20
รูปที่ 4.8 axial conversion profile กรณี adiabatic	21
รูปที่ 4.9 radial conversion profile กรณี adiabatic	21
รูปที่ 4.10 อัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบ adiabatic ตามแนว axial ตำแหน่งผนังปฏิกรณ์	22
รูปที่ 4.11 อัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบ adiabatic ตามแนว axial ตำแหน่งกึ่งกลางปฏิกรณ์	22
รูปที่ 4.12 yield ของผลิตภัณฑ์ กรณี adiabatic	23
รูปที่ 4.13 selectivity ของผลิตภัณฑ์ กรณี adiabatic	24
รูปที่ 4.14 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิขาเข้า 823 K ที่มีผลต่อ EtOH conversion	25
รูปที่ 4.15 อุณหภูมิขาเข้า 823 K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion	25
รูปที่ 4.16 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิขาเข้า 873 K ที่มีผลต่อ EtOH conversion	26
รูปที่ 4.17 อุณหภูมิขาเข้า 873 K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion	26
รูปที่ 4.18 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิขาเข้า 898 K ที่มีผลต่อ EtOH conversion	27
รูปที่ 4.19 อุณหภูมิขาเข้า 898 K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion	27
รูปที่ 4.20 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิขาเข้า 923 K ที่มีผลต่อ EtOH conversion	28
รูปที่ 4.21 อุณหภูมิขาเข้า 923 K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion	28
รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิขาเข้าต่อประสิทธิภาพการผลิต	29

รูปที่ 4.23 ความดันขาเข้า 0.5 atm ที่มีผลต่อ EtOH conversion

รูปที่ 4.24 ความดันขาเข้า 1 atm ที่มีผลต่อ EtOH conversion

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

รูปที่ 4.25 ความดันขาเข้า 1.5 atm ที่มีผลต่อ EtOH conversion	32
รูปที่ 4.26 ผลของความดันขาเข้าต่อประสิทธิภาพการผลิต	33
รูปที่ 4.27 สัดส่วนป้อนไอน้ำกับเอทานอล S/E = 3 ที่มีผลต่อ EtOH conversion	34
รูปที่ 4.28 สัดส่วนป้อนไอน้ำกับเอทานอล S/E = 5.5 ที่มีผลต่อ EtOH conversion.....	35
รูปที่ 4.29 สัดส่วนป้อนไอน้ำกับเอทานอล S/E = 10 ที่มีผลต่อ EtOH conversion.....	35
รูปที่ 4.30 ผลของสัดส่วนป้อนไอน้ำกับเอทานอลต่อประสิทธิภาพการผลิต	36
รูปที่ 4.31 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิภายนอก 923 K ที่มีผลต่อ EtOH conversion.....	38
รูปที่ 4.32 อุณหภูมิภายนอก 923 K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion	38
รูปที่ 4.33 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิภายนอก 1023 K ที่มีผลต่อ EtOH conversion	39
รูปที่ 4.34 อุณหภูมิภายนอก 1023 K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion	39
รูปที่ 4.35 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิภายนอก 1123 K ที่มีผลต่อ EtOH conversion	40
รูปที่ 4.36 อุณหภูมิภายนอก 1123 K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion	40
รูปที่ 4.37 ผลของอุณหภูมิภายนอกต่อประสิทธิภาพการผลิต	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	สมการจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา ESR (Rh (1%wt) MgAl ₂ O ₄ /Al ₂ O ₃).....	11
ตารางที่ 3.2	เงื่อนไขขอบเขตสำหรับแบบจำลองปฏิกิริยา.....	12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

VIII

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันโลกเข้าสู่ยุคที่ประชากรเริ่มตระหนักถึงการดูแลสิ่งแวดล้อม และสุขภาพมากขึ้น เนื่องจากมนุษย์จำเป็นต้องใช้พลังงานในการดำเนินชีวิตประจำวัน การค้นคว้าเทคนิค และแนวทางการผลิตพลังงานรูปแบบใหม่ที่ สะอาด ไม่เกิดมลพิษ ยั่งยืน และมีต้นทุนต่ำ มาทดแทนทรัพยากรธรรมชาติชนิดที่ใช้แล้วหมดไปกำลังเป็นประเด็นที่หลายประเทศให้ความสนใจ พลังงานไฮโดรเจนเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่มีแนวโน้มสูงที่จะถูกผลักดันให้นำใช้ในอนาคตเพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานมาตอบสนองการเพิ่มขึ้นของประชากร ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษากระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่ใช้วัตถุดิบหลักที่หาได้ง่ายจากธรรมชาติมาผลิต คือ เอทานอล ที่ได้จากการหมักพืชผล หรือ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และน้ำ ที่มีทั่วไปในธรรมชาติ มาทำปฏิกิริยากันในปฏิกรณ์เคมีที่ควบคุมภายใต้สภาวะอุณหภูมิ และความดัน ที่เหมาะสม เรียกว่า “ปฏิกิริยาปฏิรูปเอทานอลด้วยไอน้ำ” หรือ “ethanol steam reforming” เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์หลักคือ ซินแก๊ส (synthesis gas) ได้แก่ ไฮโดรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีผลพลอยได้เป็นมีเทน [1]

เพื่อทำนายปรากฏการณ์และติดตามพฤติกรรมทางธรรมชาติของการทำปฏิกิริยาภายในปฏิกรณ์เคมีที่ตำแหน่งต่าง ๆ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ และตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลทางอุณหพลศาสตร์ และจลนพลศาสตร์ ต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของปฏิกิริยาโดยแบบจำลองปฏิกรณ์เคมีที่ผู้วิจัยเลือกมาศึกษาคือ ปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลแบบราบเรียบ 2 มิติ คือ ในแนวความยาวของปฏิกรณ์ และแนวรัศมีของปฏิกรณ์ เนื่องจากในการดำเนินการจริงจะมีการกระจายตัวในทิศทาง และตำแหน่งภายในปฏิกรณ์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาวะดำเนินการ, สภาวะเริ่มต้นที่ส่งผลต่อการถ่ายโอนมวล, พลังงานและโมเมนตัม ของของไหลที่มีช่วงการไหลแบบราบเรียบ การสร้างแบบจำลองปฏิกรณ์แบบ 2 มิติจึงทำให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ตำแหน่งภายในปฏิกรณ์ได้อย่างละเอียด ได้แก่ บริเวณปากทางเข้า, บริเวณปากทางออก, บริเวณกึ่งกลางท่อ และบริเวณผนังท่อ หากทราบว่าการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนบุคคลเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ส่งผลต่อการผลิตสารชนิดใดได้ในปริมาณมาก และสารชนิดนั้นเกิดขึ้นในปริมาณมาก ณ ตำแหน่ง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ใดในปฏิกรณ์ [2] ข้อมูลนี้จะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกสภาวะดำเนินการที่เหมาะสมได้ และสามารถนำมาใช้เพื่อพัฒนา หรือดัดแปลงโครงสร้างของปฏิกรณ์ให้มีจุดประสงค์ตามความต้องการทางด้านปริมาณการผลิต, สิ่งแวดล้อม และความปลอดภัย เช่น การ scale up ขนาดของปฏิกรณ์, การเลือกชนิดวัสดุของท่อปฏิกรณ์เพื่อประเมินราคาติดตั้งปฏิกรณ์, การเลือกตำแหน่งการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนปฏิกรณ์เพื่อแก้ปัญหาการเกิดจุด hot spot ภายในปฏิกรณ์, การเลือกชนิดคอมเพรสเซอร์เพื่อป้อนและควบคุมสัดส่วนหรืออัตราการไหลของสารตั้งต้น, การติดตั้งเครื่องมือวัดและควบคุมอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์, การติดตั้งอุปกรณ์ safeguard หน่วย flare หรือช่อง purge แก๊สกรณีปฏิกรณ์ทำงานขัดข้อง หรือเสียหาย, และการติดตั้งหน่วยแยกแก๊สชนิดที่ต้องการออกจากแก๊สมลพิษ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปรากฏการณ์ และพฤติกรรมของแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบท่อ 2 มิติที่มีการไหลแบบ laminar flow สำหรับปฏิกิริยา ethanol stream reforming
2. เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา ethanol stream reforming ทั้งด้านปริมาณ และคุณภาพทางการผลิต
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา ethanol stream reforming ที่สภาวะดำเนินการต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกสภาวะดำเนินการ

1.3 ขอบเขตโครงการ

ศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา ethanol steam reforming โดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบท่อ 2 มิติ ที่มีการไหลแบบ laminar flow ในแนวความยาวปฏิกรณ์ และรัศมีของปฏิกรณ์ (axial and radial variation in tubular reactor laminar flow) รวมถึงศึกษาผลกระทบของตัวแปรต้นต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ, ความดัน, อัตราการไหลของสารตั้งต้น ที่ส่งผลต่อค่าการแปลงผันทางเคมี (conversion), ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ (selectivity) และ ผลได้ของผลิตภัณฑ์ (yield)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

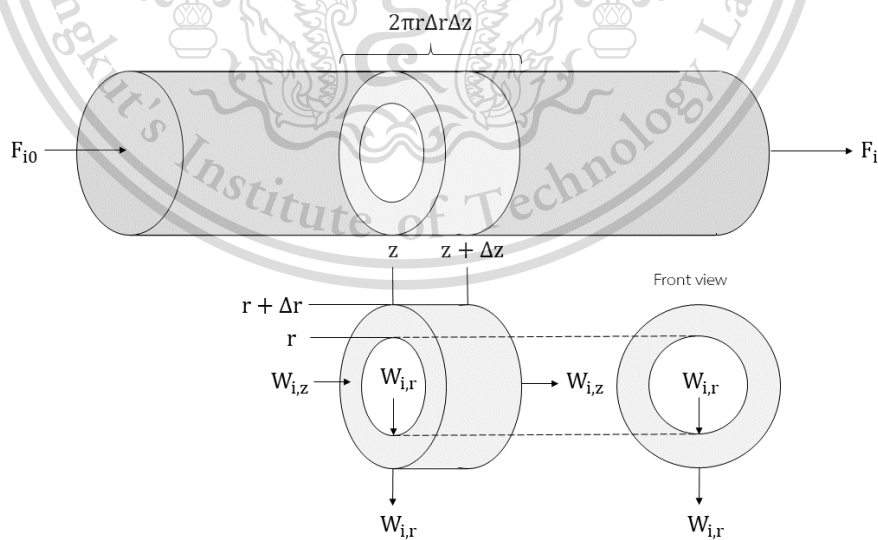
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะกล่าวถึงเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวความยาว และรัศมี, เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบราบเรียบ, และการประเมินประสิทธิภาพการผลิต

2.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวความยาวและรัศมี

เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวความยาว และรัศมี (axial and radial variation in tubular reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ 2 มิติ ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น, อุณหภูมิ, ความเร็ว, และอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดการแปรผันทั้งในแนวความยาว และรัศมีของปฏิกรณ์ สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์ของพารามิเตอร์, และตัวแปรที่เกี่ยวข้องภายในปฏิกรณ์ ในการสร้างแบบจำลองชนิดนี้จำเป็นต้องใช้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation: PDE) ในการแก้ไขปัญหา สมการดอลโมลสาร และสมการดุลพลังงานจะแสดงในรูปของอัตราการไหลเชิงโมล และพลังงาน ซึ่งนิยามจากโมลฟลักซ์ และฟลักซ์พลังงานในแนวแกน z และ r คู่กับพื้นที่ที่ตั้งฉากฟลักซ์ในแกน z และ r ตามลำดับ พิจารณาให้ระบบเป็นแบบสภาวะคงตัว (steady state) [2]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 2.1 การดุลโมลของปฏิกรณ์แบบท่อในแนว r, z และทิศทางโมลฟลักซ์ โยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

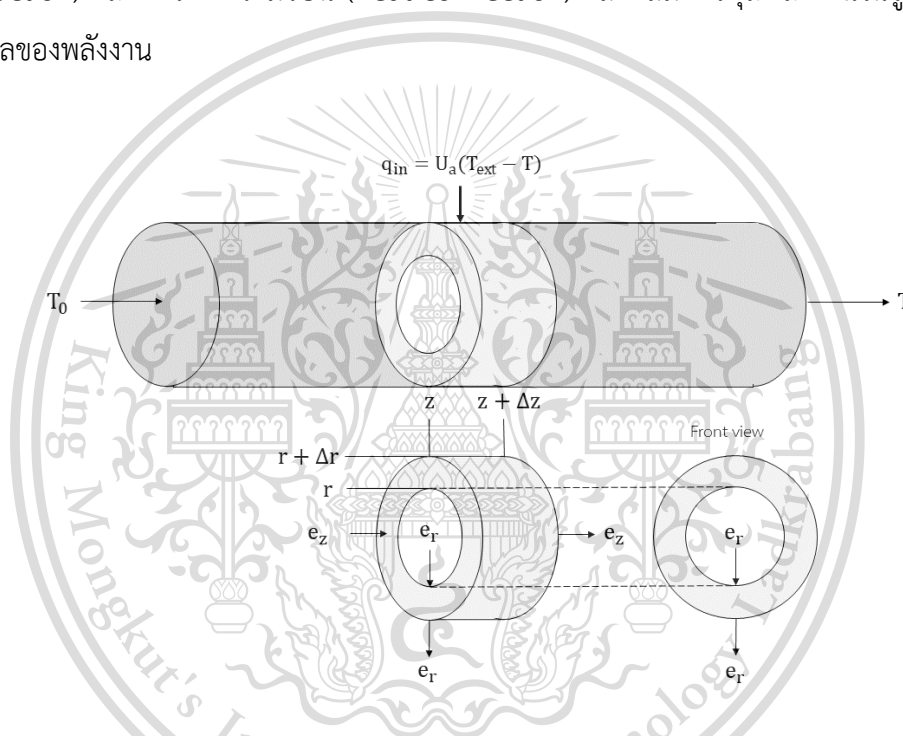
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กำหนดให้โมลฟลักซ์มีการถ่ายโอนในรูปแบบของการแพร่ (molar diffusion) และการพา (molar convection)

สมการดุลโมลสารแสดงในรูปที่ 2.1 ดังสมการ

$$D_i \frac{1}{r} \frac{\partial c_i}{\partial r} + D_i \frac{\partial^2 c_i}{\partial r^2} + D_i \frac{\partial^2 c_i}{\partial z^2} - 2u_0 \left(1 - \left(\frac{r}{R_{\text{rxt}}} \right)^2 \right) \frac{\partial c_i}{\partial z} + r_{i,j} = 0 \quad (2-1)$$

พิจารณาให้ฟลักซ์พลังงานมีการถ่ายโอนในรูปแบบของการนำความร้อน (heat conduction) และการพาความร้อน (heat convection) แสดงสมการดุลพลังงานในรูปของอัตรา การไหลของพลังงาน



รูปที่ 2.2 การดุลพลังงานของปฏิกรณ์แบบท่อในแนว r, z และทิศทางฟลักซ์พลังงาน

สมการดุลพลังงานแสดงในรูปที่ 2.2 ดังสมการ

$$\frac{k_m}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + k_m \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + k_m \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - 2u_0 \left(1 - \left(\frac{r}{R_{\text{rxt}}} \right)^2 \right) \rho_m C_{p,m} \frac{\partial T}{\partial z} + \Delta H_{R_x,j} r_j = 0 \quad (2-2)$$

พิจารณาให้การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เกิดขึ้นเฉพาะในแนวรัศมีปฏิกรณ์ ฉะนั้นจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในแนวความยาวปฏิกรณ์ ซึ่งชี้วัดได้จากลักษณะโปรไฟล์ความเร็วของของไหล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า แสดงสมการการดุลโมเมนต์ ได้ดังสมการ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\rho_m \left(u \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \right) \cdot u = \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left[-P + \mu_m \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^T \right) \right] \quad (2-3)$$

ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวความยาวและรัศมี (2 มิติ) จะมีสภาวะดำเนินการ และพฤติกรรมที่แตกต่างจากเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะแนวความยาว (1 มิติ) หรือ plug flow reactor ทำให้การประเมินประสิทธิภาพมีความแม่นยำ และละเอียดกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการศึกษาความบนพื้นฐานของผลการทดลองจริง

2.1.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบราบเรียบ

การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) เป็นรูปแบบการไหลที่กระแสน้ำไหล (stream line) เคลื่อนที่ไปด้วยขนาดที่เท่า ๆ กันอย่างเป็นระเบียบภายในท่อ มีการถ่ายโอนโมเมนตัมเพียงเล็กน้อย ทำให้กระแสน้ำไม่เกิดการหมุนวน และไม่ผสมกันใน layer ของไหล นิยมใช้ดำเนินการกับระบบที่มีของไหลความหนืดสูง, ความเร็วต่ำ, เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่มีขนาดใหญ่ บ่งบอกช่วงการไหลได้ด้วยเลขเรย์โนลด์ (Reynolds's number) ที่มีค่าต่ำ (ในกรณีการไหลแบบท่อจะมีค่าต่ำกว่า 2,000) การใช้แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบนี้จะสามารถอธิบายกลไกการถ่ายโอนโมเมนตัม, ความร้อนของของไหลภายในท่อแบบ 2 มิติ ได้ง่ายกว่าการใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) เมื่อนิยามให้การไหลแบบราบเรียบเป็นแบบพัฒนาเต็มที่ (fully developed flow) ความเร็วจะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางการไหลในแนวขนานกับท่อ หรือระยะความยาว (z) แต่จะเปลี่ยนแปลงตามระยะรัศมีท่อ (r) คือบริเวณกึ่งกลางท่อจะมีความเร็วสูงที่สุด และค่อย ๆ ลดลงจนเท่ากับศูนย์ เมื่อเข้าใกล้ผนังท่อ แสดงสมการการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ขึ้นระยะรัศมีของปฏิกรณ์ได้ตามสมการ [3]

$$u_z = 2u_0 \left(1 - \left(\frac{r}{R_{\text{rxt}}} \right)^2 \right) \quad (2-4)$$

เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow reactor) มีพฤติกรรมเฉพาะตัวที่ความเร็ว และความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ป้อนที่ปากทางเข้าไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะรัศมี แต่จะเริ่มเปลี่ยนแปลงตามระยะรัศมีเมื่อเคลื่อนที่ไปที่ความยาวมากขึ้น แต่สารตั้งต้นจะเคลื่อนที่ได้ช้า ณ บริเวณผนังปฏิกรณ์ทำให้มี resident time ที่สูง ปฏิกริยาจึงเกิดได้มาก ณ บริเวณผนังปฏิกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารมากกว่าบริเวณกึ่งกลางปฏิกรณ์ หากนำการไหลแบบราบเรียบไปใช้แบบจำลอง 1 มิติ เช่น plug flow reactor การเปลี่ยนแปลงของความเร็วในระยะรัศมีจะไม่มีความสำคัญ เนื่องจากถือว่าความเร็ว

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัดของปฏิกรณ์ การนำนิยามเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบราบเรียบมาใช้งาน จึงเหมาะสมกับระบบแบบ 2 มิติ (z และ r) คือ ปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวความยาว และรัศมีซึ่งอธิบายตามหัวข้อที่ 2.1.1

เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบราบเรียบ ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาผลของพลศาสตร์ของไหลที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา, การประเมิน resident time ในท่อปฏิกรณ์เพื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่ง-ระยะทางของจุดป้อน (input point), ทำนายปริมาณการไหลของสารที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในท่อเพื่อเลือกจุดเก็บตัวอย่างสารผลิตภัณฑ์ (product sampling point) ไปวิเคราะห์, นอกจากนี้ยังสามารถควบคุม และปรับเปลี่ยนสภาวะดำเนินการ, สภาวะเริ่มต้นของปฏิกรณ์ได้ โดยง่ายทำให้สามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ และติดตาม (monitoring) การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น, อุณหภูมิ, ความเร็ว, และความดัน สำหรับพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพ และวางแผนรับมือเหตุฉุกเฉิน หรือป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากการผลิตได้ [4], [5]

2.1.3 การประเมินประสิทธิภาพการผลิต

การคำนวณประสิทธิภาพการผลิตสำหรับงานวิจัยนี้จะแบ่งโดยพิจารณาจากแนวแกนของแบบจำลองที่ศึกษา คือ ประสิทธิภาพในแนวความยาวปฏิกรณ์ (z) และแนวรัศมีปฏิกรณ์ (r) ซึ่งมีทั้งค่าการแปลงผันทางเคมี (conversion: X), ค่าการเลือกเกิด (selectivity: S) และผลได้ของผลิตภัณฑ์ (yield) ดังนี้ [2]

ค่าการแปลงผันทางเคมีที่ขึ้นกับตำแหน่ง r และ z คำนวณได้ ดังนี้

$$X_A(r, z) = \frac{F_{A0}(r, z) - F_{A,z}(r, z)}{F_{A0}(r, z)} \quad (2-5)$$

ค่าการแปลงผันทางเคมีในแนวแกน z (axial conversion) ที่ตำแหน่ง “ผนัง” ปฏิกรณ์

$$X_A(R_{rxt}, z) = \frac{F_{A0}(R_{rxt}, z) - F_{A,z}(R_{rxt}, z)}{F_{A0}(R_{rxt}, z)} \quad (2-6)$$

ค่าการแปลงผันทางเคมีในแนวแกน z (axial conversion) ที่ตำแหน่ง “กึ่งกลาง” ปฏิกรณ์

$$X_A(0, z) = \frac{F_{A0}(0, z) - F_{A,z}(0, z)}{F_{A0}(0, z)} \quad (2-7)$$

ค่าการแปลงผันทางเคมีในแนวแกน r (radial conversion) ที่ตำแหน่ง “ปากทางเข้า” ปฏิกรณ์

$$X_A(r, 0) = \frac{F_{A0}(r, 0) - F_{A,z}(r, 0)}{F_{A0}(r, 0)} \quad (2-8)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค่าการแปลงผันทางเคมีในแนวแกน r (radial conversion) ที่ตำแหน่ง “ปากทางออก” ปฏิกรณ์

$$X_A(r, z) = \frac{F_{A0}(r, L_{rxt}) - F_{A,z}(r, L_{rxt})}{F_{A0}(r, L_{rxt})} \quad (2-9)$$

นอกจากนี้ยังคำนวณค่าการแปลงผันทางเคมีเฉลี่ยในแนวแกน r ที่ระยะ z ไต ๆ ที่เท่ากันดังนี้

$$X_{A,avg}(r) = \frac{\int_{-R_{rxt}}^{R_{rxt}} X_A(r, z) dz}{R_{rxt}} \quad (2-10)$$

ส่วนค่าการเลือกเกิด และผลได้ของผลิตภัณฑ์จะประเมินเฉพาะในแนวแกน z เท่านั้น ตามสมการ

ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ในแนวแกน z ที่ตำแหน่ง “ผนัง” ปฏิกรณ์

$$S_B(R_{rxt}, z) = \frac{F_B(R_{rxt}, z)}{\sum_{i=1}^n F_i(R_{rxt}, z)} \quad (2-11)$$

ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ในแนวแกน z ที่ตำแหน่ง “กึ่งกลาง” ปฏิกรณ์

$$S_B(0, z) = \frac{F_B(0, z)}{\sum_{i=1}^n F_i(0, z)} \quad (2-12)$$

ในกรณีนี้ i แทน สารผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (H_2, CO_2, CO, CH_4)

ผลได้ของผลิตภัณฑ์ในแนวแกน z ที่ตำแหน่ง “ผนัง” ปฏิกรณ์

$$Y_B(R_{rxt}, z) = \frac{F_B(R_{rxt}, z)}{F_{A0}(R_{rxt}, z)} \quad (2-13)$$

ผลได้ของผลิตภัณฑ์ในแนวแกน z ที่ตำแหน่ง “กึ่งกลาง” ปฏิกรณ์

$$Y_B(0, z) = \frac{F_B(0, z)}{F_{A0}(0, z)} \quad (2-14)$$

ในกรณีนี้ A0 แทน สารตั้งต้นในกระบวนการผลิตเฉพาะ เอทานอล (C_2H_5OH)

นอกจากนี้ยังคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์เฉลี่ยในแนวแกน r ที่ระยะ z ไต ๆ ที่เท่ากัน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$Y_{B,avg}(r) = \frac{\int_{-R_{rxt}}^{R_{rxt}} Y_B(r, z) dz}{R_{rxt}} \quad (2-15)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

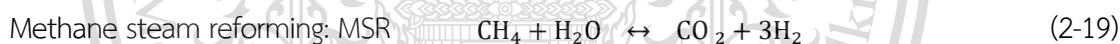
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะศึกษาการเกิดปฏิกิริยา ESR เพื่ออธิบายแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ และศึกษาแบบจำลองปฏิกิริยา 2 มิติของปฏิกิริยาต่าง ๆ

2.2.1 งานวิจัยการเกิดปฏิกิริยา ESR บนตัวเร่งชนิด Rh(1%wt)MgAl₂O₄/Al₂O₃ [6]

จากการศึกษาของ C.Graschinsky พร้อมคณะ [6] ที่ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ 5 ชุดในการเกิดปฏิกิริยา ESR กับผลการทดลองจริงของผลได้ร้อยละการผลิตแก๊สไฮโดรเจน จากการศึกษาพบว่าค่าผลรวมของค่าเศษเหลือกำลังสอง (Sum of the square residual: SSR) ของแบบจำลองที่ 5 เป็นค่าที่น้อยที่สุด (SSR มีค่า 1.7×10^{-2}) ส่งผลได้ให้ข้อสรุปที่ว่าแบบจำลองที่ 5 เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยา ESR บนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Rh(1%wt)MgAl₂O₄/Al₂O₃

โดยแบบจำลองที่ 5 สรุปว่าปฏิกิริยาทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในระบบนี้มีทั้งหมด 4 ปฏิกิริยา ดังนี้



2.2.2 งานวิจัยการศึกษาแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตบรรจ 2 มิติ สำหรับการผลิตไฮโดรเจนโดยปฏิกิริยา ESR บนตัวเร่งชนิด Ni-based [7]

จากการศึกษาของ E. Akpan พร้อมคณะ [7] ที่ทำการศึกษาแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตบรรจ 2 มิติ กับปฏิกิริยา ESR เพื่อทำนายความเข้มข้นของสารในระบบทั้งในแนวความยาวปฏิกรณ์ และแนวรัศมีปฏิกรณ์

งานวิจัยนี้ศึกษาปฏิกิริยาในช่วง space-time 62.43-624.3 วินาที ที่ความดัน 1 atm และในช่วงอุณหภูมิ 673-863 K พบว่าแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตบรรจ 2 มิติสามารถทำนายความเข้มข้นของสารในระบบทั้งแนวความยาวปฏิกรณ์และแนวรัศมีปฏิกรณ์ได้แม่นยำ โดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารในระบบจากแบบจำลองกับผลการทดลองจริงในแนวความยาวปฏิกรณ์มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ (average absolute deviation: AAD) 1.28% ในส่วนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยทางวิชาการเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่ในที่อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แก๊สมีปฏิกรณณ์มีการเปลี่ยนแปลงของสารเล็กน้อย เนื่องจากไม่ได้ดำเนินการภายใต้สภาวะ laminar flow ทำให้แทบไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารในแก๊สมี

2.2.3 งานวิจัยการศึกษาแบบจำลองเครื่องปฏิกรณณ์แบบเบดบรรจุ สำหรับปฏิกริยาการผลิต DME บนตัวเร่งชนิด $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ [8]

จากการศึกษาของ R. Peláez พร้อมคณะ [8] ทำการศึกษาแบบจำลองเครื่องปฏิกริยาแบบเบดบรรจุสำหรับทำปฏิกริยาผลิต DME ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปฏิกรณณ์ 0.07 m, ความยาวปฏิกรณณ์ 0.5 m เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การกระจายตัวของสารเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น และอุณหภูมิ โดยการพัฒนาแบบจำลองจาก 1 มิติ ในแนวความยาวปฏิกรณณ์ เป็น 2 มิติ ในแนวความยาวปฏิกรณณ์และรัศมีปฏิกรณณ์

งานวิจัยนี้ศึกษาการเกิดปฏิกริยาด้วยสภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 518 K ความดัน 40 bar ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ามีการถ่ายโอนมวล และพลังงานในแก๊สมี พบว่าแบบจำลอง 2 มิติสามารถทำนายผลลัพธ์ได้ละเอียดกว่าแบบจำลอง 1 มิติในแง่การเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์ความเร็วในแก๊สมี มีค่าความผิดพลาดเมื่อเทียบกับผลการทดลองจริง 15 % เนื่องจากปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาดูดความร้อน โปรไฟล์ของอุณหภูมิจากบริเวณกึ่งกลางท่อไปถึงผนังท่อจึงเปลี่ยนแปลงจากต่ำไปสูง, การลดอุณหภูมิทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลงมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปฏิกรณณ์ขึ้นแล้วพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความเบี่ยงเบนออกจากแบบจำลองแบบ 1 มิติมากขึ้น ในขณะที่การลดขนาดผ่านศูนย์กลางปฏิกรณณ์จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงแบบจำลอง 1 มิติมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3 สรุปผลการศึกษาจากงานวิจัย

จากการศึกษาผลจากงานวิจัยพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Rh (1%wt) $MgAl_2O_4/Al_2O_3$ สำหรับทำปฏิกิริยา ESR นั้นมีปฏิกิริยาย่อยเกิดขึ้นทั้งหมด 4 ปฏิกิริยา ซึ่งผลลัพธ์ของแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง จึงเหมาะสมที่จะนำข้อมูลทางจลนพลศาสตร์มาใช้ทำนายพฤติกรรมการเกิดปฏิกิริยา ESR ในแบบจำลองปฏิกรณ์ที่จะศึกษา

ส่วนการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับแบบจำลองปฏิกรณ์แบบ 2 มิติ พบว่าแบบจำลอง 2 มิติส่วนใหญ่จะทำนายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารภายในปฏิกรณ์ได้ละเอียด-แม่นยำสูง ทั้งในแนวความยาวปฏิกรณ์ และในแนวรัศมีปฏิกรณ์ และพบว่าหากช่วงการไหลไม่เป็นแบบ laminar flow แทบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในแนวรัศมีปฏิกิริยา และหากปฏิกิริยาเป็นแบบดูดความร้อน โปรไฟล์ของ อุณหภูมิ ณ บริเวณกึ่งกลางปฏิกรณ์ไปจนถึงผนังปฏิกรณ์จึงเปลี่ยนแปลงจากต่ำไปสูง, และการลดขนาดของระยะรัศมีปฏิกรณ์จะทำให้ผลลัพธ์มีความใกล้เคียงกับแบบจำลองแบบ 1 มิติมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน มีขั้นตอนคือการสร้างแบบจำลองขั้นต้น และการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้

3.1 สร้างแบบจำลองขั้นต้น

3.1.1 รวบรวมข้อมูลตัวแปรและสมการสำหรับเขียนแบบจำลอง

รวบรวมสมการสมดุลโมล, พลังงาน, โมเมนตัม รวมถึงข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา ESR และปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง C. Graschinsky และคณะ [6] ศึกษากระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา ESR ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ Rh (1%wt) MgAl₂O₄/Al₂O₃ แบบจำลองนี้จะใช้สมการทางจลนพลศาสตร์ของงานวิจัยฉบับนี้ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมการจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา ESR (Rh (1%wt) MgAl₂O₄/Al₂O₃) [6]

ชื่อปฏิกิริยา		
ESR	ปฏิกิริยา	$C_2H_5OH + H_2O \rightarrow CO_2 + CH_4 + 2H_2$
	สมการจลนพลศาสตร์	$r_{ESR} = \frac{k_{ESR}K_{CHO}K_{OH} \left[\frac{P_{C_2H_5OH}P_{H_2O}}{P_{CH_4}P_{H_2}} \right] C_T^2}{DEN^2}$
WGS	ปฏิกิริยา	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$
	สมการจลนพลศาสตร์	$r_{WGS} = \frac{k_{WGS}K_{CO}K_{OH} \left[\frac{P_{CO}P_{H_2O}}{P_{H_2}} - \frac{P_{CO_2}P_{H_2}^{0.5}}{K_{WGS}} \right] C_T^2}{DEN^2}$
ED	ปฏิกิริยา	$C_2H_5OH \rightarrow CO + CH_4 + H_2$
	สมการจลนพลศาสตร์	$r_{ED} = \frac{k_{ED}K_{CHO} \left[\frac{P_{C_2H_5OH}}{P_{CH_4}P_{H_2}^{0.5}} \right] C_T^2}{DEN^2}$
MSR	ปฏิกิริยา	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO_2 + 3H_2$
	สมการจลนพลศาสตร์	$r_{MSR} = \frac{k_{MSR}K_{CH_3}K_{OH} \left[\frac{P_{CH_4}P_{H_2O}}{P_{H_2}} - \frac{P_{CO}P_{H_2}^2}{K_{MSR}} \right] C_T^2}{DEN^2}$

$$\text{เมื่อ } DEN = 1 + K_{C_2H_5OH}P_{C_2H_5OH} + K_{CH_3} \frac{P_{CH_4}}{P_{H_2}^{0.5}} + K_{OH} \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}^{0.5}} + K_{CH_4}P_{CH_4} + K_{CO}P_{CO} + K_{CO_2}P_{CO_2} +$$

$$K_H P_{H_2}^{0.5} + K_{CH_3CH_2O} \frac{P_{C_2H_5OH}}{P_{H_2}^{0.5}} + K_{CH_3CHO} \frac{P_{C_2H_5OH}}{P_{H_2}} + K_{CHO} \frac{P_{C_2H_5OH}}{P_{CH_4}P_{H_2}^{0.5}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การเป็นเจ้าของเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Rh (1%wt) MgAl₂O₄/Al₂O₃ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลแบบ laminar flow

ปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลแบบ laminar flow จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงใน 2 มิติของปฏิกรณ์ คือแนวรัศมี (r) และแนวความยาวของปฏิกรณ์ (z) (radial and axial variation in tubular flow) กำหนดสมมติฐาน (assumptions) ในการสร้างแบบจำลอง ดังนี้

- ระบบแบบสภาวะคงตัว อุณหภูมิไม่คงที่ และความดันคงที่ (steady-state non-isothermal and isobaric reactor)
- แก๊สในระบบประพฤติตัวเป็นแก๊สอุดมคติ (ideal gas)
- รูปแบบการไหลของแก๊สอยู่ในช่วง laminar flow
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารป้อน ณ ทางเข้าปฏิกรณ์ ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะรัศมีปฏิกรณ์
- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของแก๊สทุกชนิด (diffusion coefficient) มีค่าเท่ากัน
- ปฏิกริยาในระบบทั้งหมดเป็นไปตามตารางที่ 3.1

ขนาดรัศมีปฏิกรณ์ 0.712 mm ความยาวปฏิกรณ์ 7.12 mm กำหนดให้การไหลแบบ fully developed laminar flow ใช้สมการคำนวณความเร็วที่ขึ้นกับรัศมีของปฏิกรณ์ ตามสมการที่ 2-4

เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้สำหรับการดุลโมล, พลังงาน, และโมเมนตัม ที่ตำแหน่งทางเข้า, ผนัง, ของปฏิกรณ์ แสดงดังตารางที่ 3.3 [2]

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับแบบจำลองปฏิกรณ์

ตำแหน่ง	การดุลโมล	การดุลพลังงาน
$z = 0$	$c_i = c_{i0}$	$T = T_0$
$r = 0$	$\frac{\partial c_i}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$
$r = R_{rxt}$	$\frac{\partial c_i}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial z} = q$

เมื่อ q แทนฟลักซ์ความร้อนที่ไหลผ่านผนังเข้าปฏิกรณ์ตลอดระยะความยาวปฏิกรณ์ ดังสมการ

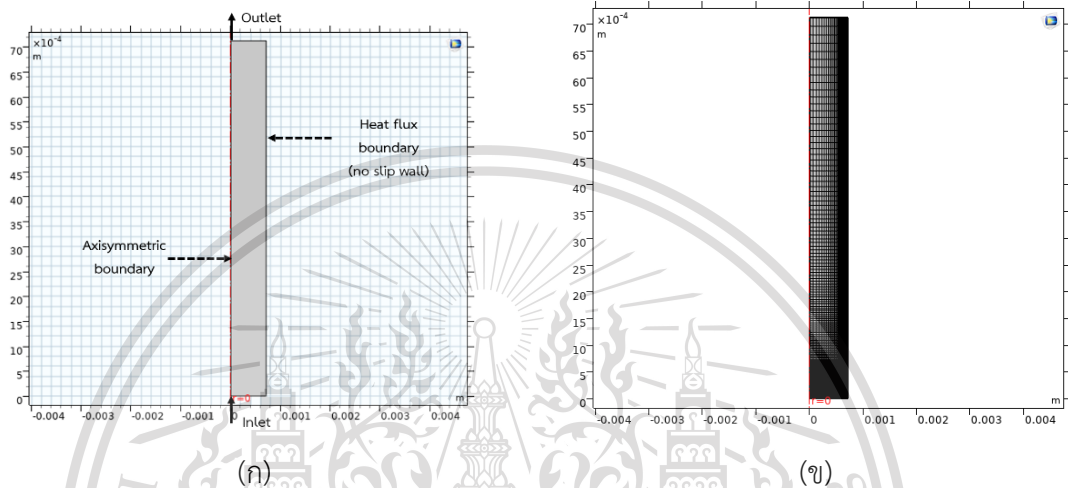
$$q = U(T_a - T) \quad (3-1)$$

เมื่อทำการแทนที่ค่าในสมการจลนพลศาสตร์ของแต่ละปฏิกิริยาได้แล้ว จะสามารถหาค่าอัตราการไหลของสารใดๆ ค่าอุณหภูมิ และค่าความดันที่เปลี่ยนไป จากสมการที่ 2-1, 2-2 และ 2-3

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลแบบ laminar flow บรรจุ Rh (1%wt) $MgAl_2O_4/Al_2O_3$ จะถูกแก้ปัญหาโดยแบบจำลอง 2 มิติ (4 เหลี่ยม) เป็นภาพตัดขวางในระนาบ rz ของปฏิกรณ์ (จำลองสถานะคงตัว (stationary) แทนที่สมการเชิงอนุพันธ์ ดังรูปที่ 3.3 (ก) boundary ประกอบไปด้วย ปากทางเข้า (inlet), ปากทางออก (outlet), ผนัง (wall), และเส้นกึ่งกลาง (centerline) ของปฏิกรณ์ ใช้ domain เพียงครึ่งหนึ่งในการแก้ปัญหา และแบ่งความละเอียดโดยใช้ mesh ดังรูปที่ 3.3 (ข)



รูปที่ 3.1 (ก) geometry และ (ข) mesh ของแบบจำลอง

3.1.2 ตรวจสอบผลของแบบจำลองกับผลการทดลองจริง

ก่อนที่จะนำแบบจำลองที่เขียนสำเร็จแล้วไปใช้งาน เพื่อให้มั่นใจว่าแบบจำลองนั้นถูกต้อง มีความน่าเชื่อถือ และเป็นสามารถนำไปงานได้ผลตรงกับตามความเป็นจริง จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบแบบจำลอง (model validation) ด้วยการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลองกับผลการทดลองจริงว่ามีความสอดคล้อง และมีแนวโน้มเหมือนกันหรือไม่

3.2 นำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้

เมื่อมั่นใจแล้วว่าแบบจำลองมีความถูกต้อง ส่วนนี้จะเป็นการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ ได้แก่ การติดตาม และทำนายพฤติกรรมของปริมาณสารต่าง ๆ ตลอดระยะความยาว และรัศมีของเครื่องปฏิกรณ์, ปรับเปลี่ยนค่าของ parameters โดยเฉพาะสถานะดำเนินการเริ่มต้นว่าส่งผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพการผลิตเพื่อเป็นแนวทางตัดสินใจปรับเปลี่ยนสถานะดำเนินการที่มีต่อการเพิ่มปริมาณ

การผลิตสารที่ต้องการ, และนำแบบจำลองไปพัฒนาปัจจัยภายนอกที่ค้ำึงถึงในการผลิต เช่น การลด
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปริมาณแก๊สมลพิษ, การลดการเกิดจุด hot spot เป็นต้น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3 ประเมินประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์

ผลการศึกษาของแบบจำลองดังกล่าวจะชี้วัด และประเมินผ่านค่าการแปลงผันทางเคมีของสารตั้งต้น, ค่าการเลือกเกิดและผลได้ของสารผลิตภัณฑ์ สำหรับงานวิจัยนี้จะประเมินประสิทธิภาพการผลิตที่สภาวะดำเนินที่แตกต่างกัน และแบ่งแกนที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าทั้ง 3 นี้ จำนวน 2 แกน คือ แกนความยาวของปฏิกรณ์ (axial axis) และ แกนรัศมีของปฏิกรณ์ (radial axis) สมการประเมินประสิทธิภาพแสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.1.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

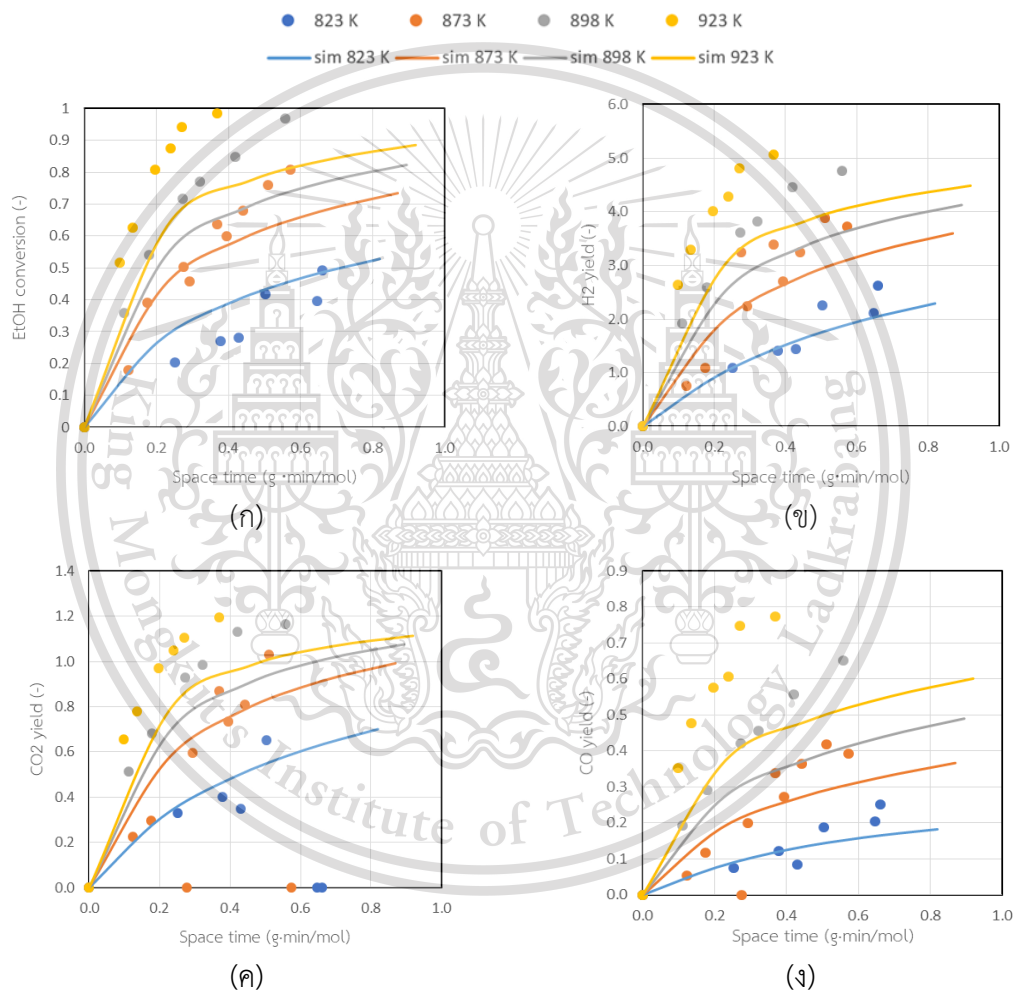
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 ผลการตรวจสอบแบบจำลอง

แสดงการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดลองจริง [6] ดังรูปที่ 4.1 แบบจำลอง 2 มิติ ที่ความสูงใด ๆ ของปฏิกรณ์จะเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมี จึงเฉลี่ยผลการคำนวณตลอดระยะรัศมี โดยใช้สมการที่ 2-7 คำนวณค่า EtOH conversion และใช้สมการที่ 2-10 คำนวณค่า yield



รูปที่ 4.1 ผลการคำนวณจากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง

(ก) EtOH conversion (ข) H₂ yield (ค) CO₂ yield (ง) CO yield

(T₀ = 823 K, P₀ = 1 atm, S/E = 5.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

พบว่าผลการคำนวณจากแบบจำลองสามารถทำนายแนวโน้มได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองแบบ isothermal ที่ อุณหภูมิ 823 K และ 873 K แต่สามารถทำนายแนวโน้มได้เบี่ยงเบนไปจากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 898 K และ 923 K เนื่องจากแบบจำลอง 2 มิติที่ใช้สมมติฐานการคำนวณภายใต้สภาวะ non-isothermal ด้วยการไหลแบบ laminar flow, แก๊สอุดมคติ และมีการเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์ในแนวรัศมีปฏิกรณ์ กำหนดให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลมีค่าเท่ากันทุกชนิด

ผลการคำนวณที่อุณหภูมิ 898 K และ 923 K พบว่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ที่ปากทางเข้าจะลดลงไปตามระยะความยาวปฏิกรณ์ (ผลจากปฏิกิริยาดูดความร้อน) อุณหภูมิภายในปฏิกรณ์บริเวณใกล้ปากทางออกจึงลดลงต่ำกว่า 898 K และ 923 K จนมีค่าเหลือประมาณ 800 – 850 K ซึ่งไม่คงที่เท่ากันทุก ๆ ระยะความยาวปฏิกรณ์เช่นเดียวกับสภาวะที่ทดลองแบบ isothermal ทำให้ผลการคำนวณที่อุณหภูมิ 898 K และ 923 K ลดลงต่ำกว่าผลการทดลอง ในขณะที่การทำนายที่อุณหภูมิ 823 K และ 873 K อุณหภูมิได้ลดลงเพียงเล็กน้อยตามระยะความยาวปฏิกรณ์ จึงสามารถทำนายผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่เป็นแบบ isothermal ได้

นอกจากนี้การใช้แบบจำลอง 2 มิติ ทำให้เกิดผลของการเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีปฏิกรณ์ ผลการคำนวณค่า EtOH conversion เฉลี่ยตามระยะ r และค่า product yield เฉลี่ยตามระยะ r ที่ความยาวต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน (ค่าบริเวณกึ่งกลางจะต่ำกว่าบริเวณผนังปฏิกรณ์เสมอ) มีสาเหตุมาจากการใช้การไหลแบบ laminar) ดังนั้น แบบจำลอง 2 มิติจึงไม่สามารถทำนายสภาวะที่อุณหภูมิภายในปฏิกรณ์คงที่ตลอดระยะความยาวปฏิกรณ์ได้แม่นยำนัก โดยเฉพาะกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเริ่มต้นกับอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ในช่วงที่สูง [9]

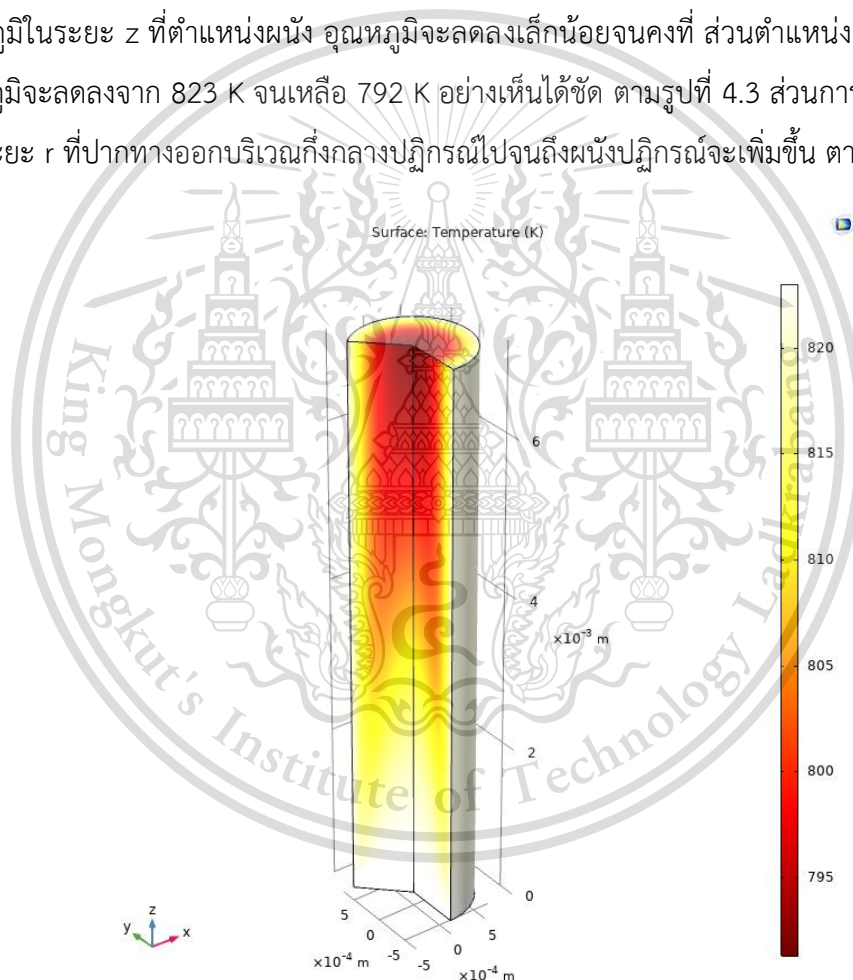
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2 แบบจำลองปฏิกรณ์แบบ adiabatic laminar flow

สำหรับการศึกษาแบบจำลองปฏิกรณ์แบบ adiabatic laminar flow จะสมมติให้มีการติดตั้งฉนวนรอบผนังปฏิกรณ์ ไม่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม และไม่มีมวลไหลออกจากผนังปฏิกรณ์ กำหนดให้สภาวะเริ่มต้น อุณหภูมิขาเข้า (T_0) 823 K, ความดันขาเข้า (P_0) 1 atm, สัดส่วนป้อนไอน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 5.5 และอัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้า (V_i) $6.23 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ สามารถแสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของระบบลดลงตามระยะความยาวของปฏิกรณ์ (z) เนื่องจากปฏิกิริยา ESR เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction) จึงจำเป็นต้องใช้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระยะ z ที่ตำแหน่งผนัง อุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อยจนกระทั่ง ส่วนตำแหน่งกึ่งกลางปฏิกรณ์ อุณหภูมิจะลดลงจาก 823 K จนเหลือ 792 K อย่างเห็นได้ชัด ตามรูปที่ 4.3 ส่วนการเปลี่ยนอุณหภูมิตามระยะ r ที่ปากทางออกบริเวณกึ่งกลางปฏิกรณ์ไปจนถึงผนังปฏิกรณ์จะเพิ่มขึ้น ตามรูปที่ 4.4



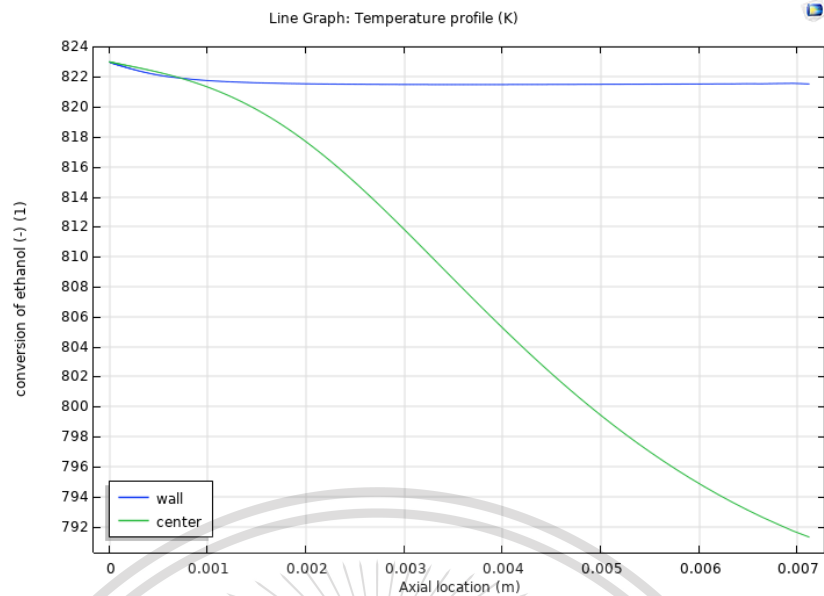
รูปที่ 4.2 surface temperature กรณี adiabatic

$$(T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

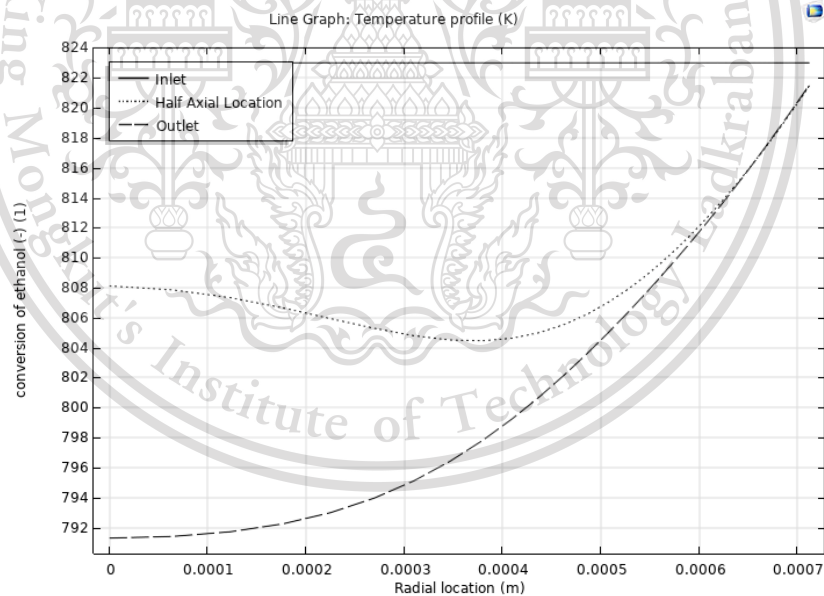
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.3 axial temperature profile กรณี adiabatic

$$(T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5)$$



รูปที่ 4.4 radial temperature profile กรณี adiabatic

$$(T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

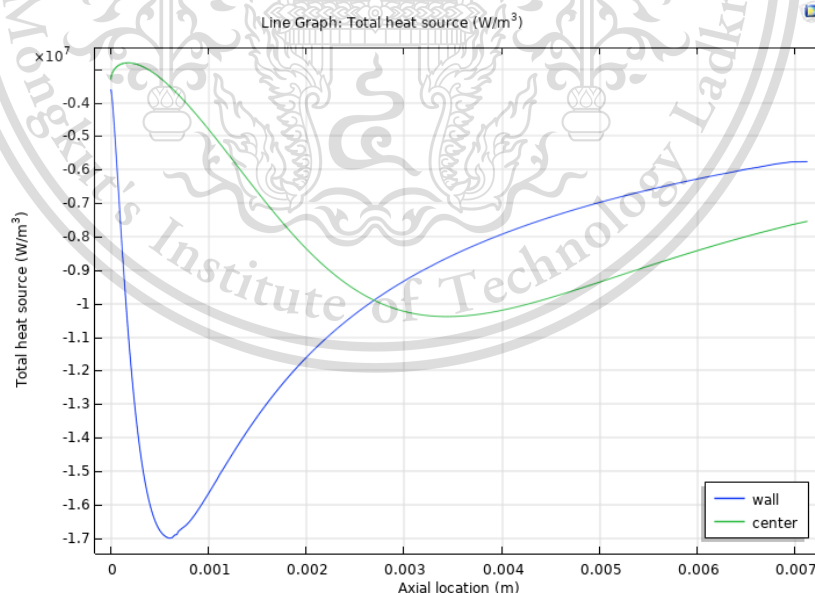
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 4.5 พบว่าที่ความยาว z ช่วงใกล้ปากทางเข้าบริเวณผนังจะต้องการดูดความร้อนเพื่อทำปฏิกิริยาสูงกว่าบริเวณกึ่งกลาง แต่ช่วงใกล้ปากทางออกบริเวณกึ่งกลางจะต้องการดูดความร้อนเพื่อทำปฏิกิริยาสูงกว่าบริเวณผนัง ทำให้อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางต่ำกว่าบริเวณผนังช่วงใกล้ปากทางออก มีสาเหตุมาจากรูปแบบการไหลของระบบเป็นแบบ laminar flow ทำให้ความเร็ว, อัตราการไหลบริเวณใกล้ผนังต่ำกว่าบริเวณกึ่งกลาง สารตั้งต้นจึงแพร่และนำพาเข้าใกล้ผนังได้น้อย ปฏิกิริยาจึงดูดความร้อนที่บริเวณผนังน้อยกว่ากึ่งกลาง ตามรูปที่ 4.6

เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้า ความเข้มข้นเอทานอลจะค่อย ๆ ลดลงเพื่อเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ หากเปรียบเทียบรูปที่ 4.2 กับรูปที่ 4.7 จะพบว่าบริเวณที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ได้ค่า conversion สูง พบว่าค่า conversion จะเพิ่มขึ้นตามระยะ z ซึ่งบริเวณใกล้ผนังปฏิกรณ์ค่า conversion จะสูงกว่ากึ่งกลางปฏิกรณ์ ตามรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาแบบ adiabatic พบว่าค่า conversion จะถูกจำกัดด้วยอุณหภูมิที่ปากทางเข้า เนื่องจากอุณหภูมิที่ปากทางออกของปฏิกรณ์บริเวณผนังจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ปากทางเข้า [10]

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่ตำแหน่งผนังและกึ่งกลางปฏิกรณ์ (ปฏิกิริยาตามตารางที่ 3.1) ตามระยะ z เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่า yield และ selectivity ของผลิตภัณฑ์



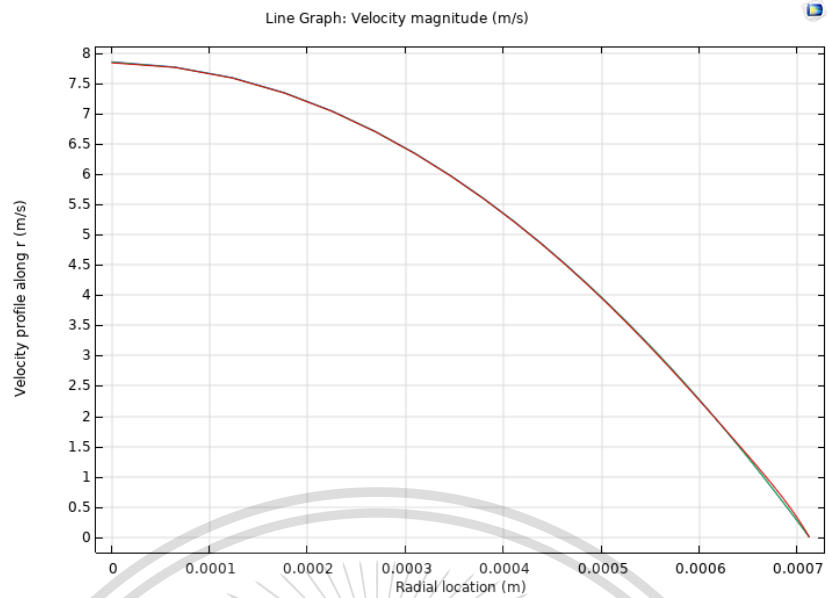
รูปที่ 4.5 total heat of reaction กรณี adiabatic

$$(T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5)$$

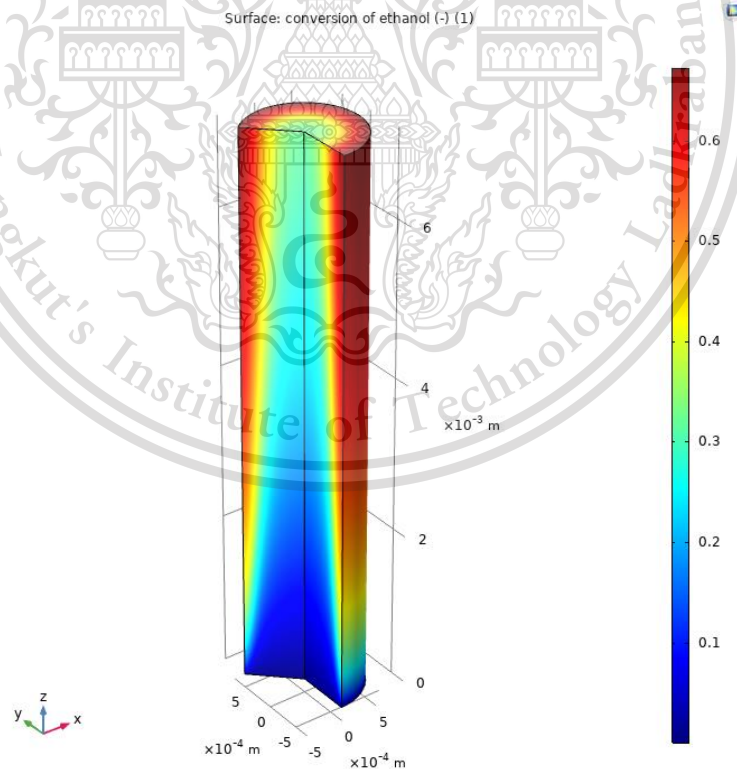
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.6 radial velocity profile กรณี adiabatic
 ($T_0 = 823 \text{ K}$, $P_0 = 1 \text{ atm}$, $S/E = 5.5$)

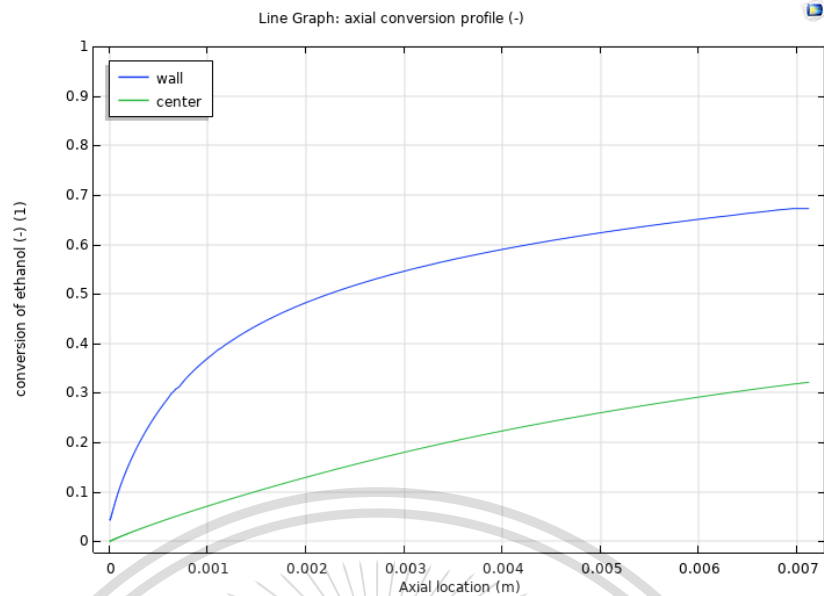


รูปที่ 4.7 EtOH surface conversion กรณี adiabatic

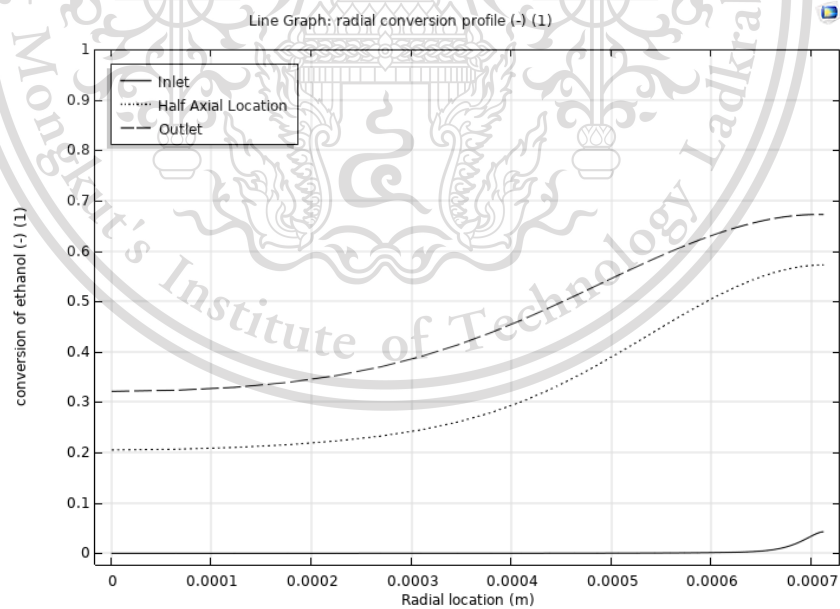
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น มิใช่ให้คุณใช้เพื่อการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.8 axial conversion profile กรณี adiabatic
 $(T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5)$



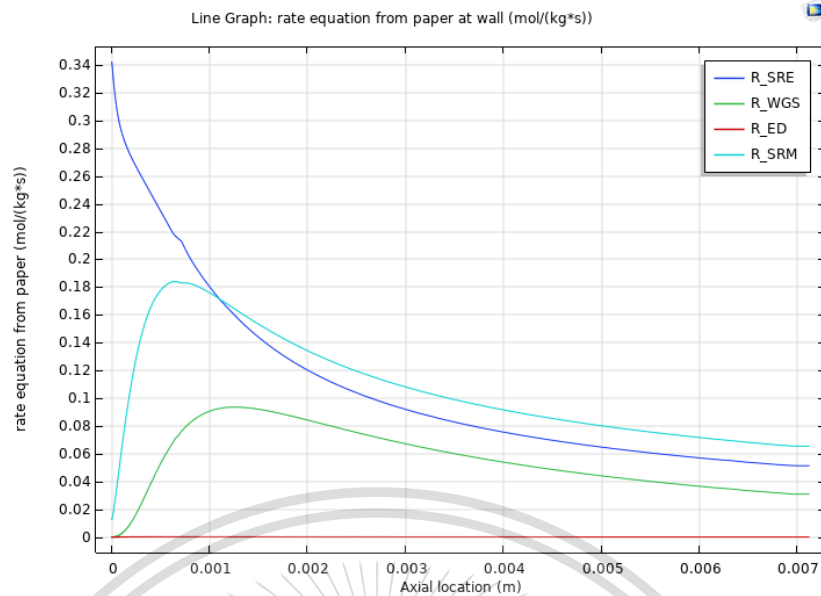
รูปที่ 4.9 radial conversion profile กรณี adiabatic

$$(T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5)$$

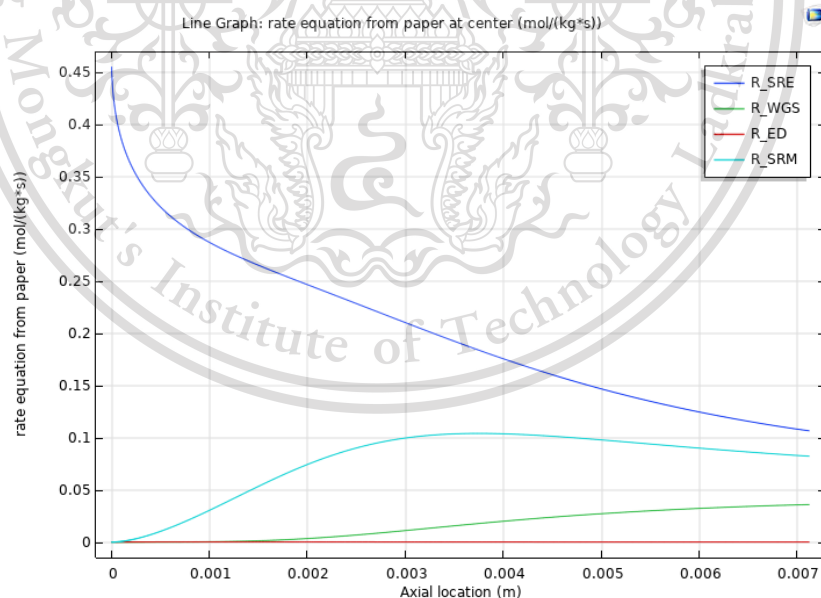
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.10 อัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบ adiabatic ตามแนว axial ตำแหน่งผนังปฏิกรณ์
($T_0 = 823$ K, $P_0 = 1$ atm, $S/E = 5.5$)

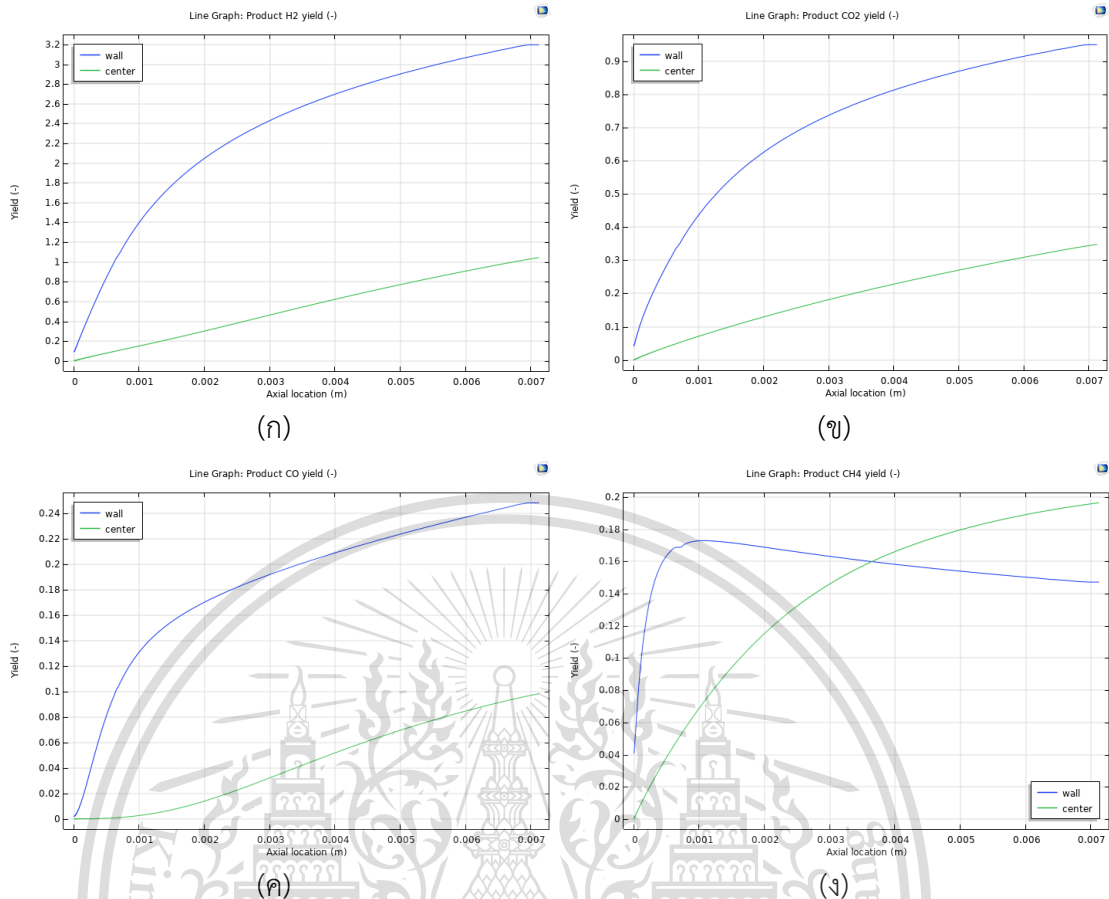


รูปที่ 4.11 อัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบ adiabatic ตามแนว axial ตำแหน่งกึ่งกลางปฏิกรณ์
($T_0 = 823$ K, $P_0 = 1$ atm, $S/E = 5.5$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.12 yield ของผลิตภัณฑ์ กรณี adiabatic

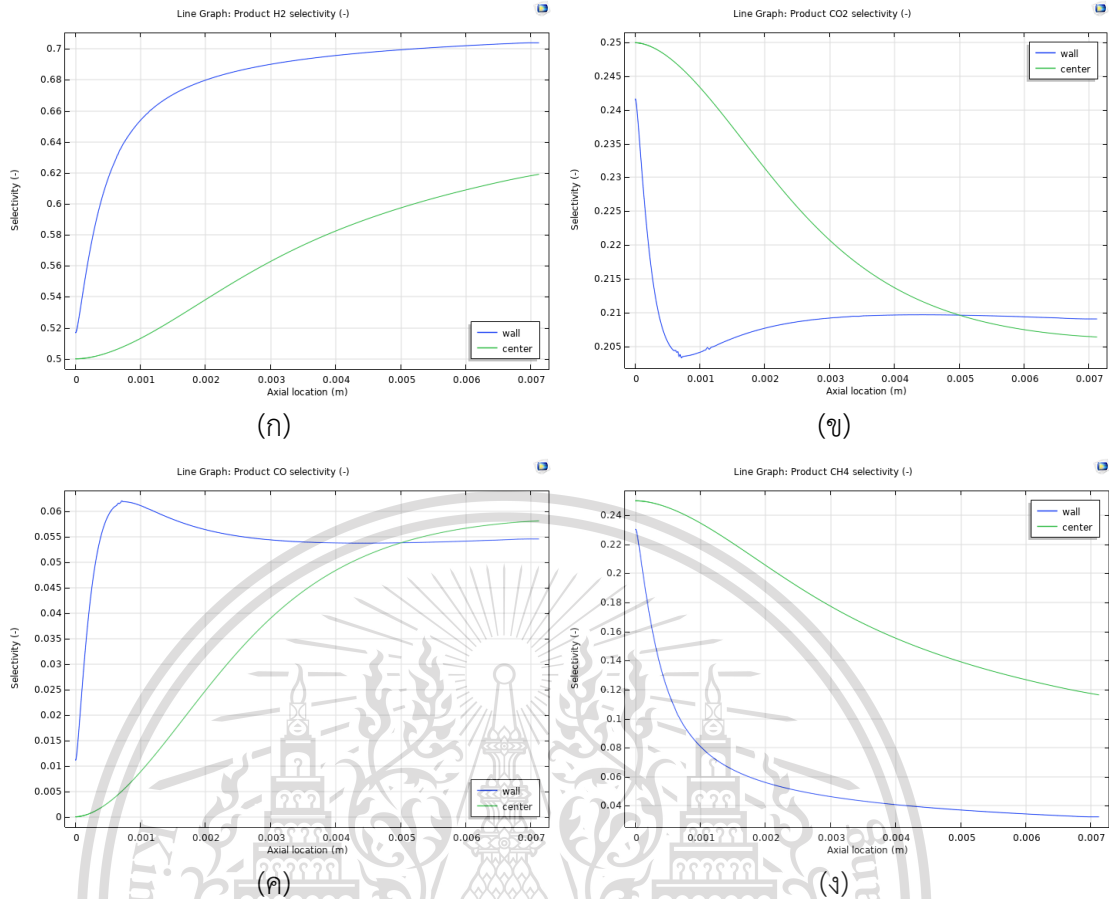
$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5, \text{ (ก) H}_2, \text{ (ข) CO}_2, \text{ (ค) CO, (ง) CH}_4$$

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าขณะที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา SRE ลดลง จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา SRM และ WGS เพิ่มขึ้น ในช่วงแรก เนื่องจากปฏิกิริยา SRE สามารถผลิต CO₂ และ H₂ ได้ซึ่งผลิตภัณฑ์นี้เป็นผลิตภัณฑ์ของทั้งปฏิกิริยา SRM และ WGS (ซึ่งเป็น reversible reaction) จึงเกิดปฏิกิริยาผันกลับของปฏิกิริยา SRM และ WGS จนกระทั่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อๆ ลดลงตามระยะ z ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ผนังบริเวณปากทางออกจะลดลงจนต่ำกว่าที่กึ่งกลางบริเวณปากทางออก ทำให้ได้ yield ของผลิตภัณฑ์บริเวณผนังสูงกว่าบริเวณกึ่งกลางทุกระยะ z ยกเว้นผลิตภัณฑ์ CH₄ ซึ่งที่ปากทางออกบริเวณกึ่งกลางจะได้ yield ที่สูงกว่าบริเวณผนัง ตามรูปที่ 4.12 (ง) เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา ED ที่บริเวณกึ่งกลางลดลงต่ำกว่าที่บริเวณผนังทำให้ผลิต CH₄ ได้เพิ่มขึ้น โดยสรุปหากเรียงลำดับ yield จากมากไปน้อยจะได้ H₂, CO₂, CO, CH₄ ตามลำดับ yield นี้คำนวณได้จากสมการที่ 2-9 [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.13 selectivity ของผลิตภัณฑ์ กรณี adiabatic

$T_0 = 823 \text{ K}$, $P_0 = 1 \text{ atm}$, $S/E = 5.5$, (ก) H₂, (ข) CO₂, (ค) CO, (ง) CH₄

พิจารณาค่า selectivity ที่บ่งบอกปริมาณผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เทียบกับผลรวมของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดคำนวณจากสมการการ 2-8 จากรูปที่ 4.13 พบว่าบริเวณผนังปฏิกรณ์ในช่วงแรกค่า selectivity ของ H₂ และ CO จะสูงกว่าบริเวณกึ่งกลางปฏิกรณ์ (แต่ที่ปากทางออก selectivity ของ CO บริเวณกึ่งกลางจะสูงกว่าเล็กน้อย) และค่า selectivity ของ CO₂ และ CH₄ บริเวณกึ่งกลางปฏิกรณ์จะสูงกว่าบริเวณผนัง (แต่ที่ปากทางออก selectivity ของ CO₂ บริเวณผนังจะสูงกว่าเล็กน้อย)

4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิขาเข้าต่อประสิทธิภาพการผลิต

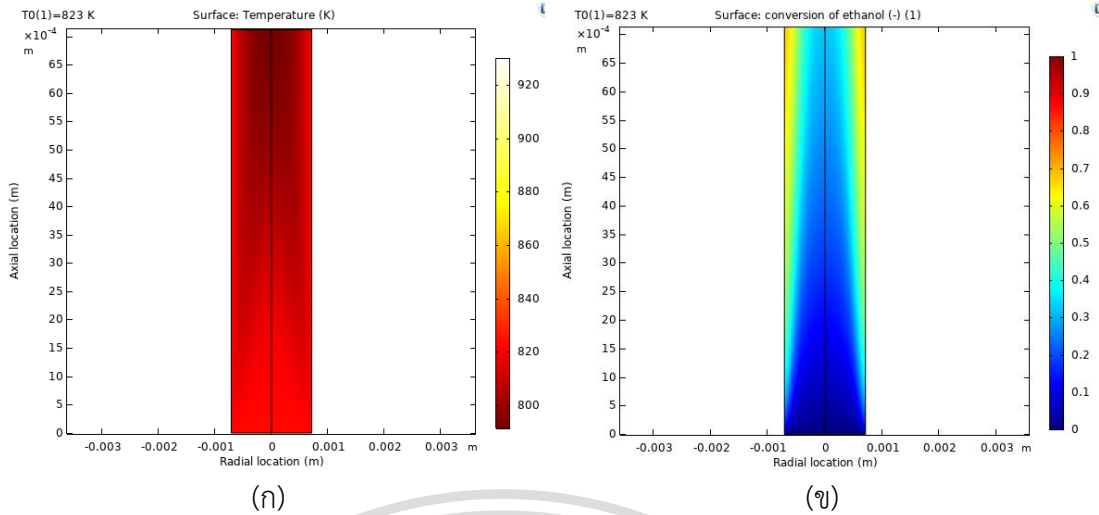
จากผลการศึกษาแบบจำลองแบบ adiabatic ที่กำหนดอุณหภูมิขาเข้าเท่ากับ 823 K พบว่าค่า EtOH conversion ที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นที่ปากทางออกบริเวณผนังซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.7 เนื่องจากปฏิกิริยาเป็นแบบดูดความร้อน เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้า จึงศึกษาผลการเพิ่มอุณหภูมิขาเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

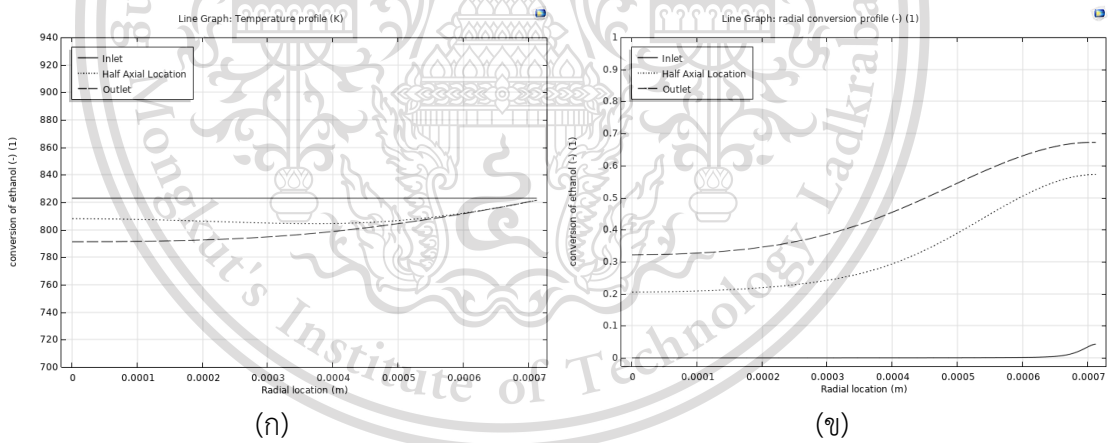
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.14 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิขาเข้า $T_0 = 823$ K ที่มีผลต่อ EtOH conversion

$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5,$$

(ก) surface temperature, (ข) EtOH surface conversion



รูปที่ 4.15 อุณหภูมิขาเข้า $T_0 = 823$ K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion

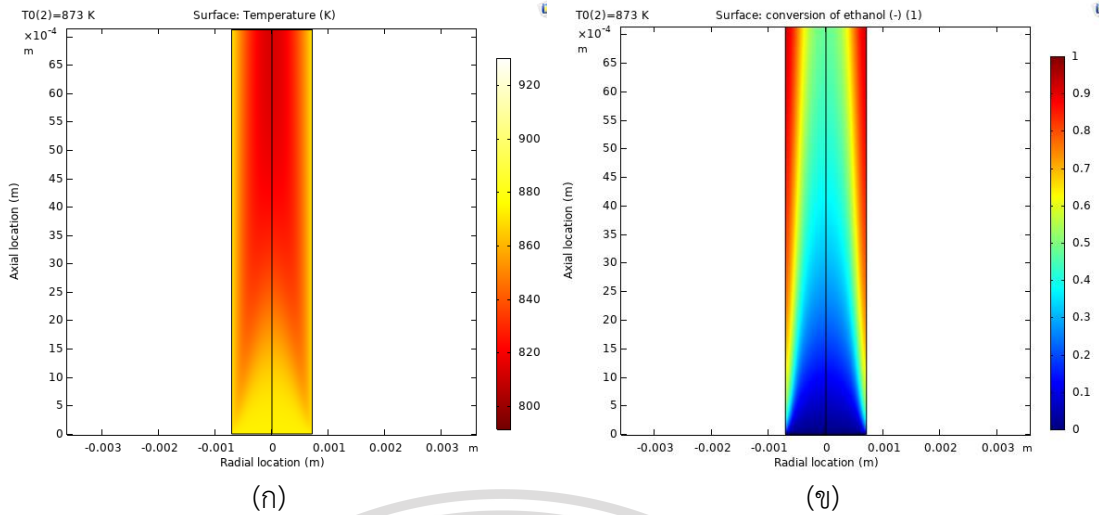
$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5,$$

(ก) radial temperature, (ข) radial EtOH conversion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

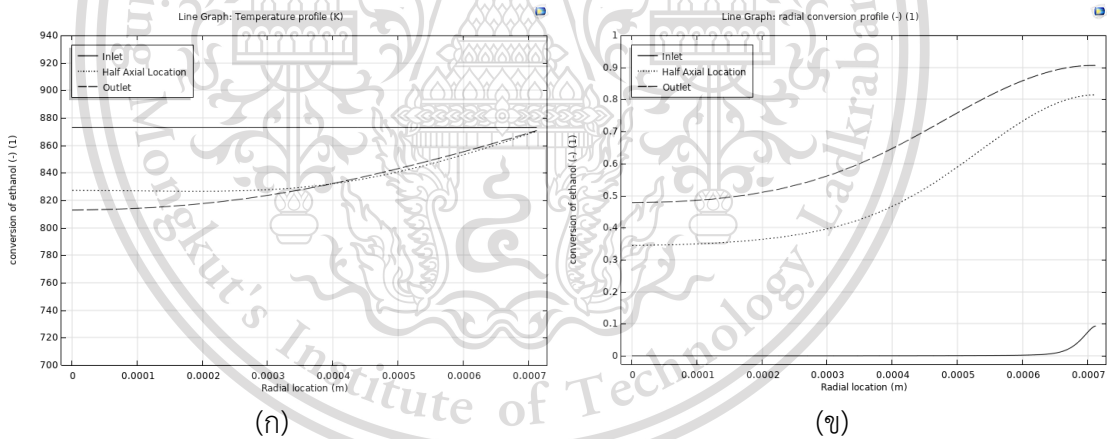
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.16 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิขาเข้า $T_0 = 873$ K ที่มีผลต่อ EtOH conversion

$T_0 = 873$ K, $P_0 = 1$ atm, S/E = 5.5,

(ก) surface temperature, (ข) EtOH surface conversion



รูปที่ 4.17 อุณหภูมิขาเข้า $T_0 = 873$ K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion

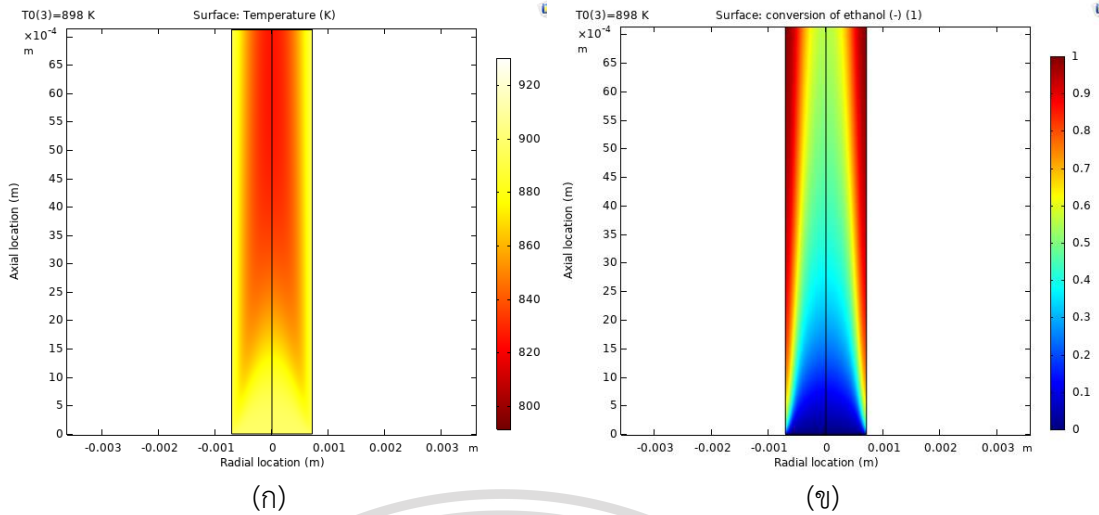
$T_0 = 873$ K, $P_0 = 1$ atm, S/E = 5.5,

(ก) radial temperature, (ข) radial EtOH conversion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

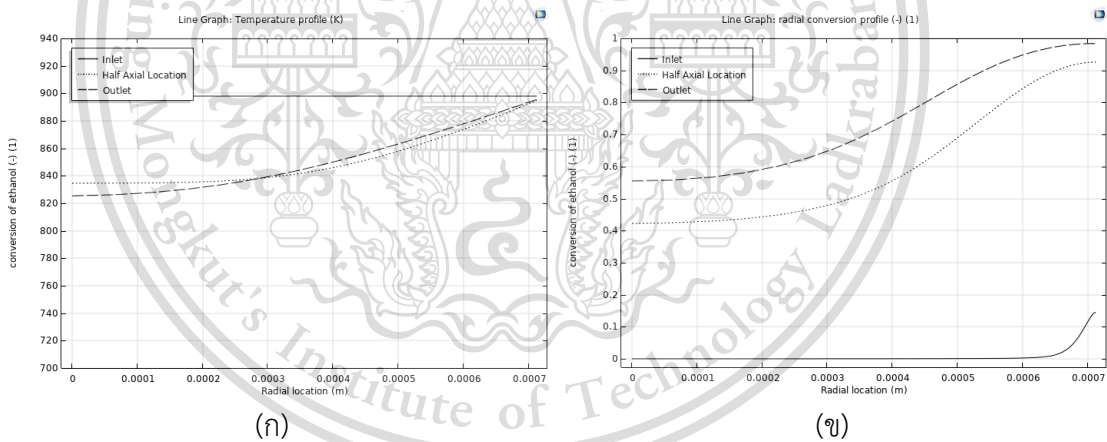
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.18 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิขาเข้า $T_0 = 898$ K ที่มีผลต่อ EtOH conversion

$T_0 = 898$ K, $P_0 = 1$ atm, S/E = 5.5,

(ก) surface temperature, (ข) EtOH surface conversion



รูปที่ 4.19 อุณหภูมิขาเข้า $T_0 = 898$ K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion

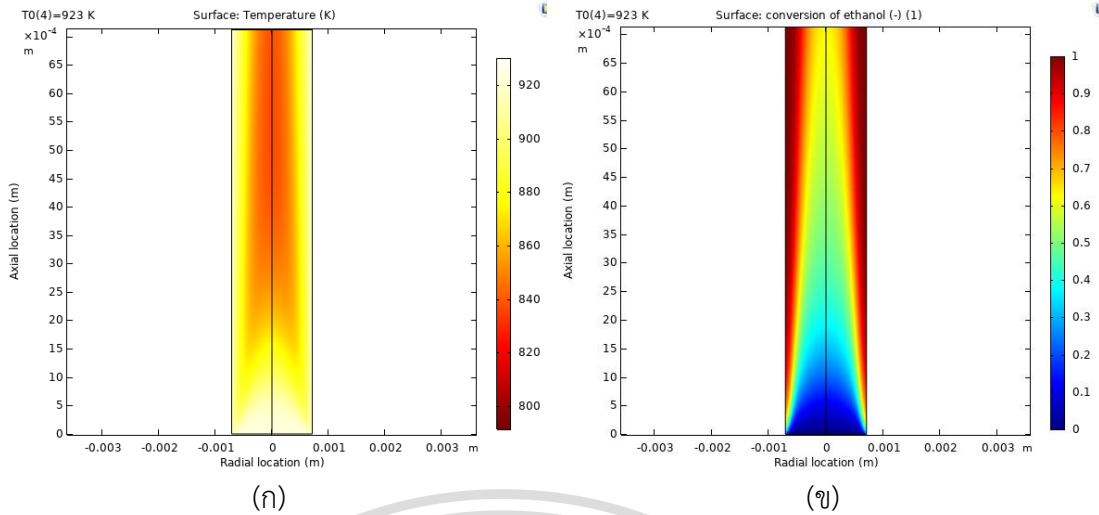
$T_0 = 898$ K, $P_0 = 1$ atm, S/E = 5.5,

(ก) radial temperature, (ข) radial EtOH conversion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

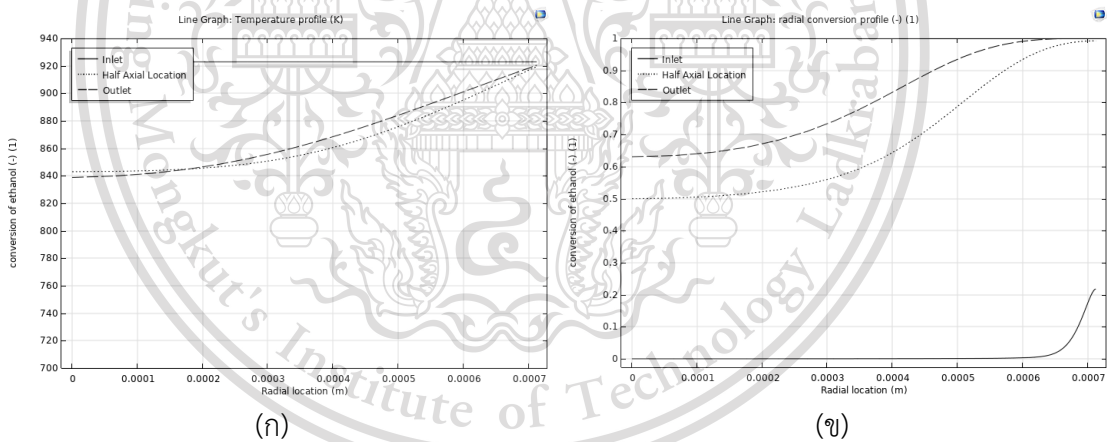
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.20 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิขาเข้า $T_0 = 923$ K ที่มีผลต่อ EtOH conversion

$T_0 = 923$ K, $P_0 = 1$ atm, S/E = 5.5,

(ก) surface temperature, (ข) EtOH surface conversion



รูปที่ 4.21 อุณหภูมิขาเข้า $T_0 = 923$ K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion

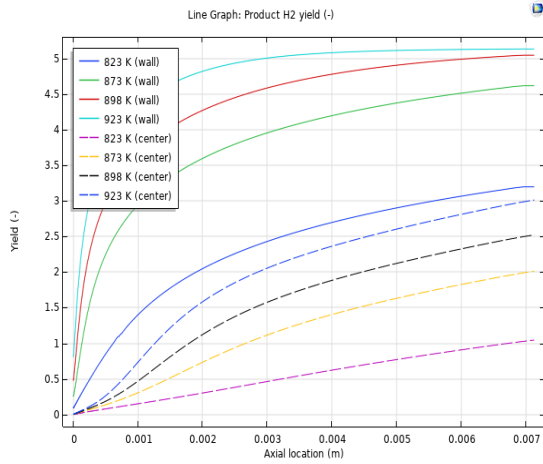
$T_0 = 923$ K, $P_0 = 1$ atm, S/E = 5.5,

(ก) radial temperature, (ข) radial EtOH conversion

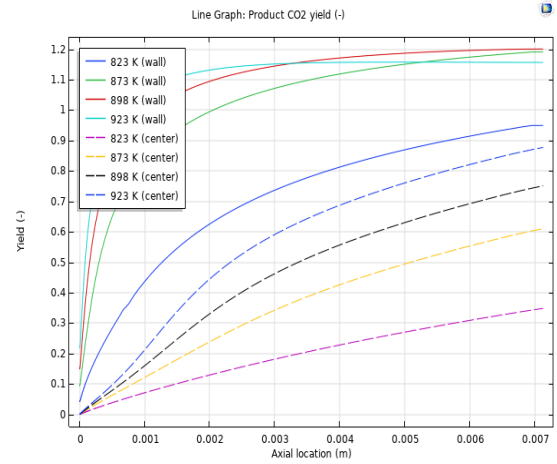
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

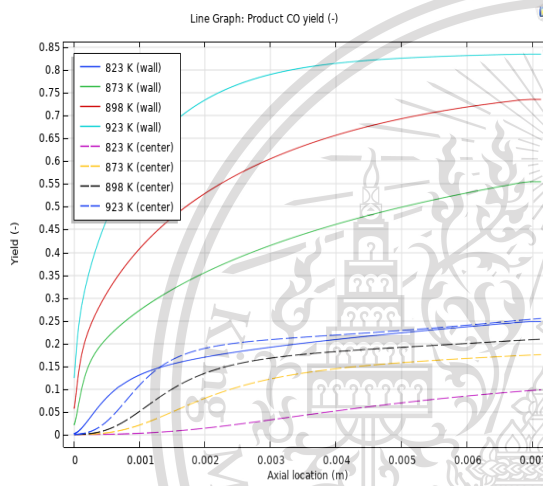
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



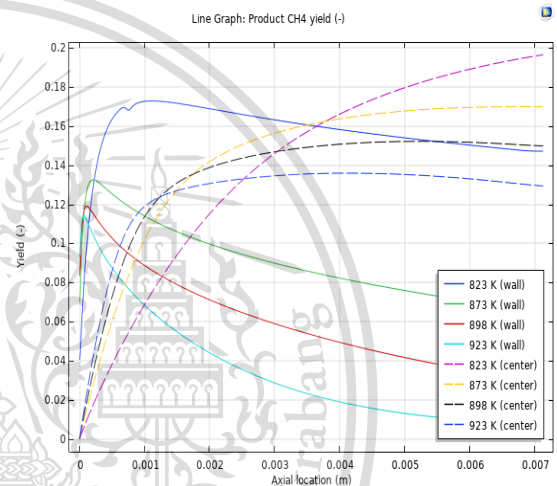
(ก)



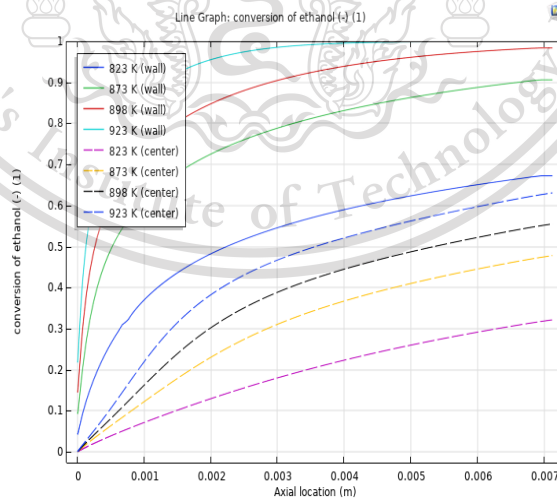
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิเข้าต่อประสิทธิภาพการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษา ซึ่ง $T_0 = 823-923 \text{ K}$, $P_0 = 1 \text{ atm}$, $S/E = 5.5$ ตัดหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น (ก) H_2 yield, (ข) CO_2 yield, (ค) CO yield, (ง) CH_4 yield, (จ) EtOH conversion

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าจาก 823 K เป็น 873 K, 898 K, และ 923 K พบว่าทำให้ความหนาแน่นของ surface conversion สูงขึ้น ตาม surface temperature ที่สูงขึ้นตามลำดับ ตามรูปที่ 4.14, 4.16, 4.18, 4.20 ตามลำดับ เมื่อป้อนสารตั้งต้นที่อุณหภูมิขาเข้าค่าหนึ่ง เมื่อระยะความยาว z เพิ่มขึ้น อุณหภูมิตามระยะ z จะลดลง เนื่องจากการดูดความร้อนของปฏิกิริยา ส่วนที่ระยะความยาว z ไต ๆ บริเวณกึ่งกลางจะมีอุณหภูมิต่ำ และค่อย ๆ สูงขึ้นจนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิขาเข้าที่บริเวณผนัง สามารถอธิบาย profile ที่สัมพันธ์กันระหว่าง radial temperature ที่มีต่อ radial conversion ตามรูปที่ 4.15, 4.17, 4.19, 4.21 พบว่าที่ปากทางออกบริเวณผนัง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าจาก 823 K เป็น 873 K, 898 K, และ 923 K สามารถเพิ่ม EtOH conversion จาก 0.68 เป็น 0.9, 0.99 และ 1 ตามลำดับ โดยที่ค่า EtOH conversion จะเพิ่มสูงเมื่อเข้าใกล้บริเวณผนัง อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าจะทำให้ axial temperature เปลี่ยนแปลงได้น้อยลง (ที่ความยาว z เท่ากัน อุณหภูมิที่ตำแหน่งนั้นจะสูงขึ้น) ซึ่งมีผลดีในการเพิ่ม axial conversion

จากรูปที่ 4.22 อธิบายผลของการเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าที่มีต่อ EtOH conversion และ product yield ต่าง ๆ ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าจะทำให้ค่า EtOH conversion, H_2 yield, CO_2 yield และ CO yield สูงขึ้นตามระยะความยาว z โดยที่บริเวณผนังจะมีค่าสูงกว่าบริเวณกึ่งกลาง แต่ค่า CH_4 yield จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขาเข้า

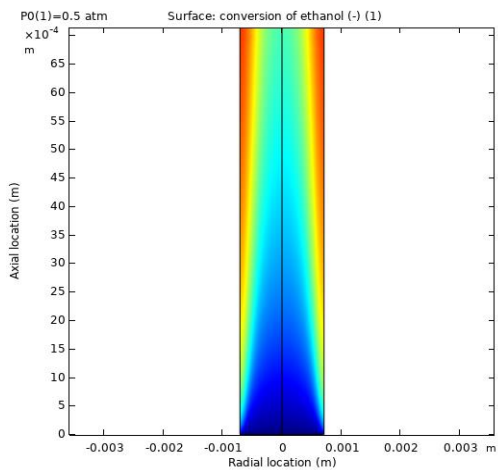
4.2.1 อิทธิพลของความดันขาเข้าต่อประสิทธิภาพการผลิต

ศึกษาผลของความดันขาเข้าทั้ง 3 ค่า โดยเปรียบเทียบระหว่างการเพิ่ม และลดความดันที่จากเดิมค่าละ 0.5 atm มีต่อประสิทธิภาพการผลิต ได้แก่ 0.5, 1, และ 1.5 atm จากรูปที่ 4.23, 4.24, 4.25 ตามลำดับ อธิบายการเปลี่ยนแปลงความดันที่มีต่อ EtOH conversion พบว่าการลดความดัน (ที่ 0.5 atm) ทำให้ ค่า EtOH conversion สูงขึ้นจากระยะความยาว z เดียวกัน ค่า conversion จะเพิ่มขึ้นประมาณ 0.2 และมีค่าสูงสุดที่ปากทางออกบริเวณผนังเท่ากับ 0.81 ส่วนการเพิ่มความดัน (ที่ 1.5 atm) ทำให้ ค่า EtOH conversion ลดลงจากระยะความยาว z เดียวกัน ค่า conversion จะลดลงประมาณ 0.05 และมีค่าสูงสุดที่ปากทางออกบริเวณผนังเท่ากับ 0.6 ฉะนั้นการลดความดันจึงสามารถเพิ่มค่า EtOH conversion ได้ เนื่องจากผลรวมจำนวนโมลสุทธิของสารตั้งต้นมากกว่าสารผลิตภัณฑ์ การลดความดันจึงทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น

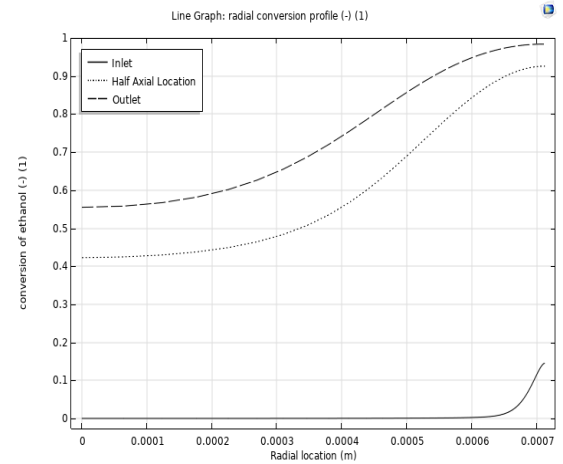
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก)

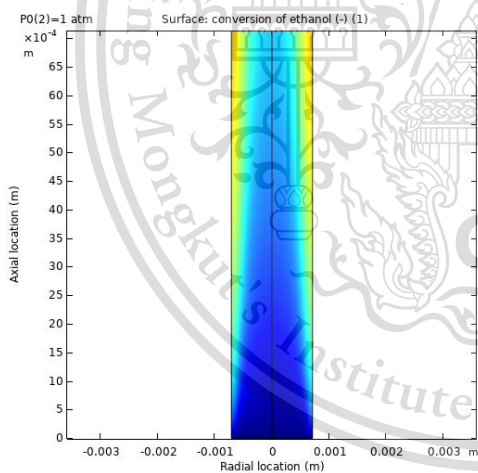


(ข)

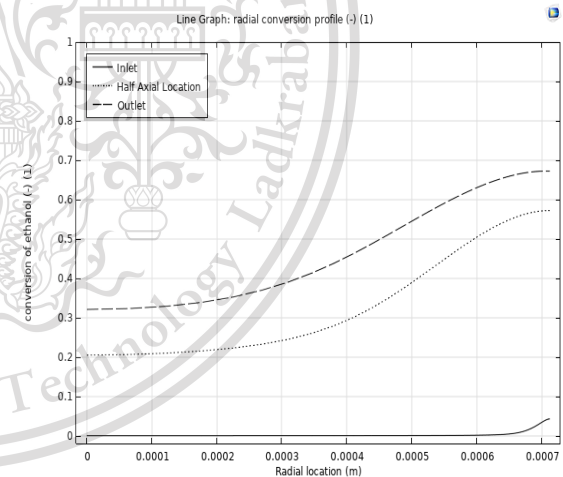
รูปที่ 4.23 ความดันขาเข้า $P_0=0.5$ atm ที่มีผลต่อ EtOH conversion

$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 0.5 \text{ atm}, S/E = 5.5,$$

(ก) EtOH surface conversion, (ข) radial EtOH conversion



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.24 ความดันขาเข้า $P_0=1$ atm ที่มีผลต่อ EtOH conversion

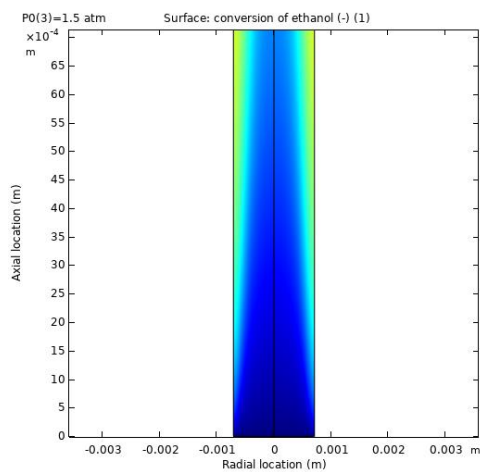
$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5,$$

(ก) EtOH surface conversion, (ข) radial EtOH conversion

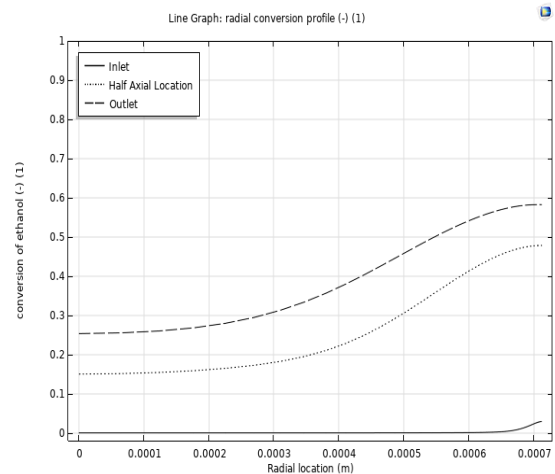
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก)

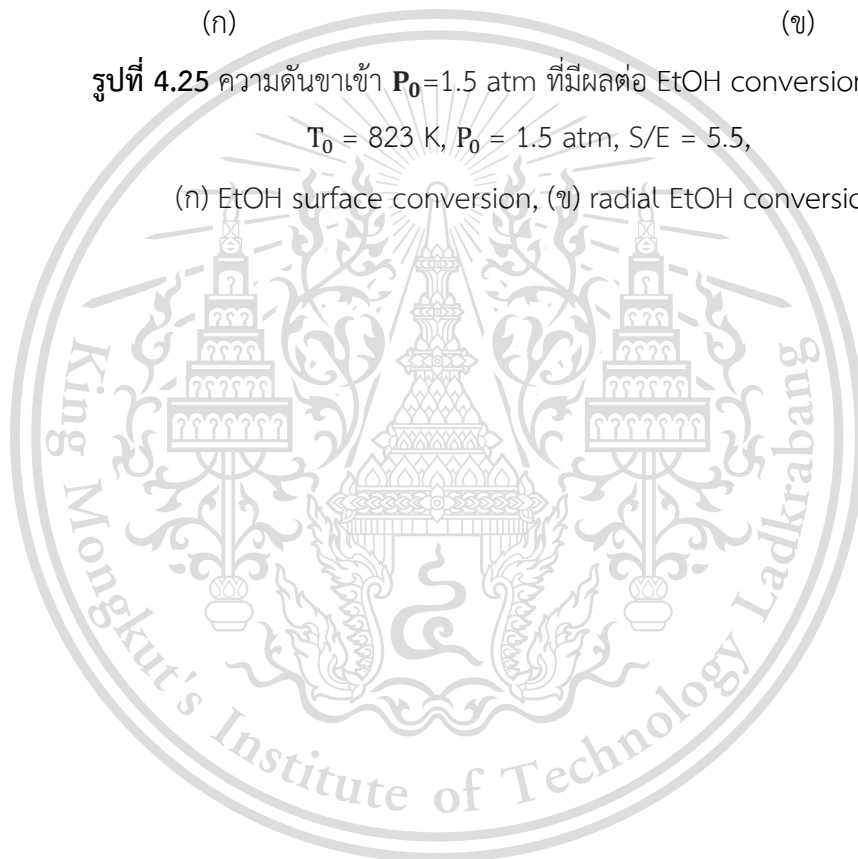


(ข)

รูปที่ 4.25 ความดันขาเข้า $P_0=1.5$ atm ที่มีผลต่อ EtOH conversion

$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1.5 \text{ atm}, S/E = 5.5,$$

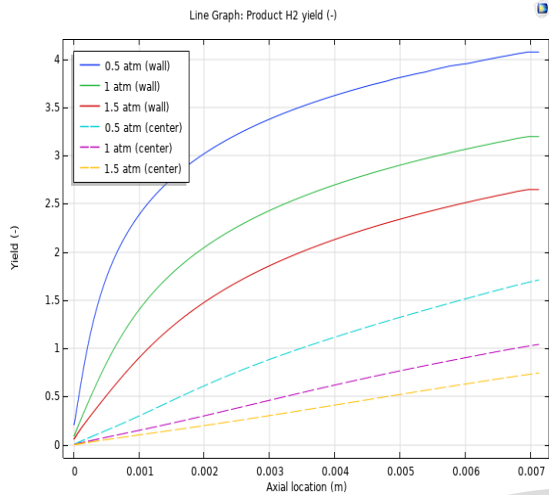
(ก) EtOH surface conversion, (ข) radial EtOH conversion



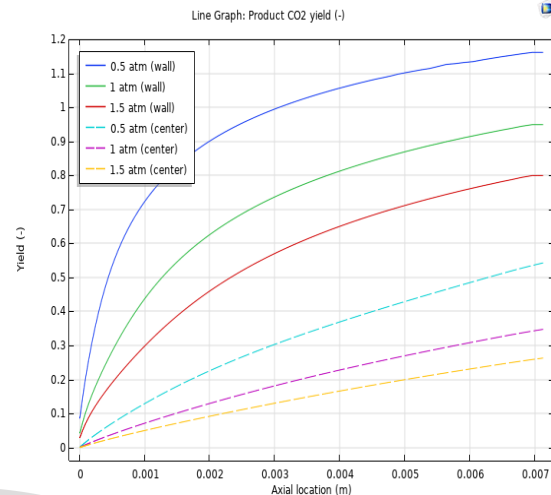
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

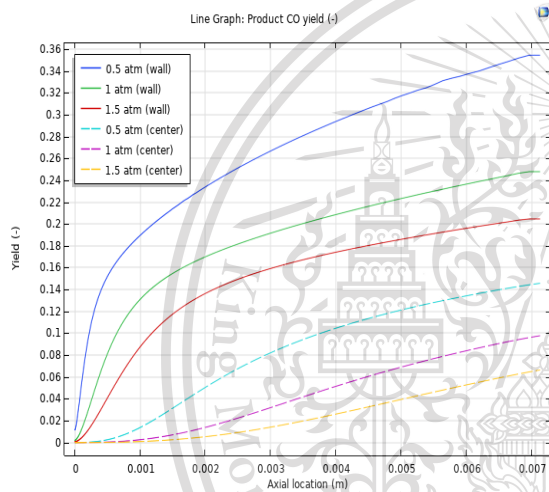
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



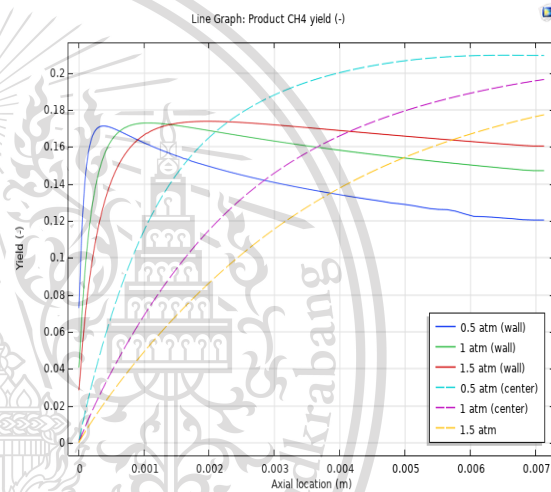
(ก)



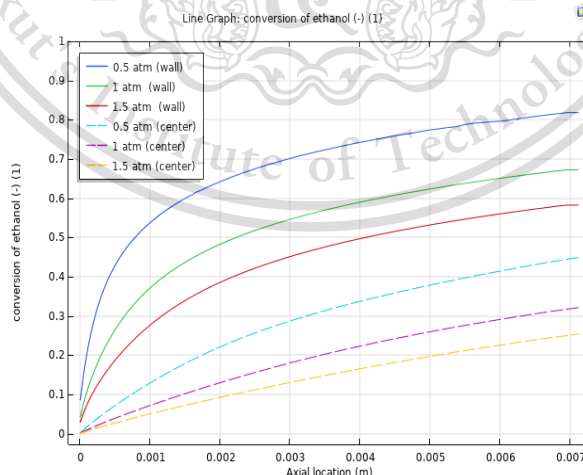
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.26 ผลของความดันขาเข้าต่อประสิทธิภาพการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1\text{-}1.5 \text{ atm}, S/E = 5.5$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) H₂ yield (ข) CO₂ yield (ค) CO yield (ง) CH₄ yield (จ) EtOH conversion

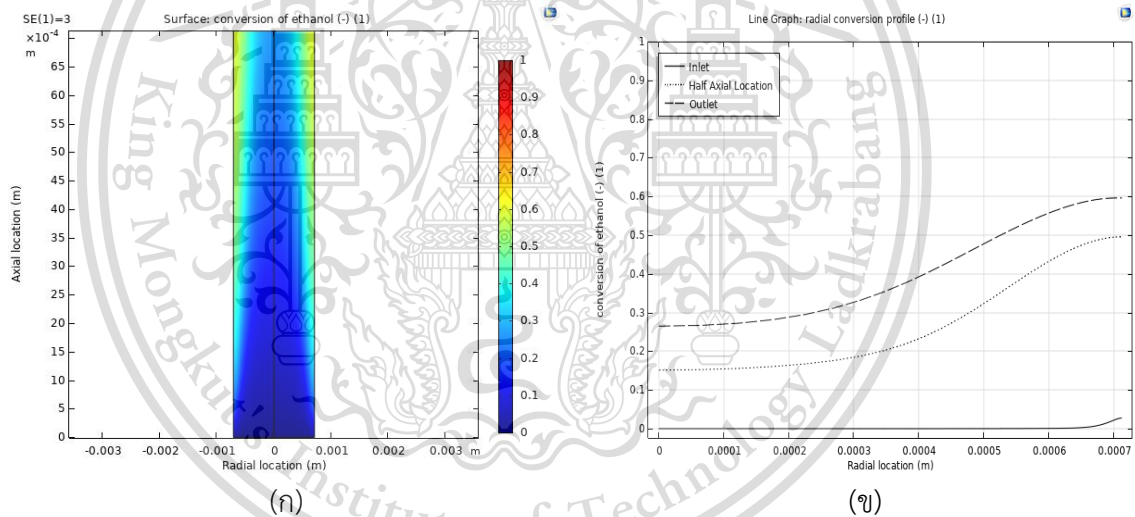
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 4.26 อธิบายผลของการเพิ่ม-ลดความดันขาเข้าที่มีต่อ EtOH conversion และ product yield ต่าง ๆ ซึ่งการลดความดันขาเข้าจะทำให้ค่า EtOH conversion, H₂ yield, CO₂ yield และ CO yield สูงขึ้นตามระยะความยาว z โดยที่บริเวณผนังจะมีค่าสูงกว่าบริเวณกึ่งกลาง แต่ค่า CH₄ yield บริเวณกึ่งกลางจะสูงกว่าบริเวณผนัง

4.2.1 อิทธิพลของสัดส่วนป้อนไอน้ำกับเอทานอลต่อประสิทธิภาพการผลิต

ศึกษาผลของสัดส่วนป้อนไอน้ำกับเอทานอล (S/E ratio) กำหนดให้ค่า molar fraction ของเอทานอลคงที่ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิต การเพิ่มสัดส่วนป้อนไอน้ำกับเอทานอลเปรียบได้กับการเพิ่มปริมาณไอน้ำป้อนซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของไอน้ำขาเข้าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ปากทางเข้าปฏิกิริยา ซึ่งจะศึกษาที่ค่า S/E ทั้ง 3 ค่า ได้แก่ 3, 5.5, และ 10



รูปที่ 4.27 สัดส่วนป้อนไอน้ำกับเอทานอล S/E = 3 ที่มีผลต่อ EtOH conversion

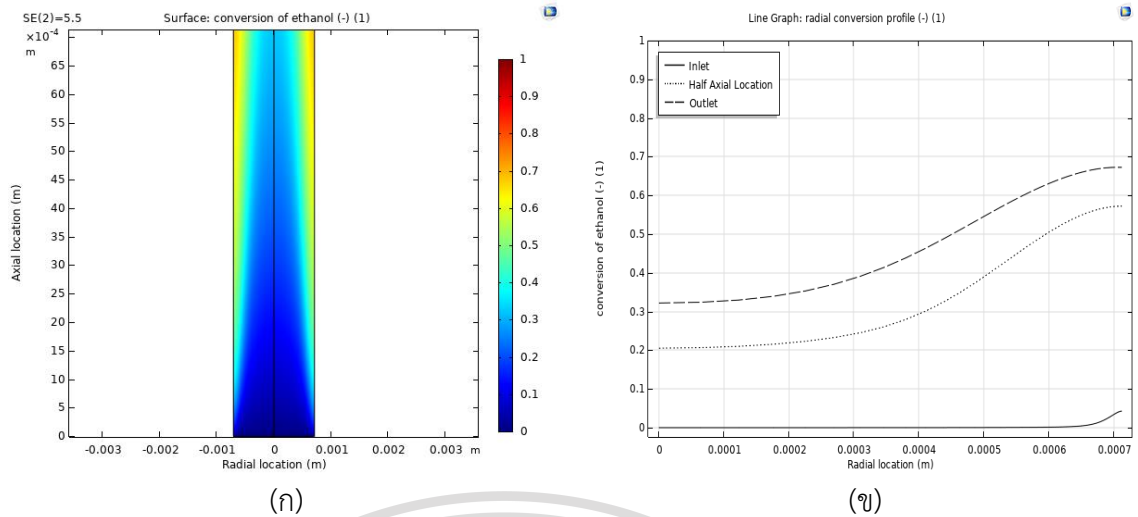
$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 3,$$

(ก) EtOH surface conversion, (ข) radial EtOH conversion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

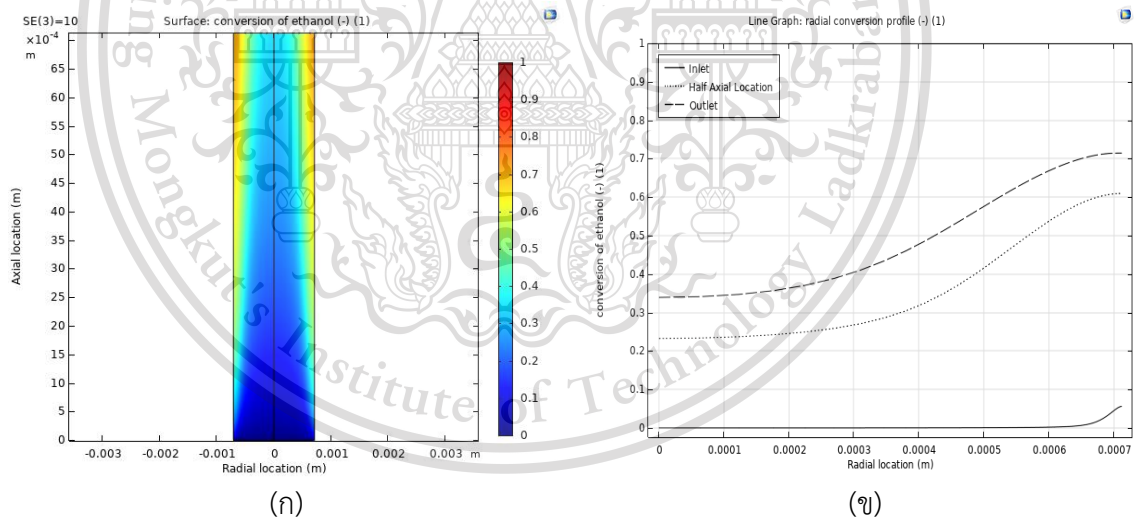
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.28 สัดส่วนป้อนไอน้ำกับเอทานอล $S/E = 5.5$ ที่มีผลต่อ EtOH conversion

$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5,$$

(ก) EtOH surface conversion, (ข) radial EtOH conversion



รูปที่ 4.29 สัดส่วนป้อนไอน้ำกับเอทานอล $S/E = 10$ ที่มีผลต่อ EtOH conversion

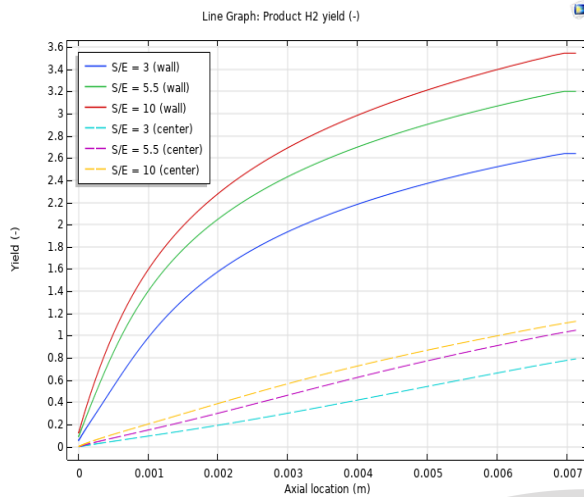
$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 10,$$

(ก) EtOH surface conversion, (ข) radial EtOH conversion

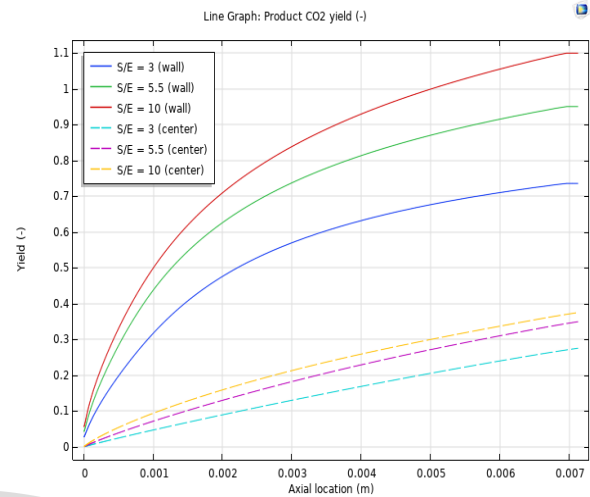
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

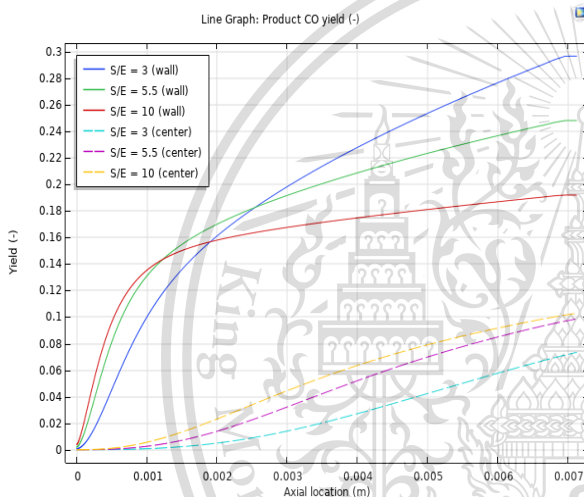
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



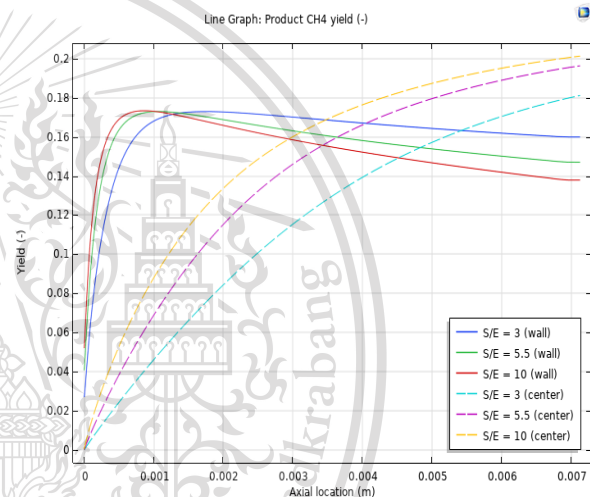
(ก)



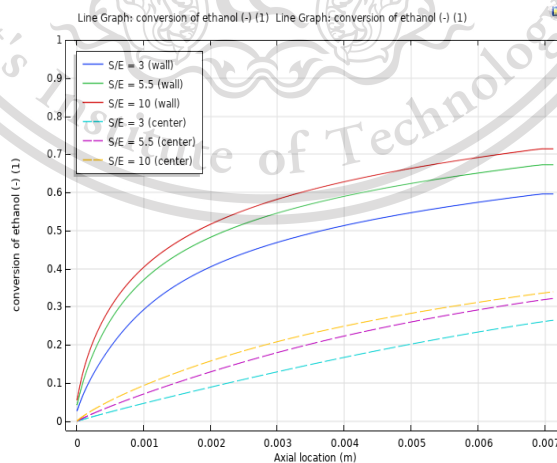
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.30 ผลของสัดส่วนป้อนไอน้ำกับเอทานอลต่อประสิทธิภาพการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $T_0 = 823 \text{ K}$, $P_0 = 1 \text{ atm}$, $S/E = 3-10$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลึกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 (ก) H_2 yield (ข) CO_2 yield (ค) CO yield (ง) CH_4 yield (จ) EtOH conversion

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 4.27 หากเปรียบเทียบกับที่ค่า S/E เท่ากับ 5.5 จากรูปที่ 4.28 พบว่าการลดค่า S/E ลงให้เท่ากับ 3 ค่า EtOH conversion จะลดลง โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.6 ที่ปากทางออกบริเวณผนัง ส่วนเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.29 การเพิ่มค่า S/E ขึ้นให้เท่ากับ 10 ค่า EtOH conversion จะเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.7 ที่ปากทางออกบริเวณผนัง หากพิจารณาจาก surface conversion จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่า S/E แทบไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงในแนว axial ในขณะที่เดียวกันก็เกิดการเปลี่ยนในแนว radial เพียงเล็กน้อยบริเวณใกล้ปากทางออก เนื่องจากการเพิ่มค่า S/E ทำให้ความเข้มข้นขาเข้าของไอน้ำเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น

จากรูปที่ 4.30 อธิบายผลของการเพิ่ม-ลดค่า S/E ที่มีต่อ EtOH conversion และ product yield ต่าง ๆ ซึ่งการเพิ่มค่า S/E ทำให้ค่า EtOH conversion, H₂ yield, และ CO₂ yield สูงขึ้นตามระยะความยาว z โดยที่บริเวณผนังจะมีค่าสูงกว่าบริเวณกึ่งกลาง แต่การลดค่า S/E จะทำให้ค่า CO yield, และ CH₄ yield ที่ปากทางออกบริเวณผนังเพิ่มขึ้น (ที่ปากทางออกบริเวณกึ่งกลางการเพิ่มค่า S/E ยังคงทำให้ค่า CO yield, และ CH₄ yield มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดิม) ฉะนั้นหากต้องการผลิต CO และ CH₄ เพิ่มขึ้น การลดค่า S/E จะมีผลดีให้ได้ค่า yield ของ CO และ CH₄ บริเวณผนังเพิ่มขึ้น

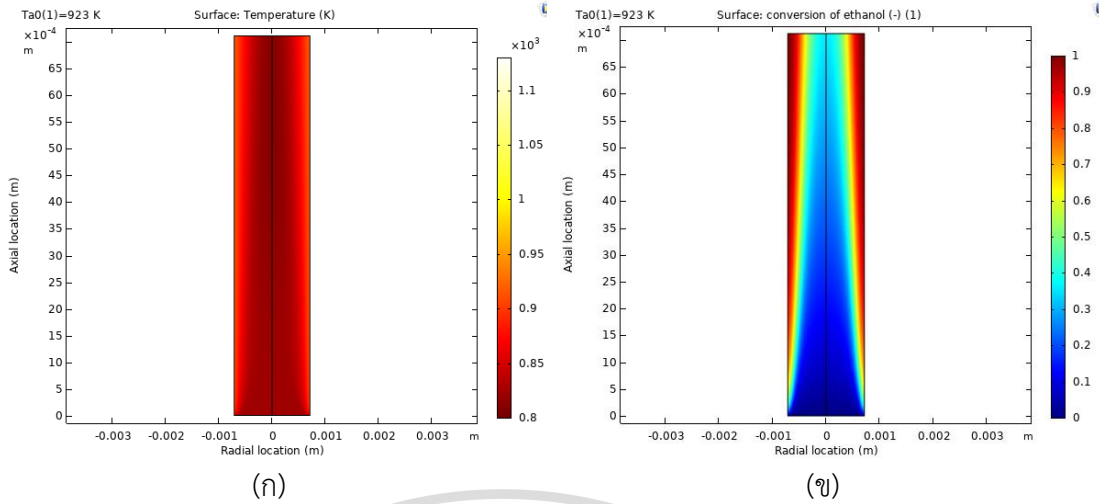
4.3 แบบจำลองปฏิกรณ์แบบ non-adiabatic laminar flow

จากผลการศึกษาการจำลองปฏิกรณ์แบบ adiabatic laminar flow พบว่าการเปลี่ยนแปลงในระยะ z หรือ axial effect มีผลเหนือกว่าการเปลี่ยนแปลงในระยะ r หรือ radial effect สังเกตจากค่า EtOH conversion จะกระจายเพิ่มขึ้นในมิติ z มากกว่ามิติ r อีกทั้งยังถูกจำกัดด้วยค่าอุณหภูมิขาเข้าคืออุณหภูมิในระบบจะไม่สูงมากไปกว่าอุณหภูมิขาเข้า เนื่องจากไม่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม หัวข้อนี้จึงศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิภายนอกในรูปของพลังค์ความร้อนที่เข้าสู่บริเวณผนังเพื่อสนับสนุนความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา โดยจะศึกษาในช่วงของอุณหภูมิภายนอก (T_a) เท่ากับ 923 K, 1023 K, และ 1123 K คงให้สภาวะเริ่มต้นในระบบ อุณหภูมิขาเข้า (T_0) เท่ากับ 823 K, ความดันขาเข้า (P_0) เท่ากับ 1 atm, สัดส่วนป้อนไอน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 5.5 และอัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้า (V_i) เท่ากับ $6.23 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

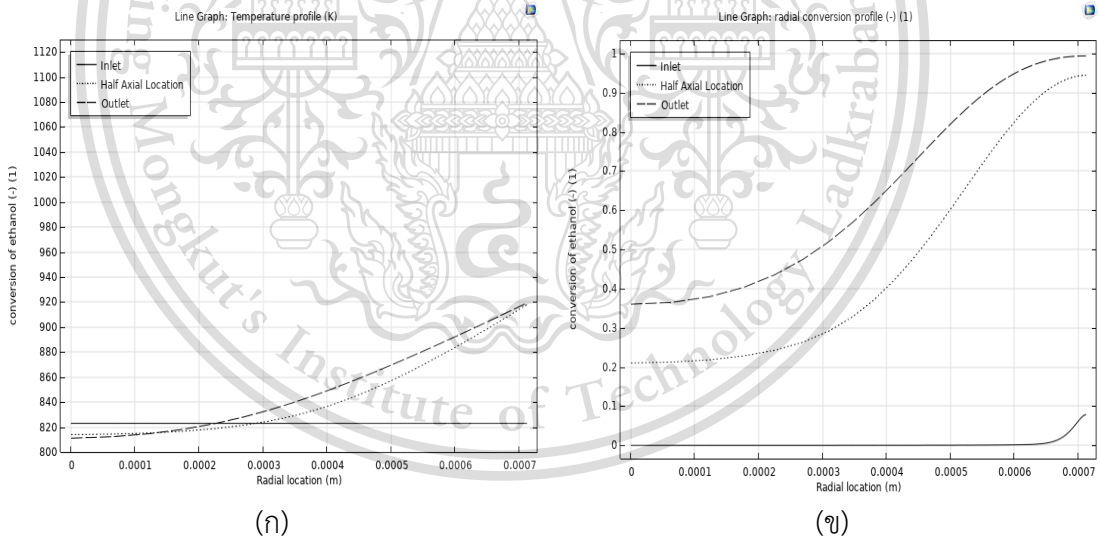
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.31 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิภายนอก $T_a = 923$ K ที่มีผลต่อ EtOH conversion

$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5, T_a = 923 \text{ K},$$

(ก) surface temperature, (ข) EtOH surface conversion



รูปที่ 4.32 อุณหภูมิภายนอก $T_a = 923$ K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion

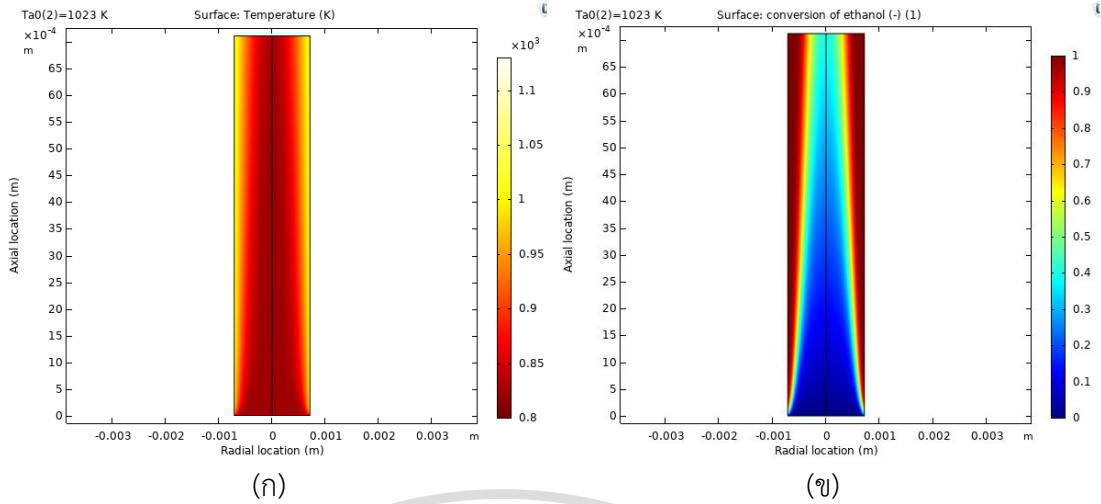
$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5, T_a = 923 \text{ K},$$

(ก) radial temperature, (ข) radial EtOH conversion

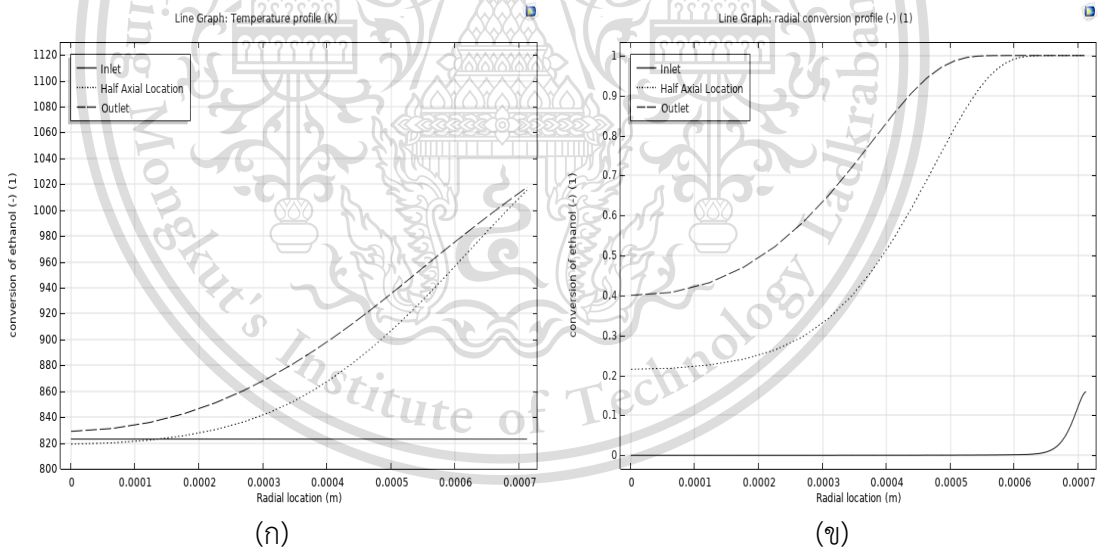
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.33 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิภายนอก $T_a = 1023$ K ที่มีผลต่อ EtOH conversion
 $T_0 = 823$ K, $P_0 = 1$ atm, $S/E = 5.5$, $T_a = 1023$ K,
 (ก) surface temperature, (ข) EtOH surface conversion

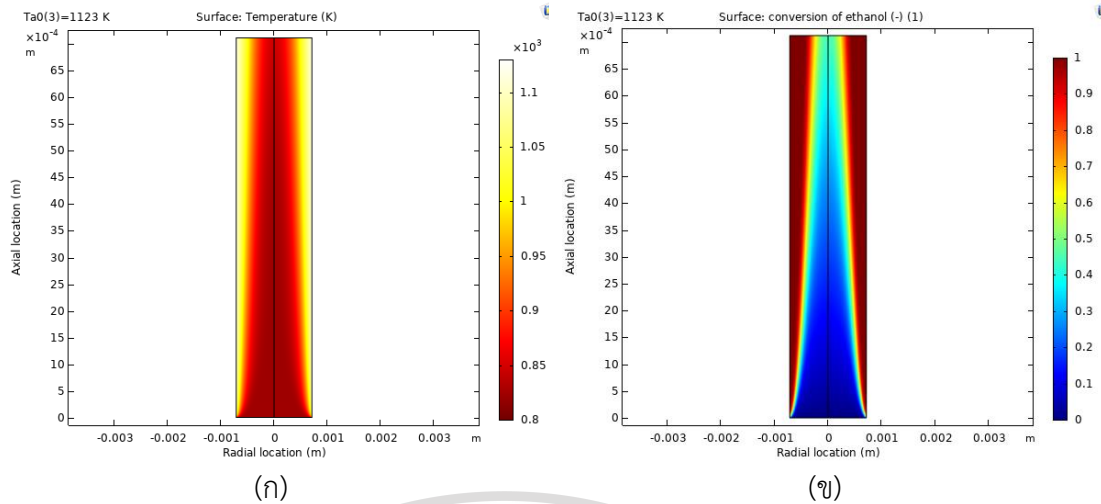


รูปที่ 4.34 อุณหภูมิภายนอก $T_a = 1023$ K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion
 $T_0 = 823$ K, $P_0 = 1$ atm, $S/E = 5.5$, $T_a = 1023$ K,
 (ก) radial temperature, (ข) radial EtOH conversion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

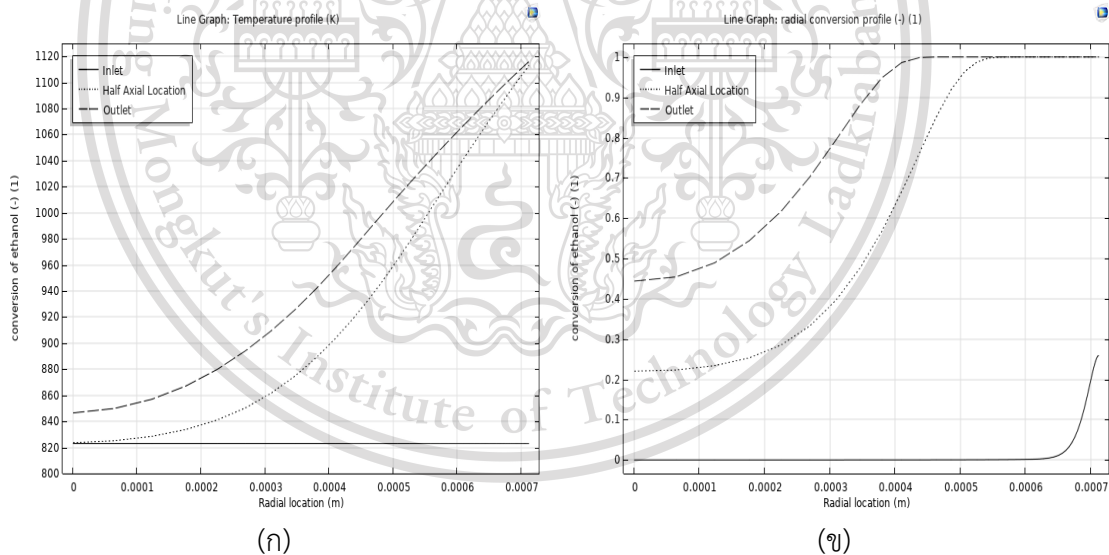
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.35 พื้นที่แสดงผลของอุณหภูมิภายนอก $T_a = 1123$ K ที่มีผลต่อ EtOH conversion

$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5, T_a = 1123 \text{ K},$$

(ก) surface temperature, (ข) EtOH surface conversion



รูปที่ 4.36 อุณหภูมิภายนอก $T_a = 1123$ K ที่มีผลต่อ radial EtOH conversion

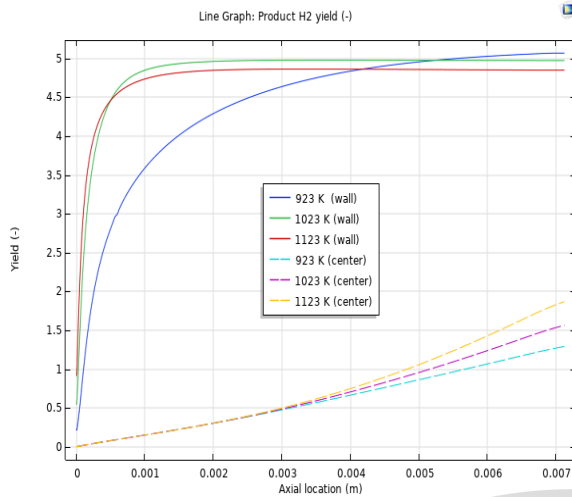
$$T_0 = 823 \text{ K}, P_0 = 1 \text{ atm}, S/E = 5.5, T_a = 1123 \text{ K},$$

(ก) radial temperature, (ข) radial EtOH conversion

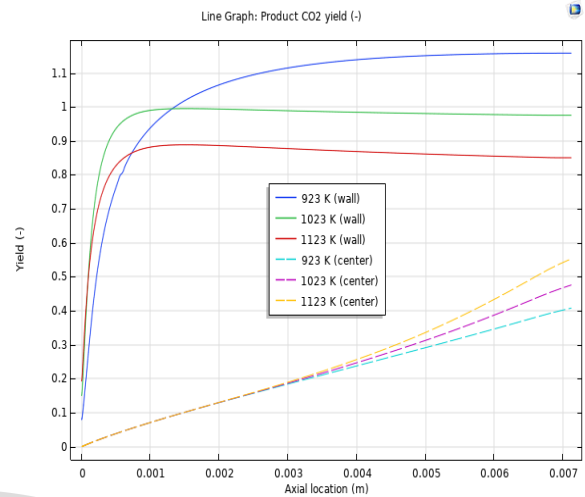
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

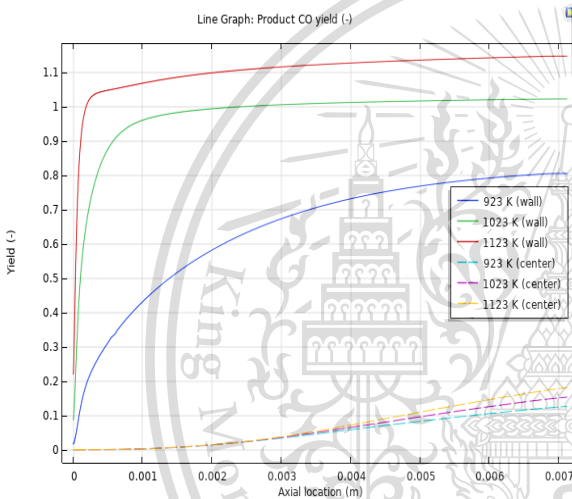
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



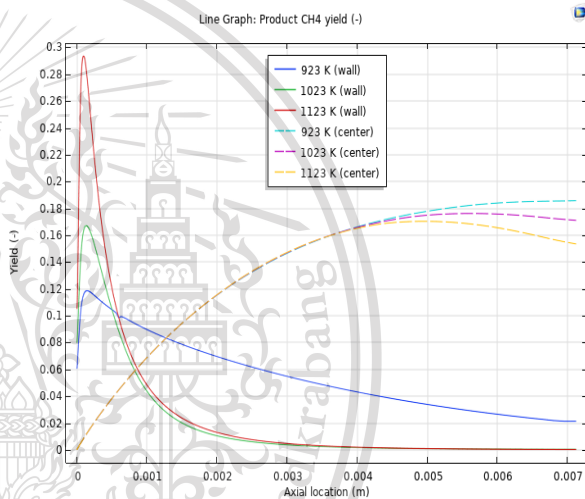
(ก)



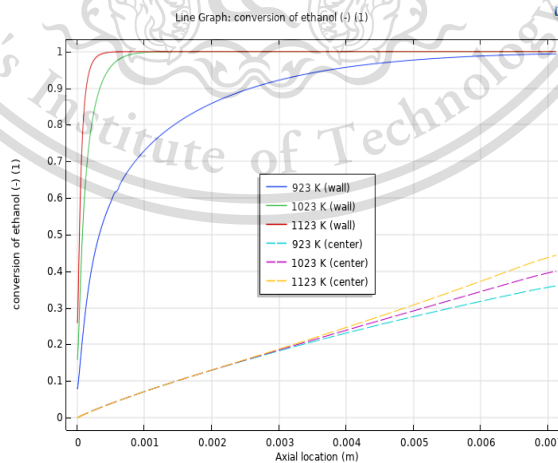
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.37 ผลของอุณหภูมิภายนอกต่อประสิทธิภาพการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $T_0 = 823 \text{ K}$, $P_0 = 1 \text{ atm}$, $S/E = 5.5$, $T_a = 923\text{-}1123 \text{ K}$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลึกทั้งห้าหมื่นให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) H_2 yield (ข) CO_2 yield (ค) CO yield (ง) CH_4 yield (จ) EtOH conversion

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการเพิ่มอุณหภูมิภายนอกเป็น 923 K, 1023 K, และ 1123 K พบว่าทำให้ความเข้มข้นของ surface conversion สูงขึ้น ตาม surface temperature ที่สูงขึ้นตามลำดับ ตามรูปที่ 4.31, 4.33, 4.35 ตามลำดับ เมื่อป้อนสารตั้งต้นที่อุณหภูมิเข้าค่าหนึ่ง เมื่อระยะความยาว z เพิ่มขึ้น อุณหภูมิตามระยะ z จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเนื่องจากการให้ความร้อนที่บริเวณผนัง ส่วนที่ระยะความยาว z ไต ๆ บริเวณกึ่งกลางจะมีอุณหภูมิต่ำ และค่อย ๆ สูงขึ้นจนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิเข้าที่บริเวณผนัง สามารถอธิบายโปรไฟล์ที่สัมพันธ์กันระหว่าง radial temperature ที่มีต่อ radial conversion ตามรูปที่ 4.32, 4.34, 4.36 พบว่าอุณหภูมิออกจะมากกว่าอุณหภูมิเข้า อีกทั้งอุณหภูมิที่ครึ่งหนึ่งของ ความยาวปฏิกรณ์บริเวณผนังมีโอกาสเท่ากับอุณหภูมิต่ำที่ปากทางออกบริเวณผนังได้ ทำให้ EtOH conversion เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้บริเวณผนัง เช่น เมื่ออุณหภูมิภายนอกเท่ากับ 1123 K ค่า EtOH conversion จะเข้าใกล้ 1 ที่ระยะ r น้อยกว่ากรณีที่อุณหภูมิภายนอกเท่ากับ 1023 และ 923 K ตามลำดับ ทั้ง 3 กรณีจะได้ค่า EtOH conversion เท่ากับ 1 ทั้งหมดที่ปากทางออกบริเวณผนัง จะเห็นว่าการเปลี่ยนระบบเป็น non-adiabatic จะทำให้ radial effect มีผลมากขึ้นในการกระจาย ความร้อนในปฏิกรณ์ มากกว่าระบบแบบ adiabatic ทำให้ค่า EtOH conversion มีค่าสูงขึ้นได้ที่ บริเวณใกล้ผนัง แม้ระยะความยาว z ต่ำ [12]

จากรูปที่ 4.37 อธิบายผลอุณหภูมิภายนอก ที่มีต่อ EtOH conversion และ product yield ต่าง ๆ พบว่าที่บริเวณกึ่งกลาง ในช่วงระยะ z ใกล้ปากทางออก การเพิ่มอุณหภูมิภายนอกจะทำให้ค่า EtOH conversion, H_2 yield, CO_2 yield และ CO yield สูงขึ้นตามระยะความยาว z (ยกเว้น CH_4 yield ที่จะลดลง) ส่วนที่บริเวณผนัง ผลที่ได้มีความแตกต่างกัน ดังนี้ บริเวณผนังสำหรับ H_2 และ CO_2 yield ช่วงระยะความยาว z ใกล้ปากทางเข้า การเพิ่มอุณหภูมิภายนอกจะได้ค่า H_2 และ CO_2 yield สูงขึ้น ส่วนที่ระยะความยาว z ใกล้ปากทางออก การเพิ่มอุณหภูมิภายนอกจะได้ค่า H_2 และ CO_2 yield ลดลง, บริเวณผนังสำหรับ CO yield การเพิ่มอุณหภูมิภายนอกจะได้ค่า CO yield สูงขึ้น, และ สำหรับ CH_4 yield ช่วงระยะความยาว z ใกล้ปากทางเข้า การเพิ่มอุณหภูมิภายนอกจะได้ค่า CH_4 yield สูงขึ้น และหลังจากระยะความยาวกึ่งกลางความยาวปฏิกรณ์ไปจนถึงปากทางออก การเพิ่ม อุณหภูมิภายนอกจะไม่มีผลต่อ CH_4 yield ฉะนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยการกำหนดอุณหภูมิภายนอกจะสัมพันธ์กับตำแหน่งต่าง ๆ ภายในปฏิกรณ์ทั้งมิติ z และ r จึงควร เลือกระยะความยาว z ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ product yield ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาแบบจำลองปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวความยาว และรัศมีของปฏิกรณ์ และมีกรไหลแบบ laminar flow บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Rh (1%wt) $MgAl_2O_4/Al_2O_3$ ด้วยแบบจำลอง 2 มิติ เพื่อทำนายแนวโน้มปริมาณสารผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต โดยศึกษาระบบแบบ adiabatic และ non-adiabatic ซึ่งระบบแบบ adiabatic ผลของ axial effect จะเหนือกว่า radial effect ทำให้ระบบแบบ non-adiabatic มีการกระจายความร้อนที่ดีกว่าแบบ adiabatic ทำให้มีประสิทธิภาพการผลิตในแนว radial ที่สูงกว่า และไม่ถูกจำกัดด้วยอุณหภูมิที่ปากทางเข้า โดยสรุปพบว่าค่า EtOH conversion ของปฏิกิริยา ESR จะสูงขึ้น หากทำการเพิ่มอุณหภูมิขาเข้า, ลดความดันขาเข้า, เพิ่มสัดส่วนป้อนไอน้ำต่อเอทานอล, และเพิ่มอุณหภูมิภายนอกปฏิกรณ์ นอกจากนี้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวความยาว (ปากทางเข้า, ครึ่งหนึ่งของความยาวปฏิกรณ์, ปากทางออก) และแนวรัศมี (กึ่งกลาง,ผนังปฏิกรณ์) ยังส่งผลต่อค่า yield ของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่ตำแหน่งแตกต่างกันสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกสภาวะดำเนินการที่เหมาะสมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

อภิธานศัพท์

สัญลักษณ์	นิยาม	หน่วย
a	คือ สัดส่วนพื้นที่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อปริมาตรของปฏิกรณ์	1/m
c_i	คือ ความเข้มข้นของสารใด ๆ ในปฏิกรณ์	mol/m ³
$C_{p,i}$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารใด ๆ	J/(mol·K)
C_T	คือ ความเข้มข้นของสารบนพื้นผิวรวมของตัวเร่งปฏิกรณ์	mol/m ²
D_i	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารใด ๆ	m ² /s
e	คือ พลังความร้อน	J/(m ² ·s)
E_{a_j}	คือ พลังงานกระตุ้นของปฏิกรณ์ใด ๆ	J/mol
$F_{i w}$	คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสารใด ๆ ณ ตำแหน่งเริ่มต้นปฏิกรณ์ (ตำแหน่งของปฏิกรณ์เทียบต่อน้ำหนักตัวเร่งปฏิกรณ์)	mol/s
$F_{i (w+\Delta w)}$	คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสารใด ๆ ณ ตำแหน่งใด ๆ ในปฏิกรณ์	Mol/s
F_{i0}	คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสารใด ๆ ณ ทางเข้าปฏิกรณ์	mol/s
F_i	คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสารใด ๆ ณ ทางออกปฏิกรณ์	mol/s
F_{T0}	คือ อัตราการไหลเชิงโมลรวมของสาร ณ ทางเข้าปฏิกรณ์	mol/s
F_T	คือ อัตราการไหลเชิงโมลรวมของสาร ณ ทางออกปฏิกรณ์	mol/s
F_B	คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสารผลิตภัณฑ์, mol/s	mol/s
H_i	คือ เอนทาลปีของสารใด ๆ	J/mol
ΔH_{Rx}	คือ ความร้อนของการเกิดปฏิกรณ์	J/mol
k_i	คือ ค่าการนำความร้อนของสารใด ๆ	W/(m·K)
k_j	คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกรณ์ใด ๆ	mol/(s·m ³)
K_j	คือ ค่าคงที่สมดุลของการเกิดปฏิกรณ์ใด ๆ	-
L_{rxt}	คือ ขนาดความยาว หรือความสูงของปฏิกรณ์	m
n	คือ จำนวนชนิดสารทั้งหมดในปฏิกรณ์	-
q	คือ พลังความร้อน	W/m ²
\dot{Q}	คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อน	J/s
r	คือ ระยะรัศมีของปฏิกรณ์ใด ๆ	m
r_i	คือ อัตราการเกิดปฏิกรณ์ของสารใด ๆ เทียบต่อปริมาตรปฏิกรณ์	mol/(s·m ³)
r'_i	คือ อัตราการเกิดปฏิกรณ์ของสารใด ๆ เทียบต่อน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกรณ์	mol/(s·kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สัญลักษณ์	นิยาม	หน่วย
R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส, ($R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$)	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
R_{rxt}	คือ ขนาคาร์ซีมีของปฏิกิริยา	m
S_B	คือ ค่าการเลือกเกิดของสารผลิตภัณฑ์	%
T	คือ อุณหภูมิดำเนินการของปฏิกิริยา	K
T_0	คือ อุณหภูมิ ณ ทางเข้าปฏิกิริยา	K
T_a	คือ อุณหภูมิภายนอกปฏิกิริยา	K
u	คือ ความเร็ว	m/s
u_0	คือ ความเร็วเฉลี่ย ณ ทางเข้าปฏิกิริยา	m/s
U	คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิ	$\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{K})$
v_i	คือ อัตราการไหลเชิงโมลรวมของสาร ณ ทางเข้าปฏิกิริยา	mol/s
V	คือ ปริมาตรของปฏิกิริยา	m^3
W	คือ น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยา	kg
W_i	คือ โมลฟลักซ์ของสารใด ๆ	$\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
X_A	คือ ค่าการแปลงผันทางเคมีของสารตั้งต้น	%
y_i	คือ สัดส่วนโดยโมลของสารใด ๆ	-
Y_B	คือ ผลได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์	%
z	คือ ระยะความยาว หรือความสูงของปฏิกิริยาใด ๆ	m

Geek letters

สัญลักษณ์	นิยาม	หน่วย
μ	คือ ความหนืดของแก๊สที่ไหลผ่านเบด	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
ρ	คือ ความหนาแน่นของแก๊สที่ไหลผ่านเบด	kg/m^3
ρ_0	คือ ความหนาแน่นของแก๊ส ณ ทางเข้าปฏิกิริยา	kg/m^3
ρ_{cat}	คือ ความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยา	kg/m^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Subscripts

สัญลักษณ์	นิยาม
avg	คือ ค่าเฉลี่ย
A	คือ สารตั้งต้น (EtOH, H ₂ O)
B	คือ สารผลิตภัณฑ์ใด ๆ ที่สนใจ (H ₂ , CO ₂ , CO, CH ₄)
cat	คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา
i	คือ สารใด ๆ ภายในปฏิกิริยา (EtOH, H ₂ O, H ₂ , CO ₂ , CO, CH ₄)
m	คือ สารผสม (mixture)
r	คือ แกนรัศมี
z	คือ แกนความยาว หรือความสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บรรณานุกรม

- [1] A. Kumar, R. Prasad, Y.C. Sharma, Steam Reforming of Ethanol: Production of Renewable Hydrogen, *Int. J. Environ. Res. Dev.* 4 (2014) 2249–3131.
<http://www.ripublication.com/ijerd.htm>.
- [2] H.S. Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering*, 2006.
- [3] J.C. Lee, R.A. Yetter, F.L. Dryer, A.G. Tomboulides, S.A. Orszag, Simulation and analysis of laminar flow reactors, *Combust. Sci. Technol.* 159 (2000) 199–212.
<https://doi.org/10.1080/00102200008935783>.
- [4] N.S. Aboghander, A.A. Shaikh, A chemical reaction engineering laboratory experiment: Isothermal laminar-flow reactor, *J. Chem. Eng. Japan.* 39 (2006) 678–681. <https://doi.org/10.1252/jcej.39.678>.
- [5] W.H. Chen, C.Y. Lu, K.Q. Tran, Y.L. Lin, S.R. Naqvi, A new design of catalytic tube reactor for hydrogen production from ethanol steam reforming, *Fuel.* 281 (2020) 118746. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118746>.
- [6] C. Graszinsky, M. Laborde, N. Amadeo, A. Le Valant, N. Bion, F. Epron, D. Duprez, Ethanol steam reforming over Rh(1%)MgAl₂O₄/Al₂O₃: A kinetic study, *Ind. Eng. Chem. Res.* 49 (2010) 12383–12389.
<https://doi.org/10.1021/ie101284k>.
- [7] E. Akpan, A. Akande, A. Aboudheir, H. Ibrahim, R. Idem, Experimental, kinetic and 2-D reactor modeling for simulation of the production of hydrogen by the catalytic reforming of concentrated crude ethanol (CRCCE) over a Ni-based commercial catalyst in a packed-bed tubular reactor, *Chem. Eng. Sci.* 62 (2007) 3112–3126. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.03.006>.
- [8] R. Peláez, P. Marín, F. V. Díez, S. Ordóñez, Direct synthesis of dimethyl ether in multi-tubular fixed-bed reactors: 2D multi-scale modelling and optimum design, *Fuel Process. Technol.* 174 (2018) 149–157.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.025>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [9] P. Ranganathan, S. Savithri, Computational Fluid Dynamics simulation of hydrothermal liquefaction of microalgae in a continuous plug-flow reactor, *Bioresour. Technol.* 258 (2018) 151–157.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.076>.
- [10] W.H. Chen, C.W. Tsai, Y.L. Lin, R.Y. Chein, C.T. Yu, Reaction phenomena of high-temperature water gas shift reaction in a membrane reactor, *Fuel*. 199 (2017) 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.002>.
- [11] X. Yang, S. Wang, B. Li, Y. He, H. Liu, Performance of ethanol steam reforming in a membrane-assisted packed bed reactor using multiscale modelling, *Fuel*. 274 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117829>.
- [12] อโนมา คชคง, การประยุกต์ใช้ CFD เพื่ออธิบายการผลิต 1,2-dichloroethane โดยปฏิกิริยา oxicholination ในปฏิกรณ์ fluidized bed, *Angew. Chemie Int. Ed.* 6(11), 951–952. 3 (1967).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

