



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการผลิตแหล่งพลังงานสะอาดจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สร้อยพัชธา สร้อยสุวรรณ

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ จันทร์ทา นาควชิรตระกูล

อาจารย์ปฎิภาณ บุญรวม

ดร.แดง แซ่แป้

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๙

รหัสโครงการ ๒๕๕๙A๑๐๘๐๒๒๑๙

สัญญาเลขที่ ๑๕๑/๒๕๕๙

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการผลิตแหล่งพลังงานสะอาดจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สร้อยพัทธา สร้อยสุวรรณ

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ จันทร์ทา นาควชิรตระกูล

อาจารย์ปฎิภาณ บุญรวม

ดร.แดง แซ่เป้

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 151/2559 ทางคณะดำเนินงานวิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยบูรพา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี และ ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม และ ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งให้คำปรึกษาโครงการและสนับสนุนเครื่องมือวิจัย และคณาจารย์ เจ้าหน้าที่และนิสิตทุกคนที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันที่มีผลต่อปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชัน โดยทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันที่มีค่าความเป็นกรด-เบสแตกต่างกัน โดยการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ผสมเชิงกายภาพกับตัวเร่งปฏิกิริยา CaO , ZrO_2 , ซีโอไลท์ ชนิด A และ HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันจะถูกทดสอบผ่านปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชันที่อุณหภูมิ 250 °C ความดันบรรยากาศ ผลการทดลองพบว่าค่าความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ผสมกับ HZSM-5 มีค่าสูงที่สุด และค่าความสามารถในการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ ของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าการเลือกเกิดมีเทนสูงและประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเบา ได้แก่ อีเทนและโพรเพน ส่วนผลิตภัณฑ์เมทานอลตรวจพบปริมาณต่ำ และสันนิษฐานว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสม HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดสูงจึงมีการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบลูกโซ่และส่งเสริมการเกิดไฮโดรคาร์บอน C_2 และ C_3 แทนปฏิกิริยาการเกิดเมทานอลและการดึงน้ำออกจากเมทานอลเพื่อผลิตไดเมทิลอีเทอร์

Abstract

This research aims to investigate ability of bifunctional catalysts for carbon dioxide hydrogenation. The bifunctional catalysts were prepared by variation of the base-acid strength of the second catalyst. The main catalysts i.e. CuO/ZnO/Al₂O₃ was physically mixed with the second catalysts i.e. CaO, ZrO₂, zeolite type A or HZSM-5 at weight ratio of 2:1. The carbon dioxide hydrogenation was carried out at 250 °C under atmospheric pressure. The results revealed the most active catalyst was CuO/ZnO/Al₂O₃ mixing with HZSM-5. This catalyst gave hydrocarbon products i.e. CH₄, C₂H₆ and C₃H₈, while as methanol was rarely found. This is possibly because of polymerization by high acid strength on HZSM-5 causing carbon based molecules to be hydrogenated and form CH₄, C₂H₆ and C₃H₈ instead of methanol synthesis and dehydrogenation of methanol to dimethyl ether.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
วัตถุประสงค์	3
ขอบเขตการวิจัย.....	3
บทที่ 2	7
วิธีเนิการวิจัย.....	7
สารตั้งต้นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาออกเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์	7
สารเคมีสำหรับการปรับสภาพความเป็นกรด-เบส(pH) สำหรับกระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	7
อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	7
การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม.....	8
การทดสอบปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชัน.....	9
การสร้าง Reaction Rig สำหรับทดสอบปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชัน ที่ความดันสูงกว่า	13
บรรยากาศ.....	13
การจำลองกระบวนการทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อการใช้ประโยชน์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	16
จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	16
บทที่ 3	17
ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย.....	17
การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/ZnO/Al ₂ O ₃ เพื่อการผลิตเมทานอล.....	17
ผลการทดสอบค่า %CO ₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาออกเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์	17
อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al ₂ O ₃)	17
ผลการทดสอบค่า %Selectivity ของตัวเร่งปฏิกิริยาออกเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียม	19
ออกไซด์ (CuO/ZnO/Al ₂ O ₃)	19
ผลการทดสอบอัตราการเกิดเมทานอล (Rate of methanol production) ของตัวเร่งปฏิกิริยาออก	21
เปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al ₂ O ₃)	21
ผลการทดสอบอัตราการเกิดมีเทน (Rate of methane production) ของตัวเร่งปฏิกิริยาออกเปอร์	24
ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al ₂ O ₃)	24
การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาสองหน้าที่สำหรับปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชัน.....	25
การเปรียบเทียบ %CO ₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันและไม่ผ่าน	25
กระบวนการรีดักชัน.....	25

การเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันและไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน.....	29
การเปรียบเทียบการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันและไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน.....	
การจำลองกระบวนการทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อการใช้ประโยชน์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	39
เปรียบเทียบความถูกต้องของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ที่ได้จากแบบจำลอง.....	39
บทที่ 4	43
สรุปและข้อเสนอแนะงานวิจัย.....	43
บทที่ 5	46
ผลผลิต.....	46
รายงานสรุปการเงิน.....	47
บรรณานุกรม.....	48
ภาคผนวก	49
ภาคผนวก ก การคำนวณความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา (%CO ₂ Conversion)	50
ภาคผนวก ข การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์.....	66
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา Bifunctional Catalyst.....	71
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา Bifunctional Catalyst.....	82
ประวัตินักวิจัยและคณะ.....	112

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน.....	4
ตาราง 2.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมแก๊สไฮโดรเจน(CO ₂ : H ₂ ที่อัตราส่วน 1 : 3) และแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 30 °C ความดัน 1 atm.....	10
ตาราง 2.2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโมลของเมทานอล ณ อุณหภูมิ ที่ใช้ในการเขียนกราฟสอบเทียบ.....	11
ตาราง 3.1 ข้อมูลอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ของแต่ละสภาวะความเป็นกรด-เบส (pH)	23
ตาราง 3.2 เปรียบเทียบค่า %CO ₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน	28
ตาราง 3.3 ข้อมูลอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันที่พิจารณาน้ำหนักต่อกรัมของ CZA.....	31
ตาราง 3.4 การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการก๊าซซิฟเคชันระหว่างการจำลองกระบวนการและผลการทดลอง.....	40
ตาราง 3.5 แสดงองค์ประกอบแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ในแต่ละกรณี.....	41
ตาราง ข 1 ข้อมูลระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมแก๊สไฮโดรเจน (CO ₂ : H ₂ ที่อัตราส่วน 1 : 3) และแก๊สไนโตรเจน.....	66
ตาราง ข 2 ข้อมูลระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมแก๊สไฮโดรเจน (CO ₂ : H ₂ ที่อัตราส่วน 1 : 3) และแก๊สไนโตรเจน.....	67
ตาราง ข 3 ข้อมูลระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของมีเทน(CH ₄), อีเทน(C ₂ H ₆) และ โพรเพน (C ₃ H ₈)	68
ตาราง ข 4 ข้อมูลระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของเมทานอล.....	70
ตาราง ค 1.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO ₂ input.....	71
ตาราง ค 1.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO ₂ output.....	71
ตาราง ค 2.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO ₂ input.....	72
ตาราง ค 2.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO ₂ output.....	72
ตาราง ค 3.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO ₂ input.....	73
ตาราง ค 3.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO ₂ output.....	73
ตาราง ค 4.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO ₂ input.....	74
ตาราง ค 4.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO ₂ output.....	75

	หน้า
ตาราง ค 5.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO ₂ input.....	75
ตาราง ค 5.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO ₂ output.....	76
ตาราง ค 6.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO ₂ input.....	76
ตาราง ค 6.2 ข้อมูล(FID)พื้นที่ใต้กราฟ CO ₂ output.....	77
ตาราง ค 7.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO ₂ input.....	77
ตาราง ค 7.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO ₂ output.....	78
ตาราง ค 8.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO ₂ input.....	78
ตาราง ค 8.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO ₂ output.....	79
ตาราง ค 9.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO ₂ input.....	79
ตาราง ค 9.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO ₂ output.....	80
ตาราง ค 10.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO ₂ input.....	80
ตาราง ค 10.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO ₂ output.....	81
ตาราง ง 1.1 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA.....	82
ตาราง ง 1.2 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO	83
ตาราง ง 1.3 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO ₂	84
ตาราง ง 1.4 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A.....	85
ตาราง ง 1.5 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite HZSM-5.....	86
ตาราง ง 1.6 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA.....	87
ตาราง ง 1.7 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO.....	88
ตาราง ง 1.8 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO ₂	89
ตาราง ง 1.9 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A	90
ตาราง ง 1.10 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite HZSM-5.....	91
ตาราง ง 2.1 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA.....	92
ตาราง ง 2.2 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO.....	93
ตาราง ง 2.3 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO ₂	94
ตาราง ง 2.4 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A.....	95
ตาราง ง 2.5 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite HZSM-5.....	96
ตาราง ง 2.6 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA.....	97
ตาราง ง 2.7 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO.....	98
ตาราง ง 2.8 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO ₂	99
ตาราง ง 2.9 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A.....	100
ตาราง ง 2.10 mole fraction ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite HZSM-5.....	101

ตาราง ง 3.1 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA (mole fraction avg. = 0.208690008)	102
ตาราง ง 3.2 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO (mole fraction avg. = 0.221459820631891)	103
ตาราง ง 3.3 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO ₂ (mole fraction avg. = 0.22253644)	104
ตาราง ง 3.4 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A (mole fraction avg. = 0.222575007).....	105
ตาราง ง 3.5 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite HZSM-5 (mole fraction avg. = 0.189615946)..	106
ตาราง ง 3.6 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA (mole fraction avg. = 0.221438106).....	107
ตาราง ง 3.7 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO (mole fraction avg. = 0.223839246)	108
ตาราง ง 3.8 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO ₂ (mole fraction avg. = 0.225457697)	109
ตาราง ง 3.9 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A (mole fraction avg. = 0.18899149).....	110
ตาราง ง 3.10 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite HZSM-5 (mole fraction avg. = 0.223379099)..	111

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม.....	8
รูปที่ 2.2 กระบวนการทดสอบปฏิกิริยา CO ₂ hydrogenation.....	12
รูปที่ 2.3 Process Flow Diagram ของการทดลองผลิตไดเมทิลอีเทอร์และสัญลักษณ์ในกระบวนการผลิต	14
รูปที่ 2.4 ระบบผสมแก๊สสารตั้งต้น และเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug Flow Reactor).....	14
รูปที่ 2.5 ระบบเพิ่มความดันโดยใช้ Back pressure valve และ Safety valve.....	15
รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาเผา.....	15
รูปที่ 2.7 ระบบการทดสอบปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชันสำหรับการผลิตไดเมทิลอีเทอร์..	16
รูปที่ 3.1 ผลการทดสอบค่า %CO ₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน.....	18
รูปที่ 3.2 ผลการทดสอบค่า %CO ₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน.....	18
รูปที่ 3.3 ผลการทดสอบค่า %Selectivity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน.....	19-20
รูปที่ 3.4 ผลการทดสอบค่า %Selectivity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน.....	20
รูปที่ 3.5 ผลการทดสอบอัตราการเกิดเมทานอลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 5 , 7 , 9 , 11	21-22
รูปที่ 3.6 ผลการทดสอบอัตราการเกิดมีเทนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะความเป็นกรด-เบส(pH) 5 , 7 , 9 , 11	24
รูปที่ 3.7 %CO ₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน.....	26
รูปที่ 3.8 %CO ₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน.....	27
รูปที่ 3.9 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน.....	29
รูปที่ 3.10 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน.....	30
รูปที่ 3.11 ผลการทดสอบค่า %Selectivityของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน.....	32-34
รูปที่ 3.12 ผลการทดสอบค่า %Selectivityของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน.....	34-36
รูปที่ 3.13 แบบจำลองแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล.....	39
รูปที่ 3.14 แสดงประสิทธิภาพพลังงาน และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวลโดยใช้สารทำปฏิกิริยาร่วมต่างๆ และกระบวนการที่มีและไม่มีกำมะถันร่วมกับสารชีวมวล	42
รูปที่ ข 1.1 กราฟสอบเทียบ(Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์(CO ₂)	66
รูปที่ ข 1.2 กราฟสอบเทียบ(Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์(CO ₂)	67

รูปที่ ข 2.1a กราฟสอบเทียบ (Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้ กราฟของมีเทน	69
รูปที่ ข 2.1b กราฟสอบเทียบ (Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้ กราฟของอีเทน	69
รูปที่ ข 2.1c กราฟสอบเทียบ(Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟ ของโพรเพน	69
รูปที่ ข 3.1 กราฟสอบเทียบ (Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟ ของเมทานอล	70

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันมีอัตราการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากธรรมชาติ ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติมีปริมาณสูงถึง 7 พันล้านตันต่อปีและอัตราการใช้พลังงานจากทรัพยากรธรรมชาตินี้ มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การใช้พลังงานจากการเผาไหม้ทรัพยากรธรรมชาตินี้ ส่งผลให้เพิ่มอัตราการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกสู่บรรยากาศในปริมาณสูงอย่างต่อเนื่อง ในช่วงระยะเวลา 30 ปีที่ผ่านมา [1] จากการคาดการณ์ในอนาคตพบว่า จะมีอัตราการปล่อย CO_2 เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 1.7 ต่อปี ตั้งแต่ปี 2004 จนถึง 2030 และคิดเป็นร้อยละ 53 เมื่อสิ้นปี 2030 [2] การเพิ่มปริมาณของ CO_2 ในบรรยากาศ สามารถส่งผลกระทบต่อทางด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจและสุขภาพในระยะยาว เนื่องจาก CO_2 จัดเป็นแก๊สเรือนกระจก (Green House Gases) ที่มีค่าความจุความร้อนสูงถึง $37.14 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สออกซิเจน (O_2) และแก๊สไนโตรเจน (N_2) ในบรรยากาศซึ่งมีค่าความจุความร้อนประมาณ $29.13 - 29.28 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ [3] ดังนั้น CO_2 จึงสามารถดูดซับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ได้ในปริมาณที่สูงและทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น ส่งผลต่อการละลายของน้ำแข็งขั้วโลก เมื่อ CO_2 ละลายน้ำเกิดกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดฝนกรด การเปลี่ยนแปลง ค่ากรด-เบสของน้ำทะเล การฟอกขาวของปะการัง การเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล รวมไปถึงการเกิดการกลายพันธุ์ของเชื้อแบคทีเรียต่างๆ เป็นต้น ประชาคมโลกจึงได้มีข้อกำหนดกฎหมายเพื่อรองรับและควบคุมการเปลี่ยนแปลงสภาวะของโลกดังกล่าวขึ้นในชื่อว่าพิธีสารเกียวโต โดยควบคุมการจัดการ แก๊สเรือนกระจกทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), แก๊สมีเทน (CH_4), แก๊สไนตรัสออกไซด์ (N_2O), ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydro Fluorocarbons – HFCs), เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (Per Fluorocarbons - PFCs) และแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) เป็นต้น [4] จากข้างต้น

นักวิทยาศาสตร์และหลายหน่วยงานจึงได้คิดค้นวิจัยเพื่อลดปริมาณแก๊สเรือนกระจก โดยการนำ CO₂ มาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งเป็นการใช้ CO₂ เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงสะอาด

เชื้อเพลิงสะอาด คือ แหล่งพลังงานที่ไม่เจือปนด้วยสารพิษอันตราย เช่นปรอท (Hg) กำมะถัน (S) หรือไนโตรเจน (N) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของน้ำมันดิบจากหลุมขุดเจาะ การสังเคราะห์เชื้อเพลิงสะอาดสามารถทำได้หลายวิธีการ เช่น การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม การผลิตเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน [5] การผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากแก๊สสังเคราะห์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไฮโดรเจน (H₂) (Fischer-Tropsch Synthesis) หรือการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากแก๊สสังเคราะห์ [6] เชื้อเพลิงสะอาดจากกระบวนการขั้นต้นสามารถช่วยลดการปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม และพลังงานจากเชื้อเพลิงสังเคราะห์ดังกล่าวสามารถทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงธรรมชาติที่เริ่มจะหมดไป การประยุกต์ใช้ CO₂ เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงสะอาด ผ่านปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชัน (CO₂ Hydrogenation) สามารถช่วยควบคุมปริมาณการปล่อย CO₂ สู่บรรยากาศ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชัน คือ เมทานอล ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารเชื้อเพลิง และมีค่าพลังงานจากปฏิกิริยาการเผาไหม้สูงถึง -238.7 KJ/mol ที่อุณหภูมิ 25°C เมทานอลยังมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายสารอินทรีย์ ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสติก ยา และสารประกอบอินทรีย์ เช่น พอร์มาลดีไฮด์ เป็นต้น นอกจากนี้เมทานอลสามารถนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยสามารถใช้เป็นแหล่งผลิตไฮโดรเจน ผ่านปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิง (Reforming reaction) สารประกอบเคมีพื้นฐาน เช่น โอลิฟิน สามารถผลิตผ่านปฏิกิริยาเมทานอลสู่อิโলেฟิน (Methanol to Olefin) และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น ไดเมทิลอีเทอร์ผลิตได้จากเมทานอลสามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีกว่า การสังเคราะห์เมทานอลผ่านทางปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชันนั้น นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ CuO-ZnO-Al₂O₃ ซึ่งการผลิตเมทานอลในเชิงอุตสาหกรรมนั้น จำเป็นต้องใช้ความดัน 50-100 bar การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยลดความดันในการผลิตเมทานอลจึงเป็นที่น่าสนใจ ในปัจจุบันนี้ได้มีการศึกษาวิจัยตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชันแบบขั้นตอนเดียว (One step synthesis) โดยการเร่งปฏิกิริยาจะใช้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยาสองหน้าที่ (Bifunctional catalyst) ซึ่งสามารถผลิตสารผลิตภัณฑ์ได้มากกว่า 1 ขั้นตอน ยกตัวอย่าง เช่น ปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชันผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/silicalite-2 สามารถผลิตไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว หรือ โอลิฟิน ผ่านปฏิกิริยา Reverse water gas shift และ ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ฟิชเชอร์โทรป ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Silicate-2 สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งสองปฏิกิริยา [7] การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสองหน้าที่ ได้แก่ CuO-ZnO-Al₂O₃ เพื่อเร่งปฏิกิริยาผลิตเมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยากรด (Acid catalyst) ได้แก่ HZSM-5 ซีโอไลท์ Y เพื่อการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดชัน หรือ ปฏิกิริยาการดึงน้ำออกจากโมเลกุลของแอลกอฮอล์ [8]

งานวิจัยนี้มีความสนใจในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาสองหน้าที่สำหรับปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่ 1 สำหรับการผลิตเมทานอล ได้แก่ CuO-ZnO-Al₂O₃ และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่ 2 ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยากรด หรือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส หรือ ตัวเร่งปฏิกิริยาแอมโฟเทริก ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่ 2 นี้จะมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยากรดที่เลือกใช้ในการทดลอง ได้แก่ HZSM-5 และ ซีโอไลท์ A ตัวเร่งปฏิกิริยากรดจะทำหน้าที่ดึงน้ำออกจากโมเลกุลของเมทานอล เพื่อผลิตไดเมทิลอีเทอร์ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ได้แก่ CaO มีงานวิจัยได้รายงาน การส่งเสริมการเกิดเมทานอลเนื่องจากการเพิ่มจำนวนตำแหน่งเบสในตัวเร่งปฏิกิริยา และตำแหน่งเบสมีความสามารถช่วยการแตกตัวของเมทานอล สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแอมโฟเทริก ซึ่งพื้นที่ผิวมีทั้งกรดและเบสอย่างอ่อน และมีรายงานการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผลิตเมทานอล [9]

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการใช้ประโยชน์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติกรดและเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาสองหน้าที่ที่มีผลต่อการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชัน

ขอบเขตของการวิจัย

1. สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-Al₂O₃-ZnO
2. พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้สำหรับผลิตพลังงานสะอาดจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน (Bi-functional Catalyst) ประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-Al₂O₃-ZnO ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตเมทานอลหรือผลิตสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และตัวเร่งปฏิกิริยากรดหรือเบส ซึ่งสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของแอลกอฮอล์ (dehydration of alcohol) และการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เพื่อการเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนเพิ่มขึ้น แผนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน

ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับ ผลิตเมทานอล (ชนิด 1)	ตัวเร่งปฏิกิริยากรดหรือเบส (ชนิด 2)			อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิด 1 : ชนิด 2 โดยน้ำหนัก
	กรด (50%)	กึ่งกรดและเบส (50%)	เบส (50%)	
CuO-ZnO-Al ₂ O ₃	×	×	CaO	1 : 1
CuO-ZnO-Al ₂ O ₃	×	ZrO ₂	×	1 : 1
CuO-ZnO-Al ₂ O ₃	HZSM-5	×	×	1 : 1
CuO-ZnO-Al ₂ O ₃	Zeolite A	×	×	1 : 1

3. การทดสอบการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์
 - 3.1 ทดสอบที่อัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน คงที่
 - 3.2 ทดสอบที่อัตราการผลิตของสารตั้งต้นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน คงที่
 - 3.3 ทดสอบ ณ ความดันบรรยากาศ 1 bar
4. ตรวจสอบคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา
 - 4.1 ตรวจโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-Al₂O₃-ZnO ด้วยการเลี้ยวเบนของเอกซ์เรย์ (X-ray diffraction)

4.2 ตรวจสอบพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ และตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน ด้วยการดูดซับแก๊สไนโตรเจนทางกายภาพ (N_2 -Physorption)

4.3 ตรวจสอบความสามารถของการดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ และตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน (Temperature Programmed Reduction)

5. สร้าง Reaction Rig เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาสองหน้าที่ ที่ความดันสูงกว่าบรรยากาศ

6. การจำลองกระบวนการทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อการใช้ประโยชน์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

6.1 จำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวลในโปรแกรม aspen plus

6.2 เปรียบเทียบความถูกต้องของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ที่ได้จากแบบจำลอง

6.3 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยการป้อนมีเทนร่วมกับเศษไม้จากต้นยางพารา และศึกษาชนิดของสารที่ป้อนร่วมในการทำปฏิกิริยาของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ในการศึกษาได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 กรณี โดยพิจารณาสารที่ป้อนเข้ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ดังนี้

- 1) สารชีวมวล ทำปฏิกิริยาร่วมกับ อากาศ (A)
- 2) สารชีวมวล ทำปฏิกิริยาร่วมกับ อากาศและไอน้ำ (A+S)
- 3) สารชีวมวลและมีเทน ทำปฏิกิริยาร่วมกับ อากาศ (A+M)
- 4) สารชีวมวลและมีเทน ทำปฏิกิริยาร่วมกับ อากาศและไอน้ำ (A+S+M)

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เปรียบเทียบการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชันที่เกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยากรด ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส และตัวเร่งปฏิกิริยาแอมโฟเทริก สำหรับปฏิกิริยาสองหน้าที่ ณ ความดันบรรยากาศ
2. สามารถลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีอยู่และนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์

3. สร้างกระบวนการและเตรียมอุปกรณ์สำหรับทดสอบปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชัน ณ สถานะความดันสูง
4. ผลิตินิสิตระดับปริญญาตรี

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สารตั้งต้นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al₂O₃)

- คอปเปอร์(II)ไนเตรต Cu(NO₃)₂ .3H₂O
- ซิงค์ไนเตรต Zn(NO₃)₂ .6H₂O
- อะลูมิเนียมไนเตรต Al(NO₃)₃ .9H₂O

2. สารเคมีสำหรับการปรับสภาพความเป็นกรด-เบส(pH) สำหรับกระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์

3. อุปกรณ์และเครื่องมือ

- ชุดเครื่องแก้ว ได้แก่ ปีกเกอร์ , แท่งแก้วคนสาร , บิวเรต
- เตาอบ อุณหภูมิ 110 °C
- เตาเผา อุณหภูมิ 30 – 1,000 °C
- เครื่องกวนแบบแม่เหล็กและความร้อน
- กระดาษลิตมัส (ทดสอบสภาพความเป็นกรด-เบส)
- เครื่องมือวิเคราะห์ ได้แก่ เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC)

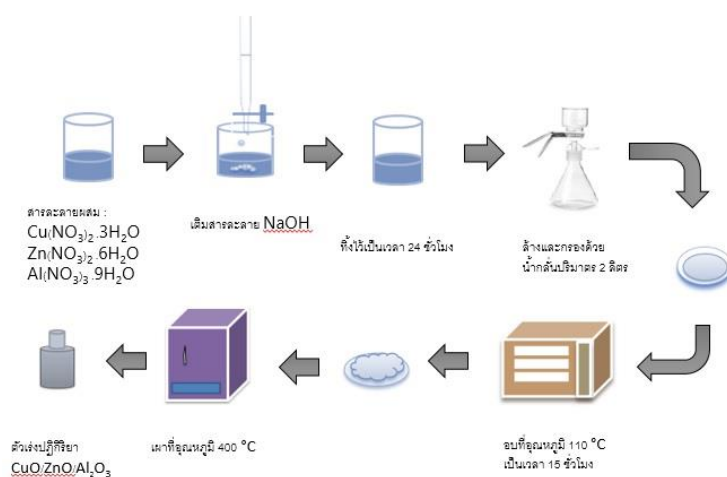
4. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม ดังรูปที่ 2.1 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1 เตรียมสารละลายคอปเปอร์(II)ไนเตรต , ซิงค์ไนเตรต และอะลูมิเนียมไนเตรต ตามอัตราส่วน 6:3:1 นำมาผสมกัน ทำการปรับปริมาตรเป็น 500 ml แล้วกวนผสมสารละลายด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็กที่มีอัตราการกวนสม่ำเสมอ

4.2 ทำการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อให้สารเกิดการตกตะกอน ขณะที่สารยังคงกวนผสมอยู่ตลอดเวลา ทำการวัดสภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) ให้ได้ 5 , 7 , 9 , 11 จากนั้นทิ้งไว้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

4.3 เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ทำการล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 2 ลิตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C ระยะเวลา 15 ชั่วโมง

4.4 นำสารที่ได้จากเตาอบไปเผาที่อุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 10 ชั่วโมง 30 นาที ได้ออกมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ออกไซด์ซึ่งคือออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์($\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ลักษณะสีดำ



รูปที่ 2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม

5 การทดสอบปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชัน

5.1 สารเคมีที่ใช้ในปฏิกิริยา ได้แก่

- แก๊สผสม ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ตามอัตราส่วน 1 : 3
- แก๊สไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง
- แก๊สไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง

5.2 ขั้นตอนในการทดสอบปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชัน ดังรูปที่ 3.2 มีขั้นตอนดังนี้

- ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ปริมาณ 1 กรัม นำไปใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยก่อนจะทำการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีการใส่ซิลิกา wool (Silica wool) ก่อน เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวเร่งปฏิกิริยารั่วออก จากนั้นใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) แล้วปิดด้วยซิลิกา wool (Silica wool) อีกครั้ง

- นำเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุสารแล้วไปเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่น จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $400\text{ }^\circ\text{C}$ ทำการปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (N_2) และอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) อย่างละ 15 ml/min ที่ไว้ระยะเวลา 6 ชั่วโมง ในส่วนนี้แก๊สทั้ง 2 ชนิดจะมีการไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์แต่จะยังไม่ถูกส่งเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) กระบวนการนี้ คือ กระบวนการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดการรีดิวซ์โลหะออกไซด์เปลี่ยนเป็นตัวเร่งโลหะ ที่อุณหภูมิ $400\text{ }^\circ\text{C}$ องศาเซลเซียส

- ต่อมาลดอุณหภูมิเป็น $250\text{ }^\circ\text{C}$ ทำการปรับอัตราการไหลของแก๊สผสม ($\text{CO}_2 : \text{H}_2$) ที่อัตราส่วน (1 : 3) เท่ากับ 48 ml/min และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (N_2) เท่ากับ 12 ml/min ในส่วนนี้แก๊สทั้ง 2 ชนิดจะไม่มีไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์แต่จะถูกส่งเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) เพื่อฉีดสารทั้งหมด 5 ครั้ง ระยะเวลา 40 นาที

- เมื่อครบแล้ว เงื่อนไขการดำเนินการยังคงเดิม เพียงแต่ในส่วนนี้ แก๊สทั้ง 2 ชนิดจะมีการไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์และถูกส่งเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) เพื่อฉีดสารทั้งหมด 15 ครั้ง ระยะเวลา 2 ชั่วโมง

- เมื่อครบแล้ว ลดอุณหภูมิเป็น $30\text{ }^\circ\text{C}$ จากนั้น ทำการปิดเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) และแก๊สทั้งหมด

- นำผลที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) มาวิเคราะห์ โดยการคำนวณความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ($\% \text{CO}_2$ Conversion), ความสามารถในการเลือกเกิดเป็นเมทานอล ($\% \text{Selectivity of methanol}$), ความสามารถในการเลือกเกิดเป็นมีเทน ($\% \text{Selectivity of methane}$) และอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ (Rate of reaction)

*หมายเหตุ – การทดสอบปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชัน ดำเนินการทดสอบ โดย เปรียบเทียบ 2 กระบวนการ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านกระบวนการรีดักชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

5.3 การสอบเทียบสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

การสอบเทียบแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ทำโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมแก๊สไฮโดรเจน (CO₂ : H₂ ที่อัตราส่วน 1 : 3) และแก๊สไนโตรเจน เพื่อให้ได้สัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่างกัน ดังตาราง 3.1 ทำการผ่านแก๊สดังกล่าวเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) ซึ่งมีการปรับสภาวะไว้ที่อุณหภูมิคอลัมน์ 50 °C และอุณหภูมิ injector 150 °C จากนั้น วัดพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วนำพื้นที่ใต้กราฟและสัดส่วนโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปเขียนกราฟสอบเทียบ

ตาราง 2.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมแก๊สไฮโดรเจน(CO₂ : H₂ ที่อัตราส่วน 1 : 3) และแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 30 °C ความดัน 1 atm

อัตราการไหล CO ₂ : H ₂ (ml/min)	อัตราการไหล N ₂ (ml/min)	อัตราการไหล CO ₂ (ml/min)	อัตราการไหลรวม (ml/min)	สัดส่วนโมล CO ₂	สัดส่วนโมล N ₂	พื้นที่ใต้กราฟ
30	0	7.5	30	0.25	0	Xxx
24	6	6	30	0.20	0.2	Xxx
18	12	4.5	30	0.15	0.4	Xxx
12	18	3	30	0.10	0.6	Xxx
6	24	1.5	30	0.05	0.8	Xxx

การสอบเทียบผลิตภัณฑ์เมทานอล ทำโดยการใส่เมทานอลบริสุทธิ์ 75 ml ลงในขวดรูปชมพู่ที่อยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิไว้เท่ากับ 1 , 5 , 10 , 15 °C ตามลำดับ ทำการปิดด้วยจุกยางที่หลอดแก้วด้านหนึ่งจุ่มลงในเมทานอลบริสุทธิ์ ส่วนอีกด้านหนึ่งอยู่เหนือจากเมทานอลบริสุทธิ์ ต่อสายยางที่ปลายด้านบนของหลอดแก้วทั้งสอง เข้ากับกระบวนการที่ผ่านเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี(GC) ซึ่งมีการปรับสภาวะไว้ที่อุณหภูมิคอลัมน์ 50 °C และอุณหภูมิ injector 150 °C จากนั้น วัดพื้นที่ใต้กราฟไอเมทานอลและ

หาค่าความดันไอของเมทานอลที่อุณหภูมิอื่นๆ เพื่อคำนวณสัดส่วนโมลของเมทานอล แล้วนำพื้นที่ใต้กราฟและ สัดส่วนโมลของเมทานอลที่ได้ไปเขียนกราฟสอบเทียบ

ตาราง 2.2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโมลของเมทานอล ณ อุณหภูมิ ที่ใช้ในการเขียนกราฟสอบเทียบ

อุณหภูมิ (°C)	ความดันไอเมทานอล (mmHg)	ความดันรวม (mmHg)	สัดส่วนโมล เมทานอล	Area
1	31.79	760	0.042	Xxx
5	40.53	760	0.053	Xxx
10	54.78	760	0.072	Xxx
15	73.17	760	0.096	Xxx

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

กรณีเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สมีเทน

$$\%CO_2\text{Conversion} = \frac{y_{CH_4}}{y_{CO_2, i} [1 - \delta (y_{CH_4})]} \times 100$$

กรณีเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สมีเทนและเมทานอล

$$\%CO_2\text{ Conversion} = \left[\frac{y_{CH_4} + y_{CH_3OH}}{y_{CO_2, in.} [1 - \delta (y_{CH_4} + y_{CH_3OH})]} \right] \times 100$$

กรณีเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทน

$$\%CO_2\text{Conversion} = \frac{y_{CO} + y_{CH_4}}{y_{CO_2, i} [1 - \delta (y_{CO} + y_{CH_4})]} \times 100$$

กรณีเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สมีเทนและอีเทน

$$\% CO_2\text{ Conversion} = \frac{y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6}}{y_{CO_2, i} [1 - \delta (y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6})]} \times 100$$

กรณีเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สมีเทนและอีเทนและโพรเพน

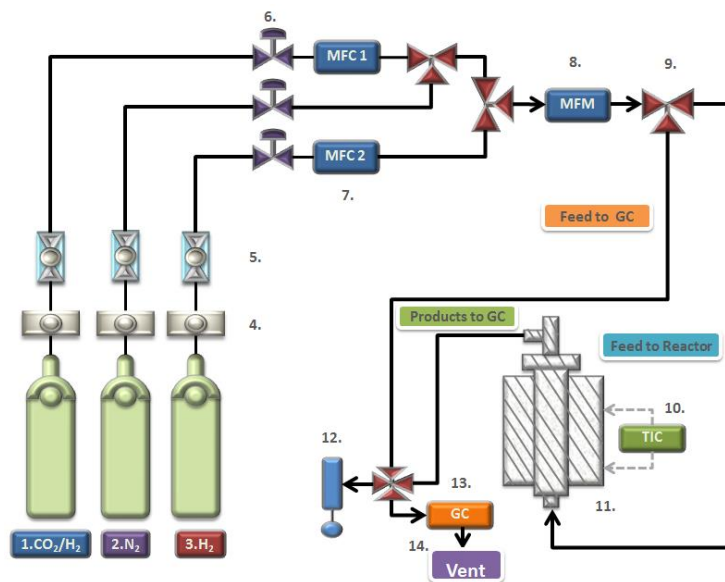
$$\% CO_2\text{ Conversion} = \frac{y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6} + 3y_{C_3H_8}}{y_{CO_2, i} [1 - \delta (y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6} + 3y_{C_3H_8})]} \times 100$$

กรณีเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนและเมทานอล

$$\%CO_2 \text{ Conversion} = \frac{y_{CH_4} + y_{CO} + y_{CH_3OH}}{y_{CO_2, i} [1 - \delta(y_{CH_4} + y_{CO} + y_{CH_3OH})]} \times 100$$

$$\% \text{Selectivity of methane} = \left[\frac{\text{Mole fraction of } CO_2 \text{ convert to } CH_4}{\text{Mole fraction of } CO_2 \text{ convert to total product}} \right] \times 100$$

$$\% \text{Selectivity of methanol} = \left[\frac{\text{Mole fraction of } CO_2 \text{ convert to } CH_3OH}{\text{Mole fraction of } CO_2 \text{ convert to total product}} \right] \times 100$$



$$\text{Rate of reaction} \left(\frac{\text{mmol}}{\text{h.kg cat}} \right) = \frac{\left(\frac{\%CO_2 \text{ Conversion}}{100} \right) \times CO_2 \text{ input}}{W}$$

รูปที่ 2.2 กระบวนการทดสอบปฏิกิริยา CO_2 hydrogenation

1. แก๊สผสมระหว่าง CO_2/H_2

2. แก๊สไนโตรเจน

6. วาล์วปรับอัตราการไหล (Needle valve)

7. เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Mass flow meter)

3. แก๊สไฮโดรเจน

8. เครื่องมือควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller)

4. ฟิวเตอร์(Filter)

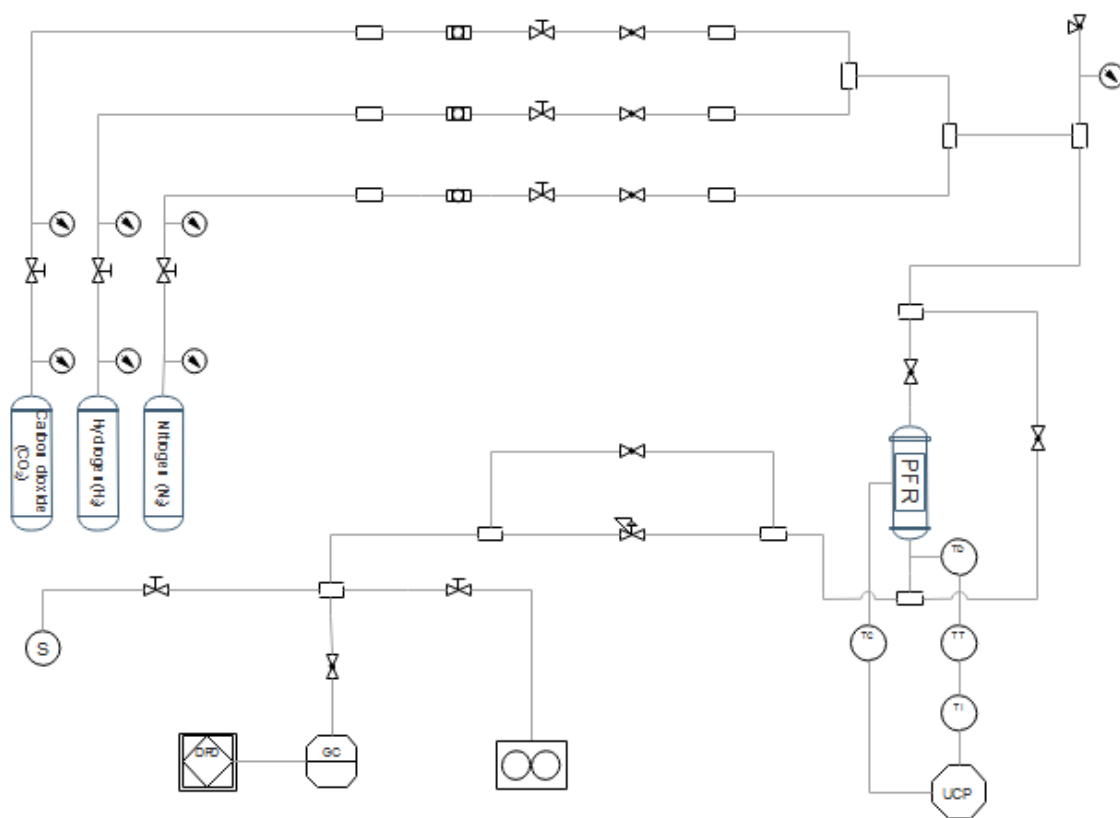
9. วาล์วสามทาง (Three ways valve)

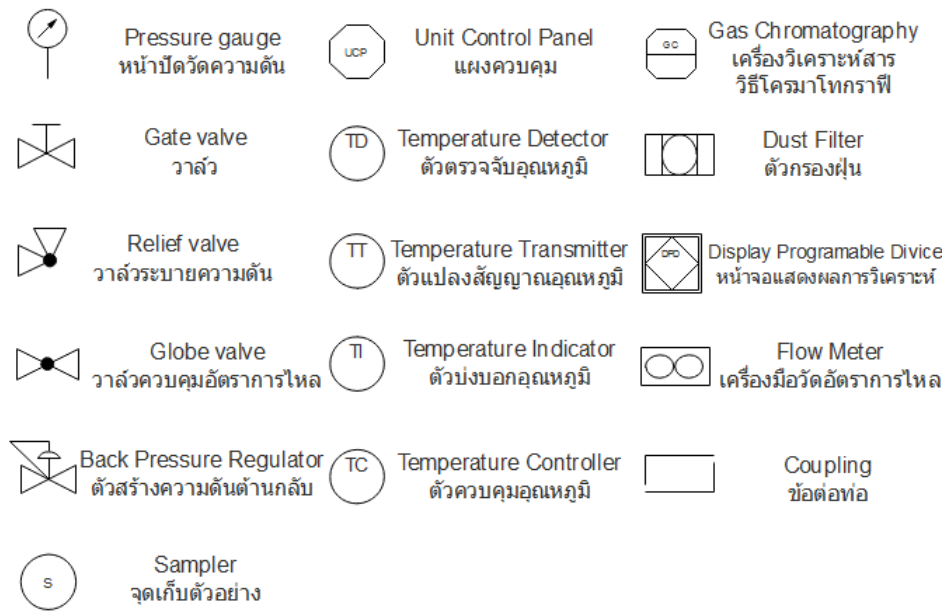
5. บอลล์วาล์ว (Ball valve)

10. Temperature controller

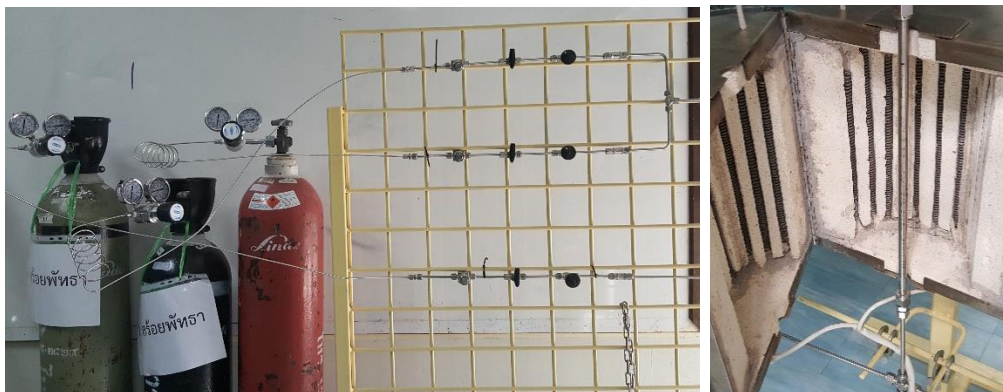
6. การสร้าง Reaction Rig สำหรับทดสอบปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชัน ที่ความดันสูงกว่า

บรรยากาศ





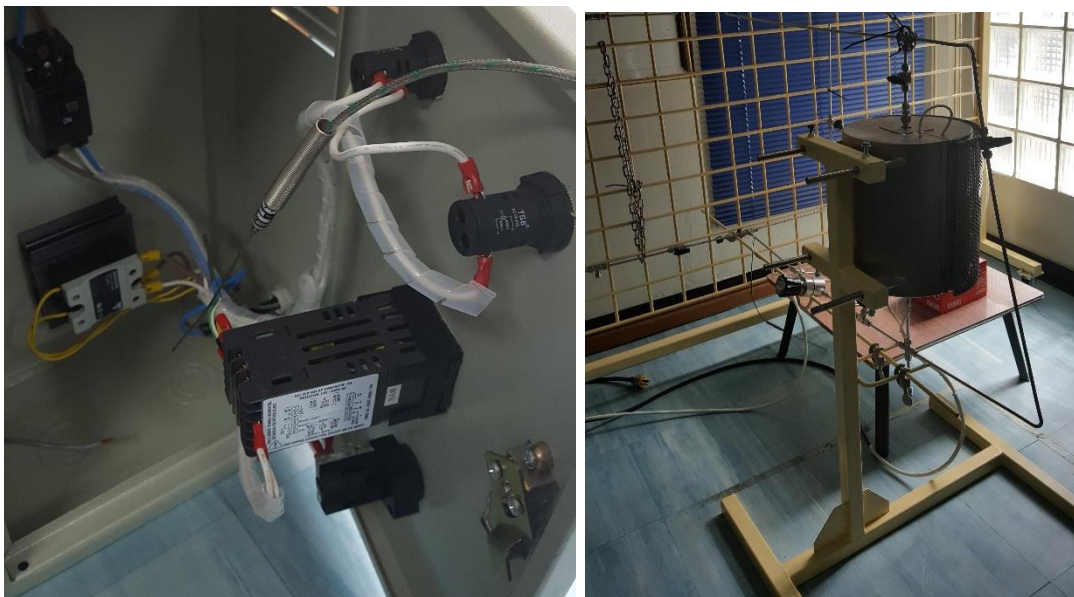
รูปที่ 2.3 Process Flow Diagram ของการทดลองผลิตไดเมทิลอีเทอร์และสัญลักษณ์ในกระบวนการผลิต



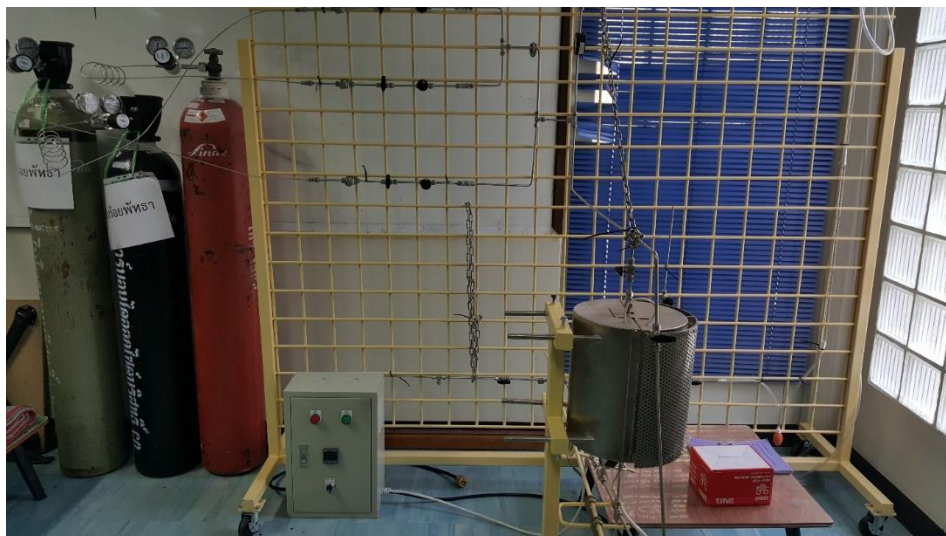
รูปที่ 2.4 ระบบผสมแก๊สสารตั้งต้น และเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug Flow Reactor)



รูปที่ 2.5 ระบบเพิ่มความดันโดยใช้ Back pressure valve และ Safety valve



รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาเผา



รูปที่ 2.7 ระบบการทดสอบปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชันสำหรับการผลิตไดเมทิลอีเทอร์

7. การจำลองกระบวนการทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อการใช้ประโยชน์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

7.1 จำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวลในโปรแกรม aspen plus

7.2 เปรียบเทียบความถูกต้องของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ที่ได้จากแบบจำลอง

7.3 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยการป้อนมีเทนร่วมกับเศษไม้จากต้น
ยางพารา และศึกษาชนิดของสารที่ป้อนร่วมในการทำปฏิกิริยาของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ในการศึกษา
ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 กรณี โดยพิจารณาสารที่ป้อนเข้ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ดังนี้

กรณี 1 สารชีวมวล ทำปฏิกิริยาร่วมกับ อากาศ (A)

กรณี 2 สารชีวมวล ทำปฏิกิริยาร่วมกับ อากาศและไอน้ำ (A+S)

กรณี 3 สารชีวมวลและมีเทน ทำปฏิกิริยาร่วมกับ อากาศ (A+M)

กรณี 4 สารชีวมวลและมีเทน ทำปฏิกิริยาร่วมกับ อากาศและไอน้ำ (A+S+M)

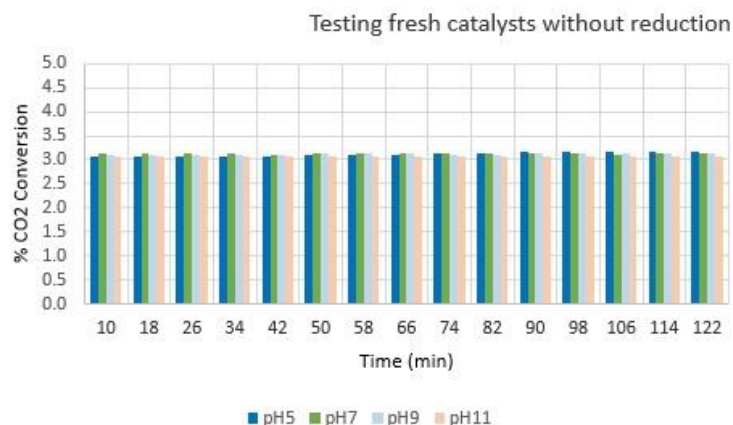
บทที่ 3

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

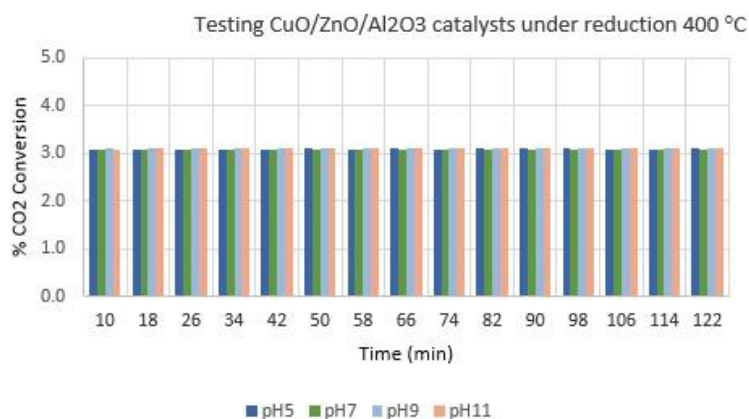
การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/ZnO/Al₂O₃ เพื่อการผลิตเมทานอล

การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al₂O₃) เพื่อใช้ในการผลิตเมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเตรียมโดยวิธีการตกตะกอนร่วมที่อัตราส่วน Cu/Zn/Al เท่ากับ 6 : 3 : 1 จากนั้น ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปรับสภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) ของการตกตะกอนให้เท่ากับ 5, 7, 9, 11 สำหรับการทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ 1.) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al₂O₃) ที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน 2.) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al₂O₃) ที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (PFR) ที่อุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้น เข้าสู่กระบวนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชัน ที่อุณหภูมิ 250 °C ผ่านเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) วิเคราะห์ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา (%CO₂ Conversion), ความสามารถในการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) และอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ (Rate of reaction) ของแต่ละสภาวะความเป็นกรด-เบส (pH)

ผลการทดสอบค่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al₂O₃)



รูปที่ 3.1 ผลการทดสอบค่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

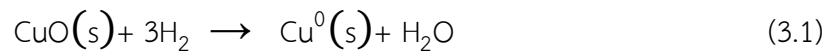


รูปที่ 3.2 ผลการทดสอบค่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

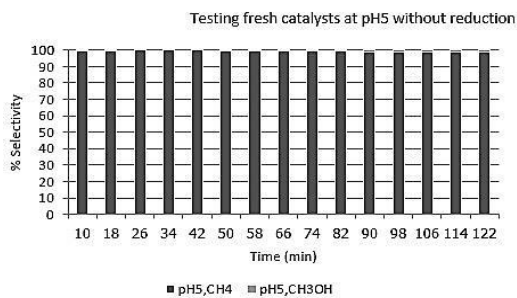
กระบวนการรีดักชัน คือ การเพิ่มพื้นที่ผิวการดูดซับของโลหะคอปเปอร์ (Cu⁰) โดยการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al₂O₃) มีความเป็นโลหะมากขึ้นด้วยการเปลี่ยนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ให้อยู่ในรูปโลหะคอปเปอร์ (Cu⁰) ตามสมการ 3.1 ซึ่งโลหะคอปเปอร์มีความสามารถในการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน (H₂) ที่เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชัน

จากการศึกษารูปที่ 3.1 และ 3.2 พบว่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันมีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือ %CO₂ Conversion มีค่าเท่ากับ 3% สันนิษฐานได้ว่า การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) ต่างกัน

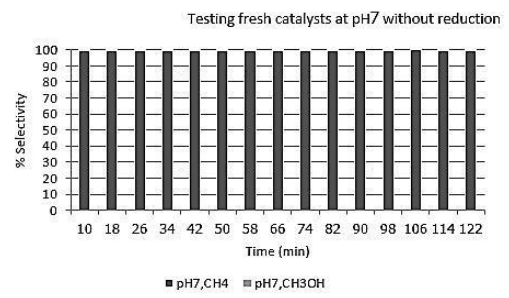
ไม่มีผลต่อการกระจายตัวของตำแหน่งการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน เนื่องจาก ค่า %CO₂ Conversion จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน ส่วนความสามารถในการเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (-CH₂)_n และเมทานอล (CH₃OH) จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉพาะการเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่นอกจากจะมีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ยังต้องมีความสามารถในการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนปริมาณมากเพียงพอที่จะเติมแก๊สไฮโดรเจนเข้าสู่โมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย



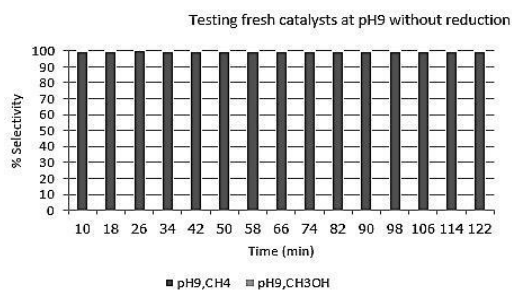
ผลการทดสอบค่า %Selectivity ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al₂O₃)



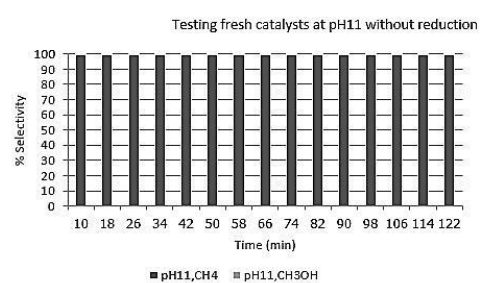
(ก)



(ข)

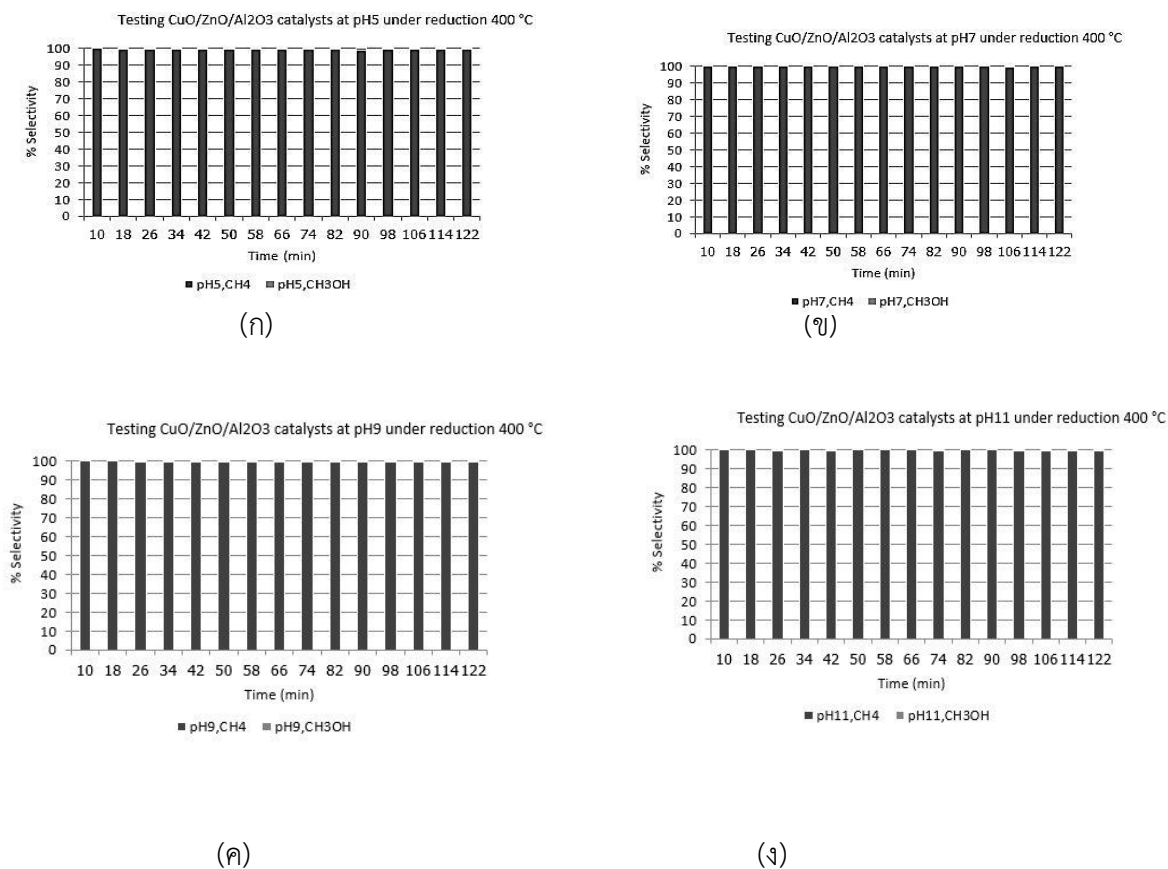


(ค)



(ง)

รูปที่ 3.3 ผลการทดสอบค่า %Selectivity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

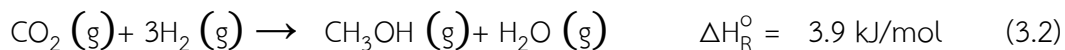


รูปที่ 3.4 ผลการทดสอบค่า %Selectivity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

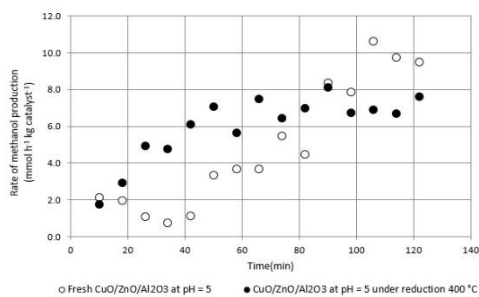
จากการศึกษารูปที่ 3.3 ถึง 3.4 พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชันของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน ที่สถานะความเป็นกรด-เบส (pH) 5 , 7 , 9 , 11 มีอยู่ด้วยกัน 2 ตัว คือ มีเทนและเมทานอล เมื่อวิเคราะห์ค่า %Selectivity จะเห็นว่า การเลือกเกิดของมีเทนสูงกว่าเมื่อเทียบกับเมทานอล จากข้อมูลการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ตามสมการ 3.2 และ 3.3 จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีกิ๊บส์ของเมทานอล ที่สถานะมาตรฐานเท่ากับ +3.37 kJ/mol เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาเป็น 250 °C ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีกิ๊บส์ของเมทานอลเท่ากับ +43.59 kJ/mol ซึ่งต่างจากค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีกิ๊บส์ของมีเทน ที่สถานะมาตรฐานเท่ากับ -113.64 kJ/mol เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาเป็น 250 °C ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีกิ๊บส์ของมีเทนเท่ากับ -74.48 kJ/mol

จะเห็นว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีกิ๊บของมีเทนมีค่าลบ ปฏิกริยาสามารถเกิดได้ง่าย ดังนั้น ที่อุณหภูมิ 250 °C ตัวเร่งปฏิกริยามีแนวโน้มเลือกเกิดเป็นมีเทนมากกว่าเมทานอล ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเป็นมีเทนสูงถึง 99% ขณะที่เมทานอลมีประมาณ 1%

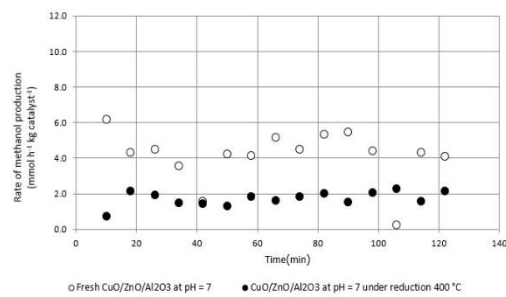
นอกจากนี้ กระบวนการรีดักชัน ที่อุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 6 ชั่วโมง ยังเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้ ตัวเร่งปฏิกริยามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตำแหน่งการเร่งปฏิกริยา (Active site) โดยจะมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณโลหะคอปเปอร์ (Cu⁰) ทำให้มีการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน (H₂) มากขึ้น ขณะที่พื้นที่ผิวการดูดซับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เท่าเดิม อีกทั้ง การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถ แยกตัวเป็นโซเดียม (Na⁺) ได้ดี จึงทำให้การล้างตะกอนในขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกริยานั้นทำได้ยาก อาจมี โซเดียม (Na⁺) เหลืออยู่ เป็นเหตุให้เกิดการยับยั้งการทำงานร่วมกันของโลหะคอปเปอร์ (Cu⁰) กับโปรโมเตอร์ และการกระจายตัวของโลหะคอปเปอร์ (Cu⁰) ลดลง



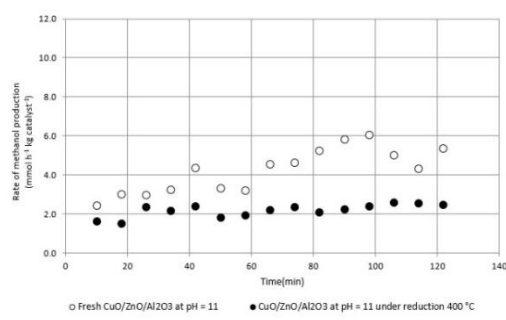
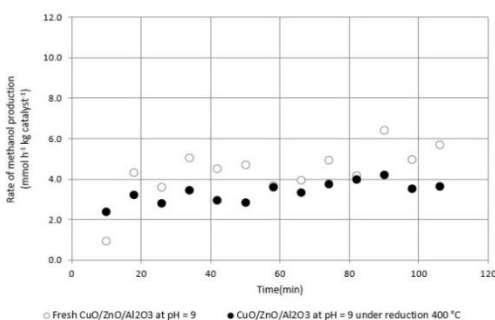
ผลการทดสอบอัตราการเกิดเมทานอล (Rate of methanol production) ของตัวเร่งปฏิกริยาคอปเปอร์ ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al₂O₃)



(ก)



(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 3.5 ผลการทดสอบอัตราการเกิดเมทานอลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 5 , 7 , 9 , 11

จากการศึกษารูปที่ 3.5 พบว่า การตกตะกอนที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (PH) ต่างกัน ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 5 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน มีอัตราการเกิดเมทานอลดีที่สุดในและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สันนิษฐานได้ว่า ที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 5 ตัวเร่งปฏิกิริยามีตำแหน่งของการเกิดเมทานอลมากที่สุด และเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านกระบวนการรีดักชันถึงจุดที่เหมาะสม จะทำให้ตำแหน่งของการเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น จากการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันระยะเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า มีอัตราการเกิดเมทานอลเฉลี่ยเท่ากับ $6.01 \text{ mmol/h/kg catalyst}^{-1}$ แสดงดังตาราง 3.1 ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน เมื่อถูกรีดิวซ์เพิ่มขึ้นเป็นระยะเวลา 100 นาที มีอัตราการเกิดเมทานอลสูงขึ้น เนื่องจาก สารตั้งต้นมีแก๊สไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้เกิดกระบวนการรีดักชันขึ้นพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชัน แต่เมื่อหลังจาก 100 นาที จะเห็นว่า อัตราการเกิดเมทานอลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชันยังคงมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น สันนิษฐานได้ว่า เมื่อทดสอบปฏิกิริยาระยะเวลา 6 ชั่วโมงหรือมากกว่า อัตราการเกิดเมทานอลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชันจะมีค่าเท่ากับอัตราการเกิดเมทานอลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตกตะกอนที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 7 , 9 , 11 จะมีอัตราการเกิดเมทานอลของทั้ง 2 การทดสอบต่างกันอย่างชัดเจน โดยการทดสอบในสภาวะที่เกิดกระบวนการรีดักชันไปพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชันมีอัตราการเกิดเมทานอลสูงกว่าการทดสอบในสภาวะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านกระบวนการรีดักชันระยะเวลา 6 ชั่วโมง

อีกทั้ง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเตรียมที่สภาวะความเป็นกรด-เบส(pH)ต่างกัน จึงทำให้องค์ประกอบของตำแหน่งการเร่งปฏิกิริยาต่างกัน ตามความสามารถในการตกตะกอนของคอปเปอร์(Cu^{2+}) ที่

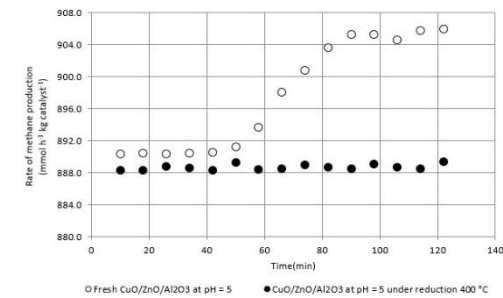
สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 3 [29] ส่วนซิงค์ (Zn^{2+}) และอะลูมิเนียม (Al^{3+}) ที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 5 [29] และที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 7 , 9 , 11 มีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ช่วยให้เกิดการตกตะกอนปริมาณมาก เมื่อทำการล้างตะกอนจึงมีโซเดียม (Na^+) เหลืออยู่ปริมาณมาก ส่งผลให้การกระจายของโลหะคอปเปอร์ (Cu^0) ลดลง นำไปสู่การขัดขวางปฏิกิริยาในการสังเคราะห์เมทานอล

นอกจากนี้ การตกตะกอนที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) ต่างกันยังส่งผลให้ปริมาณการตกตะกอนของคอปเปอร์ (Cu^{2+}) , ซิงค์ (Zn^{2+}) และอะลูมิเนียม (Al^{3+}) ต่างกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จึงมีองค์ประกอบต่างกัน ส่งผลให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาต่างกัน

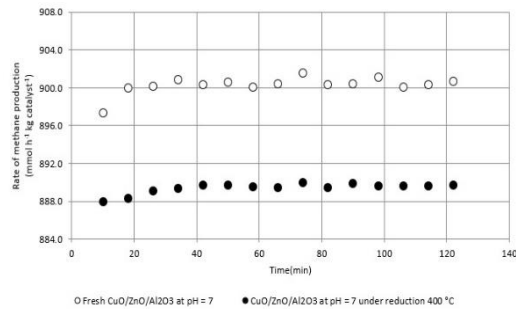
ตาราง 3.1 ข้อมูลอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ของแต่ละสภาวะความเป็นกรด-เบส (pH)

สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH)	อัตราการเกิดเมทานอลเฉลี่ย (mmol/h.kg _{cat})		อัตราการเกิดมีเทนเฉลี่ย (mmol/h.kg _{cat})	
	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน
5	4.93	6.01	905	889
7	4.15	1.26	900	890
9	4.27	3.15	898	900
11	4.24	2.18	886	897

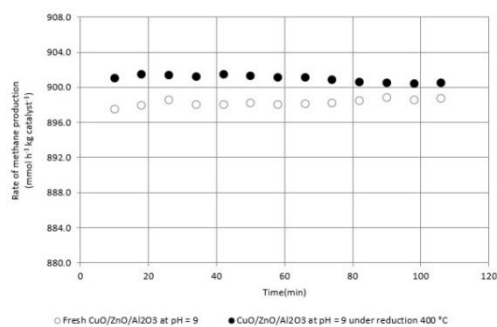
ผลการทดสอบอัตราการเกิดมีเทน (Rate of methane production) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al₂O₃)



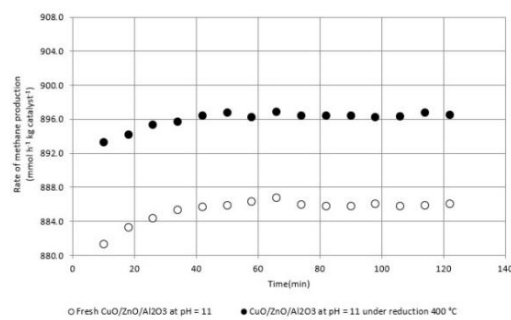
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.6 ผลการทดสอบอัตราการเกิดมีเทนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะความเป็นกรด-เบส(pH) 5 , 7 , 9 , 11

จากการศึกษารูปที่ 3.6 พบว่า ที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 11 ที่มีอัตราการเกิดมีเทนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน เนื่องจาก การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ช่วยให้เกิดการตกตะกอนปริมาณมาก จึงทำให้คอปเปอร์ (Cu²⁺) , ซิงค์ (Zn²⁺) และอะลูมิเนียม (Al³⁺) จับตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออน(OH⁻) ได้ง่าย เกิดการตกตะกอนในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ปริมาณมาก เมื่อผ่านกระบวนการรีดิวซ์ส่งผลให้พื้นที่ผิวการดูดซับของโลหะคอปเปอร์ (Cu⁰) เพิ่มขึ้น เกิดการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน (H₂) มากขึ้น อีกทั้ง ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีกิบส์ของมีเทนที่อุณหภูมิ 250 °C มีค่าลบ ปฏิกิริยาจึงสามารถเกิดได้ง่ายและเมื่อผ่านกระบวนการรีดักชันส่งผลให้อัตราการเกิดมีเทนมีปริมาณเพิ่มมากยิ่งขึ้น

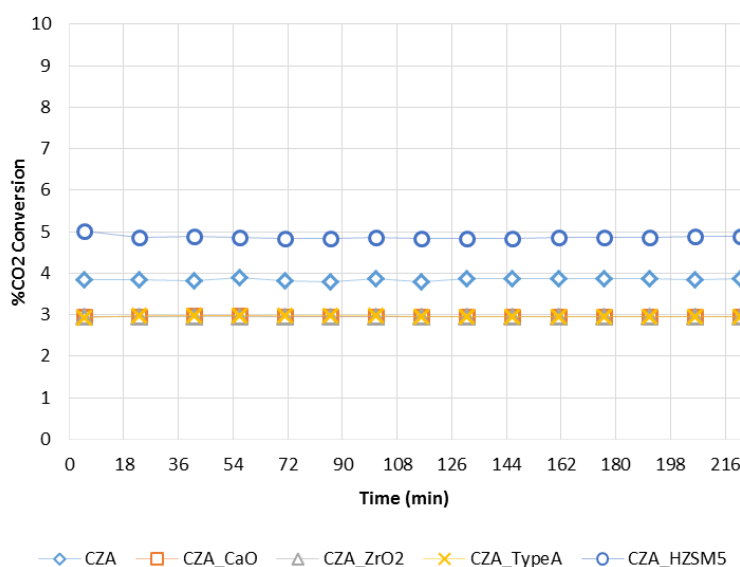
การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาสองหน้าที่สำหรับปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชัน

จากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันเพื่อการศึกษาการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันถูกเตรียมได้ 2 ขั้นตอน ได้แก่ 1). การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอล โดยวิธีการตกตะกอนร่วม คือคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่อัตราส่วน Cu/Zn/Al เท่ากับ 6:3:1 โดยโมล ทำให้ตกตะกอนโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อปรับสภาพความเป็นกรด-เบสให้เท่ากับ 7 2). เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาการแยกน้ำออกจากเมทานอลมีด้วยกัน 4 ชนิด มีความเป็นกรด-เบสของพื้นที่แตกต่างกัน คือ CaO , ZrO_2 , Zeolite Type-A และ HZSM-5 เป็นต้น ทำการบดรวมกันกับตัวเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอลกับตัวเร่งปฏิกิริยาการแยกน้ำออกจากเมทานอลแต่ละชนิด ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก จากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันเพื่อการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ 4 ชนิด คือ CZA/ CaO , CZA/ ZrO_2 , CZA/Zeolite Type A และ CZA/HZSM-5 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยามีรูปแบบในการดำเนินการ 2 ส่วน คือ 1). การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน 2). การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (PFR) ทดสอบปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ $400\text{ }^\circ\text{C}$ ระยะเวลา 6 ชั่วโมง เข้าสู่กระบวนการทดสอบปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ $250\text{ }^\circ\text{C}$ ผ่านเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงคาร์บอนไดออกไซด์ ($\% \text{CO}_2$ conversion) อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate of reaction) และความสามารถในการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ ($\% \text{Selectivity}$) ของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน

การเปรียบเทียบ $\% \text{CO}_2$ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันและไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

การทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันนี้เพื่อการศึกษาการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการสองขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการสังเคราะห์เมทานอลและ

กระบวนการแยกน้ำออกจากเมทานอล ใช้สารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ปรับค่าอัตราตารากการไหลของ CO_2 : H_2 ในสัดส่วน 1:3 ทำการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 250°C โดยค่า % CO_2 Conversion ที่พิจารณานี้เป็นการวิเคราะห์ที่น้ำหนักรวมของตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน ซึ่งเท่ากับ 1.5 กรัม ผลจากการทดลองแสดงค่า % CO_2 Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน และค่า % CO_2 Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน ดังรูป 3.7 และ 3.8

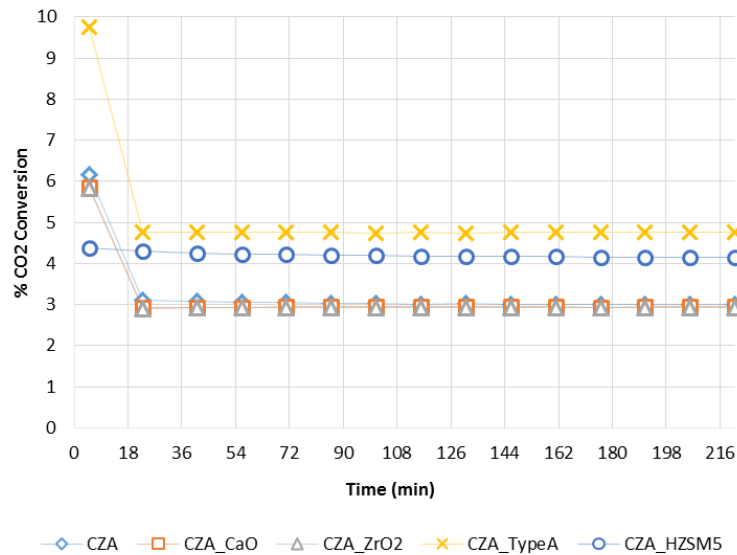


รูปที่ 3.7 % CO_2 Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

จากรูป 3.7 ในการทดลองมีการทดสอบปฏิกิริยารีดักชันที่สภาวะดังต่อไปนี้ คือ ใช้แก๊สไฮโดรเจนในไนโตรเจนที่อัตราส่วนของ H_2/N_2 เท่ากัน 50% มีอัตราการไหลรวม 30 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการทดสอบที่ความดันบรรยากาศ ทำการเผาที่อุณหภูมิที่ 400°C โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ค่า % CO_2 Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันมีดังต่อไปนี้

- 1.ค่า % CO_2 Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 มีค่าเฉลี่ยที่ 4.87 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด
- 2.ค่า % CO_2 Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA มีค่าเฉลี่ยที่ 3.84 เปอร์เซ็นต์

3. ค่า % CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/CaO, CZA/ZrO₂ และ CZA/Zeolite TypeA อยู่ในระดับเดียวกันที่ค่าเฉลี่ยที่ 2.96 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.8 %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

ค่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันมีดังต่อไปนี้

1. ค่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/Zeolite TypeA มีค่าเฉลี่ยที่ 4.76 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด
2. ค่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์
3. ค่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA, CZA/CaO และ CZA/ZrO₂ อยู่ในระดับเดียวกันที่ค่าเฉลี่ย 2.96 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 3.2 เปรียบเทียบค่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน

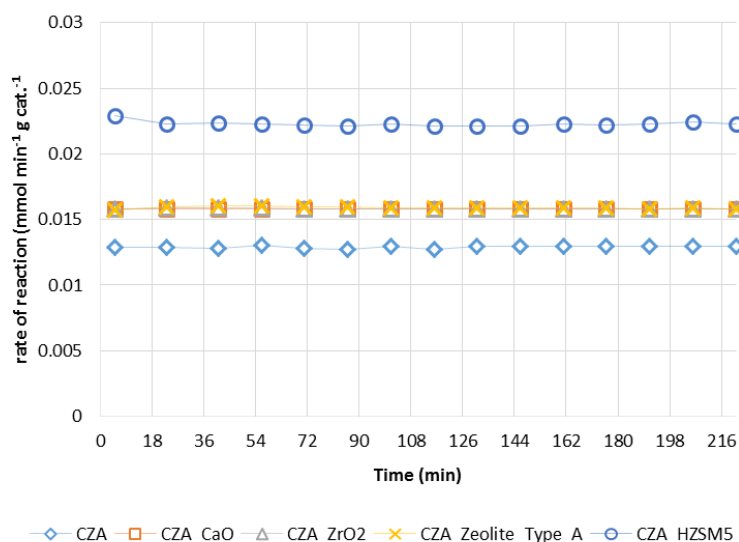
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา สองฟังก์ชัน	% CO ₂ Conversion	
	ตัวเร่งปฏิกิริยา ผ่านการรีดักชัน	ตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่ผ่านการรีดักชัน
CZA	3.84	3.03
CZA/CaO	2.96	2.94
CZA/ZrO ₂	2.95	2.92
CZA/Zeolite TypeA	2.96	4.76
CZA/HZSM-5	4.87	4.21

จากรูป 3.7 และ 3.8 แสดงค่า % CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน และ ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันนั้นจะมี % CO₂ Conversion ที่สูงกว่าของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน เนื่องจากการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านปฏิกิริยารีดักชัน เป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตำแหน่งที่ว่างไว้เป็นโลหะไอออนหรือโลหะออกไซด์ ซึ่งมีสถานะออกซิเดชัน(oxidation state) สูง ใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวพาแก๊สไฮโดรเจนไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อที่จะรีดิวซ์โลหะไอออนและ/หรือโลหะออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยาให้ลดลง จะส่งผลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพมากขึ้น หลังจากผ่านการรีดักชันตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเปลี่ยนคอปเปอร์ออกไซด์(CuO) ให้มีความเป็นโลหะมากขึ้นส่งผลให้อยู่ในรูปโลหะคอปเปอร์(Cu⁰) ตามสมการการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน มีความสามารถในการดูดซับแก๊สสารตั้งต้นดีมากขึ้น คือ แก๊สไฮโดรเจน ซึ่งเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน แต่เนื่องจากการรีดักชันตัวเร่งปฏิกิริยานั้นอาจจะถูกทดสอบเป็นเวลานานจนเกินไปทำให้ภายในโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยามีความแอทที่ฟน้อยลงกว่าที่ควรทำให้ความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้น CO₂ ต่ำลง ที่จะเห็นได้ในตัวเร่งปฏิกิริยา CZA, CZA/CaO, CZA/ZrO₂ และ CZA/HZSM-5 ที่มีความแตกต่างกันระหว่างการผ่านการรีดักชันและไม่ผ่านการรีดักชันนั้นมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/Zeolite Type Aพบว่าค่า% CO₂ Conversion สูงกว่าเมื่อไม่ผ่านการรีดักชันเนื่องจากการดูดซับสารตั้งต้นที่ดีกว่าการผ่านการรีดักชัน

การเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันและไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

จากผลการทดลอง ค่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเป็นการพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน ซึ่งประกอบด้วยตัวเร่ง 2 ส่วน คือ กระบวนการสังเคราะห์เมทานอลและกระบวนการแยกน้ำออกจากเมทานอล ในที่นี้มีความสนใจในการพิจารณาในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA ที่รวมอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน เพื่อพิจารณาความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการแยกน้ำออกจากเมทานอลในการส่งเสริมอัตราการเกิดปฏิกิริยา ผลจากการทดลองแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชันดังรูป 3.9 และ

3.10



รูปที่ 3.9 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

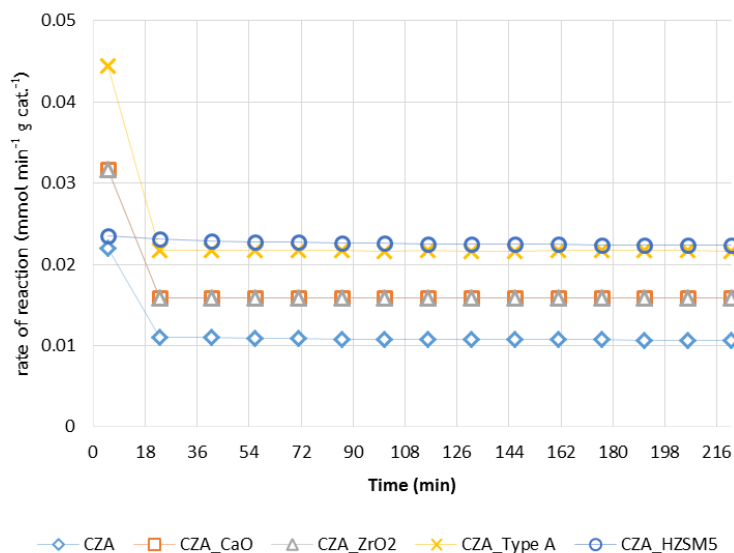
อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันมีดังต่อไปนี้

1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 มีค่าเฉลี่ยที่ $0.0223 \text{ mmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}_{\text{cat}}^{-1}$ ซึ่งเป็นค่าที่สูงสุด

2. อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/CaO, CZA/ZrO₂ และ CZA/Zeolite Type A อยู่ในระดับ

เดียวกันที่ค่าเฉลี่ย $0.0158 \text{ mmol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}_{\text{cat}}^{-1}$

3. อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $0.0129 \text{ mmol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}_{\text{cat}}^{-1}$



รูปที่ 3.10 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชันมีดังต่อไปนี้

1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 มีค่าเฉลี่ยที่ $0.0226 \text{ mmol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}_{\text{cat}}^{-1}$ ซึ่งเป็น

ค่าที่สูงสุด

2. อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/Zeolite Type A มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $0.0217 \text{ mmol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}_{\text{cat}}^{-1}$

1

3. อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/CaO, CZA/ZrO₂ อยู่ในระดับเดียวกันที่ค่าเฉลี่ย 0.0159

$\text{mmol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}_{\text{cat}}^{-1}$

4. อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $0.0115 \text{ mmol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}_{\text{cat}}^{-1}$ ซึ่งเป็นค่าที่

ต่ำสุด

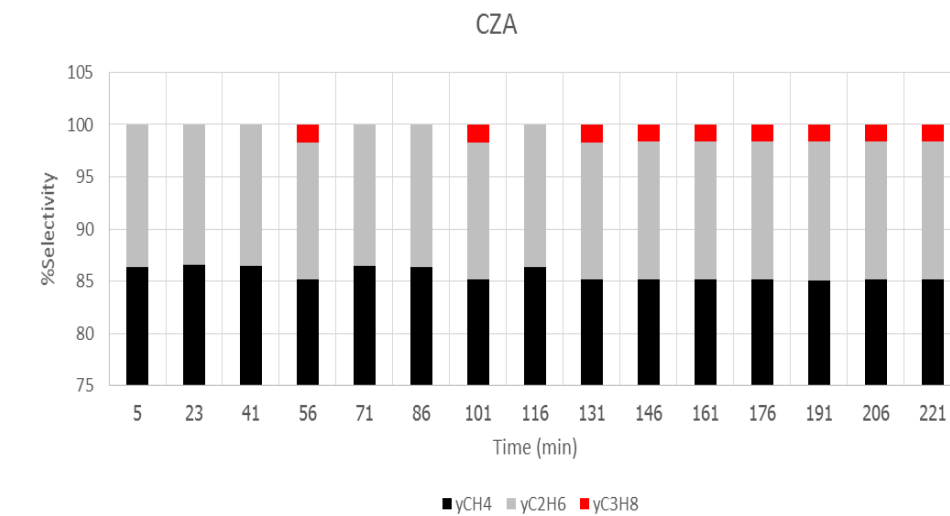
ตาราง 3.3 ข้อมูลอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันที่พิจารณาน้ำหนักต่อกรัมของ CZA

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา สองฟังก์ชัน	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ CO ₂ (mmol/min.g _{cat})	
	ตัวเร่งปฏิกิริยา ผ่านการรีดักชัน	ตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่ผ่านการรีดักชัน
CZA	0.0129	0.0115
CZA/CaO	0.0158	0.0159
CZA/ZrO ₂	0.0158	0.0159
CZA/Zeolite TypeA	0.0159	0.0217
CZA/HZSM-5	0.0223	0.0226

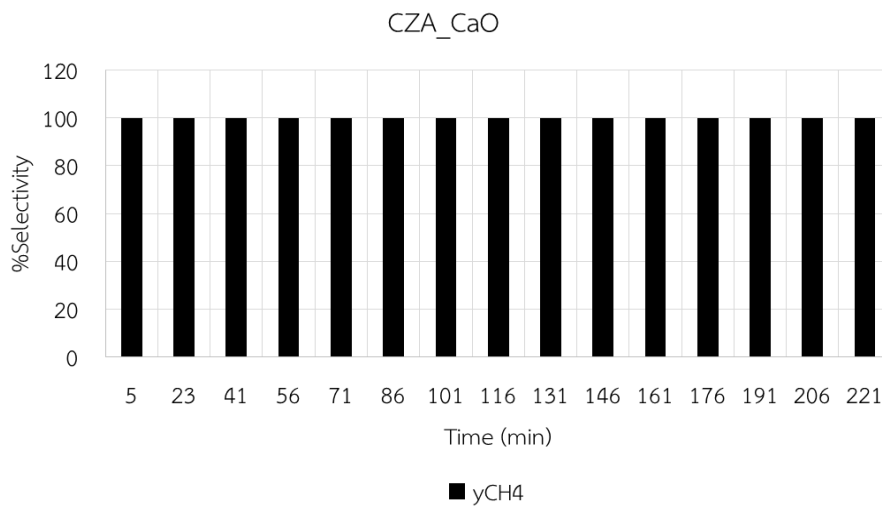
เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันและไม่ผ่านกระบวนการรีดักชันโดยพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวเร่งปฏิกิริยา CZA ซึ่งในตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีสัดส่วนที่ไม่เท่ากันคือ ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA มีน้ำหนัก 1.5 กรัม แต่ในตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน CZA/CaO , CZA/ZrO₂, CZA/Zeolite TypeA และ CZA/HZSM-5 นั้นมีสัดส่วนของ CZA ที่ 1 กรัมเท่านั้น พิจารณาได้จากรูป 3.9 และ 3.10 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันที่มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการดึงน้ำออกจากเมทานอลจะมีค่าที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี CZA เพียงชนิดเดียว จึงเป็นข้อสันนิษฐานได้ว่า การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันนั้นเป็นการเพิ่ม active site ที่ช่วยในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีโอกาสเพิ่มมากขึ้นทั้งในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน โดยในตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันแต่ละชนิดนั้นมีความแรงของกรด-เบสที่ไม่เท่ากันซึ่งจะส่งผลในการส่งเสริมต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยมีลำดับดังต่อไปนี้คือ CZA/HZSM-5 > CZA/Zeolite TypeA > CZA/ZrO₂ > CZA/CaO ยังเห็นได้อีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CZA ที่ผ่านกระบวนการรีดักชันนั้นจะมีค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันเมื่อผ่านกระบวนการรีดักชันนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าต่ำลง จึงทำให้ทราบว่าตัวเร่ง CZA จะมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

เมื่อผ่านกระบวนการรีดักชัน แต่ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันเมื่อผ่านกระบวนการรีดักชันนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพลดลงแต่ทั้งนี้ทั้งนั้นค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการรีดักชันและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านการรีดักชันในแต่ละชนิดมีค่าที่ไม่ต่างกันนัก

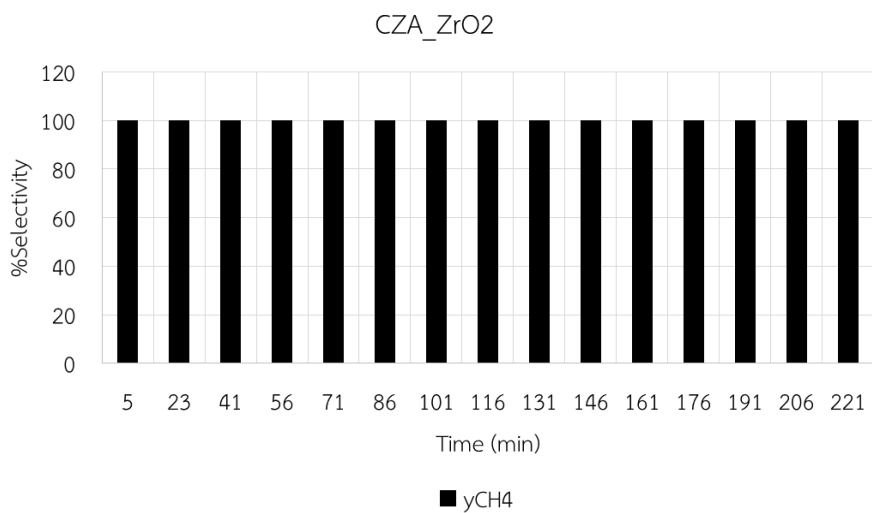
การเปรียบเทียบการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันและไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน



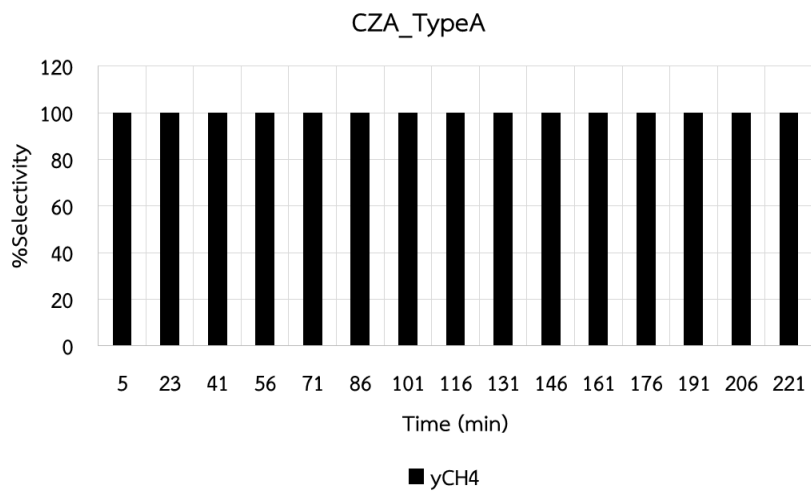
a



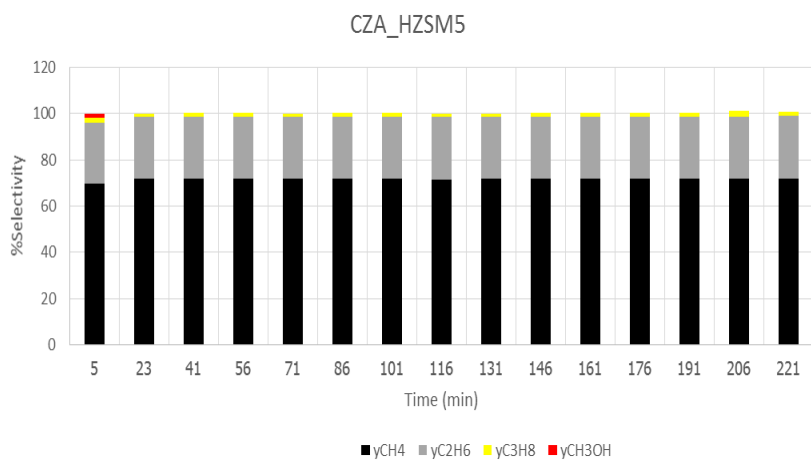
b



c



d

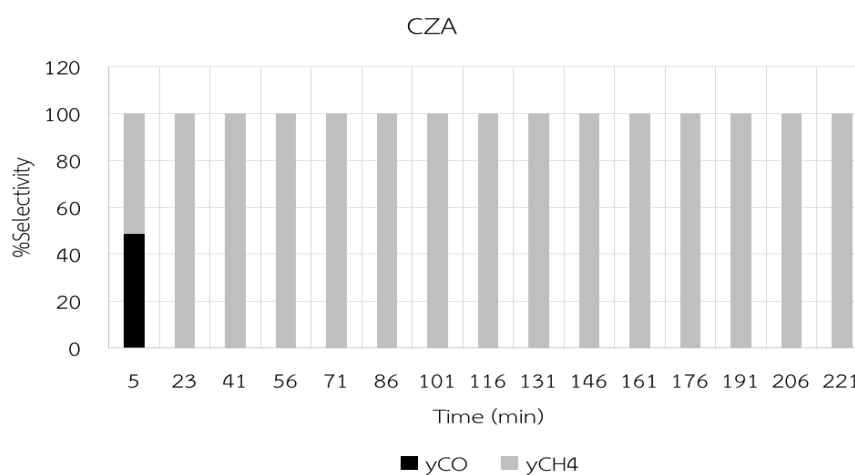


e

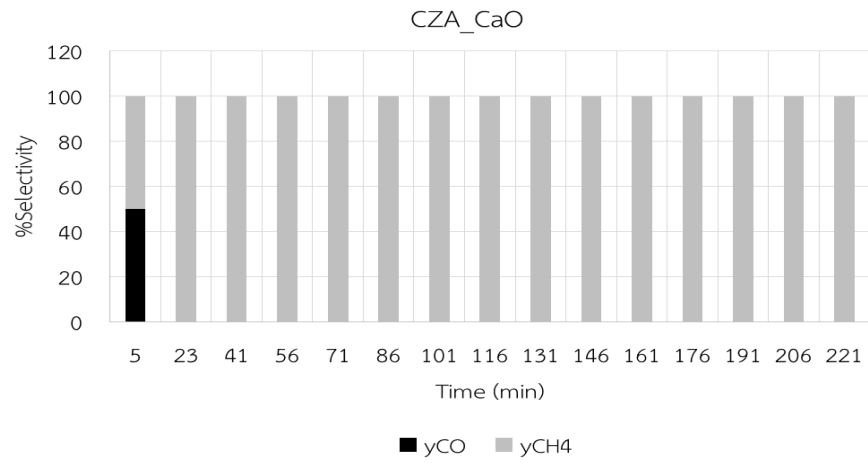
รูปที่ 3.11 ผลการทดสอบค่า %Selectivity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

ผลจากการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันมีดังต่อไปนี้

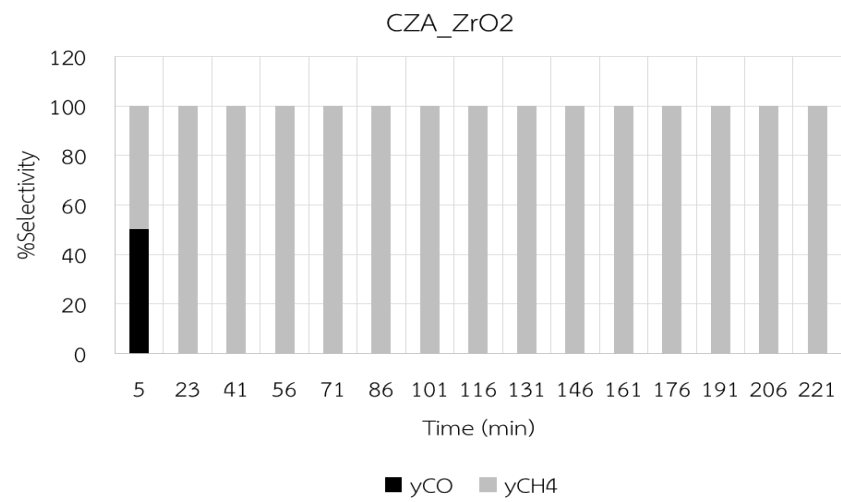
1. การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA พบว่ามีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นด้วย 3 ชนิดด้วยกัน คือ มีเทน อีเทน และโพรเพน
2. การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/CaO พบว่ามีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นด้วย 1 ชนิดด้วยกัน คือ มีเทน
3. การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/ZrO₂ พบว่ามีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นด้วย 1 ชนิดด้วยกัน คือ มีเทน
4. การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/Zeolite Type A พบว่ามีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นด้วย 1 ชนิดด้วยกัน คือ มีเทน
5. การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 พบว่ามีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นด้วย 4 ชนิดด้วยกัน คือ มีเทน อีเทน โพรเพน และเมทานอล



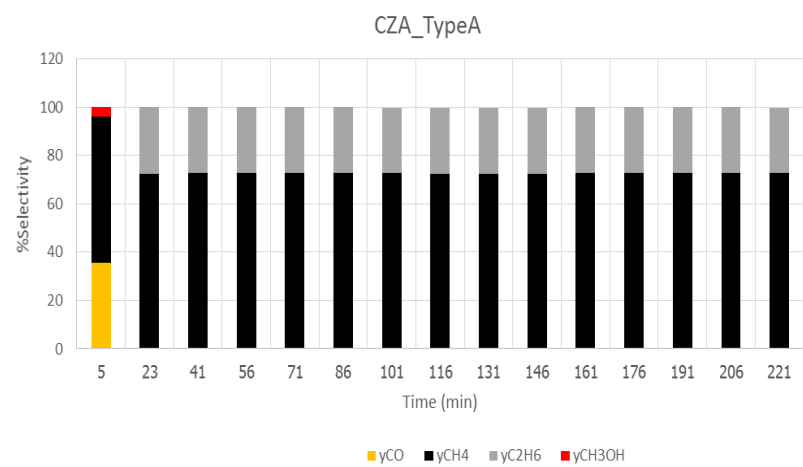
a



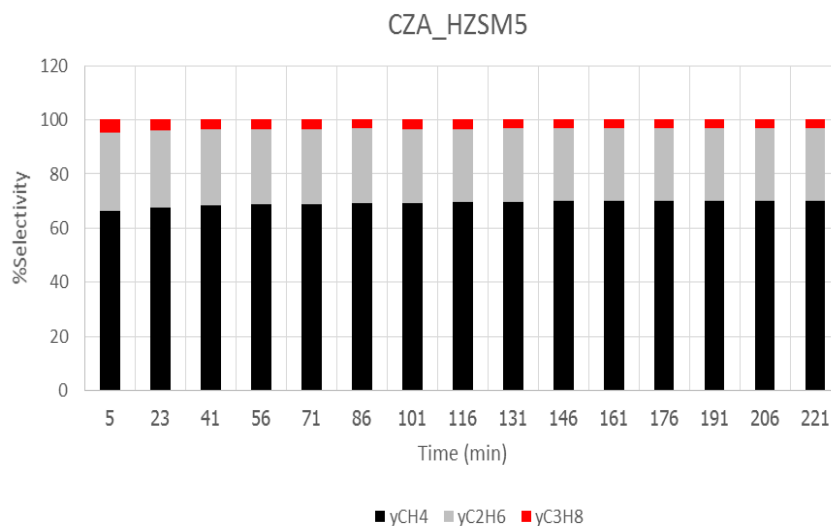
b



c



d



e

รูปที่ 3.12 ผลการทดสอบค่า %Selectivityของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

ผลจากการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชันมีดังต่อไปนี้

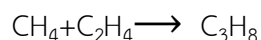
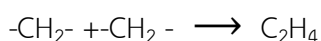
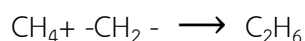
1. การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA พบว่ามีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นด้วย 2 ชนิดด้วยกัน คือ มีเทน และคาร์บอนมอนอกไซด์
2. การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/CaOพบว่ามีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นด้วย 2 ชนิดด้วยกัน คือ มีเทน และคาร์บอนมอนอกไซด์
3. การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/ZrO₂พบว่ามีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นด้วย 2 ชนิดด้วยกัน คือ มีเทน และคาร์บอนมอนอกไซด์
4. การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/Zeolite Type Aพบว่ามีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นด้วย 4 ชนิดด้วยกัน คือ มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์อีเทน และเมทานอล
5. การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 พบว่ามีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นด้วย 3 ชนิดด้วยกัน คือ มีเทน อีเทน และโพรเพน

จากการทดสอบทำปฏิกิริยาเพื่อวัดการเลือกเกิดสารผลิตภัณฑ์ จะเห็นแนวโน้มการเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารมีเทน (CH₄) มากที่สุดจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันดังรูป 3.11 และ 3.12 การผ่าน

กระบวนการรีดักชันทำให้คอปเปอร์ออกไซด์(CuO) เปลี่ยนไปอยู่ในรูปโลหะคอปเปอร์(Cu⁰) ซึ่งเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชัน(CO₂ Hydrogenation) เนื่องจากเพิ่มตำแหน่งการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นCH₄เกิดปฏิกิริยา CO₂Methanationที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง CO₂กับ H₂ ดังสมการดังต่อไปนี้



และตัวเร่งปฏิกิริยา CZA และ CZA/HZSM-5 ที่ผ่านกระบวนการรีดักชันยังเกิดปฏิกิริยา polymerization แบบลูกโซ่เกิดโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีเทน (C₂H₆) และโพรเพน(C₃H₈) ดังสมการต่อไปนี้ ทั้งนี้สันนิษฐานว่ามีตำแหน่งในการดูดซับ CO₂ที่ใกล้กันจึงเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยา polymerization ของ -CH₂- (methyl radical)



ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชันจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยา Reverse water gas shift reaction (RWGS) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น CO ดังสมการ 4.5 [15] แล้วสารบางส่วนยังสามารถเกิดปฏิกิริยา CO Methanation ได้ผลิตภัณฑ์เป็น มีเทน ดังสมการ



ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน CZA/HZSM-5 ทั้งที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชันและที่ผ่านกระบวนการรีดักชันเกิดปฏิกิริยา polymerization แบบลูกโซ่ เกิดโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีเทนและโพรเพนทั้งนี้สันนิษฐานว่า CZA/HZSM-5 มีตำแหน่งในการดูดซับ CO₂ที่ active เพียงพอในการเกิดปฏิกิริยาแม้จะผ่านหรือไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน

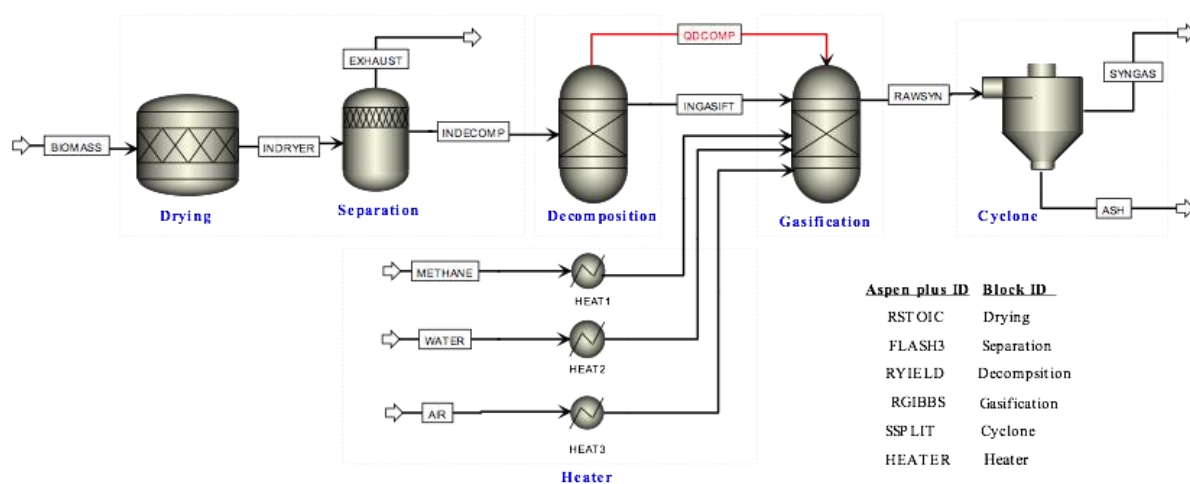
ผลิตภัณฑ์สารอินทรีย์อื่นๆที่เกิดขึ้นคือ เมทานอลเกิดในปริมาณน้อยเกิดจากปฏิกิริยา Methanol synthesis reaction (MS) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง CO₂ กับ H₂ ดังสมการข้างล่าง เกิดบนตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 ที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน และ CZA/Zeolite TypeA ที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน



จากการพิจารณาจากรูปที่ 3.11 และ 3.12 การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันและไม่ผ่านกระบวนการรีดักชันจะเห็นได้ว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเดียวกันจะเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไม่เหมือนกัน สันนิษฐานได้ว่าการผ่านกระบวนการรีดักชันจะทำให้โครงสร้างของพื้นที่ในการเลือกเกิดสารเปลี่ยนไป

การจำลองกระบวนการทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อการใช้ประโยชน์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากกระบวนการ แก๊สซิฟิเคชันของชีวมวล เพื่อใช้สำหรับการผลิต เมทานอล และไดเมทิลอีเทอร์ ได้มีการดำเนินการดังนี้ การจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวลในโปรแกรม aspen plus ที่ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ทำให้แห้ง (Drying) ขั้นตอนที่ 2 หน่วยสลายตัว (Decomposition) หรือหน่วยไพโรไลซิส (Pyrolysis) ขั้นตอนที่ 3 หน่วยแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และขั้นที่ 4 หน่วยแยกก๊าซเชื้อเพลิง (Cyclone) แสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แบบจำลองแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล

เปรียบเทียบความถูกต้องของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ที่ได้จากแบบจำลอง

เพื่อทดสอบความถูกต้องของกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากไม้ยาง โดยนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองกระบวนการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Jayah และคณะ สภาวะในการเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างแบบจำลองและการทดลอง กำหนดให้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันดำเนินการที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ ซึ่งจะเปรียบเทียบผลที่ค่าสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Equivalence ratio, ER) เท่ากับ 0.35 และ 0.38 ผลที่ได้แสดงได้ดังตารางที่ 1 พบว่า องค์ประกอบของแก๊ส

สังเคราะห์ที่ได้ ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน จากการจำลองกระบวนการ
มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากทดลอง

ตาราง 3.4 การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันระหว่างการจำลองกระบวนการและ
ผลการทดลอง

องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ (% mol)	ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง		ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	
	ER (0.35)	ER (0.38)	ER (0.35)	ER (0.38)
H ₂	19.6	20.2	20.86	21.31
CO	17.2	18.3	21.04	20.83
CO ₂	9.90	9.7	10.07	9.70
CH ₄	1.4	1.1	0.09	0.04

ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยการป้อนมีเทนร่วมกับเศษไม้จากต้นยางพารา
และศึกษาชนิดของสารที่ป้อนร่วมในการทำปฏิกิริยาของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ในการศึกษาได้แบ่ง
การศึกษาออกเป็น 4 กรณี โดยพิจารณาสารที่ป้อนเข้ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ดังนี้

- 5) สารชีวมวล ทำปฏิกิริยาร่วมกับ อากาศ (A)
- 6) สารชีวมวล ทำปฏิกิริยาร่วมกับ อากาศและไอน้ำ (A+S)
- 7) สารชีวมวลและมีเทน ทำปฏิกิริยาร่วมกับ อากาศ (A+M)
- 8) สารชีวมวลและมีเทน ทำปฏิกิริยาร่วมกับ อากาศและไอน้ำ (A+S+M)

โดยกำหนดให้ อุณหภูมิของสารที่ป้อนเข้ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเท่ากับ 1000 องศาเซลเซียส ความดัน 1
บาร์และสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง เท่ากับ 0.21 ผลที่ได้แสดงได้ดังตารางที่ 3.5 พบว่า ในกรณี A+S+M ได้
ผลผลิตของไฮโดรเจนในองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์มากที่สุด เนื่องจากการเพิ่มไอน้ำเข้าไปในแก๊สซิฟิเค

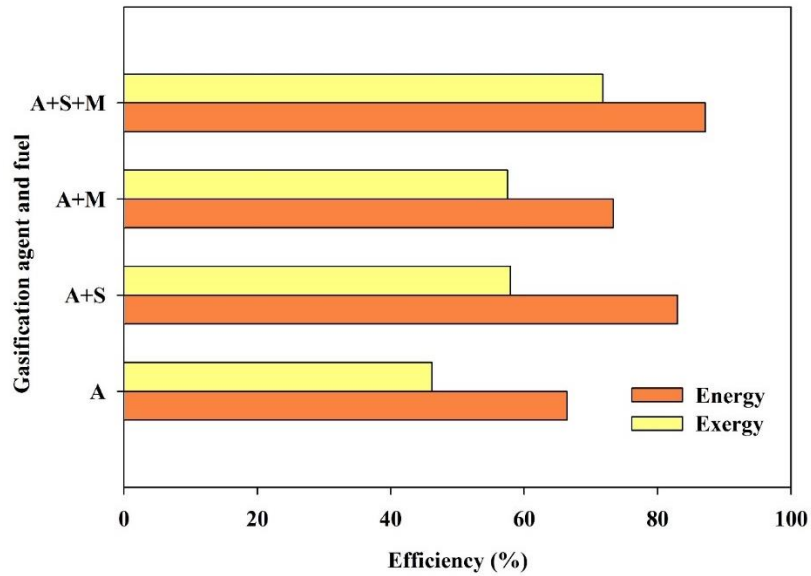
ชั้น จะสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำให้กลายเป็นแก๊ส (water gas shift reaction) มากขึ้น เป็นผลให้สามารถเพิ่มผลผลิตของไฮโดรเจนได้ ในขณะที่การเพิ่มมีเทนร่วมกับชีวมวลเข้าไปในกระบวนการเป็นการเพิ่มสัดส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนในสารป้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้สามารถเพิ่มผลผลิตของไฮโดรเจนเพิ่มยิ่งขึ้น

ตาราง 3.5 แสดงองค์ประกอบแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ในแต่ละกรณี

Cases	Gasification agents	Fuels	Gas composition (mol/kg biomass)			
			H ₂	CO	CO ₂	CH ₄
A	Air	Biomass	23.26	15.48	12.22	1.53
A+S	Air-steam	Biomass	46.82	12.29	24.84	0.78
A+M	Air	Biomass with	49.07	16.54	11.55	10.04
		methane co-feeding				
A+S+M	Air-steam	Biomass with	67.31	14.06	25.46	14.81
		methane co-feeding				

นอกจากนี้ ได้วิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพทางพลังงาน (Energy efficiency) และประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จี (Exergy efficiency) ของทั้ง 4 กรณี ที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.14 จากรูปพบว่าค่าประสิทธิภาพพลังงานของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ป้อน ไอน้ำร่วมกับอากาศ และป้อนมีเทนร่วมกับสารชีวมวล (กรณี A+S+M) มีค่าสูงที่สุด เนื่องจาก ในกรณีนี้ได้ผลผลิตของไฮโดรเจนสูงที่สุด ซึ่งเป็นผลให้ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบสูงสุด สำหรับค่าประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จี บ่งบอกถึงคุณภาพของความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ จากรูปที่ 3.14 พบว่า ประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีของกรณี A+S+M มีค่าสูงที่สุดเช่นกัน

เนื่องจากในกรณี A+S+M ได้อัตราการไหลของแก๊สสังเคราะห์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ และองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์มีไฮโดรเจนสูงที่สุด ซึ่งเป็นผลให้เพิ่มค่าเอ็กเซอร์จีทางเคมี (Chemical exergy) ในแก๊สสังเคราะห์ได้



รูปที่ 3.14 แสดงประสิทธิภาพพลังงาน และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวล โดยใช้สารทำปฏิกิริยาร่วมต่างๆ และกระบวนการที่มีและไม่มีกำมะถันร่วมกับสารชีวมวล

บทที่ 4

สรุปและข้อเสนอแนะงานวิจัย

ผลการทดสอบค่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al₂O₃)

ค่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน ที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 5 , 7 , 9 , 11 มีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 3% แสดงว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมที่สภาวะความเป็นกรดเบสต่างกัน ไม่มีผลต่อการกระจายตัวของตำแหน่งการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน

ผลการทดสอบค่า %Selectivity ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al₂O₃)

ค่า %Selectivity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน ที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 5 , 7 , 9 , 11 มีค่าการเลือกเกิดของมีเทนสูงกว่าเมทานอล เห็นได้จาก ที่อุณหภูมิ 250 °C ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีกิบบส์ในการเกิดเมทานอลมีค่าบวก ขณะที่ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีกิบบส์ในการเกิดมีเทนมีค่าลบ ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ง่าย ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเป็นมีเทนได้คิดเป็น 99% ขณะที่ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเป็นเมทานอล มีเพียงเล็กน้อยคิดเป็น 1% อีกทั้ง การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 5 , 7 , 9 , 11 อาจมีโซเดียม (Na⁺) เหลืออยู่ จึงไปขัดขวางปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอล

ผลการทดสอบค่า Rate of methanol ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al₂O₃)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน ที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 5 จะมีตำแหน่งของการเร่งปฏิกิริยามากที่สุด เนื่องจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่

สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) สูง จะมีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ช่วยให้เกิดการตกตะกอนปริมาณมาก เมื่อทำการล้างตะกอนออกด้วยโซเดียม (Na⁺) เหลืออยู่ปริมาณมาก ส่งผลให้การกระจายของโลหะคอปเปอร์ (Cu⁰) ลดลง นำไปสู่การขัดขวางปฏิกิริยาในการสังเคราะห์เมทานอล อีกทั้ง ความสามารถในการตกตะกอนของคอปเปอร์ (Cu²⁺) ที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 3 ส่วนซิงค์ (Zn²⁺) และอะลูมิเนียม (Al³⁺) ที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 5 ดังนั้นที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 7 , 9 , 11 ความสามารถในการตกตะกอนของสารตั้งต้นก็จะเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ตำแหน่งการเร่งปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลง

ผลการทดสอบค่า Rate of methane ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO/ZnO/Al₂O₃)

ที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) 11 อัตราการเกิดมีเทนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันมีค่ามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน เนื่องจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปริมาณมาก ทำให้เกิดการตกตะกอนในรูปโลหะไฮดรอกไซด์มากขึ้น เมื่อนำไปผ่านกระบวนการรีดิวซ์ส่งผลให้พื้นที่ผิวการดูดซับของโลหะคอปเปอร์ (Cu⁰) เพิ่มขึ้น เกิดการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน (H₂) มากขึ้น อีกทั้ง ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีกิ๊บส์ของมีเทนที่อุณหภูมิ 250 °C มีค่าลบ ปฏิกิริยาจึงสามารถเกิดได้ง่าย ส่งผลให้อัตราการเกิดมีเทนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น

ผลการทดสอบค่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาสองหน้าที่

ค่า %CO₂ Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชันที่ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน CZA, CaO, ZrO₂, HZSM5 และ Zeolite Type-A มีค่าที่ต่างกัน ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 จะมี %CO₂ Conversion สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ ตามด้วย CZA และ CaO, ZrO₂, Zeolite Type A จะมี %CO₂ Conversion ใกล้เคียงกัน

ผลการทดสอบค่า Rate of reaction ของตัวเร่งปฏิกิริยาสองหน้าที่

ค่า Rate of reaction ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันและสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่สองไม่เท่ากัน ซึ่ง CZA

มีน้ำหนัก 1.5 กรัม ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน CZA/CaO, CZA/ZrO₂, CZA/Zeolite Type A และ CZA/HZSM-5 มีปริมาณของ CZA ที่ 1 กรัมเท่านั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันที่ CZA 1 กรัม จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA 1.5 กรัม ทั้งนี้เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่สองที่ใส่เข้าไปทำให้สนับสนุนในการเพิ่มตำแหน่งของการดูดซับ CO₂ เพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบค่า %Selectivity ของตัวเร่งปฏิกิริยาสองหน้าที่

ค่า %Selectivity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดักชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการรีดักชัน ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน CZA, CaO, ZrO₂, HZSM-5 และ Zeolite Type A จะมีค่าการเลือกเกิดของมีเทนสูงกว่าเมทานอล, อีเทนและโพรเพน เนื่องจาก ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดสูงจึงมีการเกิดปฏิกิริยา polymerization แบบลูกโซ่และปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอล

ข้อเสนอแนะ

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้ในการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ ประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตเมทานอล ได้แก่ Cu/ZnO/Al₂O₃ ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่ 2 คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเปลี่ยนเมทานอลให้เป็นไดเมทิลอีเทอร์ ได้แก่ HZSM-5, Zeolite Type A, ZrO₂ และ CaO ซึ่งมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกับ จากผลการทดสอบ ณ ความดันบรรยากาศ ไม่สามารถตรวจสอบเมทานอล แต่พบ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ มีเทน และอีเทน

แผนการทดสอบขั้นต่อไป จึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น Cu/ZrO₂ หรือ CuZn/ZrO₂ มาทดสอบปฏิกิริยาการผลิตเมทานอล และหากตรวจพบว่าความสามารถเร่งปฏิกิริยาการเกิดเมทานอล จะนำไปใช้ผสมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชัน และทดสอบในขั้นตอนต่อไป โดยจะทดสอบที่ความดันสูงกว่าบรรยากาศ

บทที่ 5

ผลผลิต

1. การเข้าร่วมงานประชุมวิชาการ Tiche2016 (The 26th National Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Science Conference, October 26 -28, 2016, Thailand Science Conventional Science Park Center, Bangkok, Thailand. Proceeding Book, เรื่อง ตัวเร่งปฏิกิริยาสองฟังก์ชันสำหรับปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชัน (Bi – functional catalysts for carbon dioxide hydrogenation), ผู้แต่ง วิมลจตุตา ประชุมสาย, ออมรพรรณ สมิตธาพิพัฒน์, นันทิยา จันทรรุ, อาจารย์ปริญญาณ บุญรวม, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สร้อยพัทธา สร้อยสุวรรณ, หน้า 401-406

2. นิสิตปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี เข้าร่วมโครงการวิศวกรรมเคมี จำนวน 2 คน ได้แก่

- 1) นางสาวอมรพรรณ สมิตธาพิพัฒน์
- 2) นางสาวนันทิยา จันทรรุ

3. นิสิตปริญญาตรี หลักสูตรเทคโนโลยีบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเคมี เข้าร่วมโครงการวิศวกรรมเคมี จำนวน 4 คน ได้แก่

- 1) นางสาวพรพหรม เเด่นกระจ่าง
- 2) นางสาวสรณจิตต์ อินแก้ว
- 3) นางสาวจุฑามาศ สาครจันทร์
- 4) นายปริยวัฒน์ ปัทม

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย 2559A10802219 สัญญาเลขที่ 151/2559

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ การผลิตแหล่งพลังงานสะอาดจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สร้อยพัทธา สร้อยสุวรรณ

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ (วัน/เดือน/ปี) 30 กันยายน 2558 ถึงวันที่ (วัน/เดือน/ปี) 30 กันยายน 2559

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี ตั้งแต่วันที่ (วัน/เดือน/ปี) 30 กันยายน 2559

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%)....313,500.....บาท เมื่อวันที่ เดือน ปี.....ตุลาคม 2558.....

งวดที่ 2 (40%)....250,800.....บาท เมื่อวันที่ เดือน ปี.....มีนาคม 2559.....

งวดที่ 3 (10%).....62,700.....บาท เมื่อวันที่ เดือน ปี.....มกราคม 2560.....

รวม.....627,000.....บาท

รายจ่าย

รายจ่าย/รายการ	งบประมาณที่ตั้งไว้ (บาท)	งบประมาณที่ใช้จริง (บาท)	จำนวนเงินคงเหลือ/ เกิน (บาท)
1. ค่าจ้างผู้ช่วยวิจัย	180,000	214,500	-34,500
2. ค่าจ้างทั่วไป	20,000	7,200	12,800
3. ค่าวัสดุ	290,000	280,274	9,726
4. ค่าใช้สอย	47,000	3,940	43,060
5. ค่าครุภัณฑ์	27,300	58,445	-31,145
6. ค่าธรรมเนียมอุดหนุนสถาบัน	62,700	62,700	0
รวม	627,000	627,059	-59

(.....)

ลงนามหัวหน้าโครงการผู้รับทุน

บรรณานุกรม

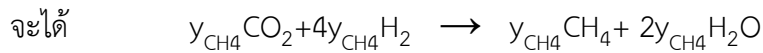
1. R.H. Sokolow, S.W. Pacala, “Direct Synthesis of DMC from scCO₂–Assistance of Nano-Oxides Produced by an scH₂O Device.”, Sci. Am., Volume 295 , pp. 28, 2006.
2. Statistics Finland, “Greenhouse gas emissions in 1990 and 1995–2005, by source category gas”[Online] แหล่งที่มา : http://www.stat.fi/til/khki/2005/khki_20052007-04-19_tau_001_en.html. [มีนาคม 2556]
3. Thomas Engel, Philip Reid, Physical Chemistry, 2nd edition, Pearson Education, Inc., Appendix B, 2010
4. United Nations Framework Convention on Climate Change, Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amounts.
5. วิชญ์ ออมทรัพย์สินและคณะ, “การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ ” [Online] แหล่งที่มา : <http://www.doa.go.th/palm/pdf/performance1/research/crude%20palm%20oil.pdf> [มีนาคม 2556]
6. Ipatieff VN, Monroe GS., “Synthesis of methanol from carbon dioxide and hydrogen over copper-alumina catalysts.”, Mechanism of reaction., J Am Chem Soc, Volume 67, pp. 2168–2171, 1945.
7. L. Xu, Q. Wang, D. Liang, X. Wang, L. Lin, W. Cui, Y. Xu, The promotion of MnO and K₂O to Fe/silicalite-2 catalyst for the production of light alkenes from CO₂ hydrogenation” Applied Catalysis A: General 173 (1998) 19-25
8. Abass A. Olajire, Valorization of greenhouse carbon dioxide emission into value-added products by catalytic processes, Journal of CO₂ Utilization , 3-4 (2013) 74-92
9. X.An, J.L. Li, Y.Z. Zuo, Q. Zhang, W.Z. Li, N. Tsubaki, Fuel 87 (2006) 443

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ก 1 การคำนวณความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา (%CO₂ Conversion)

CO₂ Conversion to CH₄



ดังนั้น
$$\delta = \frac{3y_{\text{CH}_4} - 5y_{\text{CH}_4}}{y_{\text{CH}_4}} = -2$$

ทราบว่า
$$\delta = \frac{n \text{ changed}}{n_{\text{CO}_2 \text{ reacted}}} = \frac{F \text{ changed}}{F_{\text{CO}_2 \text{ reacted}}}$$

$$\therefore F \text{ changed} = \delta (F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CH}_4})$$

จาก $F_T - F_{T0} = F_{\text{changed}}$
 $F_T - F_{T0} = \delta (F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CH}_4})$
 $F_T - F_{T0} = \delta (F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4})$

$$\therefore F_{T0} = F_T - \delta (F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4})$$

ทราบ $y_{\text{CO}_2, i} = \frac{F_{\text{CO}_2, \text{in}}}{F_{T0}}$

$$y_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}}}{n_T} = \frac{F_{\text{CH}_4}}{F_T}$$

ดังนั้น $x_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CH}_4}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}}$

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}}$$

$$x_{\text{CO}_2} = + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} / F_{T0}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}} / F_{T0}}$$

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} / F_{\text{T0}}}{y_{\text{CO}_2, i}}$$

$$x_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}{F_{\text{T0}}}$$

$$x_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}{F_{\text{T}} - \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4})}$$

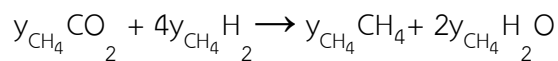
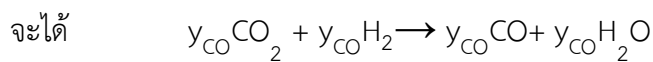
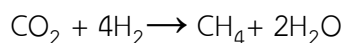
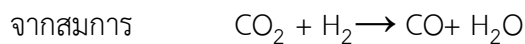
$$x_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}) / F_{\text{T}}}{[F_{\text{T}} - \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4})] / F_{\text{T}}}$$

$$x_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{y_{\text{CH}_4}}{1 - \delta \left(\frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}{F_{\text{T}}} \right)}$$

$$x_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{y_{\text{CH}_4}}{1 - \delta(y_{\text{CH}_4})}$$

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{y_{\text{CH}_4}}{y_{\text{CO}_2, i} [1 - \delta(y_{\text{CH}_4})]}$$

CO₂ Conversion to CH₄, CO



ดังนั้น
$$\delta = \frac{(2y_{\text{CO}} + 3y_{\text{CH}_4}) - (2y_{\text{CO}} + 5y_{\text{CH}_4})}{y_{\text{CO}} + y_{\text{CH}_4}} = \frac{-2y_{\text{CH}_4}}{y_{\text{CO}} + y_{\text{CH}_4}}$$

ทราบว่า
$$\delta = \frac{n \text{ changed}}{n_{\text{CO}_2 \text{ reacted}}} = \frac{F \text{ changed}}{F_{\text{CO}_2 \text{ reacted}}}$$

$$\therefore F \text{ changed} = \delta(F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CO} + \text{CH}_4})$$

จาก $F_T - F_{T0} = F_{\text{changed}}$
 $F_T - F_{T0} = \delta(F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CO+CH}_4})$
 $F_T - F_{T0} = \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4})$
 $\therefore F_{T0} = F_T - \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4})$

ทราบ $y_{\text{CO}_2, i} = \frac{F_{\text{CO}_2, \text{in}}}{F_{T0}}$

$$y_{\text{CO}} = \frac{n_{\text{CO}}}{n_T} = \frac{F_{\text{CO}}}{F_T}$$

$$y_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CH}_4}}{n_T} = \frac{F_{\text{CH}_4}}{F_T}$$

ดังนั้น

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CO + CH}_4}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}} + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}}/F_{T0}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}/F_{T0}} + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}/F_{T0}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}/F_{T0}}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}}/F_{T0} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}/F_{T0}}{y_{\text{CO}_2, i}}$$

$$X_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}}}{F_{T0}} + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}{F_{T0}}$$

$$X_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}}}{F_T \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4})} + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}{F_T \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4})}$$

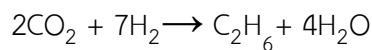
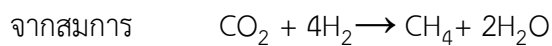
$$X_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4})/F_T}{[F_T \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4})]/F_T}$$

$$x_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{y_{\text{CO}} + y_{\text{CH}_4}}{1 - \delta \frac{(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4})}{F_T}}$$

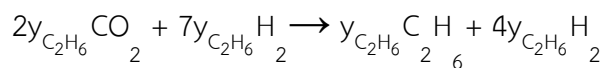
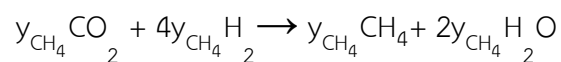
$$x_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{y_{\text{CO}} + y_{\text{CH}_4}}{1 - \delta(y_{\text{CO}} + y_{\text{CH}_4})}$$

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{y_{\text{CO}} + y_{\text{CH}_4}}{y_{\text{CO}_2, i} [1 - \delta(y_{\text{CO}} + y_{\text{CH}_4})]}$$

CO₂ Conversion to CH₄ and C₂H₆



จะได้



ดังนั้น $\delta = \frac{(3y_{\text{CH}_4} + 5y_{\text{C}_2\text{H}_6}) - (5y_{\text{CH}_4} + 9y_{\text{C}_2\text{H}_6})}{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6}} = \frac{(-2y_{\text{CH}_4} - 4y_{\text{C}_2\text{H}_6})}{(y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6})} = \frac{-2(y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6})}{(y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6})} = -2$

ทราบว่า $\delta = \frac{n \text{ changed}}{n_{\text{CO}_2 \text{ reacted}}} = \frac{F \text{ changed}}{F_{\text{CO}_2 \text{ reacted}}}$

$$\therefore F \text{ changed} = \delta(F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6})$$

จาก $F_T - F_{T0} = F_{\text{changed}}$

$$F_T - F_{T0} = \delta(F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6})$$

$$F_T - F_{T0} = \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6})$$

$$\therefore F_{\text{CO}_2} = F_T - \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6})$$

ทราบ $y_{\text{CO}_2, i} = \frac{F_{\text{CO}_2, \text{in}}}{F_{T0}}$

$$y_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CH}_4}}{n_T} = \frac{F_{\text{CH}_4}}{F_T}$$

ตั้งขึ้น

$$y_{C_2H_6} = \frac{n_{C_2H_6}}{n_T} = \frac{F_{C_2H_6}}{F_T}$$

$$x_{CO_2} = \frac{F_{CO_2 \text{ reacted to } CH_4 + C_2H_6}}{F_{CO_2 \text{ input}}}$$

$$x_{CO_2} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv C_2H_6}}{F_{CO_2 \text{ input}}}$$

$$x_{CO_2} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4}}{F_{CO_2 \text{ input}}} + \frac{F_{CO_2 \equiv C_2H_6}}{F_{CO_2 \text{ input}}}$$

$$x_{CO_2} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4} / F_{TO}}{F_{CO_2 \text{ input}} / F_{TO}} + \frac{F_{CO_2 \equiv C_2H_6} / F_{TO}}{F_{CO_2 \text{ input}} / F_{TO}}$$

$$x_{CO_2} = \frac{(F_{CO_2 \equiv CH_4} / F_{TO}) + (F_{CO_2 \equiv C_2H_6} / F_{TO})}{y_{CO_2, i}}$$

$$x_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4}}{F_{TO}} + \frac{F_{CO_2 \equiv C_2H_6}}{F_{TO}}$$

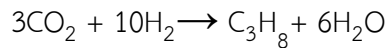
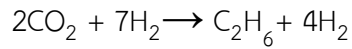
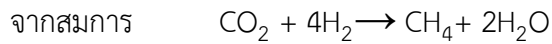
$$x_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4}}{F_T \cdot \delta (F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv C_2H_6})} + \frac{F_{CO_2 \equiv C_2H_6}}{F_T \cdot \delta (F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv C_2H_6})}$$

$$x_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{(F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv C_2H_6}) / F_T}{[F_T \cdot \delta (F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv C_2H_6})] / F_T}$$

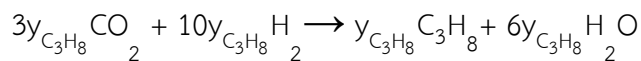
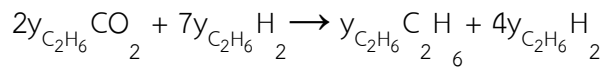
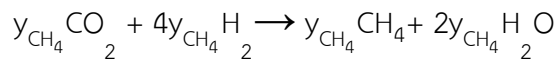
$$x_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6}}{1 - \delta \left(\frac{F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv C_2H_6}}{F_T} \right)}$$

$$x_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6}}{1 - \delta (y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6})}$$

$$x_{CO_2} = \frac{y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6}}{y_{CO_2, i} [1 - \delta (y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6})]}$$

CO₂ Conversion to CH₄, C₂H₆ and C₃H₈

จะได้



ดังนั้น

$$\delta = \frac{(3y_{\text{CH}_4} + 5y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 7y_{\text{C}_3\text{H}_8}) - (5y_{\text{CH}_4} + 9y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 13y_{\text{C}_3\text{H}_8})}{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8}}$$

$$\delta = \frac{\begin{pmatrix} -2y_{\text{CH}_4} & -4y_{\text{C}_2\text{H}_6} & -6y_{\text{C}_3\text{H}_8} \end{pmatrix}}{(y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8})} = \frac{-2(y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8})}{(y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8})} = -2$$

ทราบว่า

$$\delta = \frac{n_{\text{changed}}}{n_{\text{CO}_2 \text{ reacted}}} = \frac{F_{\text{changed}}}{F_{\text{CO}_2 \text{ reacted}}}$$

$$\therefore F_{\text{changed}} = \delta(F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8})$$

จาก

$$F_T - F_{T0} = F_{\text{changed}}$$

$$F_T - F_{T0} = \delta(F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8})$$

$$F_T - F_{T0} = \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8})$$

$$\therefore F_{T0} = F_T - \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8})$$

ทราบ

$$y_{\text{CO}_2, i} = \frac{F_{\text{CO}_2, \text{in}}}{F_{T0}}$$

$$y_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CH}_4}}{n_T} = \frac{F_{\text{CH}_4}}{F_T}$$

$$y_{\text{C}_2\text{H}_6} = \frac{n_{\text{C}_2\text{H}_6}}{n_T} = \frac{F_{\text{C}_2\text{H}_6}}{F_T}$$

ดังนั้น

$$y_{C_3H_8} = \frac{n_{C_3H_8}}{n_T} = \frac{F_{C_3H_8}}{F_T}$$

$$X_{CO_2} = \frac{F_{CO_2 \text{ reacted to } CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8}}{F_{CO_2 \text{ input}}}$$

$$X_{CO_2} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv C_2H_6} + F_{CO_2 \equiv C_3H_8}}{F_{CO_2 \text{ input}}}$$

$$X_{CO_2} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4}}{F_{CO_2 \text{ input}}} + \frac{F_{CO_2 \equiv C_2H_6}}{F_{CO_2 \text{ input}}} + \frac{F_{CO_2 \equiv C_3H_8}}{F_{CO_2 \text{ input}}}$$

$$X_{CO_2} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4}/F_{TO}}{F_{CO_2 \text{ input}}/F_{TO}} + \frac{F_{CO_2 \equiv C_2H_6}/F_{TO}}{F_{CO_2 \text{ input}}/F_{TO}} + \frac{F_{CO_2 \equiv C_3H_8}/F_{TO}}{F_{CO_2 \text{ input}}/F_{TO}}$$

$$X_{CO_2} = \frac{(F_{CO_2 \equiv CH_4}/F_{TO}) + (F_{CO_2 \equiv C_2H_6}/F_{TO}) + (F_{CO_2 \equiv C_3H_8}/F_{TO})}{y_{CO_2, i}}$$

$$X_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4}}{F_{TO}} + \frac{F_{CO_2 \equiv C_2H_6}}{F_{TO}} + \frac{F_{CO_2 \equiv C_3H_8}}{F_{TO}}$$

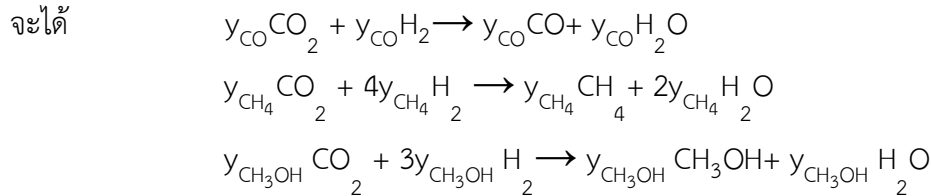
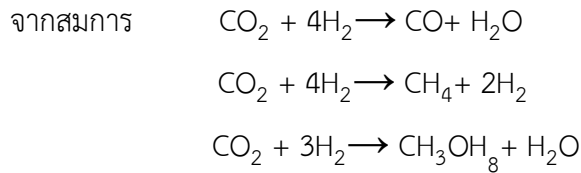
$$X_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4}}{F_T \delta(F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv C_2H_6} + F_{CO_2 \equiv C_3H_8})} + \frac{F_{CO_2 \equiv C_2H_6}}{F_T \delta(F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv C_2H_6} + F_{CO_2 \equiv C_3H_8})} + \frac{F_{CO_2 \equiv C_3H_8}}{F_T \delta(F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv C_2H_6} + F_{CO_2 \equiv C_3H_8})}$$

$$X_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{(F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv C_2H_6} + F_{CO_2 \equiv C_3H_8})/F_T}{[F_T \delta(F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv C_2H_6} + F_{CO_2 \equiv C_3H_8})]/F_T}$$

$$X_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6} + 3y_{C_3H_8}}{1 - \delta \left(\frac{F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv C_2H_6} + F_{CO_2 \equiv C_3H_8}}{F_T} \right)}$$

$$X_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6} + 3y_{C_3H_8}}{1 - \delta(y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6} + 3y_{C_3H_8})}$$

$$X_{CO_2} = \frac{y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6} + 3y_{C_3H_8}}{y_{CO_2, i} [1 - \delta(y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6} + 3y_{C_3H_8})]}$$

CO₂ Conversion to CO, CH₄ and CH₃OH

ตั้งขึ้น
$$\delta = \frac{(2y_{\text{CO}} + 3y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{CH}_3\text{OH}}) - (2y_{\text{CO}} + 5y_{\text{CH}_4} + 4y_{\text{CH}_3\text{OH}})}{y_{\text{CO}} + y_{\text{CH}_4} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}} = \frac{(-2y_{\text{CH}_4} - 2y_{\text{CH}_3\text{OH}})}{y_{\text{CO}} + y_{\text{CH}_4} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}}$$

$$\delta = \frac{-2(y_{\text{CH}_4} + y_{\text{CH}_3\text{OH}})}{y_{\text{CO}} + y_{\text{CH}_4} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}}$$

ทราบว่า
$$\delta = \frac{n \text{ changed}}{n_{\text{CO}_2 \text{ reacted}}} = \frac{F \text{ changed}}{F_{\text{CO}_2 \text{ reacted}}}$$

$$\therefore F \text{ changed} = \delta(F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CO+CH}_4\text{+CH}_3\text{OH}})$$

จาก $F_T - F_{T0} = F_{\text{changed}}$
 $F_T - F_{T0} = \delta(F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CO+CH}_4\text{+CH}_3\text{OH}})$
 $F_T - F_{T0} = \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}})$
 $\therefore F_{T0} = F_T - \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CO}} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}})$

ทราบ $y_{\text{CO}_2, i} = \frac{F_{\text{CO}_2, \text{in}}}{F_{T0}}$

$$y_{\text{CO}} = \frac{n_{\text{CO}}}{n_T} = \frac{F_{\text{CO}}}{F_T}$$

$$y_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CH}_4}}{n_T} = \frac{F_{\text{CH}_4}}{F_T}$$

$$y_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{n_{\text{CH}_3\text{OH}}}{n_T} = \frac{F_{\text{CH}_3\text{OH}}}{F_T}$$

ดังนั้น

$$X_{CO_2} = \frac{F_{CO_2 \text{ reacted to } CO+CH_4+CH_3OH}}{F_{CO_2 \text{ input}}}$$

$$X_{CO_2} = \frac{F_{CO_2 \equiv CO} + F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv CH_3OH}}{F_{CO_2 \text{ input}}}$$

$$X_{CO_2} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4}}{F_{CO_2 \text{ input}}} + \frac{F_{CO_2 \equiv CO}}{F_{CO_2 \text{ input}}} + \frac{F_{CO_2 \equiv CH_3OH}}{F_{CO_2 \text{ input}}}$$

$$X_{CO_2} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4}/F_{TO}}{F_{CO_2 \text{ input}}/F_{TO}} + \frac{F_{CO_2 \equiv CO}/F_{TO}}{F_{CO_2 \text{ input}}/F_{TO}} + \frac{F_{CO_2 \equiv CH_3OH}/F_{TO}}{F_{CO_2 \text{ input}}/F_{TO}}$$

$$X_{CO_2} = \frac{(F_{CO_2 \equiv CH_4}/F_{TO}) + (F_{CO_2 \equiv CO}/F_{TO}) + (F_{CO_2 \equiv CH_3OH}/F_{TO})}{y_{CO_2, i}}$$

$$X_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4}}{F_{TO}} + \frac{F_{CO_2 \equiv CO}}{F_{TO}} + \frac{F_{CO_2 \equiv CH_3OH}}{F_{TO}}$$

$$X_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv CO} + F_{CO_2 \equiv CH_3OH}}{F_T \cdot \delta(F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv CO} + F_{CO_2 \equiv CH_3OH})}$$

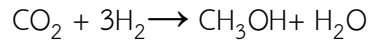
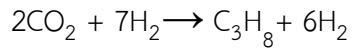
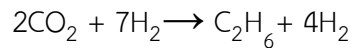
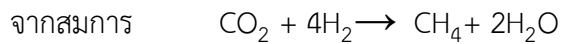
$$+ \frac{F_{CO_2 \equiv CO}}{F_T \cdot \delta(F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv CO} + F_{CO_2 \equiv CH_3OH})} + \frac{F_{CO_2 \equiv CH_3OH}}{F_T \cdot \delta(F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv CO} + F_{CO_2 \equiv CH_3OH})}$$

$$X_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{(F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv CO} + F_{CO_2 \equiv CH_3OH})/F_T}{[F_T \cdot \delta(F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv CO} + F_{CO_2 \equiv CH_3OH})]/F_T}$$

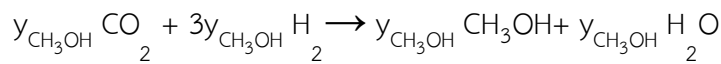
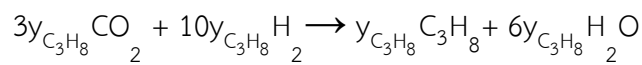
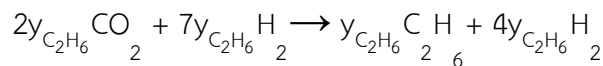
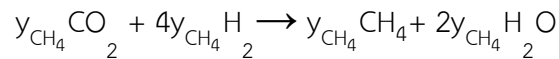
$$X_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{y_{CH_4} + y_{CO} + y_{CH_3OH}}{1 - \delta \left(\frac{F_{CO_2 \equiv CH_4} + F_{CO_2 \equiv CO} + F_{CO_2 \equiv CH_3OH}}{F_T} \right)}$$

$$X_{CO_2} \cdot y_{CO_2, i} = \frac{y_{CH_4} + y_{CO} + y_{CH_3OH}}{1 - \delta(y_{CH_4} + y_{CO} + y_{CH_3OH})}$$

$$X_{CO_2} = \frac{y_{CH_4} + y_{CO} + y_{CH_3OH}}{y_{CO_2, i} [1 - \delta(y_{CH_4} + y_{CO} + y_{CH_3OH})]}$$

CO₂ Conversion to CH₄, C₂H₆, C₃H₈ and CH₃OH

จะได้



ดังนั้น

$$\delta = \frac{(3y_{\text{CH}_4} + 5y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 7y_{\text{C}_3\text{H}_8} + 2y_{\text{CH}_3\text{OH}}) - (5y_{\text{CH}_4} + 9y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 13y_{\text{C}_3\text{H}_8} + 4y_{\text{CH}_3\text{OH}})}{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}}$$

$$\delta = \frac{(-2y_{\text{CH}_4} - 4y_{\text{C}_2\text{H}_6} - 6y_{\text{C}_3\text{H}_8} - 2y_{\text{CH}_3\text{OH}})}{(y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8} + y_{\text{CH}_3\text{OH}})}$$

$$\delta = \frac{-2(y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8} + y_{\text{CH}_3\text{OH}})}{(y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8} + y_{\text{CH}_3\text{OH}})} = -2$$

ทราบว่า

$$\delta = \frac{n \text{ changed}}{n_{\text{CO}_2 \text{ reacted}}} = \frac{F \text{ changed}}{F_{\text{CO}_2 \text{ reacted}}}$$

$$\therefore F \text{ changed} = \delta (F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8 + \text{CH}_3\text{OH}})$$

จาก

$$F_T - F_{T0} = F_{\text{changed}}$$

$$F_T - F_{T0} = \delta (F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8 + \text{CH}_3\text{OH}})$$

$$F_T - F_{T0} = \delta (F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}})$$

$$\therefore F_{T0} = F_T - \delta (F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}})$$

ทราบ

$$y_{\text{CO}_2, i} = \frac{F_{\text{CO}_2, \text{in}}}{F_{T0}}$$

$$y_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CH}_4}}{n_T} = \frac{F_{\text{CH}_4}}{F_T}$$

$$y_{\text{C}_2\text{H}_6} = \frac{n_{\text{C}_2\text{H}_6}}{n_T} = \frac{F_{\text{C}_2\text{H}_6}}{F_T}$$

$$y_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{n_{\text{C}_3\text{H}_8}}{n_T} = \frac{F_{\text{C}_3\text{H}_8}}{F_T}$$

$$y_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{n_{\text{CH}_3\text{OH}}}{n_T} = \frac{F_{\text{CH}_3\text{OH}}}{F_T}$$

ตั้งขึ้น

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CO}_2 \text{ reacted to CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8 + \text{CH}_3\text{OH}}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}} + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}} + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}} + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}}}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} / F_{\text{TO}}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}} / F_{\text{TO}}} + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} / F_{\text{TO}}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}} / F_{\text{TO}}} + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8} / F_{\text{TO}}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}} / F_{\text{TO}}} + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}} / F_{\text{TO}}}{F_{\text{CO}_2 \text{ input}} / F_{\text{TO}}}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} / F_{\text{TO}}) + (F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} / F_{\text{TO}}) + (F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8} / F_{\text{TO}}) + (F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}} / F_{\text{TO}})}{y_{\text{CO}_2, i}}$$

$$X_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}{F_{\text{TO}}} + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6}}{F_{\text{TO}}} + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8}}{F_{\text{TO}}} + \frac{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}}}{F_{\text{TO}}}$$

$$X_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{F_T - \delta \left(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}} \right)}{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6}}$$

$$+ \frac{F_T - \delta \left(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}} \right)}{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8}}$$

$$+ \frac{F_T - \delta \left(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}} \right)}{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}}}$$

$$+ \frac{F_T - \delta \left(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}} \right)}{F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}}}$$

$$x_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}}) / F_T}{[F_T - \delta(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}})] / F_T}$$

$$x_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}}{1 - \delta \frac{(F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_2\text{H}_6} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{C}_3\text{H}_8} + F_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_3\text{OH}})}{F_T}}$$

$$x_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2, i} = \frac{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}}{1 - \delta(y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8} + y_{\text{CH}_3\text{OH}})}$$

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}}{y_{\text{CO}_2, i} [1 - \delta(y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8} + y_{\text{CH}_3\text{OH}})]}$$

ก 2 การคำนวณอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ (% Selectivity)

CO₂ Conversion to CH₄



จะได้

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}{n_{\text{CO}_2 \equiv \text{product}}}$$

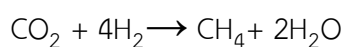
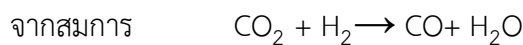
$$S_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}{n_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}$$

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{(n_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}) / n_T}{(n_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}) / n_T}$$

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{y_{\text{CH}_4}}{y_{\text{CH}_4}} = 1$$

$$\%S_{\text{CH}_4} = 100\%$$

CO₂ Conversion to CH₄, CO



จะได้

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}_2 \equiv \text{CH}_4}}{n_{\text{CO}_2 \equiv \text{product}}}$$

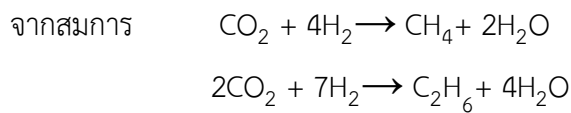
$$S_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4}}{n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4} + n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO}}}$$

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{(n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4})/n_T}{(n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4} + n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO}})/n_T}$$

$$\%S_{\text{CH}_4} = \frac{y_{\text{CH}_4}}{y_{\text{CH}_4} + y_{\text{CO}}} \times 100$$

$$\%S_{\text{CO}} = \frac{y_{\text{CO}}}{y_{\text{CH}_4} + y_{\text{CO}}} \times 100$$

CO₂ Conversion to CH₄ and C₂H₆



จะได้

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4}}{n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{product}}}$$

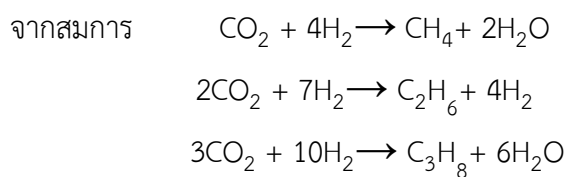
$$S_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4}}{n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4} + n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_6}}$$

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{(n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4})/n_T}{(n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4} + n_{\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_6})/n_T}$$

$$\%S_{\text{CH}_4} = \frac{y_{\text{CH}_4}}{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6}} \times 100$$

$$\%S_{\text{C}_2\text{H}_6} = \frac{2y_{\text{C}_2\text{H}_6}}{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6}} \times 100$$

CO₂ Conversion to CH₄, C₂H₆ and C₃H₈



จะได้

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4}}{n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{product}}}$$

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4}}{n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_3\text{H}_8}}$$

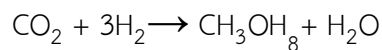
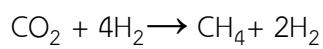
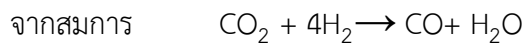
$$S_{\text{CH}_4} = \frac{(n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4})/n_T}{(n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_3\text{H}_8})/n_T}$$

$$\%S_{\text{CH}_4} = \frac{y_{\text{CH}_4}}{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8}} \times 100$$

$$\%S_{\text{C}_2\text{H}_6} = \frac{2y_{\text{C}_2\text{H}_6}}{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8}} \times 100$$

$$\%S_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{3y_{\text{C}_3\text{H}_8}}{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8}} \times 100$$

CO₂ Conversion to CO, CH₄ and CH₃OH



จะได้

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4}}{n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{product}}}$$

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4}}{n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}}}$$

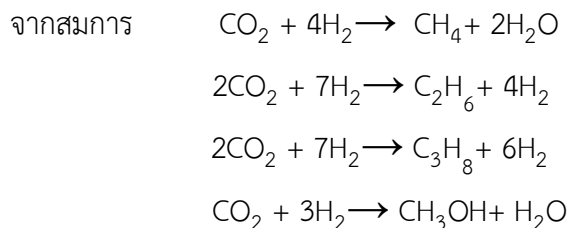
$$S_{\text{CH}_4} = \frac{(n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4})/n_T}{(n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}})/n_T}$$

$$\%S_{\text{CH}_4} = \frac{y_{\text{CH}_4}}{y_{\text{CH}_4} + y_{\text{CO}} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}} \times 100$$

$$\%S_{\text{CO}} = \frac{y_{\text{CO}}}{y_{\text{CH}_4} + y_{\text{CO}} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}} \times 100$$

$$\%S_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{y_{\text{CH}_3\text{OH}}}{y_{\text{CH}_4} + y_{\text{CO}} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}} \times 100$$

CO₂ Conversion to CH₄, C₂H₆, C₃H₈ and CH₃OH



จะได้

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4}}{n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{product}}}$$

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4}}{n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_3\text{H}_8} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}}}$$

$$S_{\text{CH}_4} = \frac{(n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4})/n_T}{(n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_3\text{H}_8} + n_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}})/n_T}$$

$$\%S_{\text{CH}_4} = \frac{y_{\text{CH}_4}}{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}} \times 100$$

$$\%S_{\text{C}_2\text{H}_6} = \frac{2 \times y_{\text{C}_2\text{H}_6}}{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}} \times 100$$

$$\%S_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{3 \times y_{\text{C}_3\text{H}_8}}{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}} \times 100$$

$$\%S_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{y_{\text{CH}_3\text{OH}}}{y_{\text{CH}_4} + 2y_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3y_{\text{C}_3\text{H}_8} + y_{\text{CH}_3\text{OH}}} \times 100$$

ก 3 การคำนวณอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ (Rate of reaction)

$$\text{Rate of reaction} \left(\frac{\text{mmol}}{\text{h.kg cat}} \right) = \frac{\left(\frac{\% \text{CO}_2 \text{ Conversion}}{100} \right) \times \text{CO}_2 \text{ input}}{W}$$

Total mole input:

$$n = \frac{PV}{RT}$$

กำหนดให้ P = 1 atm T = 303 K R = 0.08206 L•atm/mol.K

อัตราการไหลรวม = 60 mL/min

อัตราการไหลของไนโตรเจน = 12 mL/min

อัตราการไหลของไฮโดรเจน = 36 mL/min

อัตราการไหลของแก๊สผสม(CO₂ : H₂ ที่อัตราส่วน 1 : 3) = 0.012 mL/min

จะได้

$$n = \frac{1 \text{ atm} \times (60) \text{ mL/min} \times 1000}{0.08206 \frac{\text{L.atm}}{\text{mole.K}} \times 303 \text{ K} \times 1000}$$

$$n \text{ (total input)} = 0.00241318 \text{ mol/min}$$

$$= 2.41318463 \text{ mmol/min}$$

n (CO₂ input) :

ดังนั้น

$$\text{CO}_2 \text{ input} = \frac{0.012 \text{ L/min}}{0.06 \text{ L/min}} \times n \text{ (mol/min)}$$

$$= \frac{0.012 \text{ L/min}}{0.06 \text{ L/min}} \times 2.41318463 \text{ mmol/min}$$

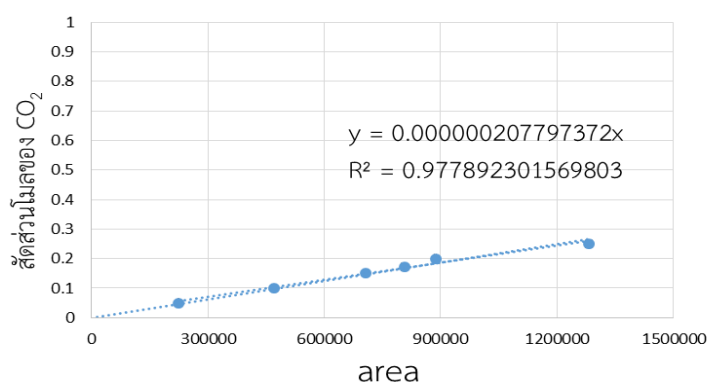
ภาคผนวก ข

การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

การสอบเทียบสารตั้งต้นทำโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมแก๊สไฮโดรเจน ($\text{CO}_2:\text{H}_2$ ที่อัตราส่วน 1:3) และแก๊สไนโตรเจน เพื่อให้ได้สัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) ต่างกัน ผ่านเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) ซึ่งมีการปรับสภาวะอุณหภูมิคอลัมน์ 50°C และเพิ่มอุณหภูมิจนกระทั่ง 110°C ที่อุณหภูมิ injector 150°C ทำการวัดพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำพื้นที่ใต้กราฟและสัดส่วนโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปเขียนกราฟสอบเทียบ

ตาราง ข 1 ข้อมูลระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมแก๊สไฮโดรเจน($\text{CO}_2 : \text{H}_2$ ที่อัตราส่วน 1 : 3) และแก๊สไนโตรเจน

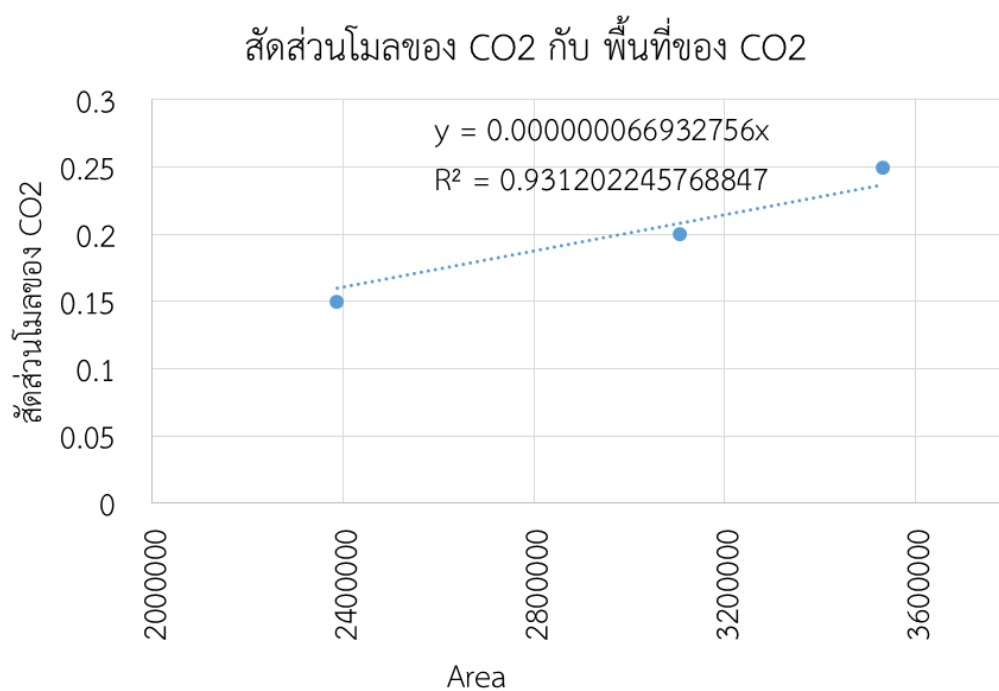
อัตราการไหล $\text{CO}_2 : \text{H}_2$ (ml/min)	อัตราการ ไหล N_2 (ml/min)	อัตราการ ไหล CO_2 (ml/min)	อัตราการไหล รวม (ml/min)	สัดส่วนโมล CO_2	สัดส่วน โมล N_2	พื้นที่ใต้กราฟ CO_2
30	0	7.5	30	0.25	0	1282444
24	6	6	30	0.20	0.2	886636.2
18	12	4.5	30	0.15	0.4	706414.8
12	18	3	30	0.10	0.6	470392.6
6	24	1.5	30	0.05	0.8	224905.6

สัดส่วนโมลของ CO_2 กับ พื้นที่ของ CO_2 

รูปที่ ข 1.1 กราฟสอบเทียบ(Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2)

ตาราง ข 2 ข้อมูลระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมแก๊สไฮโดรเจน($\text{CO}_2 : \text{H}_2$ ที่อัตราส่วน 1 : 3) และแก๊สไนโตรเจน

อัตราการไหล CO ₂ : H ₂ (ml/min)	อัตราการไหล N ₂ (ml/min)	อัตราการไหล CO ₂ (ml/min)	อัตราการไหลรวม (ml/min)	สัดส่วนโมล CO ₂	สัดส่วนโมล N ₂	พื้นที่ใต้กราฟ CO ₂
60	0	15	60	0.25	0	3531852.67
48	12	12	60	0.20	0.2	3106695.3
36	24	9	60	0.15	0.4	2387363



รูปที่ ข 1.2 กราฟสอบเทียบ(Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์(CO₂)

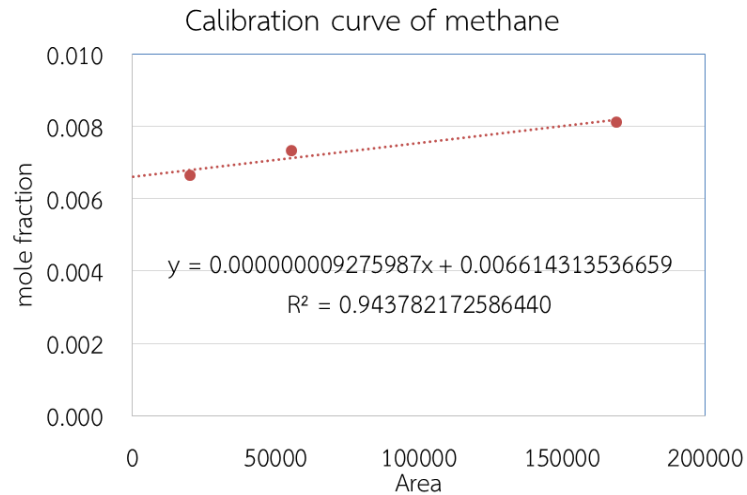
การสอบเทียบผลิตภัณฑ์ ทำโดยฉีดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนผ่านเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี(GC) ซึ่งมีการปรับสภาวะอุณหภูมิคอลัมน์ 50 °C และอุณหภูมิ injector 150 °C ทำการวัดพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำพื้นที่ใต้กราฟและสัดส่วนโมลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไปเขียนกราฟสอบเทียบ

ตาราง ข 3 ข้อมูลระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของมีเทน(CH₄), อีเทน(C₂H₆) และ โพรเพน (C₃H₈)

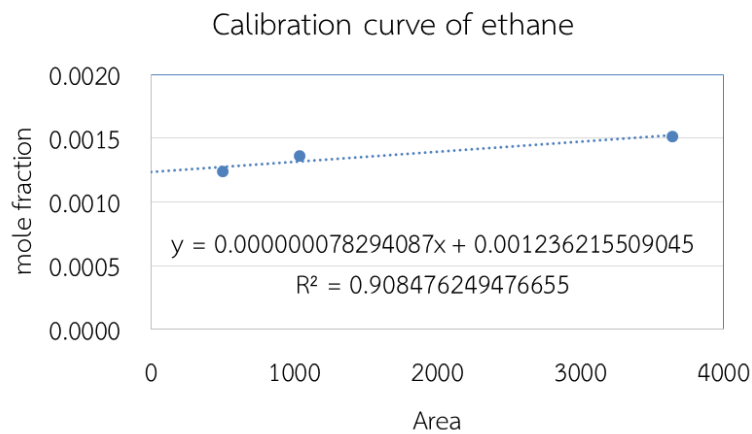
อัตราการไหล N ₂ (ml/min)	อัตราการไหลสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอน (ml/min)	พื้นที่ใต้กราฟ		
		CH ₄ _1	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
296(1)	3.37	169598	3632	760
296(2)	3.37	168426	3658	803
Area		169012	3645	781.5
Mole fraction		0.008135952	0.1332	0.000114

อัตราการไหล N ₂ (ml/min)	อัตราการไหลสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอน (ml/min)	พื้นที่ใต้กราฟ		
		CH ₄ _1	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
329(1)	3.37	56118	1004	247
329(2)	3.37	47297	1000	317
329(3)	3.37	63292	1120	352
Area		55569	1041	305
Mole fraction		0.0073	0.1333	0.000103

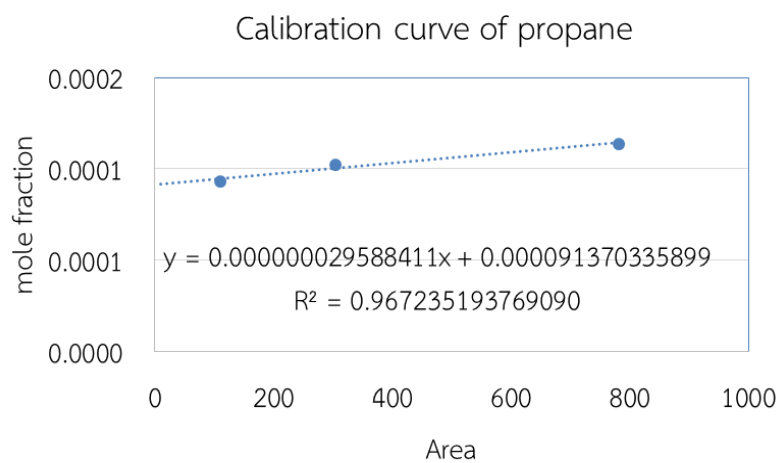
อัตราการไหล N ₂ (ml/min)	อัตราการไหลสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอน (ml/min)	พื้นที่ใต้กราฟ		
		CH ₄ _1	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
363(1)	3.37	20317	510	46
363(2)	3.37	20288	495	174
Area		20288	502.5	110
Mole fraction		0.0067	0.0012	0.000093



รูปที่ ข 2.1a กราฟสอบเทียบ (Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของมีเทน



รูปที่ ข 2.1b กราฟสอบเทียบ (Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของอีเทน



รูปที่ ข 2.1c กราฟสอบเทียบ(Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของโพรเพน

ตาราง ข 4 ข้อมูลระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของเมทานอล (CH₃OH)

คำนวณจากสมการแอนโทอิน (Antoine equation) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความดันไอของเหลว ณ สภาวะสมดุลภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน(N₂)ที่ความดัน 1 บรรยากาศ (760 mmHg)

$$\ln P^* = A - \frac{B}{T(K)+C}$$

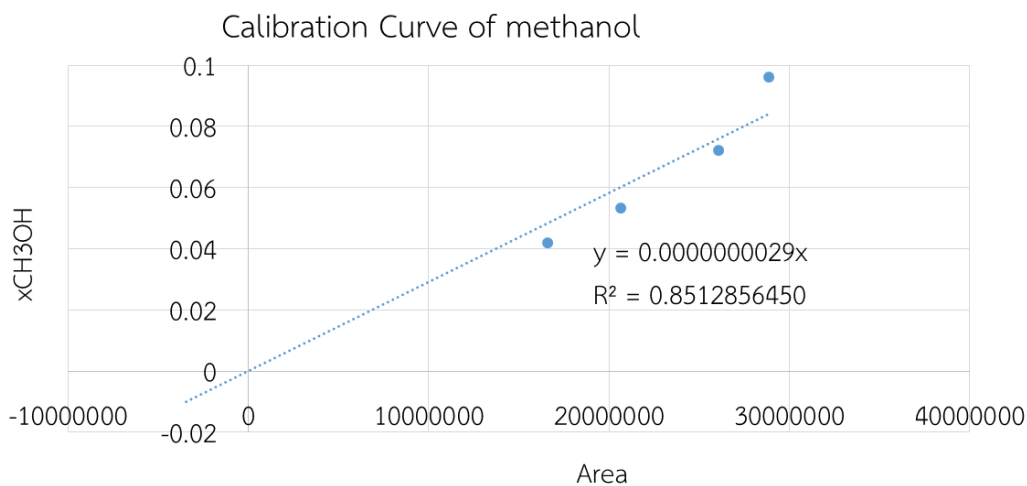
เมื่อ P^* = ความดัน (Pressure) หน่วยเป็น มิลลิเมตรปรอท (mmHg)

T = อุณหภูมิ (Temperature) หน่วยเป็น เคลวิน (K)

A, B, C = ค่าคงที่จำเพาะของสาร (Specific antoine's constant) ในช่วงอุณหภูมิ -16 ถึง 91 °C

โดย $A = 18.5875$ $B = 3626.55$ $C = -34.29$

อุณหภูมิ(°C)	ln P* (mmHg)	P* (mmHg)	P _{total} (mmHg)	สัดส่วนโมล	พื้นที่ใต้กราฟ
1	3.46	31.77	760	0.042	311457.32
5	3.71	40.73	760	0.054	461432.39
10	4.01	54.93	760	0.072	558438.58
15	4.29	73.22	760	0.096	299799.56



รูปที่ ข 3.1 กราฟสอบเทียบ (Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลกับพื้นที่ใต้กราฟของเมทานอล

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา Bifunctional Catalyst
แบบผ่านการรีดักชัน

ค 1 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA

ตาราง ค 1.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO₂ input

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1			ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2		
	N2_1	N2_2	CO2	N2_1	N2_2	CO2
1	631691	886322	1047357	1172531	1747472	2155522
2	659230	910166	1074266	12075	74237	3064284
3	659707	909186	1071895	7053	64936	3092018
4	662014	909391	1070559	1944241	2773625	3174760
5	655519	909705	1072006	1919847	2789887	3174216
6				1896918	2730872	3190035
7				1214757	1810477	2064523
8				1977764	2763772	3217226
9				2054164	2883981	3170485

ตาราง ค 1.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO₂ output

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2		
	CH4_1	CH4_1	C2	C3
1	3457	23708	578	
2	7428	23256	303	
3	7381	16746	262	
4	6255	10991	223	648
5	5868	16051	332	
6	5550	11152	244	
7	5417	9090	115	577
No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2		
8	4816	8769	205	
9	4064	6771	211	505
10	4252	6467	229	340
11	3925	6342	220	422

12	3606	6446	258	360
13	3191	5432	332	327
14	3358	4571	251	250
15	3173	4532	270	326

ค 2 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO

ตาราง ค 2.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO₂ input

NO.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1			ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2		
	N ₂ _1	N ₂ _2	CO ₂	N ₂ _1	N ₂ _2	CO ₂
1	637359	892186	1061405	659914	875805	1010994
2	656828	904721	1072465	662145	911996	1070658
3	657377	907358	1073393	662457	912386	1071520
4	658528	908010	1074780	664049	916554	1074736
5	659434	908033	1072684	663188	914707	1074854

ตาราง ค 2.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO₂ output

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2
	CH ₄ _1	CH ₄ _1
1	2773	1167
2	6183	949
3	7137	1168
4	7116	1123
5	4109	938
No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2
6	3225	1045
7	3003	915
8	3767	1133
9	3020	1152
10	2740	1163
11	2340	1139
12	3284	953
13	4108	1235

14	3430	1269
15	3345	1240

ค 3 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO₂

ตาราง ค 3.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO₂ input

NO.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1			ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2		
	N ₂ _1	N ₂ _2	CO ₂	N ₂ _1	N ₂ _2	CO ₂
1	655103	894626	1038294	676887	885542	1052056
2	659438	912799	1076678	651396	903331	1074096
3	656712	907176	1073201	651133	908558	1081700
4	660150	909917	1077331	654638	907542	1077174
5	660811	908649	1076239	662114	912358	1082531

ตาราง ค 3.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO₂ output

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2
	CH4_1	CH4_1
1	2532	3341
2	4588	6354
3	5230	5783
No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2
4	4778	5016
5	4471	3860
6	4324	3466
7	3863	1885
8	4024	2830
9	3069	2790
10	3686	2482
11	2897	2321
12	4055	2185
13	4388	1893
14	3769	1608
15	2856	1326

ค 4 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A

ตาราง ค 4.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ได้กราฟของ CO₂ input

NO.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1			ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2		
	N ₂ _1	N ₂ _2	CO ₂	N ₂ _1	N ₂ _2	CO ₂
1	675428	924819	1089948	630732	890017	1053352
2	659970	912632	1083344	652535	911845	1073336
3	663777	917057	1079739	657173	912947	1074368
4	667139	919937	1079964	660406	916468	1077103
5	667013	918975	1079442	657905	916127	1077419

ตาราง ค 4.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO₂ output

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2
	CH4_1	CH4_1
1	271	5896
No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2
2	5372	24738
3	6966	25206
4	7650	23321
5	6740	21524
6	6176	19124
7	5706	17742
8	6297	15687
9	5814	14263
10	4320	12966
11	6254	12006
12	4843	12993
13	4541	10869
14	6007	10557
15	5610	10241

ค 5 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A

ตาราง ค 5.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO₂ input

NO.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1			ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2		
	N ₂ _1	N ₂ _2	CO ₂	N ₂ _1	N ₂ _2	CO ₂
1	1363645	2065499	2729805	1363645	2065499	2729805
2	1652066	2445551	2901684	1652066	2445551	2901684
3	1722655	2406423	2874668	1722655	2406423	2874668
4	1714392	2401549	2841301	1714392	2401549	2841301
5	1707178	2383935	2817202	1707178	2383935	2817202

ตาราง ค 5.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO₂ output

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1				ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2	
	CH ₄ _1	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	CH ₃ OH	CH ₄ _1	C ₂ H ₆
1	12466	35	1843	131341	20165	610
2	6101	78	373		22143	450
3	9203	153	546		20946	390
4	7947	162	373		18580	303
5	5445	164	228		13964	320
6	9040	173	496		6373	318
7	9411	210	631		13319	330
8	5775	193	262		7868	238
9	5505	237	252		9692	229
10	7821	234	498		8470	230
11	10603	233	631		14477	218
12	7476	229	510		15456	218
13	7700	294	457		16487	222
14	10999	259	1740		15169	236
15	13615	328	633		12192	358

แบบไม่ผ่านการรีดักชัน

ค 6 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA

ตาราง ค 6.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO₂ input

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน		
	N ₂ _1	N ₂ _2	CO ₂
1	665242	910949	1075299
2	630630	891773	1050872
3	639693	8909767	1052899
4	664584	911838	1073853
5	665242	910949	1075299

ตาราง ค 6.2 ข้อมูล(FID)พื้นที่ได้กราฟ CO₂ output

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	
	CO	CH ₄ _1
1	14312	54470
2		39263
3		33518
4		28137
5		23871
6		20866
7		17454
8		16787
9		17349
10		16052
11		15726
12		14456
13		13292
14		13359
15		11724

ค 7 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO

ตาราง ค 7.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ได้กราฟของ CO₂ input

NO.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1		
	N ₂ _1	N ₂ _2	CO ₂
1	685484	945515	1077480
2	684866	946927	1077368
3	687895	946678	1077297
4	686073	945440	1076101
5	685002	947336	1077752

ตาราง ค 7.1 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO₂ output

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	
	CO	CH ₄ _1
1	6654	1808
2		2767
3		5157
4		5890
5		7542
6		6882
7		6809
8		6625
9		6203
10		6558
11		7319
12		5589
13		7494
14		6789
15		6443

ค 8 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO₂

ตาราง ค 8.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO₂ input

NO.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1		
	N ₂ _1	N ₂ _2	CO ₂
1	624182	886042	1065424
2	652014	902789	1088605
3	652085	904675	1091310
4	656454	905679	1091168
5	651149	902947	1088434

ตาราง ค 8.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO₂ output

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	
	CO	CH ₄ _1
1	6380	713
2		4565
3		7972
4		7917
5		7333
6		8011
7		7264
8		7892
9		7425
10		6511
11		6795
12		7718
13		6221
14		6372
15		7991

ค 9 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A

ตาราง ค 9.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO₂ input

NO.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1		
	N ₂ _1	N ₂ _2	CO ₂
1	1624837	2412586	2871714
2	1684233	2399863	2860279
3	1602910	2376539	2810395
4	1648347	2363183	2793665
5	1640251	2334560	2781959

ตาราง ค 9.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO₂ output

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1			
	CO	CH ₄ _1	C ₂ H ₆	CH ₃ OH
1	12105	514601		262965
2		3276	337	
3		5430	242	
4		5879	202	
5		7675	122	
6		6300	112	
7		4453	58	
8		3408	179	
9		3145	104	
10		4205	124	
11		7414	109	
12		7986	130	
13		7793	87	
14		6476	122	
15		4535	105	

ค 10 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite HZSM-5

ตาราง ค 10.1 ข้อมูล (TCD) พื้นที่ใต้กราฟของ CO₂ input

NO.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1		
	N ₂ _1	N ₂ _2	CO ₂
1	608267	855254	1019102
2	654703	909851	1083291
3	654620	905967	1088741
4	651570	909-37	1092465
5	654336	908204	1091327

ตาราง ค 10.2 ข้อมูล (FID) พื้นที่ใต้กราฟ CO₂ output

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1		
	CH ₄ _1	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
1	815	2332	2449
2	1325	1890	1262
3	1712	1456	620
4	1875	1320	554
5	2017	1151	573
6	2116	909	430
7	1877	812	511
8	1890	560	612
9	1702	736	225
10	2089	498	337
11	1808	605	154
12	1613	466	95
13	1931	461	265
14	2034	495	178
15	1591	435	71

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา Bifunctional Catalyst

แบบผ่านการรีดักชัน

ง 1 การคำนวณสัดส่วนโมล (mole fraction)

ตาราง ง 1.1 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2		
	yCH ₄ _1	yCH ₄ _1	yC ₂ H ₆	yC ₃ H ₈
1	0.00665	0.00683	0.00128	
2	0.00668	0.00683	0.00126	
3	0.00668	0.00677	0.00126	
4	0.00667	0.00672	0.00125	0.00011
5	0.00667	0.00676	0.00126	
6	0.00667	0.00672	0.00126	
7	0.00666	0.00670	0.00125	0.00011
8	0.00666	0.00670	0.00125	
9	0.00665	0.00668	0.00125	0.00011
10	0.00665	0.00667	0.00125	0.00010
11	0.00665	0.00667	0.00125	0.00010
12	0.00665	0.00667	0.00126	0.00010
13	0.00664	0.00666	0.00126	0.00010
14	0.00665	0.00666	0.00126	0.00010
15	0.00664	0.00666	0.00126	0.00010

ตาราง ง 1.2 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2
	yCH ₄ _1	yCH ₄ _1
1	0.00664004	0.00662514
2	0.00667167	0.00662312
3	0.00668052	0.00662515
4	0.00668032	0.00662473
5	0.00665243	0.00662301
6	0.00664423	0.00662401
7	0.00664217	0.0066228
8	0.00664926	0.00662482
9	0.00664233	0.006625
10	0.00663973	0.0066251
11	0.00663602	0.00662488
12	0.00664478	0.00662315
13	0.00665242	0.00662577
14	0.00664613	0.00662608
15	0.00664534	0.00662582

ตาราง ง 1.3 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO₂

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2
	yCH ₄ _1	yCH ₄ _1
1	0.0066378	0.006645305
2	0.006656872	0.006673253
3	0.006662827	0.006667957
4	0.006658634	0.006660842
5	0.006655786	0.006650119
6	0.006654423	0.006646464
7	0.006650147	0.006631799
8	0.00665164	0.006640565
9	0.006642782	0.006640194
10	0.006648505	0.006637337
11	0.006641186	0.006635843
12	0.006651928	0.006634582
13	0.006655017	0.006631873
14	0.006649275	0.006629229
15	0.006640806	0.006626613

ตาราง ง 1.4 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2
	yCH ₄ _1	yCH ₄ _1
1	0.00661683	0.006669
2	0.00666414	0.00684378
3	0.00667893	0.00684812
4	0.00668527	0.00683064
5	0.00667683	0.00681397
6	0.0066716	0.00679171
7	0.00666724	0.00677889
8	0.00667272	0.00675983
9	0.00666824	0.00674662
10	0.00665439	0.00673459
11	0.00667233	0.00672568
12	0.00665924	0.00673484
13	0.00665644	0.00671513
14	0.00667003	0.00671224
15	0.00666635	0.00670931

ตาราง ง 1.5 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite HZSM-5

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1				ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2	
	yCH4_1	yC2	yC3	yCH3OH	yCH4_1	yC2H6
1	0.0067299	0.001238956	0.000145902	0.0003809	0.0068014	0.001284
2	0.0066709	0.001242322	0.000102407		0.0068197	0.0012714
3	0.00670	0.001248195	0.000107526		0.0068086	0.0012668
4	0.006688	0.001248899	0.000102407		0.0067867	0.0012599
5	0.0066648	0.001249056	0.000098116		0.0067438	0.0012613
6	0.0066982	0.00124976	0.000106046		0.0066734	0.0012611
7	0.0067016	0.001252657	0.000110041		0.0067379	0.0012621
8	0.0066679	0.001251326	0.000099122		0.0066873	0.0012548
9	0.0066654	0.001254771	0.000098827		0.0067042	0.0012541
10	0.0066869	0.001254536	0.000106105		0.0066929	0.0012542
11	0.0067127	0.001254458	0.000110041		0.0067486	0.0012533
12	0.0066837	0.001254145	0.000106460		0.0067577	0.0012533
13	0.0066857	0.001259234	0.000104892		0.0067672	0.0012536
14	0.0067163	0.001256494	0.000142854		0.006755	0.0012547
15	0.0067406	0.001261896	0.000110100		0.0067274	0.0012642

แบบไม่ผ่านการรีดักชัน

ตาราง ง 1.6 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	
	yCO	yCH4_1
1	0.006747	0.00712
2		0.006979
3		0.006925
4		0.006875
5		0.006836
6		0.006808
7		0.006776
8		0.00677
9		0.006775
10		0.006763
11		0.00676
12		0.006748
13		0.006738
14		0.006738
15		0.006723

ตาราง ง 1.7 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	
	yCO	yCH ₄ _1
1	0.006676	0.006631
2		0.00664
3		0.006662
4		0.006669
5		0.006684
6		0.006678
7		0.006677
8		0.006676
9		0.006672
10		0.006675
11		0.006682
12		0.006666
13		0.006684
14		0.006677
15		0.006674

ตาราง ง 1.8 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO₂

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1	
	yCO	yCH ₄ _1
1	0.006676	0.006631
2		0.00664
3		0.006662
4		0.006669
5		0.006684
6		0.006678
7		0.006677
8		0.006676
9		0.006672
10		0.006675
11		0.006682
12		0.006666
13		0.006684
14		0.006677
15		0.006674

ตาราง ง 1.9 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1			
	yCO	yCH ₄ _1	yC ₂	yCH ₃ OH
1	0.0067266	0.0113877		0.0007626
2		0.0066447	0.0012626	
3		0.0066647	0.0012552	
4		0.0066688	0.001252	
5		0.0066855	0.0012458	
6		0.0066728	0.001245	
7		0.0066556	0.0012408	
8		0.0066459	0.0012502	
9		0.0066435	0.0012444	
10		0.0066533	0.0012459	
11		0.0066831	0.0012447	
12		0.0066884	0.0012464	
13		0.0066866	0.001243	
14		0.0066744	0.0012458	
15		0.0066564	0.0012444	

ตาราง ง 1.10 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite HZSM-5

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1		
	yCH ₄ _1	yC ₂ H ₆	yC ₃ H ₈
1	0.006622	0.0014188	0.00016383
2	0.006627	0.0013842	0.00012871
3	0.00663	0.0013502	0.00010972
4	0.006632	0.0013396	0.00010776
5	0.006633	0.0013263	0.00010832
6	0.006634	0.0013074	0.00010409
7	0.006632	0.0012998	0.00010649
8	0.006632	0.0012801	0.00010948
9	0.00663	0.0012938	0.00009803
10	0.006634	0.0012752	0.00010134
11	0.006631	0.0012836	0.00009593
12	0.006629	0.0012727	0.00009418
13	0.006632	0.0012723	0.00009921
14	0.006633	0.0012750	0.00009664
15	0.006629	0.0012703	0.00009347

แบบผ่านการรีดักชัน

ง 2 การคำนวณความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา (%CO₂ Conversion)

ตาราง ง 2.1 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA

No	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1		ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2			
	%CO ₂ Conversion	%Selectivity	%CO ₂ Conversion	%Selectivity		
		CH ₄		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
1	2.96	100	4.72	72.7264736	27.273526	
2	2.97	100	4.69	73.0491909	26.950809	
3	2.97	100	4.66	72.9243959	27.07560	
4	2.97	100	4.79	70.2887736	26.240558	3.4706677
5	2.97	100	4.66	72.8195371	27.180462	
6	2.97	100	4.63	72.7944268	27.205573	
7	2.97	100	4.77	70.4052030	26.175468	3.4193282
8	2.96	100	4.62	72.7773816	27.222618	
9	2.96	100	4.77	70.2741702	26.369133	3.3566957
10	2.96	100	4.76	70.3529481	26.439557	3.2074940
11	2.96	100	4.76	70.3058212	26.41159	3.2825887
12	2.96	100	4.76	70.3055290	26.470344	3.2241269
13	2.96	100	4.76	70.2119763	26.594502	3.1935214
14	2.96	100	4.75	70.3316341	26.537778	3.1305875
15	2.96	100	4.75	70.2583343	26.542964	3.1987010

ตาราง ง 2.2 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1		ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2	
	%CO ₂ Conversion	%Selectivity CH ₄	%CO ₂ Conversion	%Selectivity CH ₄
1	2.94	100	2.97	100
2	2.96	100	2.97	100
3	2.96	100	2.97	100
4	2.96	100	2.97	100
5	2.95	100	2.97	100
6	2.95	100	2.97	100
7	2.95	100	2.97	100
8	2.95	100	2.97	100
9	2.95	100	2.97	100
10	2.94	100	2.97	100
11	2.94	100	2.97	100
12	2.95	100	2.97	100
13	2.95	100	2.97	100
14	2.95	100	2.97	100
15	2.95	100	2.97	100

ตาราง ง 2.3 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO₂

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1		ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2	
	%CO ₂ Conversion	%Selectivity CH ₄	%CO ₂ Conversion	%Selectivity CH ₄
1	2.95	100	2.94	100
2	2.96	100	2.95	100
3	2.96	100	2.95	100
4	2.96	100	2.95	100
5	2.96	100	2.94	100
6	2.96	100	2.94	100
7	2.96	100	2.93	100
8	2.96	100	2.94	100
9	2.95	100	2.94	100
10	2.96	100	2.94	100
11	2.95	100	2.94	100
12	2.96	100	2.94	100
13	2.96	100	2.93	100
14	2.96	100	2.93	100
15	2.95	100	2.93	100

ตาราง ง 2.4 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1		ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2	
	%CO ₂ Conversion	%Selectivity CH ₄	%CO ₂ Conversion	%Selectivity CH ₄
1	2.90	100	2.96	100
2	2.92	100	3.03	100
3	2.93	100	3.04	100
4	2.93	100	3.03	100
5	2.93	100	3.02	100
6	2.93	100	3.01	100
7	2.93	100	3.00	100
8	2.93	100	3.00	100
9	2.93	100	2.99	100
10	2.92	100	2.99	100
11	2.93	100	2.98	100
12	2.92	100	2.99	100
13	2.92	100	2.98	100
14	2.93	100	2.98	100
15	2.92	100	2.97	100

ตาราง ง 2.5 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite HZSM-5

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1					ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 2		
	%CO ₂ Conversion	%Selectivity				%CO ₂ Conversion	%Selectivity	
CH ₄		C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	CH ₃ OH	CH ₄		C ₂ H ₆	
1	5.18	67.12	24.71	4.37	3.80	4.85	72.592	27.408
2	4.90	70.50	26.26	3.25		4.85	72.840	27.160
3	4.93	70.80	26.38	3.41		4.84	72.881	27.119
4	4.91	70.68	26.40	3.25		4.82	72.924	27.076
5	4.90	70.43	26.40	3.11		4.80	72.778	27.222
6	4.92	70.78	26.41	3.36		4.76	72.572	27.428
7	4.94	70.82	26.48	3.49		4.80	72.748	27.252
8	4.90	70.46	26.45	3.14		4.76	72.712	27.288
9	4.90	70.44	26.52	3.13		4.77	72.773	27.227
10	4.92	70.66	26.52	3.36		4.76	72.738	27.262
11	4.94	70.94	26.51	3.49		4.79	72.917	27.083
12	4.92	70.63	26.51	3.38		4.80	72.944	27.056
13	4.93	70.65	26.61	3.33		4.80	72.967	27.033
14	5.00	70.98	26.56	4.53		4.80	72.914	27.086
15	4.96	71.23	26.67	3.49		4.79	72.682	27.318

แบบไม่ผ่านการรีดักชัน

ตาราง ง 2.6 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1		
	%CO ₂ Conversion	%Selectivity	
		CO	CH ₄
1	6.17	48.6568308	51.34317
2	3.11		100
3	3.08		100
4	3.06		100
5	3.05		100
6	3.03		100
7	3.02		100
8	3.02		100
9	3.02		100
10	3.01		100
11	3.01		100
12	3.01		100
13	3.00		100
14	3.00		100
15	3.00		100

ตาราง ง 2.7 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1		
	%CO ₂ Conversion	%Selectivity	
		CO	CH ₄
1	5.87	50.1689	49.8311
2	2.93		100
3	2.94		100
4	2.94		100
5	2.95		100
6	2.94		100
7	2.94		100
8	2.94		100
9	2.94		100
10	2.94		100
11	2.95		100
12	2.94		100
13	2.95		100
14	2.94		100
15	2.94		100

ตาราง ง 2.8 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO₂

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1		
	%CO ₂ Conversion	%Selectivity	
		CO	CH ₄
1	5.82	50.1977033	49.8023
2	2.91		100
3	2.93		100
4	2.93		100
5	2.92		100
6	2.93		100
7	2.92		100
8	2.93		100
9	2.93		100
10	2.92		100
11	2.92		100
12	2.93		100
13	2.92		100
14	2.92		100
15	2.93		100

ตาราง ง 2.9 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1				
	%CO ₂ Conversion	%Selectivity			
		CO	CH ₄	C ₂ H ₆	CH ₃ OH
1	9.75	35.633943	60.326216		4.039841
2	4.76		72.462072	27.537928	
3	4.77		72.679964	27.375703	
4	4.77		72.725384	27.307397	
5	4.77		72.907061	27.170787	
6	4.76		72.767971	27.153711	
7	4.75		72.581134	27.061498	
8	4.75		72.475425	27.268122	
9	4.75		72.448821	27.14005	
10	4.75		72.556047	27.174202	
11	4.77		72.880659	27.148588	
12	4.77		72.938521	27.184448	
13	4.77		72.918998	27.11102	
14	4.76		72.785774	27.170787	
15	4.75		72.589429	27.141757	

ตาราง ง 2.10 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite HZSM-5

No.	ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผ่านการรีดักชัน ครั้งที่ 1			
	%CO ₂ Conversion	%Selectivity		
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
1	4.37	66.54504	28.51577	4.93919
2	4.29	67.74893	28.30333	3.947736
3	4.24	68.63723	27.95538	3.407386
4	4.23	68.83562	27.80874	3.355646
5	4.22	69.01735	27.60127	3.381385
6	4.20	69.3855	27.34831	3.266189
7	4.20	69.43651	27.21853	3.344965
8	4.18	69.65931	26.89089	3.449806
9	4.18	69.70349	27.20476	3.091751
10	4.17	69.9157	26.88003	3.204266
11	4.17	69.90367	27.0626	3.033733
12	4.16	70.09751	26.9149	2.987598
13	4.16	70.00096	26.85761	3.141427
14	4.16	70.02171	26.9179	3.060384
15	4.15	70.14867	26.884	2.967327

แบบผ่านการรีดักชัน**ง 3 การคำนวณอัตราการเกิดเมทานอล (Rate of Reaction)**

กำหนดให้ total flow rate = 2.413184639 mmol/min

ตาราง ง 3.1 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA (mole fraction avg. = 0.208690008)

No.	Avg. of %CO ₂ Conversion	Rate of Reaction (mmol/min/g cat)
1	0.038	0.012880615
2	0.038	0.012868696
3	0.038	0.012813122
4	0.039	0.013030406
5	0.038	0.01280651
6	0.038	0.012755344
7	0.039	0.012990922
8	0.038	0.012726983
9	0.039	0.012971034
10	0.039	0.012960213
11	0.039	0.01296187
12	0.039	0.012960855
13	0.039	0.012957399
14	0.039	0.012935808
15	0.039	0.012942279

ตาราง ง 3.2 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO (mole fraction avg. = 0.221459820631891)

No.	Avg. of %CO ₂ Conversion	Rate of Reaction (mmol/min/g cat)
1	0.0296	0.01579641
2	0.0296	0.01583101
3	0.0296	0.01584376
4	0.0296	0.01584304
5	0.0296	0.01580839
6	0.0296	0.01579998
7	0.0296	0.01579614
8	0.0296	0.01580682
9	0.0296	0.01579892
10	0.0296	0.01579601
11	0.0295	0.01579141
12	0.0296	0.01579961
13	0.0296	0.01581164
14	0.0296	0.01580465
15	0.0296	0.01580341

ตาราง ง 3.3 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO₂ (mole fraction avg. = 0.22253644)

No.	Avg. of %CO ₂ Conversion	Rate of Reaction (mmol/min/g cat)
1	0.0295	0.01581726
2	0.0296	0.01587249
3	0.0296	0.01587330
4	0.0295	0.01586002
5	0.0295	0.01584409
6	0.0295	0.01583820
7	0.0295	0.01581597
8	0.0295	0.01582801
9	0.0295	0.01581714
10	0.0295	0.01582053
11	0.0294	0.01581016
12	0.0295	0.01582133
13	0.0295	0.01582180
14	0.0294	0.01581193
15	0.0294	0.01579889

ตาราง ง 3.4 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A (mole fraction avg. = 0.222575007)

No.	Avg. of %CO ₂ Conversion	Rate of Reaction (mmol/min/g cat)
1	0.029	0.015738
2	0.030	0.015998
3	0.030	0.016020
4	0.030	0.016007
5	0.030	0.015978
6	0.030	0.015945
7	0.030	0.015925
8	0.030	0.015909
9	0.030	0.015889
10	0.030	0.015858
11	0.030	0.015869
12	0.030	0.015864
13	0.029	0.015838
14	0.030	0.015850
15	0.029	0.015843

ตาราง ง 3.5 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite HZSM-5 (mole fraction avg. = 0.189615946)

No.	Avg. of %CO ₂ Conversion	Rate of Reaction (mmol/min/g cat)
1	0.05	0.022957
2	0.05	0.022295
3	0.05	0.022336
4	0.05	0.022265
5	0.05	0.022177
6	0.05	0.022162
7	0.05	0.022264
8	0.05	0.022108
9	0.05	0.022130
10	0.05	0.022167
11	0.05	0.022273
12	0.05	0.022237
13	0.05	0.022258
14	0.05	0.022407
15	0.05	0.022324

แบบไม่ผ่านการรีดักชัน

ตาราง ง 3.6 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA (mole fraction avg. = 0.221438106)

No.	Avg. of %CO ₂ Conversion	Rate of Reaction (mmol/min/g cat)
1	0.062	0.021995326
2	0.031	0.011072428
3	0.031	0.01098903
4	0.031	0.0109109
5	0.030	0.010848948
6	0.030	0.010805303
7	0.030	0.010755741
8	0.030	0.010746052
9	0.030	0.010754216
10	0.030	0.010735374
11	0.030	0.010730638
12	0.030	0.010712188
13	0.030	0.010695277
14	0.030	0.01069625
15	0.030	0.010672495

ตาราง ง 3.7 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + CaO (mole fraction avg. = 0.223839246)

No.	Avg. of %CO ₂ Conversion	Rate of Reaction (mmol/min/g cat)
1	0.0587	0.03169223
2	0.0293	0.01581350
3	0.0294	0.01586560
4	0.0294	0.01588158
5	0.0295	0.01591759
6	0.0294	0.01590320
7	0.0294	0.01590161
8	0.0294	0.01589760
9	0.0294	0.01588840
10	0.0294	0.01589614
11	0.0295	0.01591273
12	0.0294	0.01587502
13	0.0295	0.01591654
14	0.0294	0.01590118
15	0.0294	0.01589363

ตาราง ง 3.8 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + ZrO₂ (mole fraction avg. = 0.225457697)

No.	Avg. of %CO ₂ Conversion	Rate of Reaction (mmol/min/g cat)
1	0.0582	0.03166262
2	0.0291	0.01585269
3	0.0293	0.01592696
4	0.0293	0.01592576
5	0.0292	0.01591303
6	0.0293	0.01592781
7	0.0292	0.01591153
8	0.0293	0.01592522
9	0.0293	0.01591504
10	0.0292	0.01589512
11	0.0292	0.01590131
12	0.0293	0.01592143
13	0.0292	0.01588879
14	0.0292	0.01589209
15	0.0293	0.01592738

ตาราง ง 3.9 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite Type A (mole fraction avg. = 0.18899149)

No.	Avg. of %CO ₂ Conversion	Rate of Reaction (mmol/min/g cat)
1	0.09751	0.044473
2	0.04765	0.021730
3	0.04767	0.021742
4	0.04766	0.021737
5	0.04768	0.021747
6	0.04761	0.021713
7	0.04748	0.021654
8	0.04753	0.021675
9	0.04745	0.021642
10	0.04752	0.021673
11	0.04766	0.021736
12	0.04770	0.021756
13	0.04766	0.021737
14	0.04763	0.021721
15	0.04752	0.021673

ตาราง ง 3.10 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA + Zeolite HZSM-5 (mole fraction avg. = 0.223379099)

No.	Avg. of %CO ₂ Conversion	Rate of Reaction (mmol/min/g cat)
1	0.04368	0.023545
2	0.04295	0.023151
3	0.04242	0.022869
4	0.04231	0.022809
5	0.04221	0.022755
6	0.04200	0.022640
7	0.04195	0.022616
8	0.04182	0.022545
9	0.04179	0.022525
10	0.04168	0.022470
11	0.04168	0.022465
12	0.04155	0.022398
13	0.04163	0.022438
14	0.04162	0.022435
15	0.04152	0.022382

ประวัตินักวิจัยและคณะ

ผู้ร่วมวิจัย คนที่ 1

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สร้อยพัทธา สร้อยสุวรรณ
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Assist. Dr. Soipatta Soisuwan
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3200100117859
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
เวลาที่ใช้ทำวิจัย (ชั่วโมง : สัปดาห์) 8 ชั่วโมง : สัปดาห์
4. หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
เลขที่ 169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131
หมายเลขโทรศัพท์ 038102222 ต่อ 3351
อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail) : soipatta@buu.ac.th
5. ประวัติการศึกษา
พ.ศ. 2538 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขาเคมีวิศวกรรม) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2541 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมเคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2549 วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมเคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
---ไม่มี---
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุ
สถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้
ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

ปี	โครงการวิจัย	สถานะภาพ
2549	ทุนของสกว./ ทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่ ปี 2549 ระยะเวลา 2 ปี เรื่อง “การศึกษาผลของตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสมของแลนทาเนียและเซอร์โคเนียต่อลักษณะและความว่องไวในเชิงปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของคาร์บอนมอนอกไซด์”	เสร็จสมบูรณ์
	ทุนคณะวิศวกรรมศาสตร์ปี 2549 เรื่อง “การพัฒนาตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสมของแลนทาเนียและเซอร์โคเนียสำหรับปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจิเนชัน”	เสร็จสมบูรณ์
	ทุนคณะวิศวกรรมศาสตร์ปี 2549 เรื่อง “การสังเคราะห์อลูมินาและไดปอลูมินาโดยวิธีการโซลเจล	เสร็จสมบูรณ์

2550	ทุนของโครงการ IRPUS (RPUS) เรื่อง “การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์บนตัวรองรับออกไซด์ผสมเซอร์โคเนียม ออกไซด์และแลนทาเนียมออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจิเนชัน”	เสร็จสมบูรณ์
	ทุนของโครงการ IRPUS (RPUS) เรื่อง “การทดสอบลักษณะเฉพาะเชิงการเร่งปฏิกิริยาของออกไซด์ผสมเซอร์โคเนียมออกไซด์และแลนทาเนียมออกไซด์”	เสร็จสมบูรณ์
2551	ทุนคณะวิศวกรรมศาสตร์ ปี 2551 ครั้งที่ 1 เรื่อง “การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์บนตัวรองรับเซอร์โคเนียมออกไซด์และแลนทาเนียมออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจิเนชัน”	เสร็จสมบูรณ์
	ทุนคณะวิศวกรรมศาสตร์ ปี 2551 ครั้งที่ 1 เรื่อง “การประยุกต์เชิงการเร่งปฏิกิริยาของออกไซด์ผสมเซอร์โคเนียมออกไซด์และแลนทาเนียมออกไซด์”	เสร็จสมบูรณ์
2552	ทุนของโครงการ IRPUS (RPUS) เรื่อง “การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์บนตัวรองรับออกไซด์ผสมเชิงกลสำหรับปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจิเนชัน”	เสร็จสมบูรณ์
	ทุนของโครงการ IRPUS (IPUS3) เรื่อง “การศึกษาปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งสำหรับผลิตน้ำมันไบโอดีเซล”	เสร็จสมบูรณ์
	ทุนคณะวิศวกรรมศาสตร์ ปี 2551 ครั้งที่ 3 เรื่อง “การสร้างเตาเผาแบบก๊าซไหลผ่านเพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา”	เสร็จสมบูรณ์
	ทุนคณะวิศวกรรมศาสตร์ ปี 2551 ครั้งที่ 3 เรื่อง “การเปรียบเทียบคุณลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยาของโคบอลต์บนออกไซด์ผสม $ZrO_2-La_2O_3$ ที่ปริมาณแลนทาเนียมออกไซด์ต่ำ”	เสร็จสมบูรณ์
	ทุนคณะวิศวกรรมศาสตร์ ปี 2551 ครั้งที่ 3 เรื่อง “การศึกษาปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็ง”	เสร็จสมบูรณ์
2553	Post-doctoral scholarship of Bridge the Gap (Erasmus Mundus) (2011), at Institute of Physical Chemistry, University of Innsbruck, Austria	เสร็จสมบูรณ์

2556	ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปี 2556 ครั้งที่ 3 เรื่อง “การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์จากวัสดุธรรมชาติ”	เสร็จสมบูรณ์
	ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปี 2556 ครั้งที่ 3 เรื่อง “การใช้วัสดุทางทะเลสำหรับโปรโมตปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชัน”	เสร็จสมบูรณ์
2557	ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปี 2557 ครั้งที่ 1 เรื่อง “การพัฒนาเครื่องมือวิจัยสำหรับอุณหภูมิรีดักชันที่โปรแกรม”	เสร็จสมบูรณ์

c. ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่

ผลงานตีพิมพ์

1. P. Soisuwan, P. Prasertthdam, D.C. Chambers, D.L. Trimm, O. Mekasuwandumrong, J. Panpanot “Characteristics and Catalytic Properties of Alumina-Zirconia Mixed Oxides Prepared by a Modified Pechini Method” *Catalysis Letter* 103 (2005) P.63-68
2. S. Soisuwan, P. Prasertthdam, J. Panpranot and D. L. Trimm “Effects of Si- and Y-modified nanocrystalline zirconia on the properties of Co/ZrO₂ catalysts” *Short Communication, Catalysis Communications* 7 (2006) P.761-767
3. S. Soisuwan, J. Panpranot, D. L. Trimm and P. Prasertthdam “A study of alumina–zirconia mixed oxides prepared by the modified Pechini method as Co catalyst supports in CO hydrogenation” *Article, Applied Catalysis A: General* 303 (2006) P. 268-272
4. S. Soisuwan, The Characteristics of supported cobalt catalysts on CO hydrogenation using alumina, silica, and zirconia as supports” *Review Article, Journal of Science, Technology, and Humanities*,8 (2010) P. 1-12
5. N. Sriakekaweerat, S. Pinyo, K. Pansanga, S. Soisuwan, “Study on transesterification by solid catalysts for biodiesel production”, *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 29 (2010) P.139-148 (in Thai).
6. T. Bielz, S. Soisuwan, R. Kaindl, R. Tessadri, D. M. Toebbons, B. Kloetzer, S. Penner, “A High-Resolution Diffraction and Spectroscopic study of the Low-Temperature Phase Transformation of Hexagonal to Tetragonal GeO₂

with and without Alkali Hydroxide Promotion“ , Journal of Physical Chemistry C, 115 (2011) P. 9706 – 9712

7. S. Soisuwan, B. Netiworaruksa, C. Charoendechanukor, T. Tubcharoen, J. Panpranot, P. Praserthdam, “ Characteristics and catalytic properties of La-modified ZrO₂ supported cobalt catalysts in CO hydrogenation”, Reaction Kinetic, Mechanism and Catalysis, 103 (2011) 2, P. 367-378

8. T. Bielz, S. Soisuwan, F. Girgsdies, B. Klötzer, S. Penner, “Reduction of different GeO₂ polymer”, Journal of Physical Chemistry C, 116 (2012) P. 9961 – 9968

9. T. Tubchareon, S. Soisuwan, S. Ratanathamphan, P. Praserthdam, “Effect of Na Content on the Physical Properties of Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃ Powders”, Advances in Materials Science and Engineering, volume 2014 Article ID 602504

10. S. Soisuwan, J. Phommachant, W. Wisajorn, P. Praserthdam, “The Characteristics of Green Calcium Oxide Derived from Aquatic Materials”, Procedia Chemistry, 9, 2014, 53-61

ผู้ร่วมวิจัย คนที่ 2

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) รองศาสตราจารย์ จันทรืทา นาควชิรตระกูล
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Associate. Prof. Chantra Nakvachiratrakul
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3219900046067
- ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์
เวลาที่ใช้ทำวิจัย (ชั่วโมง : สัปดาห์) 6 ชั่วโมงต่อสัปดาห์
- หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ. เมือง จ. ชลบุรี 20131
โทรศัพท์ 038102222 ต่อ 3390
โทรสาร 038745806
ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail) chantran@buu.ac.th
- ประวัติการศึกษา

คุณวุฒิ	ปี พ.ศ. ที่จบ	ชื่อสถานศึกษาและประเทศ
วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ)	2541	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย

วศ.บ. (วิศวกรรมอุตสาหการ) 2536 มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต (Productivity Improvement), การจัดการระบบการบำรุงรักษา (Maintenance Management System), เออร์โกโนมิกส์ (Ergonomics), วิศวกรรมความปลอดภัย (Safety Engineering)
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย
 - a. ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย -
 - b. หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย
 - (1) เรื่อง “การประยุกต์การบำรุงรักษาทีผลแบบทุกคนมีส่วนร่วมเพื่อพัฒนาประสิทธิผล กระบวนการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตฟิล์มโพลีเอสเตอร์ขนาดย่อม” ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๓
 - c. งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง)
 - (1) จันทร์ทา นาควชิรตระกูล และ สุรสิทธิ์ หมั่นทำ (๒๕๕๓) “การปรับปรุงกระบวนการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพสายการประกอบ : กรณีศึกษาอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี ๒๕๕๓, โรงแรมสุนีย์แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชันเซ็นเตอร์ จ.อุบลราชธานี. (ระยะเวลาที่ใช้ ๑ ปี ๖ เดือน)
 - (2) จันทร์ทา นาควชิรตระกูล และคณะ (๒๕๕๓) “การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสภาพของแบร็งตามกลยุทธ์การบำรุงรักษาตามสภาพ” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี ๒๕๕๓, โรงแรมสุนีย์แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชันเซ็นเตอร์ จ.อุบลราชธานี. (ระยะเวลาที่ใช้ ๒ ปี)
 - (3) จันทร์ทา นาควชิรตระกูล และ ประภาส ศุภศิริสัตยากุล (๒๕๕๔) “การประยุกต์การบำรุงรักษาทีผลแบบทุกคนมีส่วนร่วมเพื่อพัฒนาประสิทธิผล กระบวนการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตฟิล์มโพลีเอสเตอร์ขนาดย่อม” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี พ.ศ. ๒๕๕๔, โรงแรมแอมบาสเตอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา จ.ชลบุรี. (ระยะเวลาที่ใช้ ๑ ปี ๖ เดือน)
 - (4) จันทร์ทา นาควชิรตระกูล และคณะ (๒๕๕๔) “การลดค่าใช้จ่ายการซ่อมแม่พิมพ์ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนของหัวฉีดน้ำมันเครื่องยนต์” การประชุม

วิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี พ.ศ. ๒๕๕๔, โรงแรมแอมบาสเตอร์ซีดี จอมเทียน พัทยา จ.ชลบุรี. (ระยะเวลาที่ใช้ ๒ ปี)

(5) Pipatpanyanugoon, K., Chantra Nakvachiratrakul (2012). “Preparation of Lightweight Brick via Aluminum Powder” International Conference on intelligent Manufacturing & Logistics Systems, IML 2012. Ubon Ratchathani, Thailand, February 18-22, 2012, pp.300-303. (ระยะเวลาที่ใช้ ๑ ปี ๖ เดือน)

(6) จันท์ธา นาควชิรตระกูล (๒๕๕๕) “การศึกษาการยืดอายุการใช้งานชิ้นส่วนเครื่องจักรโดยพิจารณาจากความเชื่อถือได้” วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ ๔ มกราคม – ธันวาคม ๒๕๕๕, หน้า ๖๗ – ๗๒. (ระยะเวลาที่ใช้ ๒ ปี)

(7) จันท์ธา นาควชิรตระกูล เกษม พิพัฒน์ปัญญานุกูล และ เปรมกมล ปรีชาภรณ์ (๒๕๕๖) “การวิเคราะห์อาการเสียของบอลวาล์วโดยการทำให้เหมือนข้อมูล” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี พ.ศ. ๒๕๕๖, พัทยา จ.ชลบุรี. (ระยะเวลาที่ใช้ ๒ ปี)

(8) เกษม พิพัฒน์ปัญญานุกูล จันท์ธา นาควชิรตระกูล และ ปรางลักษณ์ อัมรนนท์ (๒๕๕๖) “การศึกษาความพึงพอใจในคำตอบแทน สวัสดิการและการจูงใจของพนักงาน” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี พ.ศ. ๒๕๕๖, พัทยา จ.ชลบุรี. (ระยะเวลาที่ใช้ ๒ ปี)

- d. งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อข้อเสนอการวิจัย แหล่งทุน และสถานภาพในการทำวิจัยว่าได้ทำการวิจัยคล่องแล้วประมาณร้อยละเท่าใด -

ผู้ร่วมวิจัย คนที่ 3

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นาย ปฏิภาณ บุญรวม
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Patiparn boonruam
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3439900096071
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
เวลาที่ใช้ทำวิจัย (ชั่วโมง : สัปดาห์) 6-8 ชั่วโมง : สัปดาห์
4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
 เลขที่ 169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131
 หมายเลขโทรศัพท์ 038102222 ต่อ 3351
 อีเล็กทรอนิกส์ (e-mail) : partipan@buu.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2539 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมเคมี) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
 ธนบุรี กรุงเทพมหานคร

พ.ศ. 2556 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัด
 ขอนแก่น

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
 เศรษฐศาสตร์ สาขา เศรษฐศาสตร์ธุรกิจ

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุ
 สถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้
 ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

- ไม่มี -

ผู้ร่วมวิจัยคนที่ 4

1. ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) ดร. แดง แซ่เบ๊
 (ภาษาอังกฤษ) Dr. DANG SAEBEA
2. เลขหมายประจำตัวประชาชน 1100800035221
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
 เวลาที่ใช้ทำวิจัย(ชั่วโมง : สัปดาห์) 8
4. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้สะดวก ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยบูรพา 169 ถ. ลงหาดบางแสน ต. แสนสุข อ. เมือง จ.
 ชลบุรี 20311
 โทรศัพท์ 0-3180-2222 ต่อ 114/ 0-2874-5806,
 โทรสาร 037-322-608
 E-mail dangs@eng.buu.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี), 2549

ปริญญาเอก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วศ.ด. (วิศวกรรมเคมี), 2554

6. สาขาวิชาที่ชำนาญ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

เซลล์เชื้อเพลิง/การผลิตไฮโดรเจน/พลังงานหมุนเวียน

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

7.1 หัวหน้าโครงการวิจัย: ชื่อโครงการวิจัย

7.1.1 หัวหน้าโครงการวิจัย: การศึกษาและออกแบบของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและเครื่องกังหันก๊าซ

7.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว: ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน

- ผลงานตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ

- 1) Authayanun, S., Saebea, D., Patcharavorachot, Y., Arpornwichanop, A. (2014) Effect of different fuel options on performance of high-temperature PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) systems. *Energy* 68 (2014) 989-997.
- 2) Authayanun, S., Patniboon, A., Saebea, D., Patcharavorachot, Y., Arpornwichanop, A. (2014) Effect of Flow Pattern on Single and Multi-stage High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack Performance. *Computer Aided Chemical Engineering*, 33, 1471-1476.
- 3) Saebea, D., Authayanun, S., Patcharavorachot, Y., Assabumrungrat, S., Arpornwichanop, A. (2013) Analysis of a pressurized solid oxide fuel cell–gas turbine hybrid power system with cathode gas recirculation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 11, 4748–4759.
- 4) Saebea, D., Authayanun, S., Patcharavorachot, Y., Paengjuntuek, W., Arpornwichanop, A. (2013). Use of different renewable fuels in a steam reformer integrated in a solid oxide fuel cell: Theoretical analysis and performance comparison *Energy*, 11, 1-9.
- 5) Saebea, D., Patcharavorachot, Y. and Arpornwichanop, A. (2012). Analysis of an Ethanol-Fuelled Solid Oxide Fuel Cell System Using Partial Anode Exhaust Gas Recirculation. *Journal of Power Sources*, 208, 120-130.
- 6) Chaichana, K., Patcharavorachot, Y., Chutichai, B., Saebea, D., Assabumrungrat, S., Arpornwichanop, A. (2012). Neural Network Hybrid Model of a Direct Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 2498-2508.

7) Saebea, D., Arpornwichanop, A., Patcharavorachot, Y. and Assabumrungrat, S. (2011). Adsorption-Membrane Hybrid System for Ethanol Steam Reforming: Thermodynamic Analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 14428-14434.

8) Authayanun, S., Pothong, W., Saebea, D., Patcharavorachot, Y. and Arpornwichanop, A. (2008). Modeling of an Industrial Fixed Bed Reactor Based on Lumped Kinetic Models for Hydrogenation of Pyrolysis Gasoline. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 14, 771-778.

9) Patcharavorachot, Y., Tirasetm S., Saebea, D., Paengjuntek, W., Arpornwichanop, A. (2013). Optimization of a Membrane-based Oxidative Coupling of Methane Reactor Using Surface Response Methodology. *Chemical Engineering Transactions*, 35, 121-127.

- ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1) DESIGN OF ENERGY RECUPERATION IN A SOLID OXIDE FUEL CELL-GAS TURBINE HYBRID SYSTEM WITH ETHANOL AS FUEL, Fifth European Fuel Cell Technology & Applications Conference, Piero Lunghi Conference, December 11-13, 2013, Rome, Italy

2) Saebea, D., Authayanun, S., Patcharavorachot, Y., Arpornwichanop, A. Thermodynamic analysis of hydrogen production from the adsorption-enhanced steam reforming of biogas. The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE2014, 30 May – 2 June, 2014, Taipei City, Taiwan.

3) Enhancement of hydrogen production for steam reforming of biogas in fluidized bed membrane reactor, 17th Conference “Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction” (PRES 2014), 23 – 27, AUGUST 2014, PRAGUE, CZECH REPUBLIC

4) Saebea, D., Magistri, L., Massardo, A., Arpornwichanop, A. (2012). Design and Heat Recovery of Pressurized SOFC/GT Hybrid Systems. *Fuel cell 2012 Science & Technology Conference*, April 10-11, 2012, Berlin, Germany.

5) Saebea, D., Authayanun, S., Patcharavorachot, Y., Paengjuntek, W., Arpornwichanop, A. (2012). Performance Analysis of SOFC Systems Integrated with Steam Reforming of Different Renewable Fuels. *International Conference*

on Renewable Energy and Power Quality (ICREPO'12), March 28-30, 2012, Santiago de Compostela, Spain.

6) Saebea, D., Patcharavorachot, Y., Assabumrungrat, S. and Arpornwichanop, A. (2011). Design of a Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid Power System with Cathode Gas Recycling. *Asia Pacific Chemical Reaction Engineering Symposium (APCRE'11)*, September 18-21, 2011, Beijing, China. (Excellent Poster Presentation)

7) Saebea, D., Patcharavorachot, Y., Assabumrungrat, S. and Arpornwichanop, A., A Thermodynamic Study on Adsorption-Membrane Hybrid System for Ethanol Steam Reforming. *CHEMECA 2010*, September 26-29, 2010, Adelaide, Australia.

8) Arpornwichanop, A., Chutichai, B., Chaichana, K., Saebea, D., Assabumrungrat, S. and Tade, M. (2009). Hybrid Neural Network Model of a Solid Oxide Fuel Cell. *CHEMECA 2009*, Sep. 27-30, 2009, Perth, Australia.

9) Patcharavorachot, Y., Saebea, D., Assabumrungrat, S., Arpornwichanop, A. (2008). Investigation of Electrochemical Behavior of SOFCs with a Proton-Conducting Electrolyte. *Mexican Congress on Chemical Reaction Engineering (MCCRE 2008)*, June 15-19, 2008, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero, Mexico.

-
1. R.H. Sokolow, S.W. Pacala, "Direct Synthesis of DMC from scCO₂–Assistance of Nano-Oxides Produced by an scH₂O Device.", *Sci. Am.*, Volume 295 , pp. 28, 2006.
 2. Statistics Finland, "Greenhouse gas emissions in 1990 and 1995–2005, by source category gas"[Online] แหล่งที่มา : http://www.stat.fi/til/khki/2005/khki_20052007-04-19_tau_001_en.html. [มีนาคม 2556]
 3. Thomas Engel, Philip Reid, *Physical Chemistry*, 2nd edition, Pearson Education, Inc., Appendix B, 2010.
 4. United Nations Framework Convention on Climate Change, *Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amounts*.
 5. วิษณีย์ ออมทรัพย์สินและคณะ, "การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ"[Online] แหล่งที่มา : <http://www.doa.go.th/palm/pdf/performance1/research/crude%20palm%20oil.pdf> [มีนาคม 2556]
 6. Ipatieff VN, Monroe GS., "Synthesis of methanol from carbon dioxide and hydrogen over copper-alumina catalyts.", *Mechanism of reaction.*, *J Am Chem Soc*, Volume 67, pp. 2168–2171, 1945.
 7. L. Xu, Q. Wang, D. Liang, X. Wang, L. Lin, W. Cui, Y. Xu, "The promotion of MnO and K₂O to Fe/silicalite-2 catalyst for the production of light alkenes from CO₂ hydrogenation" *Applied Catalysis A: General* 173 (1998) 19-25
 8. Abass A. Olajire, "Valorization of greenhouse carbon dioxide emission into value-added products by catalytic processes, *Journal of CO₂ Utilization* , 3-4 (2013) 74-92
 9. X.An, J.L. Li, Y.Z. Zuo, Q. Zhang, W.Z. Li, N. Tsubaki, *Fuel* 87 (2006) 443