RESEARCH ARTICLE ISSN 2730-2334 (Online)

การจำลองกระบวนการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง: ไฮโดรเจน มีเทน เมทานอล และไดเมทิลอีเทอร์ ด้วยก๊าซเสียจากการเผาไหม้

SIMULATION OF HIGH-VALUE PRODUCT SYNTHESIS: HYDROGEN, METHANE, METHANOL AND DIMETHYL ETHER FROM FLUE GAS

***วรณี มังคละศิริ*[1]*, *พัทธ์ศริยา พงษ์ลำเจียกงาม*[1], *สุกษมา เอี่ยมเล็ก*[1], *จิตติ มังคละศิริ*[2]**

***Woranee Mungkalasiri*[1]*, *Patsariya Ponglumjeakngam*[1], *Sukasama Iamlek*[1], *Jitti Mungkalasiri*[2]**

[1]*ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*

[1]*Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University.*

[2]*สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ*

[2]*National Science and Technology Development Agency.*

**Corresponding author, e-mail: pworanee@engr.tu.ac.th*

***Received:** 29 July 2021; **Revised:** 22 June 2022; **Accepted:** 30 June 2022*

บทคัดย่อ

อิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง (Solid oxide electrolysis cell: SOEC) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าเคมีที่สามารถเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์กับไอน้ำซึ่งเป็นก๊าซเสียจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมไปเป็นก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis gas) ได้ โดยก๊าซสังเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้ผลิตเชื้อเพลิงต่าง ๆ เช่น มีเทน เมทานอล และไดเมทิลอีเทอร์ได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง โดยใช้ก๊าซเสียจากการเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจนร่วมกับการสังเคราะห์มีเทน เมทานอล และไดเมทิลอีเทอร์ โดยทำการศึกษาด้วยการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus V.11 เพื่อศึกษาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจน มีเทน เมทานอล และไดเมทิลอีเทอร์ โดยในการศึกษานี้จะป้อนก๊าซเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินเข้ามาในกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งในปริมาณ 200 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดำเนินงานของแต่ละกระบวนการ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง คือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 3.261 กิโลโมลต่อชั่วโมง สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์มีเทน คือ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ สัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 1 และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 4 สามารถผลิตมีเทนได้ 1.630 กิโลโมลต่อชั่วโมง สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล คือ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 100 บาร์ สัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 2 และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 4 สามารถผลิตเมทานอลที่ได้ 1.435 กิโลโมลต่อชั่วโมง และสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ คือ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 20 บาร์ สัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 1 และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 2 สามารถผลิตไดเมทิลอีเทอร์ได้ 1.287

กิโลโมลต่อชั่วโมง นอกจากนี้ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าก๊าซเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินหรือก๊าซเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นสามารถนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์เพิ่มมูลค่าได้ ซึ่งสอดคล้องตามนโยบายเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy)

คำสำคัญ: ก๊าซเสียจากการเผาไหม้; ไดเมทิลอีเทอร์; มีเทน; เมทานอล; อิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง; ไฮโดรเจน

Abstract

The solid oxide electrolysis cell (SOEC) is an electrochemical device that can efficiently convert carbon dioxide and steam to syngas using flue gas from industrial processes. Syngas can be used to produce various fuels such as methane, methanol and dimethyl ether. Therefore, this research aims to study the production of hydrogen from a solid oxide electrolysis cell system. Flue gas from a coal power plant was used to produce hydrogen. Then, hydrogen was used as a main feed component in methane synthesis, methanol synthesis and dimethyl ether synthesis. These processes were designed and simulated by using Aspen Plus V.11. The developed model was employed to study the optimal operating conditions of each process. In this study, flue gas from a coal power plant was fed into SOEC with 200 l/hr. The influences of variables affecting the operation of each process were studied. The simulation results showed that the optimal operating conditions for SOEC were temperature of 800^{o}C and pressure of 1 bar. The maximum amount of hydrogen was 3.261 kmol/hr. The optimal operating conditions for methane synthesis were temperature of 100^{o}C, pressure of 30 bar, H_2/CO ratio of 1 and H_2/CO_2 ratio of 4. The maximum amount of methane was 1.630 kmol/hr. The optimal operating conditions for methanol synthesis were temperature of 200^{o}C, pressure of 100 bar, H_2/CO ratio of 2 and H_2/CO_2 ratio of 4. The maximum amount of methanol was 1.435 kmol/hr. The optimal operating conditions for dimethyl ether synthesis were temperature of 140^{o}C, pressure of 20 bar, H_2/CO ratio of 1 and H_2/CO_2 ratio of 2. The maximum amount of dimethyl ether was 1.287 kmol/hr. Furthermore, the results from this study revealed that flue gas or waste gas produced from power plant or other industries can be reused to produce high value-added products which according to circular economy concept.

Keywords: Flue Gas; Dimethyl Ether; Methane; Methanol; Solid Oxide Electrolysis Cell; Hydrogen

บทนำ

ไฮโดรเจนเป็นพลังงานทางเลือกที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถผลิตจากแหล่งพลังงานที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ ไม่หมดไป และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม อิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง (Solid oxide electrolysis cell: SOEC) เป็นกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งยังเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด ซึ่งไฮโดรเจนที่ผลิตได้นั้นสามารถนำไปผลิตเป็นมีเทน เมทานอล และไดเมทิลอีเทอร์ได้อีกด้วย โดยก๊าซมีเทน (Methane) สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนในโรงงานอุตสาหกรรมได้ และสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงได้ [1] สำหรับเมทานอล (Methanol) นั้นเป็นสารเคมีพื้นฐานที่สำคัญในอุตสาหกรรมเคมีต่าง ๆ สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็ก

นอกจากนี้เมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญสำหรับการผลิตไบโอดีเซลอีกด้วย สำหรับไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl ether: DME) นั้นนิยมนำมาใช้ทดแทนก๊าซปิโตรเลียมเหลว เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพคล้ายก๊าซปิโตรเลียมเหลว อีกทั้งยังสามารถนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ [2]

พลังงานไฮโดรเจนเป็นพลังงานแห่งอนาคตจึงมีงานวิจัยหลายฉบับที่ทำการศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงในรูปของไฮโดรเจน ด้วยการใช้สารตั้งต้นชนิดต่าง ๆ ที่สภาวะการดำเนินงานที่แตกต่างกัน รวมถึงการผลิตมีเทน เมทานอล และไดเมทิลอีเทอร์จากก๊าซสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ ด้วย ดังเช่นงานวิจัยของ Youssef Redissi และคณะ (2013) [3] ได้ศึกษากระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งซึ่งดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง 800 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ โดยใช้สารตั้งต้นคือคาร์บอนไดออกไซด์ 450 กิโลโมลต่อชั่วโมง ไฮโดรเจน 100 กิโลโมลต่อชั่วโมง และไอน้ำ 450 กิโลโมลต่อชั่วโมง เพื่อผลิตก๊าซสังเคราะห์ งานวิจัยของ Seyedmehdi Sharifian และคณะ (2015) [4] ทำการศึกษากระบวนการสังเคราะห์มีเทน โดยใช้สารตั้งต้นคือคาร์บอนไดออกไซด์ 16% คาร์บอนมอนอกไซด์ 4% และไฮโดรเจน 80% ที่สภาวะอุณหภูมิ 298 เคลวิน ความดัน 1 บาร์ สัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 4 และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 4 งานวิจัยของ Kok Siew และคณะ (2011) [5] ทำการศึกษากระบวนการสังเคราะห์เมทานอลโดยใช้สารตั้งต้นคือ คาร์บอนไดออกไซด์ 0.1% คาร์บอนมอนอกไซด์ 31.3% ไฮโดรเจน 66.1% และไอน้ำ 2.5% ที่สภาวะอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดัน 100 บาร์ สัดส่วน CO/CO_2 เท่ากับ 4 งานวิจัยของ Takashi Ogawa และคณะ (2003) [6] ทำการศึกษากระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากก๊าซสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์ 3.12 กิโลโมลต่อชั่วโมง คาร์บอนมอนอกไซด์ 17.18 กิโลโมลต่อชั่วโมง และไฮโดรเจน 17.94 กิโลโมลต่อชั่วโมง ที่สภาวะอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์ สัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 1 เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ พบว่า การกำหนดสภาวะการดำเนินงานของกระบวนการนั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมในการนำก๊าซเสียจากการเผาไหม้ (Flue gas) ของโรงไฟฟ้าถ่านหินมาผลิตไฮโดรเจนร่วมกับการสังเคราะห์มีเทน เมทานอล และไดเมทิลอีเทอร์ โดยทำการศึกษาด้วยการจำลองกระบวนการบนโปรแกรม Aspen Plus V.11 ซึ่งงานวิจัยนี้อ้างอิงข้อมูลองค์ประกอบของก๊าซเสียจากงานวิจัยของ Stempien และคณะ [7]

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

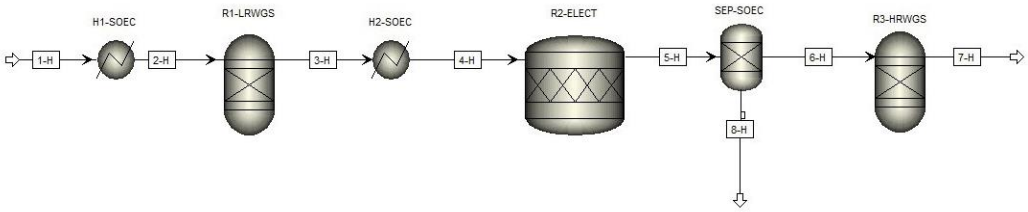
ศึกษาปัจจัยตัวแปรที่มีอิทธิพลสำคัญของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรเจน, มีเทน, เมทานอล และไดเมทิลอีเทอร์ เพื่อกำหนดสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของแต่ละกระบวนการ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การจำลองกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง

กระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งสามารถเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำให้เป็นก๊าซสังเคราะห์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้อย่างหลากหลาย นอกจากนี้ยังเป็นการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศโลก และช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย [8] โดยกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งในงานวิจัยนี้ได้นำก๊าซเสียจากการเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าถ่านหินที่มีองค์ประกอบต่อปริมาตรเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 18%, ไอน้ำ 35% และก๊าซไนโตรเจน 47% มาเข้าสู่กระบวนการด้วยอัตราการไหล 200 ลิตรต่อชั่วโมง (6.3054 กิโลโมลต่อชั่วโมง) อุณภูมิ 110 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ (สาย 1-H) [7] เพื่อสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจน (สาย 7-H) โดยก๊าซเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (H1) และถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ R1 (กำหนดเครื่องปฏิกรณ์ชนิด RGibbs) จากนั้นผ่านเครื่องแลกเปลี่ยน

ความร้อน (H2) และป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ R2 เพื่อเกิดปฏิกิริยาดังสมการ (1) และ (2) จากนั้นก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเข้าสู่เครื่องแยก (SEP) เพื่อแยกก๊าซออกซิเจนออกจากก๊าซสังเคราะห์ จากนั้นก๊าซสังเคราะห์สาย 6-H จะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ R3 เพื่อเกิดปฏิกิริยา Reverse water gas shift ดังสมการ (3) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซสังเคราะห์สาย 7-H ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus V.11 ในการจำลองกระบวนการ ดังแสดงในภาพที่ 1 และในการจำลองกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งนี้จะเลือกใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic model) เป็น RKSMHV2 (Redlich-Kwong-Soave equation of state with modified Huron-Vidal mixing rules) ซึ่งแบบจำลองกระบวนการนี้ได้ทดสอบความถูกต้อง (Model validation) กับงานวิจัยของ Youssef Redissi และคณะ (2013) [3]



ภาพที่ 1 แบบจำลองกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งด้วยโปรแกรม Aspen Plus V.11

โดยปฏิกิริยาในกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง [8] มีดังต่อไปนี้

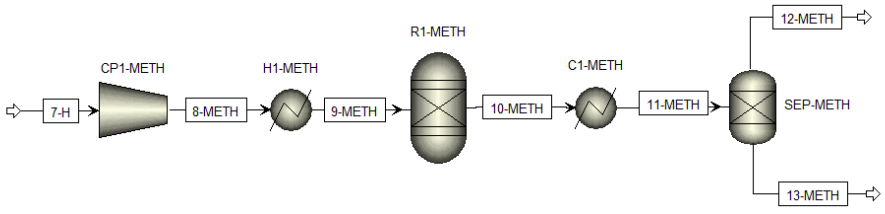
Steam electrolysis: $H_2O \longrightarrow H_2 + ½O_2$ $\Delta H = 242$ kJ/mol (1)

CO_2 electrolysis: $CO_2 \longrightarrow CO + ½O_2$ $\Delta H = 282$ kJ/mol (2)

Reverse water gas shift: $CO_2 + H_2 \leftrightarrow CO + H_2O$ $\Delta H = 41$ kJ/mol (3)

2. การจำลองกระบวนการสังเคราะห์มีเทน

กระบวนการสังเคราะห์มีเทน เป็นกระบวนการที่นำก๊าซสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง (สารขาออกสาย 7-H จากภาพที่ 1) ที่สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมมาใช้เป็นสารตั้งต้น โดยแบบจำลองกระบวนการสังเคราะห์มีเทนแสดงดังภาพที่ 2 ก๊าซสังเคราะห์ในสาย 7-H ถูกป้อนผ่านคอมเพรสเซอร์ CP1 และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน H1 จากนั้นจะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ R1 (กำหนดเครื่องปฏิกรณ์ชนิด RGibbs) เพื่อเกิดปฏิกิริยาดังสมการ (4)-(7) จากนั้นทำการลดอุณหภูมิที่ C1 และเข้าสู่เครื่องแยก SEP เพื่อแยกก๊าซมีเทน (สาย 12-METH) ออกจากก๊าซที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา (สาย 13-METH) และในการจำลองกระบวนการสังเคราะห์มีเทนนี้จะเลือกใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ PRMHV2 (Peng-Robinson equation of state with modified Huron-Vidal mixing rules) ซึ่งแบบจำลองกระบวนการนี้ได้ทดสอบความถูกต้องกับงานวิจัยของ Seyedmehdi Sharifian และคณะ (2015) [4]



ภาพที่ 2 แบบจำลองกระบวนการสังเคราะห์มีเทนด้วยโปรแกรม Aspen Plus V.11

โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์มีเทน [9-11] มีดังต่อไปนี้

CO methanation: $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ ΔH = -206 kJ/mol (4)

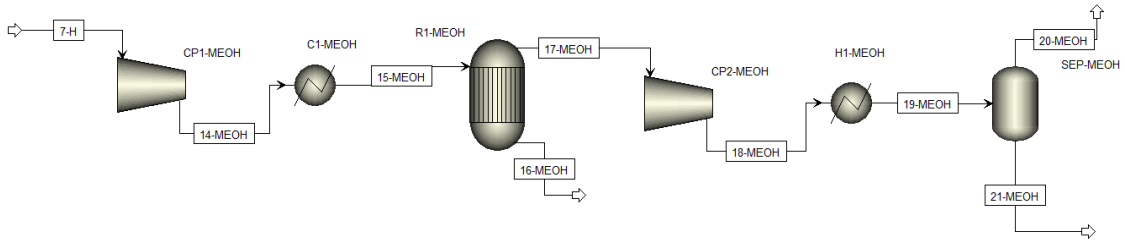
Water gas shift: $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ ΔH = -41 kJ/mol (5)

Boudouard reaction: $2CO \rightarrow C + CO_2$ ΔH = -172 kJ/mol (6)

CO_2 methanation: $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$ ΔH = -165 kJ/mol (7)

3. การจำลองกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล

กระบวนการสังเคราะห์เมทานอล เป็นกระบวนการที่นำก๊าซสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งมาใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์เป็นเมทานอล (สารขาออกสาย 7-H จากภาพที่ 1) โดยแบบจำลองกระบวนการสังเคราะห์เมทานอลแสดงดังภาพที่ 3 ก๊าซสังเคราะห์ในสาย 7-H จะถูกป้อนผ่านคอมเพรสเซอร์ CP1 ผ่านเครื่องทำความเย็น C1 จากนั้นจะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ R1 (กำหนดเครื่องปฏิกรณ์ชนิด REquil) เพื่อเกิดปฏิกิริยาดังสมการ (3) และ (8) จากนั้นป้อนเข้าสู่เครื่องคอมเพรสเซอร์ (CP2) ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (H1) และเข้าสู่เครื่องแยก SEP) เพื่อแยกเมทานอล (สาย 21-MEOH) ออกจากก๊าซที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา (สาย 20-MEOH) และในการจำลองกระบวนการสังเคราะห์เมทานอลนี้จะใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ PENG-ROB (Peng-Robinson equation of state) ซึ่งแบบจำลองกระบวนการนี้ได้ทดสอบความถูกต้องกับงานวิจัยของ Kok Siew และคณะ (2011) [5]



ภาพที่ 3 แบบจำลองกระบวนการสังเคราะห์เมทานอลด้วยโปรแกรม Aspen Plus V.11

โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอล [2] มีดังต่อไปนี้

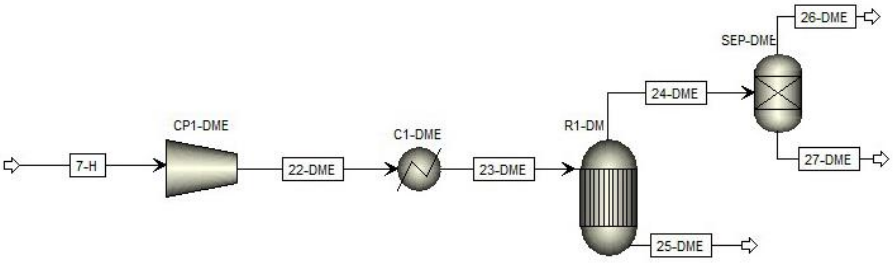
Reverse water gas shift: $CO_2 + H_2 \leftrightarrow CO + H_2O$ ΔH = 41 kJ/mol (3)

Hydrogenation: $CO + 2H_2 \longrightarrow CH_3OH$ ΔH = -90.6 kJ/mol (8)

4. การจำลองกระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ (CH_3OCH_3) ด้วยวิธีตรง (Direct synthesis) เป็นการทำงานร่วมกันของขั้นตอนการสังเคราะห์เมทานอลและขั้นตอนการดึงน้ำออกจากเมทานอลที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์เดียวกัน ในงานวิจัยนี้กระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์เป็นกระบวนการที่ใช้สารตั้งต้นมาจากกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง (สารขาออกสาย 7-H จากภาพที่ 1) โดยแบบจำลองกระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แสดงดังภาพที่ 4 ก๊าซสังเคราะห์ในสาย 7-H จะถูกป้อนผ่านคอมเพรสเซอร์ CP1 ผ่านเครื่องทำความเย็น C1 จากนั้นจะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ R1 (กำหนดเครื่องปฏิกรณ์ชนิด REquil) เพื่อเกิดปฏิกิริยาดังสมการ (5), (8) และ (9) จากนั้นป้อนเข้าสู่เครื่องแยก (SEP) เพื่อแยกไดเมทิลอีเทอร์ (สาย 26-DME) ออกจากก๊าซที่เหลือ

จากการทำปฏิกิริยา (สาย 27-DME) และในการจำลองกระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์นี้จะเลือกใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ NRTL (Non-random two-liquid model) ซึ่งแบบจำลองกระบวนการนี้ได้ทดสอบความถูกต้องกับงานวิจัยของ Takashi Ogawa และคณะ (2003) [6]



ภาพที่ 4 แบบจำลองกระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ด้วยโปรแกรม Aspen Plus V.11

โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ [12] มีดังต่อไปนี้

Water gas shift: $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ ΔH = -41 kJ/mol (5)

Hydrogenation: $CO + 2H_2 \longrightarrow CH_3OH$ ΔH = -90.6 kJ/mol (8)

Methanol dehydration:

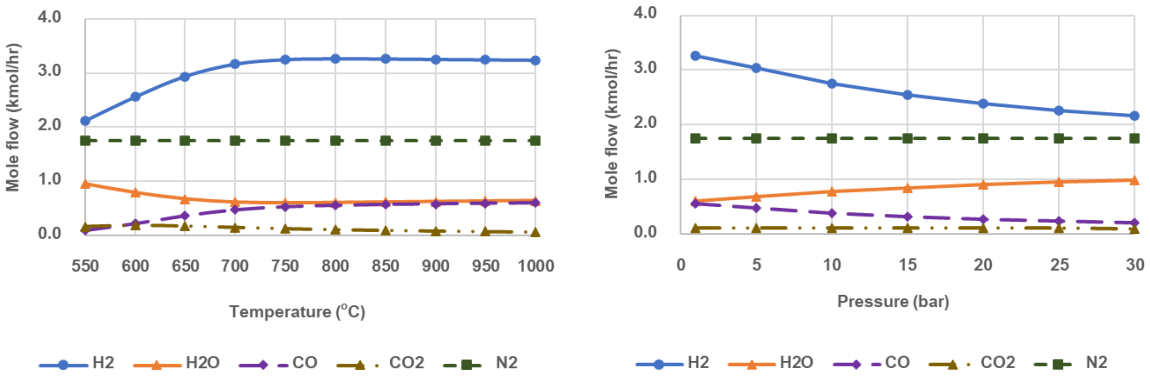
$2CH_3OH \leftrightarrow CH_3OCH_3 + H_2O$ ΔH = -23.4 kJ/mol (9)

ผลการวิจัย

ตอนที่ 1 สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง

ตอนที่ 1.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในช่วง 550 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บาร์ แสดงดังภาพที่ 5 (ก) และอิทธิพลของความดันในช่วง 1 ถึง 30 บาร์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 5 (ข)



(ก) (ข)

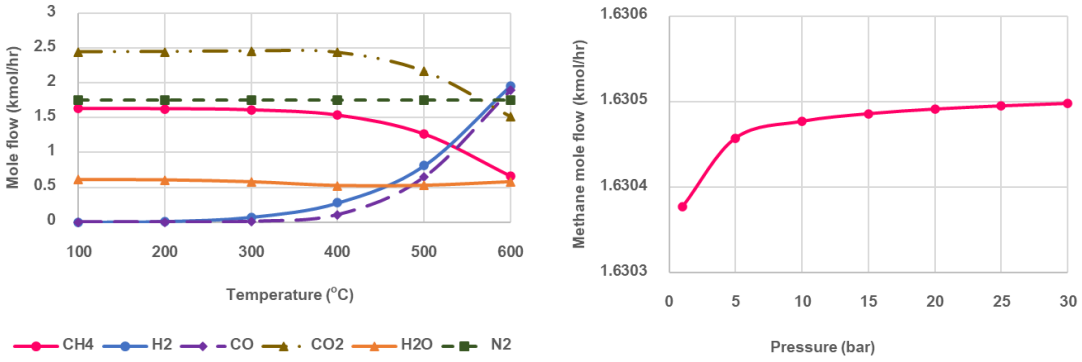
ภาพที่ 5 (ก) อิทธิพลของอุณหภูมิ และ (ข) อิทธิพลของความดันที่มีผลต่อปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์สังเคราะห์ในกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง

จากผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 5 (ก) พบว่าที่ความดันเดียวกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยา Steam electrolysis, CO_2 electrolysis และ Reverse water gas shift ดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 800 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจะคงที่และลดลงเล็กน้อยเนื่องจากปฏิกิริยา Reverse water gas shift ทำให้ก๊าซไฮโดรเจนที่สังเคราะห์ได้บางส่วนทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [13] และจากผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 5 (ข) พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ปริมาณไฮโดรเจนที่สังเคราะห์ได้จะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยา Reverse water gas shift ดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้นทำให้ไอน้ำมากขึ้น ส่วนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยา CO_2 electrolysis เกิดน้อยลงที่ความดันสูงขึ้น [14] ซึ่งกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งจะดำเนินการได้ดีที่ความดันต่ำ [15] โดยงานวิจัยนี้สามารถผลิตไฮโดรเจนได้มากที่สุดเท่ากับ 3.261 กิโลโมลต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสและความดัน 1 บาร์

ตอนที่ 2 สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์มีเทน

ตอนที่ 2.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์มีเทน

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในช่วง 100 ถึง 600 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บาร์ แสดงดังภาพที่ 6 (ก) และผลการศึกษาอิทธิพลของความดันในช่วง 1 ถึง 30 บาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 6 (ข) โดยกำหนดค่าสัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 1 และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 4



(ก) (ข)

ภาพที่ 6 (ก) อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์สังเคราะห์ในกระบวนการสังเคราะห์มีเทน และ (ข) อิทธิพลของความดันที่มีผลต่อปริมาณมีเทน

จากผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 6 (ก) พบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการส่งผลให้ปริมาณมีเทนที่สังเคราะห์ได้มีค่าลดลง และเกิดปฏิกิริยา Reverse water gas shift ซึ่งเป็นผลให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นด้วย [16] อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อุณหภูมิที่น้อยกว่า 100 องศาเซลเซียส ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะไม่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องใช้สภาวะการดำเนินงานที่มากกว่า 100 องศาเซลเซียส [17] และจากผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 6 (ข) พบว่า เมื่อทำการเมื่อเพิ่มความดันปริมาณมีเทนจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์คือมีเทนมากขึ้นเล็กน้อย [16]

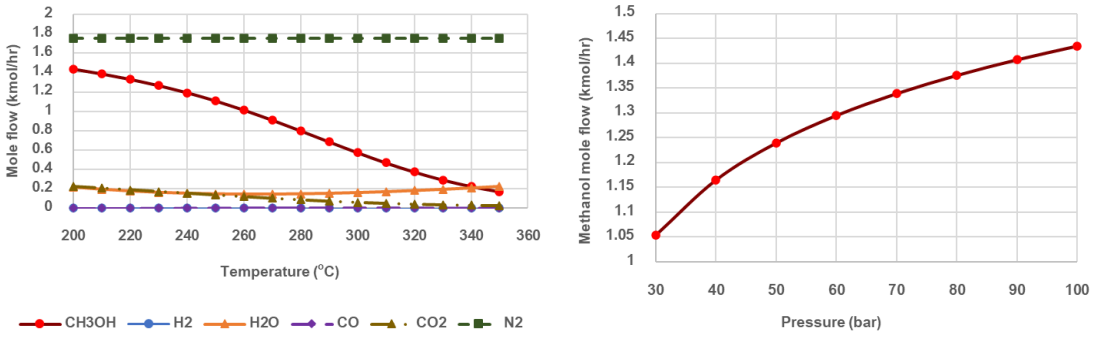
ตอนที่ 2.2 การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน H_2/CO และสัดส่วน H_2/CO_2 ที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์มีเทน

การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน H_2/CO ในช่วง 1 ถึง 4 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 4 ผลการศึกษาพบว่าปริมาณมีเทนมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนของ H_2/CO มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัดส่วนที่ H_2/CO เท่ากับ 1 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมของการทำปฏิกิริยากันระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และทำการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน H_2/CO_2 ในช่วง 1 ถึง 4 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ และสัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 1 ผลการศึกษาพบว่าปริมาณมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของ H_2/CO_2 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากคาร์บอนที่อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องการก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณมาก ๆ เพื่อที่จะนำไปผลิตเป็นมีเทน ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น ก๊าซมีเทนและไอน้ำที่ได้จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ก๊าซไฮโดรเจนมีปริมาณลดลง [18] โดยอัตราส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 4 คาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถเปลี่ยนเป็นมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยงานวิจัยนี้สามารถผลิตมีเทนได้มากที่สุดเท่ากับ 1.630 กิโลโมลต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ สัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 1 และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 4

ตอนที่ 3 สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล

ตอนที่ 3.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในช่วง 200 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 100 บาร์ แสดงดังภาพที่ 7 (ก) และผลการศึกษาอิทธิพลของความดันในช่วง 30 ถึง 100 บาร์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 7 (ข) โดยกำหนดค่าสัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 2 และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 4



(ก) (ข)

ภาพที่ 7 (ก) อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์สังเคราะห์ในกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล และ (ข) อิทธิพลของความดันที่มีผลต่อปริมาณเมทานอล

จากผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 7 (ก) พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเข้าไปในระบบปริมาณเมทานอลที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาผลิตเมทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ผลิตเมทานอลได้ลดลง ในทางกลับกันปฏิกิริยา Reverse water gas shift เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปด้านหน้า ส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง แต่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น [19] และจากผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 7 (ข) พบว่าเมื่อเพิ่มความดันเข้าไปปริมาณเมทานอลจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันจะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สลายตัวเกิดเป็นเมทานอลมากขึ้น [20]

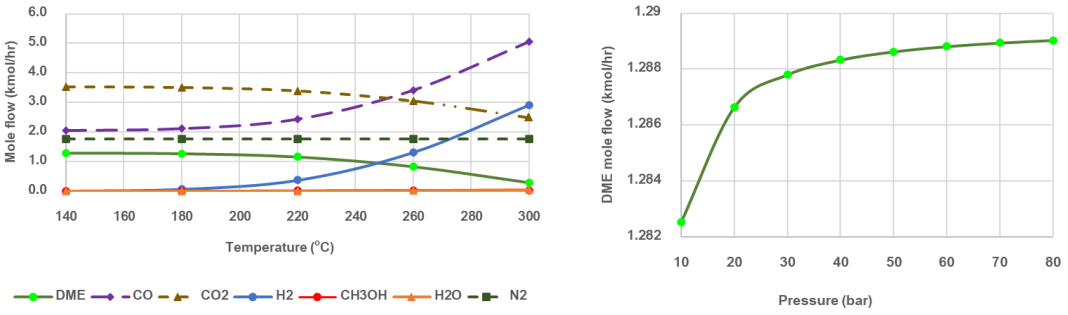
ตอนที่ 3.2 การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน H_2/CO และสัดส่วน H_2/CO_2 ที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล

การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน H_2/CO ในช่วง 2.0 ถึง 2.5 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 100 บาร์ และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 4 ผลการศึกษาพบว่าเมื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลง (สัดส่วน H_2/CO สูงขึ้น) ปริมาณเมทานอลจะลดลง เนื่องจากการลดปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลงจะทำให้ปฏิกิริยา Hydrogenation ผลิตเมทานอลได้น้อยลง ซึ่งถ้าสัดส่วนของ H_2/CO น้อยกว่า 2 จะทำให้ปฏิกิริยาการผลิตเมทานอลจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ [21] และทำการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน H_2/CO_2 ในช่วง 1 ถึง 4 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 100 บาร์ และสัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 2 ผลการศึกษาพบว่าเมื่อสัดส่วน H_2/CO_2 มีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณเมทานอลที่สังเคราะห์ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากคาร์บอนที่อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องการก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณมาก ๆ เพื่อที่จะนำไปผลิตเป็นเมทานอล ดังสมการการผลิตเมทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยงานวิจัยนี้สามารถผลิตเมทานอลได้มากที่สุดเท่ากับ 1.435 กิโลโมลต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 100 บาร์ สัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 1 และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 4

ตอนที่ 4 สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์

ตอนที่ 4.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในช่วง 140 ถึง 300 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 20 บาร์ แสดงดังภาพที่ 8 (ก) และผลการศึกษาอิทธิพลของความดันในช่วง 10 ถึง 80 บาร์ ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 8 (ข) โดยกำหนดค่าสัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 1 และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 2



(ก) (ข)

ภาพที่ 8 (ก) อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์สังเคราะห์ในกระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ และ (ข) อิทธิพลของความดันที่มีผลต่อปริมาณไดเมทิลอีเทอร์

จากผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 8 (ก) พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณไดเมทิลอีเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์มีการคายความร้อนสูง ซึ่งไดเมทิลอีเทอร์ส่วนใหญ่จะสังเคราะห์ได้ดีที่อุณหภูมิต่ำแต่ต้องไม่ต่ำกว่า 140 องศาเซลเซียส [22] การสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอล (Methanol synthesis) และกระบวนการดีไฮเดรชันของเมทานอล (Methanol dehydration) และทำให้ได้ปริมาณไดเมทิลอีเทอร์สูง ส่วนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยา Reverse water gas shift ทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นแต่ปริมาณไดเมทิลอีเทอร์ลดลง [23] และผลการศึกษาอิทธิพลของความดันแสดงในภาพที่ 8 (ข) พบว่าเมื่อเพิ่มความดัน ปริมาณไดเมทิลอีเทอร์จะเพิ่มขึ้น โดยปริมาณไดเมทิล

อีเทอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจนถึง 20 บาร์ หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย [24] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้สภาวะการดำเนินงานที่ความดัน 20 บาร์เป็นสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสม

ตอนที่ 4.2 การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน H_2/CO และสัดส่วน H_2/CO_2 ที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์

การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน H_2/CO ในช่วง 1 ถึง 2 ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 20 บาร์ และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 2 ผลการศึกษาการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ด้วยวิธีตรงเป็นการทำงานร่วมกันของขั้นตอนการสังเคราะห์เมทานอลจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และการสังเคราะห์เมทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และขั้นตอนการดึงน้ำออกจากเมทานอลที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์เดียวกัน เมื่อสัดส่วน H_2/CO เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณไดเมทิลอีเทอร์ลดลง เนื่องจากปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจึงทำให้ปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอลจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ผลิตเมทานอลได้น้อย จึงเกิดไดเมทิลอีเทอร์น้อยลง และทำการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน H_2/CO_2 ในช่วง 1 ถึง 4 ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 20 บาร์ และสัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 1 ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วน H_2/CO_2 ปริมาณไดเมทิลอีเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่สัดส่วน H_2/CO_2 คือ 2 เนื่องจากถ้าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจะส่งผลให้ผลิตเมทานอลได้น้อยลง จึงทำให้ปริมาณไดเมทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นไม่มากนัก ในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ต้องอาศัยปฏิกิริยาการเกิดเมทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปฏิกิริยา Water gas shift เพื่อเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์ดังสมการปฏิกิริยา Methanol dehydration โดยงานวิจัยนี้สามารถผลิตไดเมทิลอีเทอร์ได้มากที่สุดเท่ากับ 1.287 กิโลโมลต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 20 บาร์ สัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 1 และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 2

สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรเจนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งโดยใช้ก๊าซเสียจากการเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้นด้วยวิธีการจำลองกระบวนการด้วยโปแกรม Aspen Plus V.11 จากการศึกษาพบว่าสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งที่สามารถผลิตก๊าซสังเคราะห์ให้มีปริมาณไฮโดรเจนมากที่สุด คือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลในเทอมของปริมาณไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของก๊าซสังเคราะห์ที่ผลิตได้ต่อปริมาณไอน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารตั้งต้นในกระบวนการนั้น พบว่างานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่างานวิจัยของ Youssef Redissi (2013) [3] โดยงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.84 และงานวิจัยของ Youssef Redissi (2013) [3] มีค่าเท่ากับ 0.68 นอกจากนี้ก๊าซสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากกระบวนการ อิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งนี้สามารถนำไปใช้ผลิตเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ได้แก่ มีเทน, เมทานอล และไดเมทิลอีเทอร์ได้ ผลการศึกษาพบว่าสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์มีเทน คือ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ สัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 1 และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 4 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอ้างอิงของ Seyedmehdi Sharifian และคณะ (2015) [4] ในเทอมของปริมาณผลิตภัณฑ์มีเทนที่ผลิตได้ต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ป้อนเข้าจะพบว่างานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่างานวิจัยของงานวิจัยอ้างอิงดังกล่าว โดยงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.50 และงานวิจัยของ Seyedmehdi Sharifian และคณะ (2015) [4] มีค่าเท่ากับ 0.01 สำหรับผลการศึกษาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล คือ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 100 บาร์ สัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 2 และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 4 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ Kok Siew และคณะ (2011) [5] ในเทอมของปริมาณผลิตภัณฑ์เมทานอลที่ผลิตได้ต่อปริมาณ

ไฮโดรเจนที่ป้อนเข้าจะพบว่างานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่างานวิจัยอ้างอิงดังกล่าว โดยงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.44 และงานวิจัยของ Kok Siew และคณะ (2011) [5] มีค่าเท่ากับ 0.34 นอกจากนี้ผลการศึกษาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ คือ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 20 บาร์ สัดส่วน H_2/CO เท่ากับ 1 และสัดส่วน H_2/CO_2 เท่ากับ 2 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ Takashi Ogawa และคณะ (2003) [6] ในเทอมของปริมาณผลิตภัณฑ์ไดเมทิลอีเทอร์ที่ผลิตได้ต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ป้อนเข้าจะพบว่างานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่างานวิจัยอ้างอิงดังกล่าว โดยงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.395 และงานวิจัยของ Takashi Ogawa และคณะ (2003) [6] มีค่าเท่ากับ 0.288 ซึ่งการที่กระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจน มีเทน เมทานอล และไดเมทิลอีเทอร์ในงานวิจัยนี้ สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้ในสัดส่วนที่สูงกว่างานวิจัยอ้างอิงนั้นเป็นผลมาจากการพิจารณาเลือกสภาวะการทำงานของตัวแปรที่เหมาะสมซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยอ้างอิง รวมถึงปริมาณองค์ประกอบของก๊าซเสียที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ด้วย นอกจากนี้การนำก๊าซเสียจากโรงไฟฟ้าหรือโรงงานอุตสาหกรรมกลับมาใช้ในกระบวนการอีกครั้ง นอกจากจะช่วยลดก๊าซเรือนกระจกแล้วยังเป็นการนำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งเป็นการดำเนินงานตามนโยบายเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) ที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

[1] Department of Mineral Fuels. (2018). *What is the benefit of petroleum*. Retrieved April 25, 2021, from https://dmf.go.th/public/list/data/detail/id/11266/menu/604/page/2 (in Thai).

[2] Prasert, R. (2008). GLT Technology for Clean Fuel Production. *Technology Energy, 199,* 95-104. (in Thai).

[3] Reddissi, Y., and Bouallou, C. (2013). Valorization of Carbon Dioxide by Co-Electrolysis of CO2/H2O at High Temperature for Syngas Production. *Energy Procedia, 37*, 6667-6678.

[4] Sharifian, S., and Harasek, M. (2015). Simulation of COX methanation reactor for the production of natural gas. *Chemical Engineering Transactions*, *45,* 1003-1008.

[5] Siew, K., and Sadhukhan, J. (2011). Process integration and economic analysis of biooil platform for the production of methanol and combined heat and power. *Biomass and Bioenergy, 35,* 1153-1169.

[6] Ogawa, T., Inoue, N., Shikada, T., and Ohno, Y. (2003). Direct Dimethyl Ether Synthesis. *Journal of Natural Gas Chemistry*, *12,* 219-227.

[7] Stempien, J. P., Ding, O. L., Sun, Q., and Chan, S. H. (2012). Energy and exergy analysis of solid oxide electrolyser cell (SOEC) working as a CO2 mitigation device. *International Journal of Hydrogen Energy, 37*, 14518-14527.

[8] Pattaraporn, K. (2013). *Hydrogen and syngas productions via steam and carbon dioxide co-electrolysis using solid oxide electrolysis cell (SOEC) under the reverse reaction of solid oxide fuel cell (SOFC)*. Chemical Engineering Department, Engineering Faculty, Mahidol University. (in Thai).

[9] Chanchai, L., and Yuwanun, S. (2014). *Gas producer engine system from biomass*. Bangkok. National Science and Technology Development Agency. (in Thai).

[10] Suthinee, H., and Suthep, B. (2014). Experimental Study to Obtain Gas Production Conditions from the Old Landfill Solid Waste by using Gasification Process. *SWU Engineering Journal, 9*(1), 16-27. (in Thai).

[11] Diego, V. S. (2017). *Reversible solid oxide cells for bidirectional energy conversion in spot electricity and fuel markets*. Graduate School of Arts and Sciences, Columbia University.

[12] Dang, S. (2019). *Performance analysis of fuel assisted solid oxide co-electrolysis cell to produce syngas for dimethyl ether synthesis process*. Thailand Science Research and Innovation. (in Thai).

[13] Ni, M. (2012). An electrochemical model for syngas production by co-electrolysis of H_2O and CO_2. *Journal of Power Source, 202,* 209-216.

[14] Du, Y., Qin, Y., Zhang, G., Yin, Y., Jiao, K., and Du, Q. (2019). Modelling of effect of pressure on co-electrolysis of water and carbon dioxide in solid oxide electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy, 44,* 3456-3469.

[15] Yaneeporn, P. (2018). *Methanol production from H_2O/CO_2 electrolysis in a proton-conducting SOEC*. Thailand Science Research and Innovation. (in Thai).

[16] Yamada, K., Ogo, S., Yamano, R., Higo, T., and Sekine, Y. (2020). Low-temperature Conversion of Carbon Dioxide to Methane in an Electric Field. *Chemistry Letters, 49,* 303-306.

[17] Heyne, S., Seemann, M. C, and Harvey, S. (2010). *Integration study for alternative methanation technologies for the production of synthetic natural gas from gasified biomass*. Chemical Engineering Transcations, 21.

[18] Pan, Z., Chan, W., Veksha, A., Giannis, A., Dou, X., Wang, H., Lisak, G., and Lim, T. (2019). Thermodynamic analyses of synthetic natural gas production via municipal solid waste gasification, high-temperature water electrolysis and methanation. *Energy Conversion and Management, 202,* 112-160.

[19] Leonzio, G. (2018). *Methanol Synthesis: Optimal Solution for a Better Efficiency of the Process.* Process System Engineering for More Efficient Power and Chemicals Production.

[20] Gallucci, F. (2018). *Chapter 18 - Inorganic Membrane Reactors for Methanol Synthesis*. Science and Engineering, pp. 493-518.

[21] Higman, C. (2014). *State of the Gasification Industry: Worldwide Gasification Database 2014 Update*. Retrieved May 19, 2020, from https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/2014-Wednesday-Higman_0.pdf

[22] Inayat, A., Ghenai, C., Naqvi, M., Ammar, M., Ayoub, M., and Hussin, M. N. B. (2017). Parametric Study for Production of Dimethyl Ether (DME) As a Fuel from Palm Wastes. *Energy Procedia, 105*, 1242-1249.

[23] Catizzone, E., Bonura, G., Migliori, M., Frusteri, F., and Giordano, G. (2017). *CO_2 Recycling to Dimethyl Ether: State-of-the-Art and Perspectives*. Molecules.

[24] Polsen, C., Narataruksa, P., Hunpinyo, P., and Prapainainar, C. (2020). Simulation of single-step dimethyl ether synthesis from syngas. *Energy reports, 6*, 516-520.