Research Article

Received: June 16, 2020; Accepted: October 8, 2020

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางพลังงานในกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งสำหรับการผลิตไฮโดรเจน มีเทน และเมทานอล

Energy Efficiency Analysis in Solid Oxide Electrolysis Cell System for Production of Hydrogen, Methane and Methanol

ธนวรรณ ชนประเสริฐ, กมลชนก สุทธิรัตน์ และวรณี มังคละศิริ*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

จิตติ มังคละศิริ

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Thanawan Chonprasert, Kamonchanok Sutthirat and Woranee Mungkalasiri*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Jitti Mungkalasiri

National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency, Thailand Science Park, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งร่วมกับกระบวนการสังเคราะห์มีเทนและกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล โดยใช้แก๊สที่ปล่อยออกจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวออกแบบและจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus v.9.0 แบบจำลองที่สร้างขึ้นจะนำมาใช้ในการศึกษาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมที่ทำให้ผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพทางพลังงานมีค่ามากที่สุด โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อทั้งสามกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิและความดันของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง (550-1,000 ºC, 1-30 บาร์) อุณหภูมิและความดันของกระบวนการสังเคราะห์มีเทน (200-600 ºC, 1-100 บาร์) และอุณหภูมิและความดันของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล (140-280 ºC, 15-100 บาร์) ร่วมกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางพลังงาน ผลการศึกษาพบว่าสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมที่ผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้มากที่สุดของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง คือ อุณหภูมิและความดันของกระบวนการ 800 องศาเซลเซียส และ

***ผู้รับผิดชอบบทความ :** pworanee@engr.tu.ac.th

1 บาร์ โดยประสิทธิภาพทางพลังงานมีค่า 14.95 % สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์มีเทน คือ อุณหภูมิและความดันของกระบวนการ 200 องศาเซลเซียส และ 1 บาร์ โดยประสิทธิภาพทางพลังงานมีค่า 69.97 % และสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล คือ อุณหภูมิและความดันของกระบวนการ 160 องศาเซลเซียส และ 100 บาร์ โดยประสิทธิภาพทางพลังงานมีค่า 75.42 %

คำสำคัญ : การจำลองกระบวนการ; ประสิทธิภาพทางพลังงาน; ไฮโดรเจน; มีเทน; เมทานอล; อิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง

Abstract

This research aims to study the solid oxide electrolysis cell (SOEC) system with methane synthesis and methanol synthesis. Exhaust gas from the coal power plant was used as feedstock. These processes were designed and simulated by Aspen plus v.9.0. The developed model was employed to study the optimal operating conditions, generating the maximum product yields and the highest energy efficiency. The effect of several parameters including SOEC temperature and pressure (550-1,000 ºC, 1-30 bar), methane synthesis temperature and pressure (200-600 ºC, 1-100 bar), and methanol synthesis temperature and pressure (140-280 ºC, 15-100 bar) were investigated with energy efficiency analysis. The simulation results showed that the optimal operating conditions which provided the maximum hydrogen production were SOEC temperature of 800 ºC, pressure of 1 bar, and energy efficiency of 14.95 %. The optimal operating conditions for methane synthesis were temperature of 200 ºC, pressure of 1 bar, and energy efficiency of 69.97 %. The optimal operating conditions for methanol synthesis were temperature of 160 ºC, pressure of 100 bar, and energy efficiency of 75.42 %.

Keywords: process simulation; energy efficiency; hydrogen; methane; methanol; solid oxide electrolysis cell

1. บทนำ

โลกปัจจุบันที่มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว มนุษย์มีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภาวะโลกร้อน ทำให้ทั่วโลกตระหนักถึงความจำเป็นที่ต้องใช้พลังงานจากแหล่งที่สะอาดและมีประสิทธิภาพ รวมถึงร่วมกันหาแนวทางแก้ไขวิกฤติที่เกิดขึ้น ด้วยความก้าวหน้าด้านงานวิจัยและเทคโนโลยี จึงมีการนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับไอน้ำมาผลิตเป็นแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง (solid oxide electrolysis cell, SOEC) ซึ่งมีประโยชน์ทั้งในแง่ของการนำพลังงานที่สะอาด คือ ไอน้ำ มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงรวมถึงเป็นการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นสาเหตุของการเกิดภาวะโลกร้อน นอกจากนี้แก๊สไฮโดรเจน

สามารถนำไปใช้ผลิตเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น มีเทน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ในการขนส่งและการผลิตไฟฟ้า [1] เมทานอลซึ่งสามารถนำไปใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซลและใช้ในการผลิตไดเมทิลอีเธอร์เพื่อเป็นสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีต่อไปได้ [2] นอกจากนี้มีเทนและเมทานอลยังสามารถใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าอีกด้วย [3] ซึ่งมีงานวิจัยหลายเรื่องได้ออกแบบกระบวนการเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง กระบวนการสังเคราะห์มีเทนและกระบวนการสังเคราะห์เมทานอลด้วยการจำลองกระบวนการ (process simulation) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพ เช่น Aspen Plus

Redissi และ Bouallou [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจำลองกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการอิเล็กโทรไลซิสผ่านเซลล์อิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดออกไซด์ของแข็ง (SOEC) โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus v.7.1 สภาวะความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 1,073 เคลวิน และอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สขาเข้าของน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไฮโดรเจน ($H_2O/CO_2/H_2$) มีค่า 45/45/10 ผลการศึกษาพบว่าสามารถผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ในอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (H_2/CO) เท่ากับ 1.19

Van-Dal และ Bouallou [5] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและจำลองกระบวนการผลิตเมทานอลโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงงานไฟฟ้าถ่านหินร่วมกับแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสโดยใช้น้ำ ซึ่งจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus v.7.3 ที่สภาวะความดัน 75 บาร์ อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการผลิตเมทานอลเป็นกระบวนการหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นจำนวนมาก (1.6 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ 1 ตันเมทานอล) อย่างไรก็ตามการติดตั้งระบบดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานจะทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเมทานอลลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานไฟฟ้าฟ้าถ่านหินที่นำกลับมาใช้ในระบบดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องดึงความร้อนจากกระบวนการสังเคราะห์เมทานอลมาใช้ในระบบด้วย

Sharifian และ Harasek [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาเมทาเนชันที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นสารตั้งต้น ซึ่งจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus v.8.6 ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมีเทน คือที่สภาวะอุณหภูมิ 316 องศาเซลเซียส ความดัน 28.8 บรรยากาศ โดยมีองค์ประกอบของแก๊สขาเข้าเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน 20.5, 3.4 และ 4186.7 กิโลโมลต่อชั่วโมง ตามลำดับ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาและจำลองกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งโดยใช้แก๊สเสีย (flue gas) จากโรงไฟฟ้าถ่านหินในการผลิตไฮโดรเจนร่วมกับการสังเคราะห์มีเทนและการสังเคราะห์เมทานอลด้วยโปรแกรม Aspen Plus v.9.0 เนื่องจากเป็นโปรแกรมประสิทธิภาพสูงที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการวิจัยและพัฒนากระบวนการทางเคมี เพื่อหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจน มีเทน และเมทานอล พร้อมทั้งศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางพลังงานของแต่ละกระบวนการ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง

อิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดออกไซด์ของแข็ง เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยา

ไฟฟ้าเคมีทำให้โมเลกุลของน้ำแยกออกเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน ทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับไอน้ำ โดยจะได้ก๊าซสังเคราะห์เป็นผลิตภัณฑ์ ก๊าซสังเคราะห์ที่ได้นำไปใช้ผลิตเชื้อเพลิงเหลวต่าง ๆ ได้อีกด้วย [7] โดยจะเกิดปฏิกิริยาการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (H_2O electrolysis) และปฏิกิริยาการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยไฟฟ้า (CO_2 electrolysis) ดังนี้

$$H_2O \longrightarrow H_2 + 0.5O_2 \quad (1)$$

$$CO_2 \longrightarrow CO + 0.5O_2 \quad (2)$$

นอกจากเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าที่กล่าวข้างต้นแล้ว ยังเกิดปฏิกิริยา reverse water gas shift (RWGS) ด้วย

$$CO_2 + H_2 \leftrightarrow H_2O + CO \quad (3)$$

$$\Delta H = 41 \text{ kJ/mol}$$

2.2 กระบวนการสังเคราะห์มีเทน

2.2.1 ปฏิกิริยาการเกิดมีเทนของคาร์บอนมอนอกไซด์ (syngas methanation)

มีเทนเกิดได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังปฏิกิริยา (4) โดยปฏิกิริยาการเกิดมีเทนของคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยา reverse water gas shift ดังปฏิกิริยา (3) ร่วมด้วย [8]

$$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O \quad (4)$$

$$\Delta H = -206 \text{ kJ/mol}$$

2.2.2 ปฏิกิริยาการเกิดมีเทนของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 methanation)

มีเทนเกิดขึ้นได้อีกวิธี โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังปฏิกิริยา (5) [8]

$$CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O \quad (5)$$

$$\Delta H = -165 \text{ kJ/mol}$$

2.3 กระบวนการสังเคราะห์เมทานอล

การผลิตเมทานอลจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้ 2 วิธี ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ปฏิกิริยาแบบขั้นตอนเดียว และปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน โดยปฏิกิริยาแบบขั้นตอนเดียวจะเป็นปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นเมทานอลโดยตรง ดังปฏิกิริยา (6) [1]

$$CO + 2H_2 \leftrightarrow CH_3OH \quad (6)$$

$$\Delta H = -90.7 \text{ kJ/mol}$$

ส่วนปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนนั้น ในขั้นตอนแรกจะเกิดปฏิกิริยา reverse water gas shift ดังปฏิกิริยา (3) และขั้นตอนที่สองจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันโดยใช้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดผลิตภัณฑ์เป็นเมทานอล ดังปฏิกิริยา (7) [1]

$$CO_2 + 3H_2 \leftrightarrow CH_3OH + H_2O \quad (7)$$

$$\Delta H = -40.9 \text{ kJ/mol}$$

2.4 ประสิทธิภาพทางพลังงาน

ประสิทธิภาพทางพลังงาน หมายถึง สภาวะหรือคุณภาพของสมรรถนะในการดำเนินงานเพื่อให้งานมีความสำเร็จโดยใช้พลังงานคุ้มค่าที่สุดตามจุดมุ่งหมายที่กำหนดไว้ โดยสามารถคำนวณได้ตามอัตราส่วนระหว่างพลังงานเคมี (chemical power) ของผลิตภัณฑ์ (แก๊สไฮโดรเจน มีเทน และเมทานอล) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความร้อนต่ำ (lower heating value) และพลังงานทั้งหมดที่ป้อนเข้า (total power input) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (8) [1]

$$\eta = \frac{\dot{m}_{product} \times LHV_{product}}{P_{input}} \times 100 \quad (8)$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพทางพลังงาน (energy efficiency, %); $\dot{m}_{product}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล (mass flow rate, kg s^{-1}); $LHV_{product}$ คือ ค่าความ

ร้อนต่ำ (lower heating value, MJ kg^{-1}); P_{input} คือ พลังงานทั้งหมดที่ป้อนเข้า (total power input, J s^{-1})

3. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาด้วยการจำลองกระบวนการบนโปรแกรม Aspen Plus v.9.0 โดยใช้แก๊สที่ปล่อยออกจากโรงไฟฟ้าถ่านหินที่มีองค์ประกอบต่อปริมาตรเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 18 % ไอน้ำ 35 % และแก๊สไนโตรเจน 47 % มาเข้าสู่กระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งด้วยอัตราการไหล 200 ลิตรต่อชั่วโมง [9] เพื่อผลิตเป็นแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งสารขาออกทั้งหมดของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งจะเข้าสู่กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงสองรูปแบบ คือ มีเทนและเมทานอล ดังแสดงในรูปที่ 1

โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินงานของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งที่ทำให้ได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุด จากนั้นศึกษาสภาวะในการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์มีเทนและกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล โดยการดำเนินงานแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่หนึ่ง นำปริมาณแก๊สไฮโดรเจนทั้งหมดที่สังเคราะห์ได้ที่สภาวะในการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งไปเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์มีเทน และรูปแบบที่สอง นำปริมาณแก๊สไฮโดรเจนทั้งหมดที่สังเคราะห์ได้ที่สภาวะในการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งไปเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์เมทานอล เพื่อหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของทั้งสองกระบวนการที่ทำให้ได้ปริมาณแก๊สมีเทนและเมทานอลมากที่สุด โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันของแต่ละกระบวนการร่วมกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางพลังงาน โดยช่วงของอุณหภูมิและความดันที่ศึกษาในแต่ละกระบวนการแสดงดังตารางที่ 1

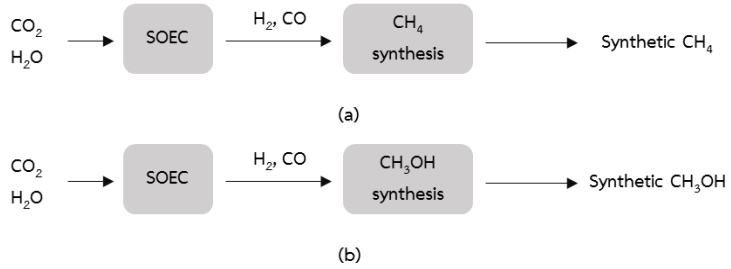

Figure 1 Process block diagrams (a) SOEC with methane synthesis (b) SOEC with methanol synthesis

Table 1 Parameters and values of the various operating conditions

Parameters	Ranges of operating conditions
SOEC temperature (°C) [1,10-12]	550-1,000
SOEC pressure (bar) [11]	1-30
Methane synthesis temperature (°C) [1,6,13-14]	200-600
Methane synthesis pressure (bar) [1,6,13-14]	1-100
Methanol synthesis temperature (°C) [15-18]	140-280
Methanol synthesis pressure (bar) [15-18]	15-100

4. ผลการวิจัย

กระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งเป็นกระบวนการที่ใช้สารตั้งต้นเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ซึ่งผลิตภัณฑ์จากกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งจะนำไปเป็นสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการสังเคราะห์มีเทนและกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล จากนั้นศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไฮโดรเจน มีเทน และเมทานอล ร่วมกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางพลังงานของแต่ละกระบวนการ

4.1 การหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนที่สังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อเพิ่มความดัน ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนที่สังเคราะห์ได้มีค่าลดลง เนื่องจากกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งจะดำเนินการได้ดีที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ โดยพบว่าที่ความดัน 1 บาร์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 800 องศาเซลเซียส ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่สังเคราะห์ได้มีค่ามากที่สุด คือ 6.57 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่สังเคราะห์ได้มีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยา reverse water gas shift ขึ้น จึงทำให้แก๊สไฮโดรเจนที่สังเคราะห์ได้บางส่วนทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งที่ความดัน 1 บาร์ แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 800 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากศักย์ไฟฟ้ามีค่าลดลง ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในระบบมีค่าลดลง โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งมีค่ามากที่สุด คือ 14.95 % แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากศักย์ไฟฟ้ามีค่าค่อนข้างคงที่ เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสจะเกิดน้อยมาก เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา reverse water gas shift แทน ดังนั้นจึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งเป็นอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ เพราะเป็นสภาวะที่มีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่สังเคราะห์ได้มากที่สุด และมีประสิทธิภาพของกระบวนการดีที่สุด ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายของพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในระบบ

4.2 การหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์มีเทน

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์มีเทน แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าที่อุณหภูมิในช่วง 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส ปริมาณแก๊สมีเทนที่สังเคราะห์ได้มีค่าเกือบจะคงที่ เนื่องจากปฏิกิริยาเมทาเนชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นในช่วงที่อุณหภูมิต่ำจึงเกิดปฏิกิริยาได้ดี [19] โดยปริมาณแก๊สมีเทนมากที่สุดที่สังเคราะห์ได้ คือ 10.71 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แต่ที่ความดันเดียวกันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณแก๊สมีเทนที่สังเคราะห์ได้มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยา reverse water gas shift ร่วมด้วย ขณะที่ที่

อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อเพิ่มความดันจะเห็นได้ว่าปริมาณแก๊สมีเทนที่สังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นไปตามหลักการของเลอชาเตอลิเอ (Le Chatelier's principle) กล่าวคือ ปฏิกิริยาเมทาเนชันจะเกิดได้ดีเมื่อความดันสูง

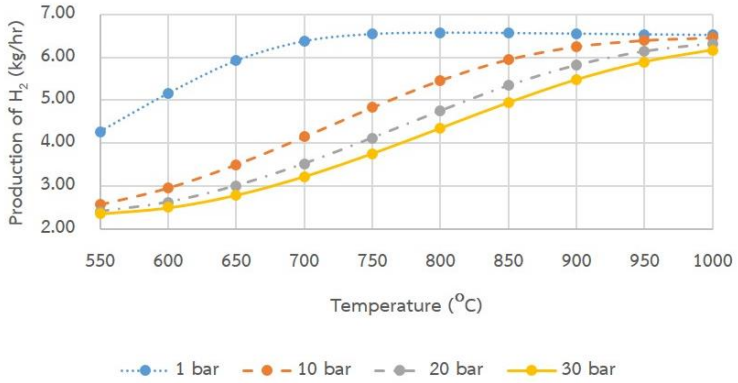

Figure 2 Effects of temperature and pressure on SOEC

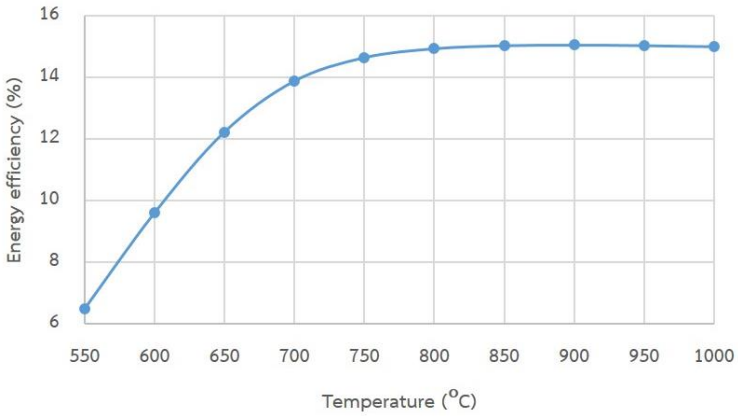

Figure 3 Energy efficiency of SOEC at 1 bar

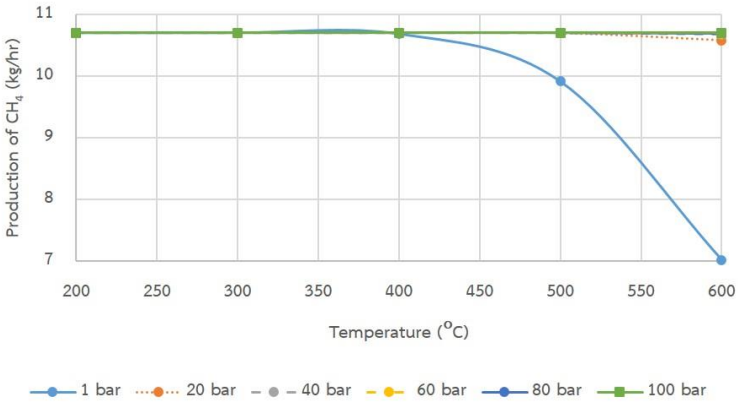

Figure 4 Effects of temperature and pressure on methane production

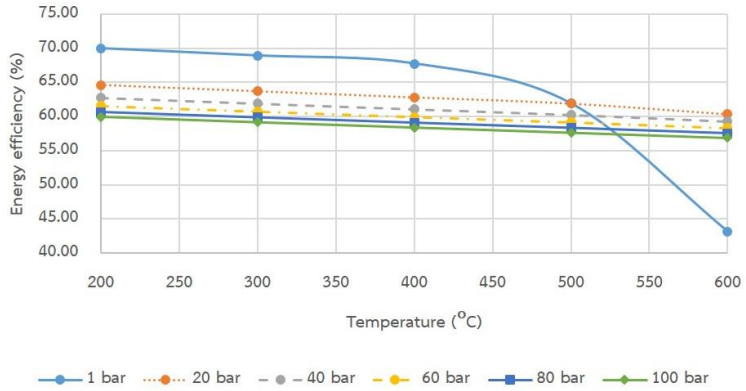

Figure 5 Effects of temperature and pressure on energy efficiency of methane synthesis

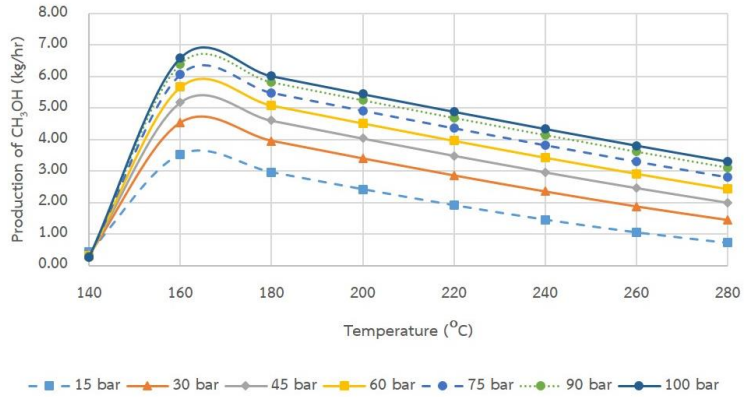

Figure 6 Effects of temperature and pressure on methanol production

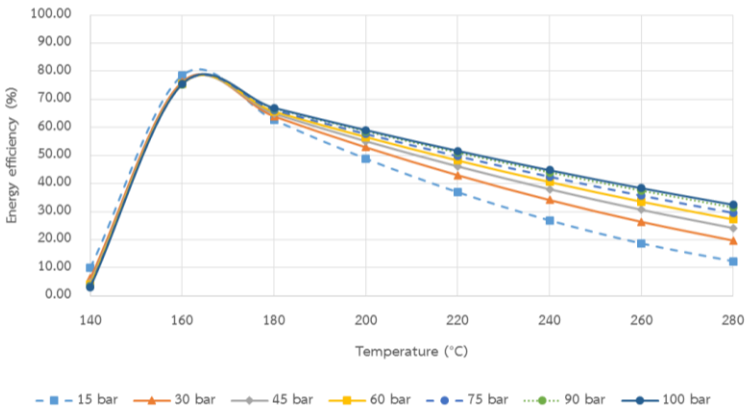

Figure 7 Effects of temperature and pressure on energy efficiency of methanol synthesis

ผลการศึกษาประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการสังเคราะห์มีเทนแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการสังเคราะห์มีเทนมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณแก๊สมีเทนที่สังเคราะห์ได้มีค่าลดลง เพราะปฏิกิริยาเมทาเนชันจะดำเนินการได้ดีเมื่ออุณหภูมิต่ำ

และความดันสูง แต่ที่ความดันสูง พลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการจะมีค่าสูงด้วย ผลการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ มีประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการสังเคราะห์มีเทนมากที่สุด คือ 69.97 % ดังนั้น จึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินงานของกระบวนการสังเคราะห์มีเทน คือ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการสังเคราะห์มีเทนมากที่สุด และเป็นสภาวะที่มีปริมาณแก๊สมีเทนที่ผลิตได้มากที่สุด ซึ่งจะทำให้ประหยัดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการและยังทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณมากที่สุดอีกด้วย

4.3 การหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 140 เป็น 160 องศาเซลเซียส ปริมาณเมทานอลที่สังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เมื่อความดันเพิ่มขึ้นปริมาณเมทานอลที่สังเคราะห์ได้มีค่าลดลง เนื่องจากถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปแต่ความดันสูงจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าและไม่เกิดสมดุลเคมี [20] ขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 160 เป็น 280 องศาเซลเซียส ปริมาณเมทานอลที่ผลิตได้มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกเผาไหม้และเกิดความเสียหายอย่างถาวร [21] นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นปริมาณเมทานอลที่สังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์เมทานอลจะดำเนินการได้ดีที่ความดันสูง ผลการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และความดัน 100 บาร์ มีปริมาณเมทานอลที่ผลิตได้มากที่สุด คือ 6.59 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ผลการศึกษาประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล แสดงดังรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ความดันเดียวกัน พบว่าประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 160 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอลมีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ปริมาณเมทานอลที่สังเคราะห์ได้มีค่ามากที่สุด และพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการมีค่าน้อย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของความดันพบว่าประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากแม้ว่าที่ความดันสูงขึ้นจะต้องใช้พลังงานในกระบวนการสูงขึ้น แต่ก็ทำให้ปริมาณเมทานอลที่สังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน จึงทำให้ประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสและความดัน 15 บาร์ ประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอลมีค่าสูงสุด คือ 78.53 % แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอลที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และความดัน 100 บาร์ ซึ่งมีค่าเป็น 75.42 % พบว่ามีค่าน้อยกว่าเพียง 4.12 % แต่หากเปรียบเทียบปริมาณเมทานอลที่สังเคราะห์ได้ จะพบว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และความดัน 100 บาร์ มีปริมาณเมทานอลที่สังเคราะห์ได้มากกว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และความดัน 15 บาร์ คิดเป็น 87.16 % ดังนั้นจึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินงานของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล คือ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และความดัน 100 บาร์ เนื่องจากมีปริมาณเมทานอลที่สังเคราะห์ได้มากที่สุด คือ 6.59 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แม้ว่าที่อุณหภูมิ 160 องศา

เซลเซียส และความดัน 100 บาร์ จะใช้พลังงานมากกว่าอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และความดัน 15 บาร์ แต่ก็ทำให้ได้ปริมาณเมทานอลที่สังเคราะห์ได้มากที่สุด และทำให้ประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอลมีค่าสูง

5. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำแก๊สเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินมาเข้าสู่กระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งแก๊สผลิตภัณฑ์นี้จะนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการสังเคราะห์แก๊สมีเทนและเมทานอล โดยศึกษาสภาวะในการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง จากนั้นศึกษาสภาวะในการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์มีเทนและเมทานอล โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากแต่ละกระบวนการ ร่วมกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางพลังงานของแต่ละกระบวนการ ซึ่งในการดำเนินงานจะศึกษาด้วยการจำลองกระบวนการบนโปรแกรม Aspen Plus v.9.0

ผลการศึกษาสภาวะในการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง พบว่าสภาวะในการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง คือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ โดยแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ซึ่งมีอัตราการไหล 6.57, 15.53, 4.98 และ 10.95 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพทางพลังงาน 14.95 %

การดำเนินงานของกระบวนการสังเคราะห์มีเทนและกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล แก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็ง (ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ) จะเป็นสารตั้งต้นสำหรับทั้งสองกระบวนการ ผลการศึกษากระบวนการสังเคราะห์มีเทนพบว่าสภาวะในการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์มีเทน คือ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ โดยปริมาณแก๊สมีเทนที่สังเคราะห์ได้ คือ 10.71 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีประสิทธิภาพทางพลังงานเป็น 69.97 % และผลการศึกษากระบวนการสังเคราะห์เมทานอลพบว่าสภาวะในการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล คือ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และความดัน 100 บาร์ โดยปริมาณเมทานอลที่สังเคราะห์ได้ คือ 6.59 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีประสิทธิภาพทางพลังงานเป็น 75.42 %

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ากระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งนั้น สามารถนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นสาเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาผลิตเป็นแก๊สไฮโดรเจน แต่ประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งนั้นไม่สูงมากนัก แต่หากเพิ่มกระบวนการสังเคราะห์มีเทนซึ่งเป็นการนำแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งมาผลิตเป็นแก๊สมีเทนด้วย จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางพลังงานของกระบวนการให้สูงขึ้นได้ นอกจากนี้ปริมาณแก๊สมีเทนที่ผลิตได้มีปริมาณมาก ซึ่งจะช่วยให้มีความคุ้มค่าในการผลิตอีกด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้

7. References

[1] Parigi, D., Giglio, E., Soto, A. and Santarelli, M., 2019, Power-to-fuels through carbon dioxide re-utilization and high temperature electrolysis: A technical and economical comparison between synthetic methanol and methane, J. Clean. Prod. 226: 679-691.

[2] Bozzano, G. and Manenti, F., 2016, Efficient methanol synthesis: Perspectives, techno logies and optimization strategies, Prog. Energy Combust. Sci. 56: 71-105.

[3] Andika, R., Nandiyanto, A.B., Putra, Z.A., Bilad, M.R., Kim, Y., Yun, C.M. and Lee, M., 2018, Co-electrolysis for power-to-methanol applications, Renew. Sustain. Energy Rev. 95: 227-241.

[4] Redissi, Y. and Bouallou, C., 2013, Valoriza tion of carbon dioxide by co-electrolysis of CO_2/H_2O at high temperature for syngas production, Energy Proc. 37: 6667–6678.

[5] Van-Dal, E.S. and Bouallou, C., 2013, Design and simulation of a methanol production plant from CO_2 hydrogena tion, J. Clean. Prod. 57: 38-45.

[6] Sharifian, S. and Harasek, M., 2015, Simulation of CO_X Methanation Reactor for the Production of Natural Gas, Chem. Eng. Transact. 45: 1003-1008.

[7] Nattawut, W. and Amornchai, A., 2014, Electrolysis for hydrogen production, Technol. Promot. Innomag Magazine 237: 45-48. (in Thai)

[8] Wang, L., Rao, M., Diethelm, S., Lin, T., Zhang, H., Hagen, A. and van Herle, J., 2019, Power- to- methane via co-electrolysis of H_2O and CO_2: The effects of pressurized operation and internal methanation, Appl. Energy 250: 1432-1445.

[9] 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 CO_2 mitigation device, Int. J. Hydrogen Energy 37: 14518-14527.

[10] Pozzo, M., Lanzin, A. and Santarelli, M., 2015, Enhanced biomass-to-liquid (BTL) conversion process through high tempera ture co- electrolysis in a solid oxide electrolysis cell (SOEC), Fuel 145: 39-49.

[11] Tinoco, R.R., Farran, M., Bouallou, C., Aupretre, F., Valentin, S., Millet, P. and Ngameni, J.R., 2016, Investigation of power- to- methanol processes coupling electrolytic hydrogen production and catalytic CO_2 reduction, Int. J. Hydrogen Energy 41: 4546-4559.

[12] Li, W., Wang, H., Shi, Y. and Cai, N., 2013, Performance and methane production characteristics of H_2O-CO_2 co-electrolysis in solid oxide electrolysis cells, Int. J. Hydrogen Energy 38: 11104-11109.

[13] Er-rbib, H. and Bouallou, C., 2013, Modelling and simulation of methanation catalytic reactor for renewable electricity storage. Chem. Eng. Transact 35: 541-546.

[14] Porubova, J., Bazbauers, G. and Markova, D., 2011, Modeling of the adiabatic and isothermal methanation process, Sci. J. Riga Tech. Univer. 6: 79-84.

[15] Kim, W.S., Yang, D.R., Moon, D.J. and Ahn, B.S., 2014, The process design and simulation for the methanol production on the FPSO (floating production, storage and off-loading) system, Chem. Eng. Res. Design 92: 931-940.

[16] Rujiroj, T., Rujira, J., Tarawipa, P., Weerawat, P. and Kamonrat, L., 2018, Kinetic modeling and simulation of bio-methanol process from biogas by using aspen plus, MATEC Web Conf. 192: 3030-3034.

[17] Mignard, D. and Pritchard, C., 2008, On the use of electrolytic hydrogen from variable renewable energies for the enhanced conversion of biomass to fuels, Chem. Eng. Res. Design 86: 473-487.

[18] Lonis, F., Tola, V. and Cau, G., 2019, Renewable methanol production and use through reversible solid oxide cells and recycled CO_2 hydrogenation, Fuel 246: 500-515.

[19] Kang, W.R. and Lee, K.B., 2013, Effect of operating parameters on methanation reaction for the production of synthetic natural gas, Korean J. Chem. Eng. 30: 1386-1394.

[20] Lücking, L.E., 2017, Methanol Production from Syngas: Process Modelling and Design Utilizing Biomass Gasification and Integrating Hydrogen Supply, Delft University of Technology, Mekelweg.

[21] Puig-Gamero, M., Argudo-Santamaria, J., Valverde, J.L., Sánchez, P. and Sanchez-Silva, L., 2018, Three integrated process simulation using aspen plus®: Pine gasification, syngas cleaning and methanol synthesis, Energy Convers Manag. 177: 416-427.