

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระบบผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการผลิตก๊าซ จากชีวมวลร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

ด้วยโปรแกรม ASPEN PLUS

Study of Parameters Affecting the Power Generation

System via Integrated Biomass Gasification with

Solid Oxide Fuel Cell Using ASPEN PLUS

จิตติ มังคละศิริ

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

วรณี แ่งจันทิก*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120

Jitti Mungkalasiri

National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development

Agency, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Woranee Paengjuntuek*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Rangsit Centre,

Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ดังนั้นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือชีวมวลจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการผลิตพลังงานทดแทน งานวิจัยนี้จึงศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการผลิตก๊าซจากชีวมวลร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงหรือ BGFC จำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม APEN PLUS v.8.6 โดยศึกษาชีวมวล 7 ชนิด ได้แก่ ช้างข้าวโพด ทะลายปาล์มเปล่า เหง้ามันสำปะหลัง ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย และกะลาปาล์ม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาประเมินค่ากำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบ BGFC โดยมีปัจจัยสำคัญ 5 ตัวแปรที่ส่งผลต่อระบบนี้ ได้แก่ อุณหภูมิของก๊าซซีไฟเออร์ อัตราส่วนการป้อนอากาศต่อชีวมวล อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อน้ำต่อชีวมวล อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง และความดันของเซลล์เชื้อเพลิง ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนการป้อนอากาศต่อชีวมวล อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อ

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

ชีวมวล อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง และความดันของเซลล์เชื้อเพลิงให้กับระบบ นอกจากนี้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงในระบบมีค่าสูง

คำสำคัญ : การจำลองกระบวนการ; กำลังไฟฟ้า; ชีวมวล; เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง; ประสิทธิภาพรวมของระบบ

Abstract

Thailand is an agricultural country. Therefore, biomass from agricultural waste is the best sources for renewable energy production. In this research, an integrated biomass gasification fuel cell or BGFC system is studied. ASPEN PLUS v.8.6 is used to perform the simulated BGFC system. Seven types of biomass are considered, which are corncob, empty fruit bunch, cassava rhizome, rice straw, rice husk, bagasse and palm shell. The goal is to evaluate power generation and energy efficiency of the BGFC system. There are 5 various parameters that affect to the system as gasifier temperature, air to biomass ratio, steam to biomass ratio, fuel cell temperature and fuel cell pressure. The results showed that total power increase when increasing air to biomass ratio, steam to biomass ratio, fuel cell temperature and fuel cell pressure. Moreover, the system efficiency increases when increasing fuel cell temperature and pressure.

Keywords: process simulation; power output; biomass; solid oxide fuel cell; overall system efficiency

1. บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศทั้งด้านธุรกิจและสังคม นับตั้งแต่ยุคที่มนุษย์เริ่มเปลี่ยนจากการใช้แรงมาใช้เครื่องมือที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อน ดังนั้นเราจำเป็นต้องผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการแน่นอนว่าแหล่งพลังงานหลักที่สำคัญในการผลิตพลังงานไฟฟ้าคือเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งในปัจจุบันมีปริมาณลดลงเรื่อย ๆ ประกอบกับความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าอันเนื่องมาจากอัตราการเพิ่มขึ้นของประชากร และระดับการพัฒนาประเทศมีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหลักเพียงอย่างเดียวไม่

เพียงพออีกต่อไป จึงมีการพยายามผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานน้ำ พลังงานจากขยะ รวมถึงพลังงานชีวมวล [1]

ประเทศไทยนับเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ประชากรส่วนมากประกอบอาชีพเกษตรกรรม ผลพลอยได้ที่สำคัญนอกเหนือจากผลผลิตการเกษตรก็คือ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว แกลบ ชังข้าวโพด กะลาปาล์ม เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงาน โดยการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้น นอกจากจะเป็นการผลิตพลังงานทางเลือกแล้ว ยังสามารถช่วยกำจัดของ

เสียและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอีกรูปแบบหนึ่งด้วย [2] โดยกระบวนการแปรรูปพลังงานชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่าง ๆ นั้น มีหลายวิธี ทั้งกระบวนการเผาไหม้โดยตรง (combustion) กระบวนการหมัก (fermentation) และกระบวนการผลิตก๊าซ (gasification)

กระบวนการผลิตก๊าซ เป็นกระบวนการที่นิยมมากในการแปรรูปชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรไปเป็นก๊าซเชื้อเพลิง (producer gas) ประกอบด้วย ไฮโดรเจน ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไอน้ำ ซึ่งมักถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า แต่การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากชีวมวลอาศัยการเผาไหม้ซึ่งจะมีการปล่อยก๊าซที่เป็นอันตรายต่อชั้นบรรยากาศ [3] เพื่อแก้ปัญหานี้จึงมีการนำระบบผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการผลิตก๊าซและเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) มาทำงานร่วมกัน หรือที่เรียกว่าระบบผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการผลิตก๊าซจากชีวมวลร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง (integrated biomass gasification fuel cell, BGFC) เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีที่มีในเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี (electrochemical process) ทำให้มีการปล่อยก๊าซเสียที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมในปริมาณต่ำ ซึ่งปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (SOFC) มาทำงานร่วมกับกระบวนการผลิตไฟฟ้า ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการผลิตก๊าซจากชีวมวลร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย [4] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการผลิตก๊าซจากชีวมวลชนิดต่าง ๆ ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง กระบวนการนี้จะศึกษาโดยการจำลองกระบวนการ (process simulation) ด้วย

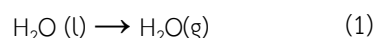
โปรแกรม ASPEN PLUS v.8.6 ซึ่งเป็นโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการจำลองกระบวนการที่มีประสิทธิภาพได้รับการยอมรับจากภาคการศึกษาและภาคอุตสาหกรรม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตก๊าซจากชีวมวล (biomass gasification)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นก๊าซ โดยแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน [5] ดังนี้

2.1.1 Drying การให้ความร้อนกับชีวมวล เพื่อให้ความชื้นระเหยออกไป



2.1.2 pyrolysis การให้ความร้อนเพื่อให้ชีวมวลสลายตัว (thermal decomposition) ในสภาวะไร้อากาศ ได้ผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ ของแข็งของเหลว และก๊าซ โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล อุณหภูมิ ความดัน และอัตราการให้ความร้อน



โดย Char เป็นของแข็งที่เรียกว่า fixed carbon; Tars เป็นได้ทั้งของเหลวและก๊าซ และ Light gases ประกอบไปด้วย CH_4 , CO , CO_2 , H_2 และ H_2O

2.1.3 char gasification เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นคู่ขนานกับขั้นตอนการ drying และ pyrolysis โดยมี 3 ปฏิกิริยาหลักดังสมการที่ 3, 4 และ 5 โดยปฏิกิริยา methanation นั้นจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก

2.2.4 combustion และ gas phase reaction เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นคู่ขนานกัน โดยเกิดขึ้นหลังจากขั้นตอนการ pyrolysis และ char gasification โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 6, 7, 8, 9 และ 10

ปฏิกิริยา Boudouard	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	$\Delta H^\circ_{rxn} = +172 \text{ kJ/gmol}$	(3)
ปฏิกิริยา heterogeneous water gas shift	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	$\Delta H^\circ_{rxn} = +131 \text{ kJ/gmol}$	(4)
ปฏิกิริยา methanation	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	$\Delta H^\circ_{rxn} = -75 \text{ kJ/gmol}$	(5)
ปฏิกิริยา combustion	$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	$\Delta H^\circ_{rxn} = -111 \text{ kJ/gmol}$	(6)
	$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H^\circ_{rxn} = -283 \text{ kJ/gmol}$	(7)
	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H^\circ_{rxn} = -394 \text{ kJ/gmol}$	(8)
ปฏิกิริยา water gas shift	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	$\Delta H^\circ_{rxn} = -41 \text{ kJ/gmol}$	(9)
ปฏิกิริยา Steam methane reforming	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	$\Delta H^\circ_{rxn} = +206 \text{ kJ/gmol}$	(10)
anode (oxidation)	$2H_{2(g)} \rightarrow 4H^+ + 4e^-$		(11)
cathode (reduction)	$O_{2(g)} + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$		(12)
ปฏิกิริยารวม (redox)	$2H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 4H^+ + 2O^{2-} \rightarrow 2H_2O_{(l)}$		(13)

2.2 เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจน ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงไม่ต้องผ่านการเผาไหม้ ทำให้เครื่องยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงนี้ไม่ก่อมลภาวะทางอากาศ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ ส่วนประกอบหลักของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด (electrode) 2 ขั้ว คือ แคโทด (cathode) และแอโนด (anode) คั่นด้วยอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) มีการเติมเชื้อเพลิง เช่น ก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปที่แอโนด ในขณะที่ก๊าซออกซิเจน (จากอากาศ) จะผ่านเข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงที่แคโทด เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาก๊าซไฮโดรเจน (H_2) จะถูกออกซิไดซ์ให้แตกตัวออกเป็นโปรตอน (H^+) และอิเล็กตรอน ซึ่งโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกให้กระแสไฟฟ้าออกมาและวิ่งไปยังแคโทดเพื่อรีดิวซ์ก๊าซออกซิเจนให้เป็นออกซิเจนไอออน (O^{2-}) เมื่อโปรตอนและออกซิเจนไอออนรวมตัวกันจะได้ผลผลิตเป็นน้ำบริสุทธิ์ที่แคโทด

พร้อมกับให้ความร้อนออกมาด้วย โดยปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและแคโทด [4] สามารถแสดงรายละเอียดดังสมการที่ 11, 12 และ 13

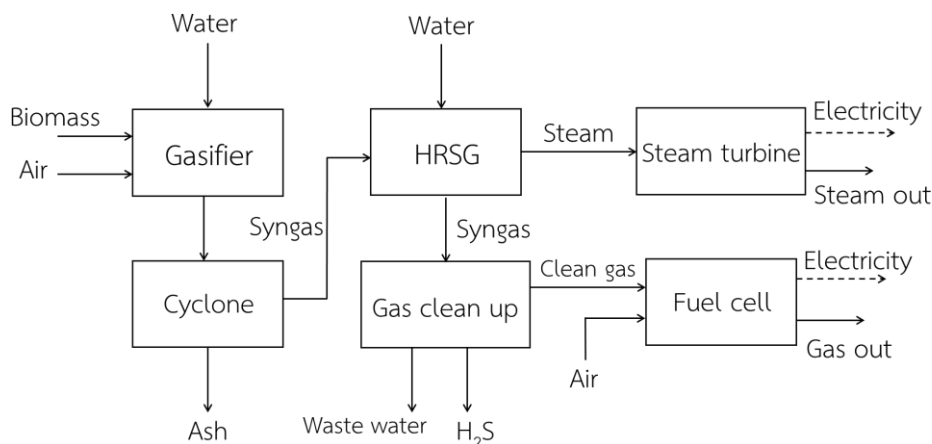
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (solid oxide fuel cell, SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการพัฒนาให้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่สำคัญเนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูง และมีการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมในระดับต่ำ นอกจากนี้ SOFC เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด เช่น ก๊าซธรรมชาติและก๊าซที่ได้จากชีวมวล และไม่มีความจำเป็นในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพงดังเช่นเซลล์เชื้อเพลิงแบบอื่น อีกทั้งการทำงานในช่วงอุณหภูมิสูงทำให้ SOFC สามารถทำงานร่วมกับ Gas turbine ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี [6]

2.3 ระบบผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการผลิตก๊าซจากชีวมวลร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง (integrated biomass gasification fuel cell system, BGFC)

เป็นเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าซึ่งใช้กระบวนการผลิตก๊าซจากชีวมวลมาทำงานร่วมกับ

เซลล์เชื้อเพลิง โดยระบบนี้ประกอบด้วยกระบวนการผลิตก๊าซ (gasifier) กระบวนการแยกขี้เถ้า (cyclone) กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนและผลิตไอน้ำ (heat recovery steam generation, HRSG) และกระบวนการทำความสะอาดก๊าซ (gas clean up) กระบวนการนี้สามารถผลิตไฟฟ้าได้จาก 2 ส่วน คือ

ผลิตไฟฟ้าจากกังหันไอน้ำ (steam turbine) และผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) แสดงดังรูปที่ 1 และเนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้ในปริมาณมาก ทำให้กระบวนการนี้เป็นกระบวนการผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง [6,7]



รูปที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการผลิตก๊าซจากชีวมวลร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง (BGFC)

3. วิธีการและขั้นตอนการศึกษา

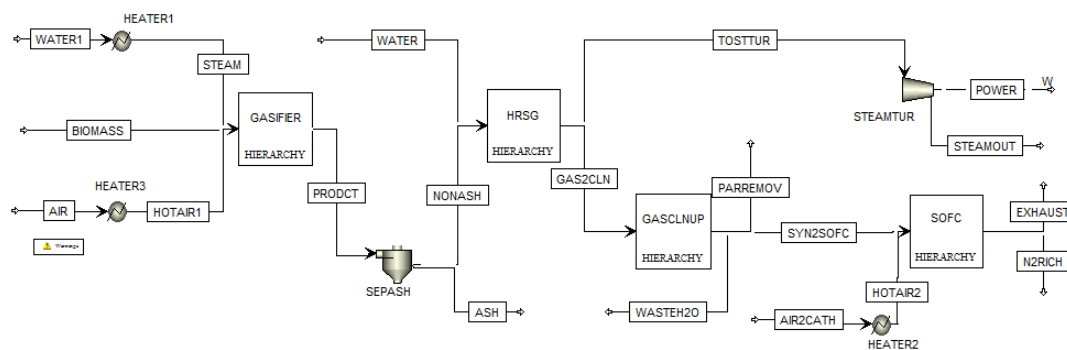
3.1 การจำลองระบบผลิตไฟฟ้า BGFC

สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการผลิตก๊าซจากชีวมวลร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง (BGFC) ในงานวิจัยนี้จะศึกษาด้วยการจำลองกระบวนการโดยโปรแกรม ASPEN PLUS v.8.6 ซึ่งประกอบด้วย 6 หน่วยดำเนินงานหลัก ได้แก่ กระบวนการผลิตก๊าซ (gasifier) กระบวนการแยกขี้เถ้า (separation) กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อผลิตไอน้ำ (HRSG) กังหันไอน้ำ (steam turbine) กระบวนการทำความสะอาดก๊าซ (gas clean up) และเซลล์เชื้อเพลิง (SOFC) แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งองค์ประกอบของชีวมวลต่าง ๆ นั้น (องค์ประกอบในสาย BIOMASS) แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นค่าองค์ประกอบของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสขั้นต้นและการทำให้แห้งมาแล้ว

[8] และกำหนดอัตราการป้อนชีวมวลในสาย BIOMASS ปริมาณ 205 กิโลกรัมต่อชั่วโมง [7]

3.2 การคำนวณหาค่ากำลังไฟของระบบ

ระบบผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการผลิตก๊าซจากชีวมวลร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (BGFC) เป็นเทคโนโลยีที่นำกระบวนการผลิตก๊าซมาทำงานร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดมาจาก 2 ส่วน คือ ไฟฟ้าที่ได้มาจากกังหันไอน้ำ (steam turbine) และไฟฟ้าที่ได้มาจากเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) ซึ่งในการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม ASPEN PLUS จะมีการแสดงผลของค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันไอน้ำ ส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถหาได้จากการคำนวณด้วยสมการ Electrochemical model [6] ดังนี้



รูปที่ 2 การจำลองกระบวนการผลิตก๊าซจากชีวมวลร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (BGFC) โดยโปรแกรม ASPEN PLUS v.8.6

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของชีวมวลแห้งหลังผ่านการไพโรไลซิสขั้นต้น (primary pyrolysis) [8]

องค์ประกอบ	สัดส่วนองค์ประกอบโดยโมล (mole fraction)						
	ซังข้าวโพด (corn cob)	ทะลายปาล์มเปล่า (empty fruit bunch)	เหง้ามันสำปะหลัง (cassava rhizome)	ฟางข้าว (rice straw)	แกลบ (rice husk)	ขานอ้อย (bagasse)	กะลาปาล์ม (palm shell)
H ₂	0.1993	0.2042	0.1983	0.1776	0.1796	0.1877	0.1795
CO	0.1134	0.1211	0.0835	0.1241	0.1211	0.0842	0.1223
CO ₂	0.3390	0.3492	0.4033	0.2632	0.2697	0.3722	0.2690
H ₂ O	0.1912	0.1986	0.1478	0.3316	0.3244	0.2321	0.3241
CH ₄	0.1009	0.1043	0.1430	0.0859	0.0871	0.1014	0.0871
ethane	0.0049	0.0050	0.0051	0.0041	0.0041	0.0048	0.0041
ethylene	0.0054	0.0057	0.0058	0.0046	0.0047	0.0055	0.0047
benzene	0.0382	0.0039	0.0041	0.0032	0.0032	0.0038	0.0032
N ₂	0.0056	0.0057	0.0068	0.0043	0.0044	0.0062	0.0044
NH ₃	0.0018	0.0020	0.0021	0.0013	0.0013	0.0019	0.0013
H ₂ S	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002

จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิง ในกรณีที่ระบบผันกลับได้ หรือไม่มีการสูญเสียใด ๆ เกิดขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถสร้างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดได้ ซึ่งศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้ (reversible cell voltage, E) สามารถหาได้ดังสมการ

$$E = - \frac{\Delta G}{n_e F} \quad (14)$$

โดย n_e คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ส่งผ่านระหว่างปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและแคโทด; F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ มีค่าเท่ากับ $96,485 \text{ C mol}^{-1}$; ΔG คือ การเปลี่ยนแปลง

พลังงานกิบส์อิสระต่อโมล (molar Gibbs free energy change)

$$\Delta G = \Delta G^\circ - RT \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right) \quad (15)$$

โดย ΔG° คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานกิบส์อิสระต่อโมลที่ความดัน $p_0 = 1 \text{ atm}$; R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$; p_{H_2} , p_{O_2} และ p_{H_2O} คือ ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจน ออกซิเจน และน้ำตามลำดับ

โดยทั่วไปแล้ว ศักย์ไฟฟ้า (V) ที่เซลล์เชื้อเพลิงสร้างออกมาได้นั้นต้องคำนวณโดยพิจารณาค่าการสูญเสียหลัก ๆ 3 อย่างด้วย ได้แก่ ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (activation loss V_{act}) ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากผลของการถ่ายโอนมวล (concentration loss, V_{conc}) และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic loss, V_{ohm})

$$V = E - V_{act} - V_{conc} - V_{ohm} \quad (16)$$

ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ที่แอโนด ($V_{act,a}$) และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ที่แคโทด ($V_{act,c}$) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_{act,a} = \frac{2RT}{F} \sinh^{-1}\left(\frac{i}{2i_{0,a}}\right) \quad (17)$$

$$V_{act,c} = \frac{2RT}{F} \sinh^{-1}\left(\frac{i}{2i_{0,c}}\right) \quad (18)$$

ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน (exchange current density, i_0) โดยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนที่แอโนด ($i_{0,a}$) และแคโทด ($i_{0,c}$) สามารถหาได้ดังนี้

$$i_{0,a} = \gamma_a \left(\frac{P_{H_2}}{P_0}\right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_0}\right) \exp\left(-\frac{E_{act,a}}{RT}\right) \quad (19)$$

$$i_{0,c} = \gamma_c \left(\frac{P_{O_2}}{P_0}\right)^{1/4} \exp\left(-\frac{E_{act,c}}{RT}\right) \quad (20)$$

สำหรับ γ_a และ γ_c เป็นค่าสัมประสิทธิ์ pre-exponential ของแอโนดและแคโทด ส่วน $E_{act,a}$ และ $E_{act,c}$ เป็นค่าพลังงานกระตุ้นที่แอโนดและแคโทดตามลำดับ โดยค่าคงที่ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงจะใช้ข้อมูลอ้างอิงจากงานวิจัย [6] และ [7] ซึ่งค่าคงที่เหล่านี้มีแสดงถึงข้อจำกัดของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น เช่น ความหนาแน่นกระแสสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายได้ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากผลของการถ่ายโอนมวลทั้งที่แอโนด ($V_{conc,a}$) และแคโทด ($V_{conc,c}$)

สามารถหาได้จากพื้นฐานของสมการของ Fick's law ดังนี้

$$V_{conc,a} = - \frac{RT}{n_e F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_{L,a}}\right) \quad (21)$$

$$V_{conc,c} = - \frac{RT}{n_e F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_{L,c}}\right) \quad (22)$$

โดย $i_{L,a}$ และ $i_{L,c}$ คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจำกัด (Limiting current density) ของแอโนดและแคโทดตามลำดับ

ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic loss, V_{ohm}) เกิดขึ้นจากความต้านทานการไหลของไอออนในอิเล็กโทรไลต์และความต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนผ่านขั้วไฟฟ้า ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$V_{ohm} = \frac{i_{el} L_{el}}{\sigma_0} \exp\left(\frac{E_{el}}{RT}\right) \quad (23)$$

โดย L_{el} คือ ความหนาของอิเล็กโทรไลต์; σ_0 คือ ค่าการนำไอออน; E_{el} คือ ค่าพลังงานกระตุ้นของการส่งผ่านไอออน

ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ได้ (V) สามารถคำนวณได้จากศักย์ไฟฟ้าสูงสุดลบศักย์ไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้น ดังสมการ

$$V = E - V_{act,a} - V_{act,c} - V_{conc,a} - V_{conc,c} - V_{ohm} \quad (24)$$

และกำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ (P) จะคำนวณจาก

$$P = IV \quad (25)$$

โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้า (I) สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (i) กับพื้นที่แอโนดที่ฟของเซลล์เชื้อเพลิง (A) คือ $I = iA$ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดพื้นที่แอโนดที่ฟของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 284.83 m^2 สำหรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นค่าที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยมีค่าไม่เกิน 5800 A/m^2 ซึ่งเป็นความสามารถที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด ซึ่งอ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยของ Sadhukhan และคณะ [6]

3.3 ค่าประสิทธิภาพของระบบ (system efficiency, η)

ประสิทธิภาพของระบบ[9]สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta = \frac{\Sigma W_{out} + \Sigma Q_{out}}{\Sigma E_{mass,in} + \Sigma Q_{in}} \quad (26)$$

โดย W_{out} คือ ปริมาณงาน (กำลังไฟฟ้า) ที่ระบบ BGFC ผลิตได้; Q_{in} และ Q_{out} คือ ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าและออกจากระบบ BGFC; $E_{mass,in}$ คือ ปริมาณพลังงานที่มาจากการไหลของมวลสารเข้าสู่ระบบ BGFC

4. ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาระบบผลิตไฟฟ้า BGFC ด้วยโปรแกรม ASPEN PLUS v.8.6 ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของระบบ BGFC นั้น จะศึกษาตัวแปรที่สำคัญในหน่วยปฏิกรณ์หลัก 2 ส่วน คือ ก๊าซซิไฟเออร์และเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งในส่วนของก๊าซซิไฟเออร์ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของก๊าซซิไฟเออร์ สัดส่วนการป้อนอากาศต่อชีวมวล และสัดส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ และความดันของเซลล์เชื้อเพลิง ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2 โดยชีวมวลที่ศึกษา ได้แก่ ช้างโหด ทะลายปาล์มเปล่า เหง้ามันสำปะหลัง ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย และกะลาปาล์ม ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรแต่ละตัวนั้น จะดำเนินการปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรทีละตัว โดยที่ตัวแปรอื่น ๆ จะมีค่าเท่ากับค่าสภาวะดำเนินงานเบื้องต้น ดังแสดงในตารางที่ 3

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณกำลังไฟฟ้ารวมของระบบที่ผลิตได้และประสิทธิภาพของระบบ BGFC นี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 ถึง 7 โดยภาพรวมจะพบว่าชีวมวล

ทั้ง 7 ชนิดจะได้รับอิทธิพลของตัวแปรแต่ละตัวในรูปแบบที่คล้ายกัน

ตารางที่ 2 ตัวแปรและสภาวะของตัวแปรต่าง ๆ ที่ศึกษา

ตัวแปร	ช่วงของตัวแปร
อุณหภูมิของก๊าซซิไฟเออร์ (°C) [10]	400-1000
สัดส่วนการป้อนอากาศต่อชีวมวล [7]	2.0-4.0
สัดส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล [10]	0.6-2.0
อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง (°C) [7]	600-1300
ความดันของเซลล์เชื้อเพลิง (bar) [7]	1.0-7.0

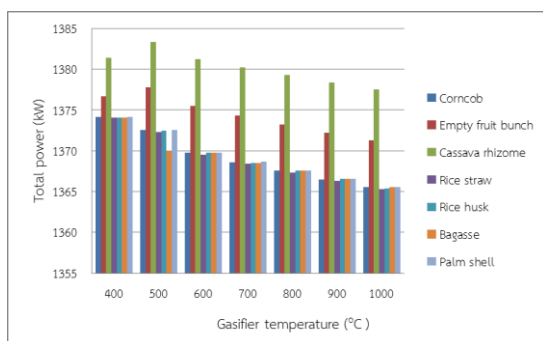
ตารางที่ 3 ค่าสภาวะดำเนินงานเบื้องต้น (nominal condition) ในการดำเนินงาน

ตัวแปร	ค่าสภาวะดำเนินงานเบื้องต้น
อุณหภูมิของก๊าซซิไฟเออร์ (°C)	1000
สัดส่วนการป้อนอากาศต่อชีวมวล	2.0
สัดส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล	1.3
อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง (°C)	1000
ความดันของเซลล์เชื้อเพลิง (bar)	5.0

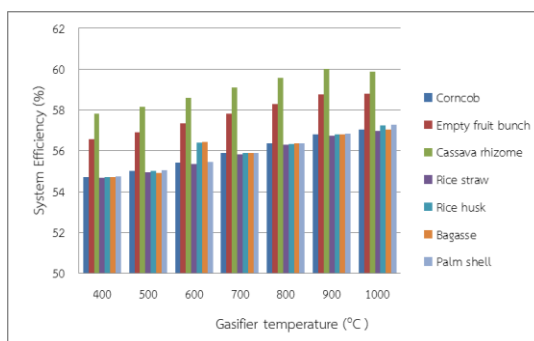
รูปที่ 3 แสดงผลอิทธิพลของอุณหภูมิก๊าซซิไฟเออร์ (gasifier temperature) ที่มีต่อปริมาณกำลังไฟฟ้ารวมและประสิทธิภาพของระบบ โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรกกำลังไฟฟ้ารวมจะมีเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงมากขึ้นต่อไปปริมาณกำลังไฟฟ้ารวมจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากในช่วงแรก (400-600 °C) นั้น ก๊าซซิไฟเออร์สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ได้ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยา water gas, steam reforming และปฏิกิริยาผันกลับของ methanation ซึ่งเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง

จนเมื่ออุณหภูมิ 600 °C ซึ่งเป็นจุดที่ชีวมวลแต่ละชนิดให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 8 และเมื่ออุณหภูมิสูงมากกว่า 600 °C จะส่งผลให้ปฏิกิริยาผันกลับของ water gas shift มีอิทธิพลมากขึ้นซึ่งจะทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจะลดลง แต่ปริมาณก๊าซ CO จะเพิ่มสูงขึ้น [10] โดยปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากก๊าซซิไฟเออร์นั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่จะผลิตได้จากเซลล์

เชื้อเพลิง ในทางกลับกันค่าประสิทธิภาพรวมของระบบจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ความร้อนทั้งหมดที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้า BGFC (ΣQ_{out}) เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่ามากกว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของความร้อนทั้งหมดที่ต้องป้อนเข้าสู่ระบบผลิตไฟฟ้า BGFC (ΣQ_{in}) และสัดส่วนการลดลงของกำลังไฟฟ้ารวมจึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบที่ได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

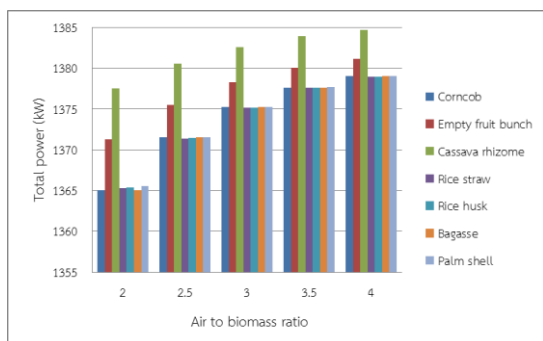


(ก)

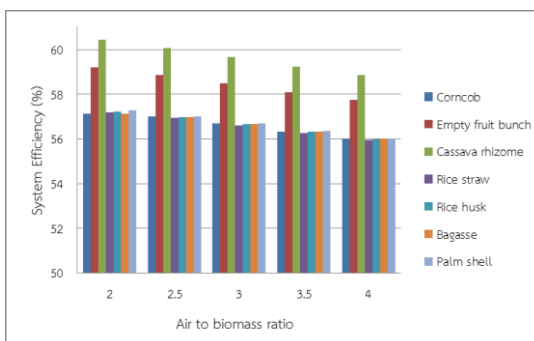


(ข)

รูปที่ 3 อิทธิพลของอุณหภูมิก๊าซซิไฟเออร์ที่มีต่อ (ก) ปริมาณกำลังไฟฟ้ารวม และ (ข) ประสิทธิภาพของระบบ



(ก)



(ข)

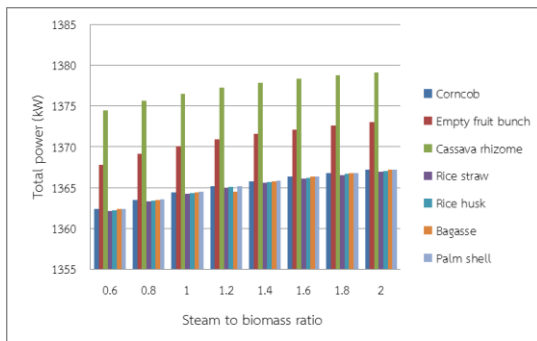
รูปที่ 4 อิทธิพลของสัดส่วนการป้อนอากาศต่อชีวมวลที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณกำลังไฟฟ้ารวม และ (ข) ประสิทธิภาพของระบบ

รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของสัดส่วนการป้อนอากาศต่อชีวมวลทั้ง 7 ชนิด (air to biomass ratio) ที่มีผลต่อปริมาณกำลังไฟฟ้ารวมและประสิทธิภาพของ

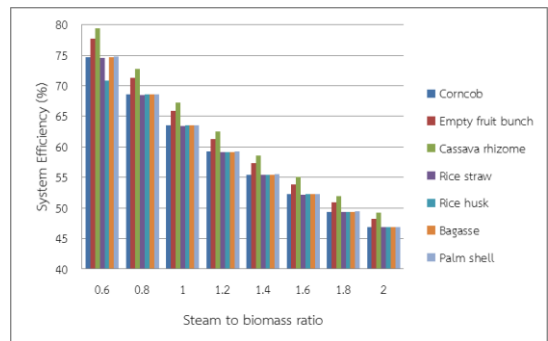
ระบบ โดยพบว่าเมื่อสัดส่วนการป้อนอากาศเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้ารวมของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากในช่วงแรก และค่อนข้างคงที่เมื่อสัดส่วนอากาศมากขึ้น เนื่องจาก

การป้อนอากาศเข้าสู่ก๊าซซิไฟเออร์นั้นเป็นการเติมตัวออกซิโดซ์ในการเผาไหม้คาร์บอน (C) ในปฏิกิริยา carbon combustion ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนของอากาศเพิ่มมากขึ้น คาร์บอนจะมีการเผาไหม้มากขึ้นซึ่งจะทำให้ได้ ปริมาณ ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งปริมาณ H_2 และ CO จะมากที่สุดเมื่อปริมาณ C ทำปฏิกิริยาพอดีกับ O_2 [10] ในขณะที่ประสิทธิภาพรวมของระบบมีค่า

ลดลง เนื่องจากสัดส่วนการป้อนอากาศต่อชีวมวลที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความร้อนทั้งหมดที่ต้องป้อนเข้าสู่ระบบผลิตไฟฟ้า BGFC (ΣQ_{in}) และผลรวมของพลังงานที่มาจากการไหลของมวลสารขาเข้า ($\Sigma E_{mass,in}$) เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่ามากกว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของความร้อนทั้งหมดที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้า BGFC (ΣQ_{out}) และกำลังไฟฟารวม จึงทำให้ประสิทธิภาพของระบบที่คำนวณได้มีค่าลดลง

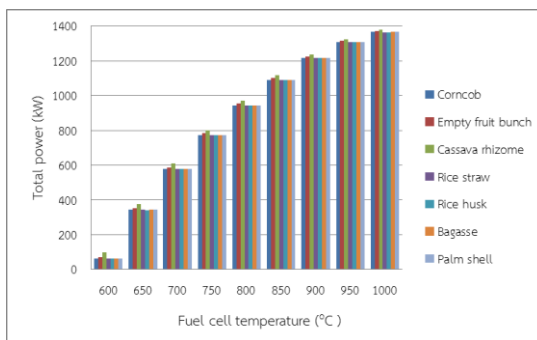


(ก)

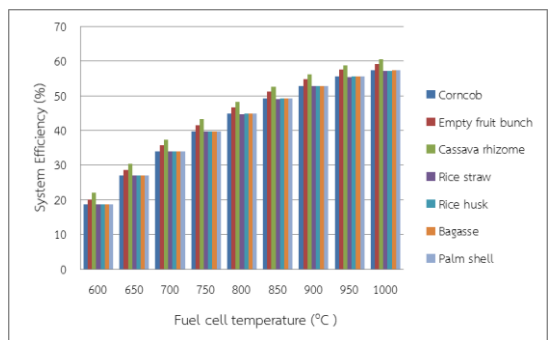


(ข)

รูปที่ 5 อิทธิพลของสัดส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณกำลังไฟฟารวม และ (ข) ประสิทธิภาพของระบบ



(ก)



(ข)

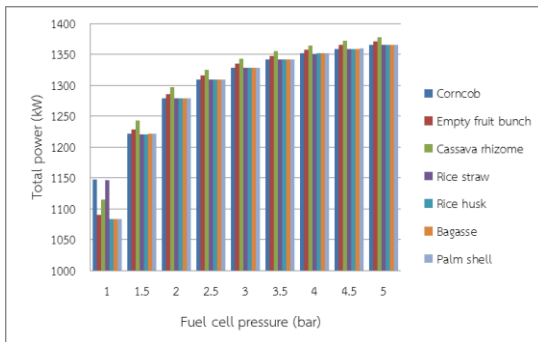
รูปที่ 6 อิทธิพลของอุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิงที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณกำลังไฟฟารวม และ (ข) ประสิทธิภาพของระบบ

รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของสัดส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลทั้ง 7 ชนิด (steam to biomass ratio)

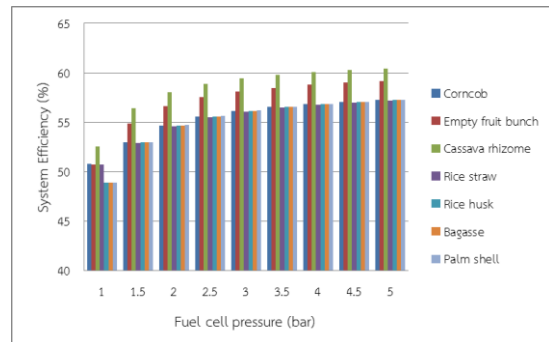
ที่มีผลต่อปริมาณกำลังไฟฟารวมและประสิทธิภาพของระบบ โดยพบว่าเมื่อสัดส่วนการป้อนไอน้ำเพิ่มขึ้น

กำลังไฟฟารวมของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณไอน้ำเข้าสู่ก๊าซซิไฟเออร์มากขึ้น ทำให้ก๊าซซิไฟเออร์สามารถผลิตไฮโดรเจนได้มากขึ้นจากปฏิกิริยา water gas shift และ steam methane reforming จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น ในขณะที่ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบมีค่าลดลง เนื่องจาก

สัดส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความร้อนทั้งหมดที่ต้องป้อนเข้าสู่ระบบผลิตไฟฟ้า BGFC (ΣQ_{in}) เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่ามากกว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของความร้อนทั้งหมดที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้า BGFC (ΣQ_{out}) และกำลังไฟฟารวม จึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าลดลง

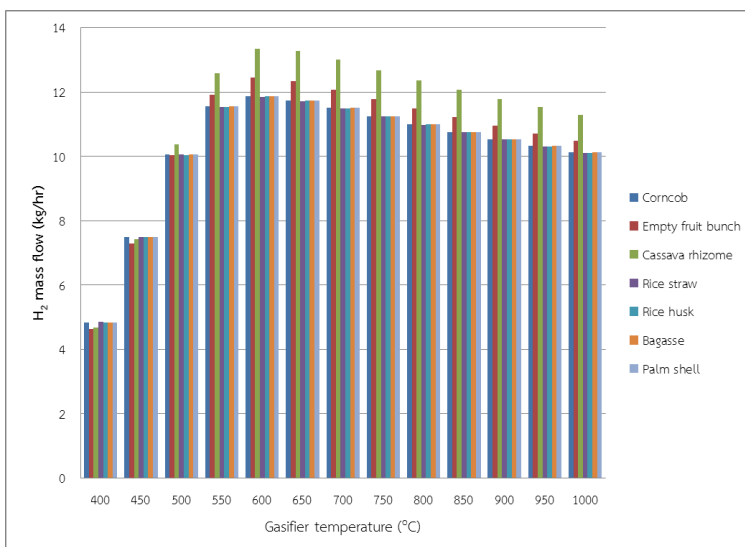


(ก)



(ข)

รูปที่ 7 อิทธิพลของความดันเซลล์เชื้อเพลิงที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณกำลังไฟฟารวม และ (ข) ประสิทธิภาพของระบบ



รูปที่ 8 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ออกจากหน่วยก๊าซซิไฟเออร์ (gasifier) ที่อุณหภูมิการดำเนินงานในช่วง 400-1000 °C

จากรูปที่ 6 และ 7 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิ (fuel cell temperature) และความดันเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell pressure) ที่มีผลต่อปริมาณ

กำลังไฟฟารวมและประสิทธิภาพของระบบ โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิหรือความดันภายในเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นกำลังไฟฟารวมและค่าประสิทธิภาพรวมของ

ระบบจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิหรือความดันของเซลล์เชื้อเพลิงที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (V) ของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นค่าที่มีอิทธิพลต่อกำลังไฟฟารวมของระบบ เพราะกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันก๊าซ นอกจากนี้จากสมการคำนวณค่าประสิทธิภาพรวมของระบบ (สมการที่ 26) แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณกำลังไฟฟารวม (W_{out}) ของระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากกว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของความร้อนทั้งหมด (ΣQ_{in}) ที่ป้อนเข้าสู่ระบบผลิตไฟฟ้า BGFC จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากชีวมวลแต่ละชนิดจะพบว่า ชีวมวลทั้ง 7 ชนิด ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถผลิตไฟฟ้าได้ โดยเหง้ามันสำปะหลัง (cassava rhizome) สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากที่สุด รองลงมาคือทะลายปาล์มเปล่า (empty fruit bunch) เนื่องจากชีวมวลเหล่านี้มีองค์ประกอบของไฮโดรเจน (ในรูปของ H_2 และ CH_4) ในปริมาณที่มาก ทำให้ gasifier สามารถผลิตก๊าซ H_2 ได้ในปริมาณมากกว่าชีวมวลอื่น ซึ่งปริมาณ H_2 จากก๊าซสังเคราะห์ชีวมวลนั้น เป็นปัจจัยสำคัญต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนชีวมวลอื่น ๆ ที่เหลือสามารถผลิตไฟฟ้าได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้การหาค่าสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆในระบบ BGFC นั้นก็เป็นประเด็นสำคัญที่ต้องศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีและมีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

5. สรุปผลการศึกษา

ปัจจุบันประเทศไทยมีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศทั้งด้าน

ธุรกิจและสังคม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการผลิตก๊าซจากชีวมวลร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (BGFC) โดยจำลองระบบด้วยโปรแกรม ASPEN PLUS v.8.6 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และประสิทธิภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้านี้ โดยศึกษาชีวมวล 7 ชนิด ได้แก่ ชิงช้าหวัด ทะลายปาล์มเปล่า เหง้ามันสำปะหลัง ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย และกะลาปาล์ม โดยตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และประสิทธิภาพของระบบ BGFC ได้แก่ ค่าอุณหภูมิของก๊าซซีฟเอร์ สัดส่วนการป้อนอากาศต่อชีวมวล สัดส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง และความดันของเซลล์เชื้อเพลิง โดยผลจากการศึกษาพบว่าปริมาณกำลังไฟฟ้าของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการป้อนอากาศต่อชีวมวล สัดส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง และความดันของเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนประสิทธิภาพของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงและความดันของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเหง้ามันสำปะหลังมีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าได้สูงที่สุด

เนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษาด้วยการจำลองกระบวนการ ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้ อาจจะมีแตกต่างกับผลที่ได้จากการดำเนินงานของกระบวนการจริงได้ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาด้วยการจำลองกระบวนการนั้นสามารถแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าชีวมวลชนิดต่างๆในประเทศไทยมีศักยภาพเหมาะสมที่จะนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าเพื่อเป็นพลังงานทดแทนในอนาคตได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาวิจัย

7. รายการอ้างอิง

- [1] มณฑาสินี หอมหวาน, 2555, พลังงานทดแทนพลังงานทางเลือกใหม่สำหรับอนาคต, Execut. J. 32(1): 100-104.
- [2] ธนาพล ตันตีสัตยกุล, สุริยา พงษ์เกษม, ปรีดิ์ ปวีณ ภูหญา และภาณุวัฒน์ ไถ่บ้านถวย, 2558, พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว, ว. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 23: 418-431.
- [3] นัย บารุงเวช, 2555, ชั่งข้าวโพดพลังงานทดแทนจากพืช ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวล, เทคโนโลยีชาวบ้าน 25: 74.
- [4] Din, Z. และ Zainal, Z., 2016, Biomass integrated gasification-SOFC systems: Technology overview, Renew. Sust. Energ. Rev. 53: 1356-1376.
- [5] Chutichai, B., Authayanun, S., Assabumrungrat, S. and Arpornwichanop, A., 2013, Performance analysis of an integrated biomass gasification and PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) system: Hydrogen and power generation, Energy 55:98-106.
- [6] Sadhukhan, J., Zhao, Y., Shah, N. and Brandon, N., 2010, Performance analysis of integrated biomass gasification fuel cell (BGFC) and biomass gasification combined cycle (BGCC) systems, Chem. Eng. Sci. 65: 1942-1954.
- [7] Boonmak, J. and Paengjuntuek, W., 2014, Optimal operation analysis of IGFC system, Thammasat Int. Sci. Tech. 19: 52-59.
- [8] จันจิรา อมรชัยวิวัฒน์, 2555, การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐศาสตร์ และพลังงานของการผลิตไฮโดรเจนจากชีวมวล, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 236.น.
- [9] Paengjuntuek, W., Boonmak, J. and Mungkalasiri, J., 2015, Energy efficiency analysis in an integrated biomass gasification fuel cell system, Energy Procedia 79: 430-435.
- [10] Ramzan, N., Ashraf, A., Naveed, S. and Malik, A., 2011, Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste, Biomass Bioen. 35: 3962-3969.