ระบบควบคุมการดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ Modified Packed Bed Reactor ต้นแบบขนาดเล็กในกระบวนการรีฟอร์มมิง

พงษ์ศักดิ์ กีรติวินทกร[1]* ภาวนี นรัตถรักษา[2] และ ฉัฐพงศ์ ช่วยประสาทวัฒนา[3]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมการดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบขนาดเล็กแบบ Modified Packed Bed ในกระบวนการรีฟอร์มมิงโดยใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาจากโปรแกรม Aspen Plus Dynamics Simulation กับการควบคุมจริงด้วยโปรแกรม LabView ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมของบริษัท National Instrument ที่เชื่อมต่อการควบคุมไปยังชุดอุปกรณ์ควบคุมและวัดผลต่าง ๆ ในชุดทดสอบกระบวนการรีฟอร์มมิง ผลการทดสอบพบว่าการปรับค่าความดันได้ผลตอบสนองที่มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทำ Simulation ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบป้อนกลับในการควบคุมกระบวนการรีฟอร์มมิงกับเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบขนาดเล็กแบบ Modified Packed Bed ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: เครื่องปฏิกรณ์ Modified Packed Bed รีฟอร์มมิง ทฤษฎีการป้อนกลับ

[1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[3] นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2255 อีเมล: phongsakk@kmutnb.ac.th

รับเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2557 ตอบรับเมื่อ 7 มีนาคม 2557

A Control System for a Pilot-Scale Modified Packed Bed Reactor for a Reforming Process

Phongsak Keeratiwintakorn[1]* Phavanee Narataruksa[2] and Chatpong Chuayprasadpattana[3]

Abstract

This experimental research is to investigate Dry and Steam Reforming Process on the specially designed Modified Packed Bed reactor controlled by automated control software. A feedback controller system is implemented to control the process according to the preset condition. The results of the experiments are compared with those produced from the process simulation software, Aspen Plus Dynamics Simulation. To control the Reforming Process, the LabView® software is used with the controller from National Instrument to interface with the instruments for both controlling and monitoring. The comparisons of adjusting pressure reveal that the automated process control software can perform the task within an acceptable response time. Hence, it can be utilized in experiments and further research respecting both Dry and Steam Reforming processes.

Keywords: Modified Packed Bed Reactor, Reforming, Feedback Control

[1] Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

[2] Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

[3] Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2255, E-mail: phongsakk@kmutnb.ac.th

Received 7 February 2014; Accepted 7 March 2014

1. บทนำ

สภาพการณ์การใช้พลังงานของโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากขึ้นทุกๆ ปี อันเนื่องมาจากความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นในการพัฒนาประเทศในภูมิภาคต่างๆ ทั่วโลก พลังงานที่ต้องการส่วนมากเป็นพลังงานจากฟอสซิลหรือจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งมีแนวโน้มจะหมดไปจากโลกในอนาคต อย่างไรก็ตามในประเทศไทยแหล่งพลังงานที่สามารถหาได้จากธรรมชาติส่วนใหญ่คือแหล่งก๊าซธรรมชาติซึ่งสามารถนำมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายภายในประเทศ อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตน้ำมันดิบมักจะมีก๊าซเหลือทิ้ง (Associated Gas) จากกระบวนการ ในหลายๆ ประเทศทั่วโลกจึงได้มีการวิจัยเพื่อนำก๊าซธรรมชาติเหลือทิ้งดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เช่น กระบวนการเพื่อผลิตเป็นก๊าซสังเคราะห์เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น นำไปผลิตเป็นก๊าซไฮโดรเจนเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม [1],[2] นำไปใช้ในการสังเคราะห์เมธานอล [3] นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน [4] และนำไปผลิตเป็นน้ำมันดีเซลคุณภาพสูงหรือเบนซินด้วยกระบวนการฟิชเชอร์-ทรอปช์ [5],[6] เป็นต้น

กระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซธรรมชาติคือกระบวนการรีฟอร์มมิงที่จำเป็นต้องมีการควบคุมสภาวะการเกิดปฏิกิริยาให้เหมาะสมเพื่อให้กระบวนการรีฟอร์มมิงมีประสิทธิภาพสูงสุด งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบการควบคุมอัตโนมัติแบบป้อนกลับด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมกระบวนการรีฟอร์มมิงให้เกิดขึ้นในสภาวะที่ต้องการตามการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบ Modified Packed Bed

ในการศึกษากระบวนการรีฟอร์มมิงก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซมีเทนในงานวิจัยอื่นๆ [7]-[9] มีการใช้ซอฟต์แวร์ด้าน Computational Fluid Dynamic (CFD) เพื่อการจำลองสภาวะการไหลของก๊าซเมื่อเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงภายในเตาปฏิกรณ์โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสารตั้งต้นไว้คงที่โดยเน้นการศึกษาถึงกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ภายในเตาปฏิกรณ์ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่นำเสนอนี้เน้นการควบคุมค่าพารามิเตอร์ของสารตั้งต้นและค่าทางกายภาพ เช่น ความร้อนจากเตาและความดันภายในเตาด้วยการควบคุมอุปกรณ์ด้วยคอมพิวเตอร์แบบอัตโนมัติเพื่อรักษาสภาวะการเกิดปฏิกิริยาให้เหมาะสมที่สุด

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบการควบคุมอัตโนมัติแบบป้อนกลับด้วยระบบคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการควบคุมปฏิกิริยารีฟอร์มมิงในสภาวะที่ต้องการตามการออกแบบของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก โดยการพัฒนาระบบดังกล่าวมีการทดสอบผลการควบคุมควบคู่กับการทำ Simulation ด้วยโปรแกรม Aspen Plus Dynamics Simulation [10] ผลการทดสอบพบว่าระบบควบคุมสามารถทำงานได้ใกล้เคียงจากผลของการทำ Simulation และสามารถนำระบบดังกล่าวไปใช้งานได้จริงเพื่อให้ได้ผลผลิตตามเป้าหมายของกระบวนการรีฟอร์มมิงที่ได้ออกแบบไว้

2. กระบวนการรีฟอร์มมิง

กระบวนการรีฟอร์มมิงเป็นกระบวนการทางเคมีที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ที่สภาวะความดันประมาณ 1-10 bar และอุณหภูมิดำเนินงานที่ 600°C [11] ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการรีฟอร์มมิงมี 2 ปฏิกิริยาด้วยกัน คือปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิง (Dry Reforming: DR) และปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิง (Steam Reforming: SR) ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$CH_4 + CO_2 \rightarrow 2CO + 2H_2,\ \Delta H = +247\ \text{kJ/kmol} \quad (1)$$

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2,\ \Delta H = +206.16\ \text{kJ/kmol} \quad (2)$$

จากสมการพบว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงเป็นกระบวนการคายความร้อน ซึ่งความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยามีผลให้อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์มีค่า

เปลี่ยนไปซึ่งอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาได้

3. การออกแบบระบบสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิง

กระบวนการรีฟอร์มมิงก๊าซธรรมชาติจำเป็นจะต้องมีการควบคุมค่าตัวแปรในการดำเนินงานต่างๆ ทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต้องการ และกระบวนการสามารถดำเนินการได้ต่อเนื่องอย่างอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ ดังนั้นระบบควบคุมกระบวนการอัตโนมัติสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงจึงจำเป็นจะต้องได้รับการติดตั้งประกอบในชุดทดลองเพื่อใช้ในการควบคุมระบบให้ได้สภาวะที่คงตัวทางเทอร์โมไดนามิกส์อันได้แก่ อุณหภูมิ และความดัน นอกจากนั้นยังใช้ในการควบคุมการป้อนสารตั้งต้นได้แก่ ก๊าซธรรมชาติจำลอง และก๊าซ CO_2 หรือ H_2O ให้เหมาะสมกับการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์

นอกเหนือจากการควบคุมสภาวะต่างๆ ทางเทอร์โมไดนามิกส์ และการควบคุมปริมาณและองค์ประกอบของสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิง ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยควบคุมภายนอกที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแล้ว ในการดำเนินงานกระบวนการดังกล่าวยังมีสภาวะที่เป็นปัจจัยภายในของการดำเนินงาน ได้แก่ ผลกระทบที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา การเกิดโค้ก และการอุดตันของเบดตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยภายในเหล่านี้สามารถถูกควบคุมให้มีอิทธิพลในวงจำกัดได้โดยอาศัยระบบควบคุมแบบอัตโนมัติที่เหมาะสม ซึ่งจะมีผลทำให้กระบวนการสามารถดำเนินงานไปได้อย่างต่อเนื่องและมีความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน

ในโครงการนี้คณะผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาระบบควบคุมกระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซธรรมชาติแบบอัตโนมัติ เพื่อให้สามารถผลิตก๊าซสังเคราะห์ได้อย่างต่อเนื่องสำหรับกระบวนการต้นแบบขนาดเล็กที่มีขนาดกำลังการผลิตในปริมาณคงที่ต่อเวลา โดยระบบควบคุมนี้สามารถปรับสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์และรักษาสภาวะนั้นให้ได้ตามที่ต้องการโดยใช้ทฤษฎีควบคุมที่เหมาะสม

นอกเหนือไปจากหน้าที่หลักในการควบคุมกระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์แล้ว ในการออกแบบกระบวนการยังต้องคำนึงถึงการดำเนินงานในทางปฏิบัติควบคู่กันไปด้วย ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานสามารถสรุปเป็นขั้นตอนย่อยได้สองส่วน ขั้นตอนที่หนึ่งคือ ขั้นตอนการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสภาพที่พร้อมสำหรับการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิง หรือที่เรียกว่า ขั้นตอนการรีดักชั่น (Reduction) และขั้นตอนที่สองคือ ขั้นตอนการดำเนินกระบวนการรีฟอร์มมิง

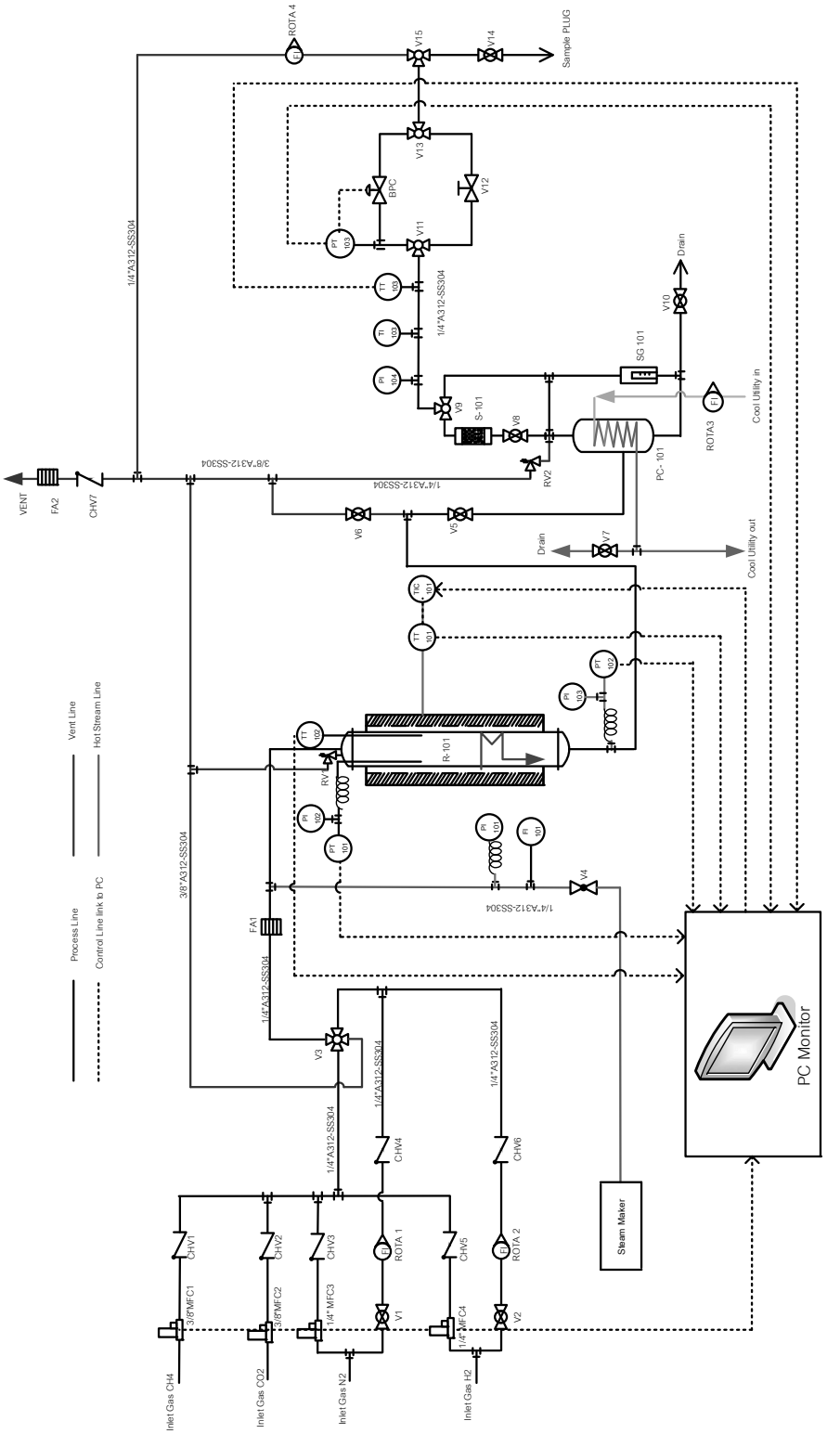
รูปที่ 1 แสดงการดำเนินงานของทั้งสองขั้นตอนด้วยการแสดงเป็นแผนภาพ Process and Instrumentation Diagram (P&ID) โดยมีคำอธิบายได้ดังนี้

3.1 P&ID ของกระบวนการปฏิกิริยารีฟอร์มมิง

P&ID สำหรับกระบวนการปฏิกิริยารีฟอร์มมิงนั้นจะต้องสามารถรองรับการดำเนินปฏิกิริยารีฟอร์มมิงได้ทั้งสองปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิง และปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิง ซึ่งการดำเนินปฏิกิริยารีฟอร์มมิงทั้งสองแบบสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.1.1 ปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิง

ในการดำเนินปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิง สารตั้งต้นของปฏิกิริยาอันได้แก่ CH_4 และ CO_2 จะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการด้วยอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Mass Flow Controller หรือ MFC) ชนิดโซลินอยด์วาล์วปรับค่าอัตราการไหลที่ MFC1 และ MFC2 ตามลำดับ จากนั้นก๊าซทั้งสองชนิดก็จะไหลผ่านวาล์วป้องกันการไหลย้อน CHV1 และ CHV2 ในระหว่างการดำเนินปฏิกิริยารีฟอร์มมิง ก๊าซ N_2 ก็จะถูกป้อนเข้ามาในกระบวนการที่ MFC3 ผ่านวาล์วป้องกันการไหลย้อน CHV3 และไหลไปรวมกับก๊าซสารตั้งต้น จากนั้นสารตั้งต้นที่ถูกป้อนจะผสมกันภายในท่อไหลผ่านวาล์วสลับทิศทางการไหล V3 และวาล์วป้องกันเปลวไฟไหลย้อน FA1 เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ R-101 ทางด้านบน



รูปที่ 1 P&ID สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิ่งที่ถูกออกแบบขึ้นในโครงการนี้

ในเครื่องปฏิกรณ์นี้ ปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 600°C ความดัน 1 bar จากนั้นสารผลิตภัณฑ์และก๊าซสารตั้งต้นที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านล่างผ่านวาล์ว V5 และถูกลดอุณหภูมิที่อุปกรณ์ควบแน่น PC-101 ด้วยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำหล่อเย็น (Cooling Utility) ซึ่งอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นจะถูกวัดด้วย Rotameter ROTA3 และถูกควบคุมด้วยวาล์วใน Rotameter

3.1.2 ปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิง

ในการดำเนินปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิง สารตั้งต้น CH_4 จะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการที่ MFC1 จากนั้นจะไหลผ่านวาล์วป้องกันการไหลย้อน CHV1 ในส่วนก๊าซ N_2 ก็จะถูกป้อนเข้ามาในกระบวนการที่ MFC3 ผ่านวาล์วป้องกันการไหลย้อน CHV3 และไหลไปรวมกับก๊าซ CH_4 ผสมกันภายในท่อไหลผ่านวาล์วสลับทิศทางการไหล V3 และวาล์วป้องกันเปลวไฟไหลย้อน FA1 ในส่วนของสารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิงอีกหนึ่งสารคือ H_2O จะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการด้วยเครื่องต้มระเหยน้ำ (Steam Maker) ผ่านวาล์ว V4 และไหลไปรวมกับก๊าซผสม CH4 และ N_2 ก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ R-101 ทางด้านบน

ในกรณีที่ดำเนินปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิงนั้น ถึงแม้ตามสมการการเกิดปฏิกิริยาจะได้ก๊าซผลิตภัณฑ์ CO และ H_2 แต่ในทางปฏิบัติปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น ปฏิกิริยา Water-gas-shift Reaction สามารถเกิดขึ้นได้และส่งผลให้ได้สารผลิตภัณฑ์ H_2O ด้วย ดังนั้นในการดำเนินปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิง โดยใช้เครื่องควบแน่น PC-101 นอกจากจะทำหน้าที่ลดอุณหภูมิสารผลิตภัณฑ์แล้ว ยังทำหน้าที่ควบแน่นสารผลิตภัณฑ์ H_2O จากปฏิกิริยาข้างเคียงด้วย

ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว H_2O ที่ถูกควบแน่นใน PC-101 ถูกตรวจสอบปริมาณผ่านอุปกรณ์วัดระดับน้ำ SG-101 เมื่อมีผลิตภัณฑ์ของเหลว H_2O สะสมในปริมาณที่มากพอ จะถูกถ่ายเทออกจาก PC-101 ผ่านวาล์ว V10 สำหรับก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงและก๊าซที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาถูกลดอุณหภูมิที่ PC-101 จากนั้นไหลผ่านวาล์ว V8 เข้าสู่อุปกรณ์ดูดซับความชื้น MS-101 ก่อนไหลเข้าสู่วาล์วสลับทิศทางการไหล V9 ซึ่งวาล์ว V9 นี้ยังทำหน้าที่เป็นวาล์วบายพาสของอุปกรณ์ดูดซับความชื้น MS-101 ด้วย

เมื่อก๊าซผลิตภัณฑ์ผ่านวาล์วสลับทิศทางการไหล V13 แล้วเข้าสู่วาล์วสลับทิศทางการไหล V15 ซึ่งเมื่อต้องการเก็บตัวอย่างก๊าซผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบ วาล์วสลับทิศทางการไหล V15 จะบังคับให้ก๊าซผลิตภัณฑ์ไหลเข้าสู่วาล์ว V14 ก่อนไหลออกสู่ส่วนของการเก็บก๊าซตัวอย่าง (Sampling Plug) ในขณะที่ไม่มีการเก็บตัวอย่างก๊าซผลิตภัณฑ์ วาล์วสลับทิศทางการไหล V15 จะถูกปรับบังคับให้ก๊าซผลิตภัณฑ์ไหลออกสู่บรรยากาศโดยไหลผ่าน Rotameter ROTA4 ผ่านวาล์วป้องกันการไหลย้อน CHV7 และอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟไหลย้อน FA2 และปล่อยสู่บรรยากาศ

3.2 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยในกระบวนการ

นอกเหนือไปจากการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมกระบวนการสำหรับการดำเนินปฏิกิริยารีฟอร์มมิงแล้ว ยังมีการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยสำหรับกระบวนการด้วย ได้แก่ วาล์วปล่อยฉุกเฉิน RV1 สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ และวาล์วปล่อยฉุกเฉิน RV2 สำหรับเครื่องควบแน่น ทั้งนี้วาล์วปล่อยฉุกเฉินทำหน้าที่ควบคุมความดันในระบบไม่ให้สูงเกินไปจนก่อให้เกิดอันตรายต่อกระบวนการ โดยวาล์วทั้งสองถูกปรับตั้งค่าความดันที่เหมาะสมเพื่อความปลอดภัยสำหรับกระบวนการไว้

3.3 การควบคุมตัวแปรในกระบวนการรีฟอร์มมิง

การควบคุมอัตราการไหลของก๊าซสารตั้งต้นที่จะเข้าทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Modified Packed Bed Reactor: R-101) จะเป็นระบบควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งสามารถกระทำได้ด้วยอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลก๊าซ (Mass Flow Controller: MFC) ชนิดโซลินอยด์วาล์ว

ซึ่งจะถูกติดตั้งและใช้ในการปรับค่าอัตราการไหลที่จุด MFC1, MFC2, MFC3 และ MFC4 โดยการทำงานของอุปกรณ์จะต้องมีการตั้งค่าอัตราการไหลของก๊าซสารตั้งต้นที่ต้องการควบคุม (Set Point) เพื่อให้อุปกรณ์ควบคุม (Controller) แบบ PID ของระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถใช้เป็นค่าควบคุมในการปรับแต่งค่าการเปิดวาล์วเพื่อปรับอัตราการไหลได้ ทั้งนี้ระบบควบคุมอัตโนมัติจะควบคุมการทำงานผ่านโปรแกรม LabView

การควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงในเครื่องปฏิกรณ์ R-101 เป็นระบบควบคุมแบบอัตโนมัติสามารถกระทำได้ดังนี้ อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ R-101 จะถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบโทโมคอปเปิลที่จุด TT-101 ซึ่งทำหน้าที่เป็น Temperature Transmitter และจะส่งสัญญาณที่แสดงถึงค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไปยังคอมพิวเตอร์ (PC Monitor) เพื่อนำสัญญาณมาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ถูกกำหนดไว้ (Set Point) ที่ชุดอุปกรณ์ควบคุมของเตาให้ความร้อน (TIC-101) จากนั้นประเมินหาผลต่างของอุณหภูมิเพื่อใช้ในการคำนวณอัตราการให้พลังงานและส่งสัญญาณควบคุมให้กับ TIC-101

จากนั้นระบบควบคุมอัตโนมัติจะทำการปรับระดับอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อปรับแต่งค่าอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้เข้าสู่ Set Point ที่กำหนดไว้

การควบคุมความดันในการดำเนินงานของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงในเครื่องปฏิกรณ์ R-101 เป็นการใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ สามารถกระทำได้โดยการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซขาเข้า ด้วยอุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหลก๊าซที่บริเวณทางเข้าสู่กระบวนการร่วมกับการใช้ชุดอุปกรณ์ควบคุมความดันกลับชนิดโซลินอยด์วาล์ว (Back Pressure Controller: BPC) ที่บริเวณทางออกของก๊าซผลิตภัณฑ์เพื่อรักษาสภาวะการไหลได้ของก๊าซและความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ R-101 โดยการดำเนินงานจะเป็นการวัดค่าความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์โดยอุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Transmitter: PT-101) และส่งสัญญาณค่าความดันที่วัดได้ไปยังคอมพิวเตอร์ (PC Monitor) เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าความดันที่วัดได้กับค่าความดันที่ถูกกำหนดเพื่อการดำเนินปฏิกิริยา (Set Point) หากค่าความดันที่วัดได้กับค่าที่ถูกกำหนดไว้แตกต่างกัน PC Monitor จะทำการส่งสัญญาณเพื่อมาปรับค่าการเปิดโซลินอยด์วาล์วของชุดอุปกรณ์ BPC ที่บริเวณทางออกของกระบวนการเพื่อปรับแต่งค่าความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์

3.4 กระบวนการรีดักซ์ชัน (Reduction) ตัวเร่งปฏิกิริยา

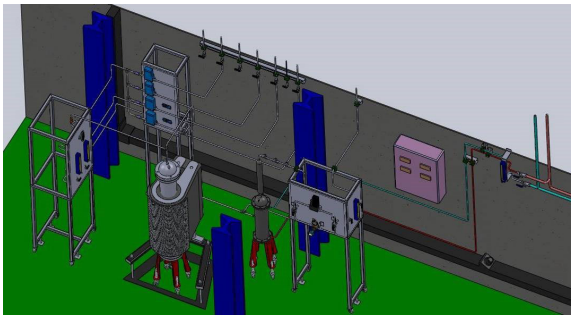
กระบวนการรีดักซ์ชันดำเนินการภายในเครื่องปฏิกรณ์ภายใต้สภาวะก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 600°C ความดัน 1 bar เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อเตรียมพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มความว่องไวก่อนการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิง ในขั้นตอนกระบวนการรีดักซ์ชันนี้ การควบคุมกระบวนการจะเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ กล่าวคือการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซในกระบวนรีดักซ์ชันจะถูกควบคุมแบบปรับด้วยมือ (Manual) ในขณะที่การควบคุมอุณหภูมิและความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์จะถูกควบคุมอัตโนมัติ โดยก๊าซ N_2 จะถูกป้อนเข้ามายังกระบวนการผ่านวาล์ว V1 และควบคุมอัตราการไหลด้วย Rotameter ที่ ROTA1 และไหลผ่านวาล์วป้องกันการไหลย้อน CHV4 ในขณะที่ก๊าซ H_2 จะถูกป้อนเข้ามายังกระบวนการผ่านวาล์ว V2 ถูกควบคุมอัตราการไหลที่ ROTA2 และไหลผ่านวาล์วป้องกันการไหลย้อน CHV6 จากนั้นก๊าซทั้งสองจะไหลมารวมกันเป็นก๊าซผสมและไหลผ่านวาล์วควบคุมทิศทางการไหล V3 และผ่านอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟไหลย้อน FA1 ก่อนที่ก๊าซผสมจะถูกป้อนเข้าสู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ R-101 ก๊าซที่เหลือจากกระบวนการรีดักซ์ชันจะไหลออกที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ผ่านวาล์ว V6 วาล์วป้องกันการไหลย้อน CHV7 และผ่านอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟไหลย้อน FA2 ก่อนที่ก๊าซที่เหลือจากกระบวนการรีดักซ์ชันจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ ในส่วนของการวัดและควบคุมอุณหภูมิและความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ของกระบวนการรีดักซ์ชันจะถูกควบคุมอัตโนมัติผ่านโปรแกรม LabView® ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น

4. การออกแบบต้นแบบระบบเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบ Modified Packed Bed Reactor

จากผลการออกแบบ P&ID ที่ได้ คณะผู้วิจัยจึงดำเนินการออกแบบและสร้างต้นแบบระบบเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบ Modified Packed Bed Reactor โดยเริ่มจากการออกแบบเป็นภาพแบบจำลองสามมิติของระบบต้นแบบแสดงดังรูปที่ 2 ที่แสดงถึงการออกแบบการจัดวางและการติดตั้งหน่วยปฏิบัติการต่างๆ (Unit Operations) และระบบควบคุม (Control System) พร้อมทั้งระบบสนับสนุนกระแสมวลสาธารณูปโภค (Utilities) ต่างๆ มาแสดงประกอบ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงพื้นที่และการเตรียมระบบสาธารณูปโภคก่อนการสร้างจริง เพื่อรองรับการดำเนินการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยารีฟอร์มมิง เช่น การลดอุณหภูมิของสารผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับกระแสน้ำเย็น กระบวนการดูดซับความชื้น (ในสารผลิตภัณฑ์) เป็นต้น การออกแบบการจัดวางหน่วยปฏิบัติการต่างๆ สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิง ที่สอดคล้องกับคำอธิบายใน P&ID รูปที่ 3 แสดงโรงประลองต้นแบบสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ได้ดำเนินการสร้างเสร็จแล้ว

5. ระบบควบคุมกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบอัตโนมัติ

นอกจากระบบหน่วยปฏิบัติการต่างๆ และการเชื่อมต่อท่อสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงแล้ว ระบบควบคุมอัตโนมัติถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากในการจัดสร้างโรงประลองต้นแบบเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการรีฟอร์มมิงเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนในการการควบคุมตัวแปรในการดำเนินไปของปฏิกิริยาให้อยู่ภายใต้สภาวะที่ถูกออกแบบและกำหนดไว้ ได้แก่ อัตราการไหลของสารตั้งต้น ความดันของการเกิดปฏิกิริยา รวมไปถึงสภาวะทางอุณหพลศาสตร์ เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัตินี้จะต้องถูกออกแบบเพื่อการควบคุมกระบวนการรีฟอร์มมิงที่มีองค์ประกอบของหน่วยปฏิบัติการ อุปกรณ์วัดและควบคุม เฉพาะสำหรับกระบวนการนี้เท่านั้น



รูปที่ 2 กระบวนการรีฟอร์มมิงต้นแบบสามมิติ

รูปที่ 3 โรงประลองต้นแบบ

ในโครงการวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมให้มีสามารถในการควบคุมตัวแปรต่างๆ ภายในกระบวนการให้เป็นไปแบบอัตโนมัติ เพื่ออำนวยความสะดวกในการดำเนินงาน และมีความถูกต้องในการควบคุมตัวแปรต่างๆ ซึ่งจะนำไปสู่การดำเนินกระบวนการแบบต่อเนื่องในอัตราการผลิตที่กำหนด นอกจากนี้ การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติยังได้คำนึงถึงความปลอดภัยของกระบวนการและผู้ปฏิบัติงานด้วย

5.1 ส่วนประกอบฮาร์ดแวร์

ฮาร์ดแวร์ที่เลือกใช้ในโครงการนี้คือ National Instrument CompactDAQ แสดงในรูปที่ 4 ประกอบด้วย 2 ส่วนคืออุปกรณ์โครง (Chassis) สำหรับการเชื่อมต่อ และอุปกรณ์โมดูล (Module) อุปกรณ์โครงสำหรับการเชื่อมต่อ

รูปที่ 4 อุปกรณ์ National Instrument CompactDAQ

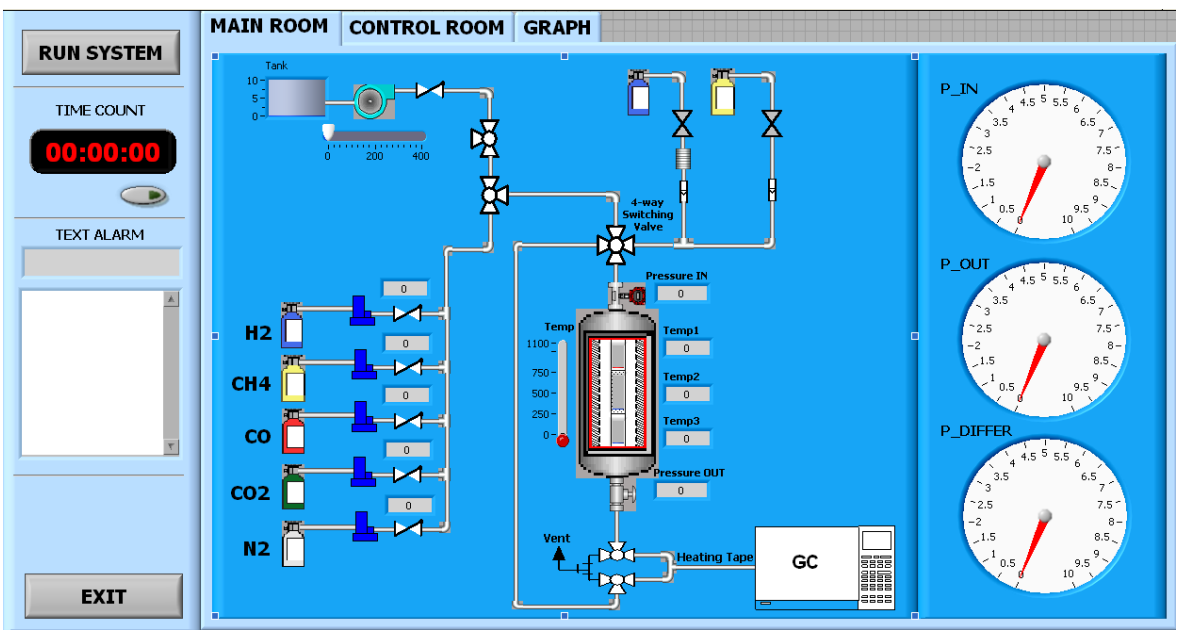
มีหน้าที่เป็นตัวกลางเชื่อมโยงระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์โมดูลสำหรับรับส่งข้อมูลแบบต่างๆ เช่น โมดูลที่รับส่งสัญญาณด้วยกระแสไฟฟ้าขนาด 4-20 mA หรือด้วยแรงดันไฟฟ้าขนาด +/– 10 V

ในกรณีที่สัญญาณที่ได้รับไม่ได้อยู่ในรูปของแรงดันในช่วง +/- 10V เราจึงออกแบบวงจรเพิ่มเติมที่เรียกว่า Signal Conditioner เพื่อทำให้สัญญาณที่ได้รับจากอุปกรณ์อยู่ในรูปแบบที่สามารถอ่านค่าได้

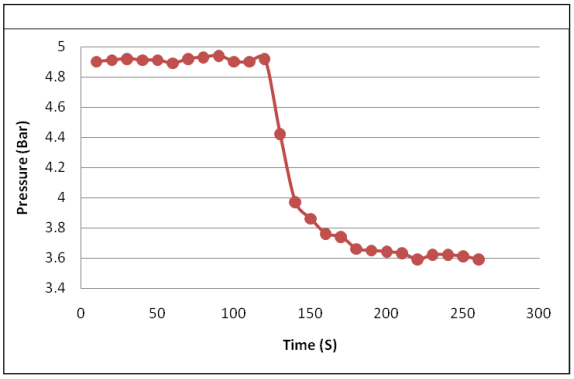
5.2 ส่วนประกอบซอฟต์แวร์

โครงการวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ LabView เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับการควบคุมกระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซธรรมชาติ เพื่อใช้ในการทดสอบควบคุมกระบวนการ และการพัฒนาอัลกอริธึมสำหรับการดำเนินงานที่สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์

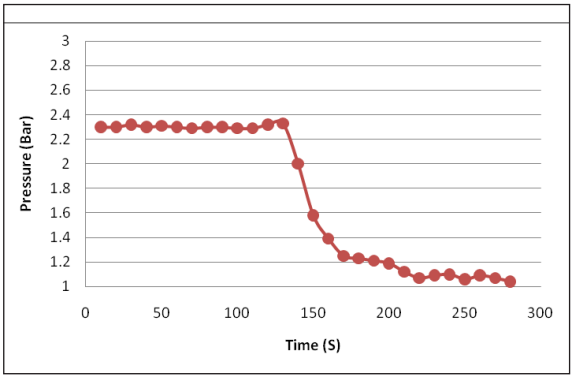
ผลของโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับโครงการนี้แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งสามารถเก็บค่าข้อมูลต่างๆ ของกระบวนการตั้งแต่เริ่มต้นจนกระบวนการเข้าสู่สภาพสมดุล ข้อมูลที่เก็บนี้สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อทำการวิจัยและพัฒนาให้กระบวนการทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



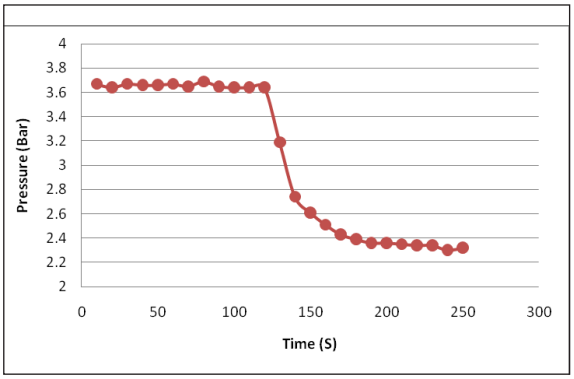
รูปที่ 5 ตัวอย่างหน้าจอระบบควบคุมด้วยโปรแกรม LabView



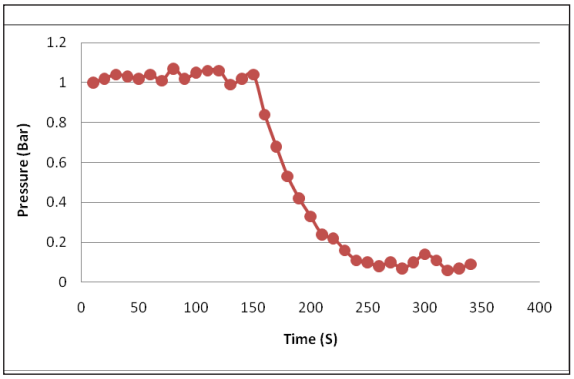
รูปที่ 6 ค่าการลดความดันของระบบจาก 4.9 bar ไปสู่ 3.6 bar โดยใช้ระบบควบคุม



รูปที่ 8 ค่าการลดความดันของระบบจาก 2.3 bar ไปสู่ 1.1 bar โดยใช้ระบบควบคุม



รูปที่ 7 ค่าการลดความดันของระบบจาก 3.6 bar ไปสู่ 2.3 bar โดยใช้ระบบควบคุม

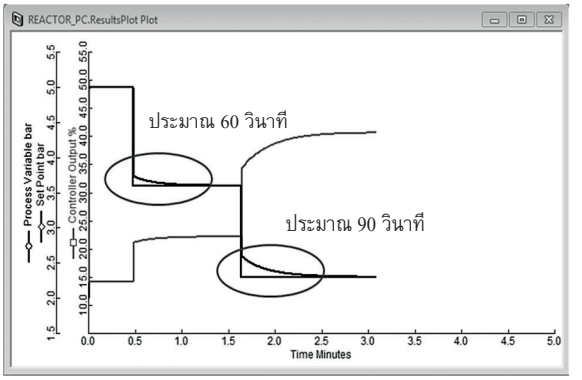


รูปที่ 9 ค่าการลดความดันของระบบจาก 1.1 bar ไปสู่ 0.1 bar โดยใช้ระบบควบคุม

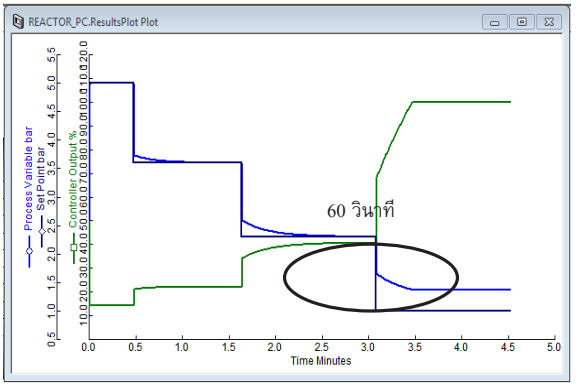
6. การทดสอบระบบควบคุม

ในการทำการทดสอบระบบควบคุมกระบวนการที่ได้ออกแบบและจัดสร้างไว้ในงานวิจัยนี้ เป็นการทดสอบการควบคุมความดันในลักษณะของการปรับลดความดันที่อุณหภูมิคงที่ โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเข้าไหลผ่านระบบ และทำการควบคุมความดันผ่านวาล์วควบคุมความดันโดยใช้ตัววาล์วชนิดสปริง ในการทดสอบจะกำหนดค่าความดันเริ่มต้นสำหรับระบบที่ค่า 4.9 bar และปรับค่าแรงดันลงมาที่ 3.6, 2.3, 1.1 และ 0.1 bar โดยแสดงผลการปรับค่าแรงดันและการตอบเสนอทางเวลา (Time Response) ในรูปที่ 6 รูปที่ 7 รูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับ จากรูปพบว่า เมื่อทำการปรับลดความดันควบคุมจาก 4.9 bar ไปสู่ 3.6 bar จะใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลประมาณ 60 วินาที และจาก 3.6 bar ไปสู่ 2.3 bar และจาก 2.3 bar ไปสู่ 1.1 bar จะใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลประมาณ 90 วินาที และเมื่อลดความดันเพื่อไปควบคุมที่ระดับต่ำสุดคือที่ 1 bar ไปสู่ 0.1 bar จะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลนานที่สุดอยู่ที่ 120 วินาที และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองผ่านโปรแกรม Aspen Plus Dynamics โดยทำการสร้างแบบจำลองให้มีลักษณะที่สอดคล้องกับกระบวนการทดสอบจริง

รูปที่ 10 แสดงให้เห็นถึงระยะเวลาในการปรับตัวของระบบ เพื่อให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่ โดยพบว่าที่การ



รูปที่ 10 ระยะเวลาโดยประมาณที่ใช้ในการปรับความดันจาก 4.9 bar เป็น 3.6 bar และ 2.3 bar ตามลำดับ



รูปที่ 11 ระยะเวลาโดยประมาณที่ใช้ในการปรับความดันลดลงไปที่ 1.1 bar

ปรับลดความดันจาก 4.9 bar ไปสู่ 3.6 bar เพื่อเข้าสู่สมดุลใช้ระยะเวลาโดยประมาณ 60 วินาที และที่ความดัน 3.6 bar ไปสู่ 2.3 bar พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อเข้าสู่สมดุลใช้ระยะเวลา ประมาณ 90 วินาที

อย่างไรก็ดีในกรณีของการปรับลดความดันจาก 2.3 ไปสู่ 1.1 bar โปรแกรมการคำนวณไม่สามารถแสดงผลออกมาได้ดังแสดงในรูปที่ 11 ที่ค่าแรงดันค้างอยู่ที่ 1.3 bar ทั้งนี้เนื่องจากขาดข้อมูลลักษณะของวาล์วในย่านการควบคุมที่ความดันต่ำ ในกรณีที่มีข้อมูลเพิ่มเติมจากผู้ผลิตก็จะสามารถทำนายผลการปรับแต่งค่าความดันในย่านดังกล่าวได้เพิ่มขึ้น สำหรับการควบคุมอุณหภูมิในระบบพบว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ดี แม้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงในด้านตัวแปรความดัน โดยอุณหภูมิควบคุมมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ประมาณไม่เกิน 5% ของค่าที่ตั้งไว้ (Set Point) ที่ย่านการควบคุมจากอุณหภูมิห้องถึงประมาณ 600°C

7. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมการดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบขนาดเล็กแบบ Modified Packed Bed ในกระบวนการรีฟอร์มมิง โดยใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรม Aspen Plus Dynamics Simulation และผลที่ได้จากการควบคุมจริงด้วยโปรแกรม LabView เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมและวัดผลต่างๆ ในชุดทดสอบกระบวนการรีฟอร์มมิงที่สร้างขึ้น ผลการทดสอบการปรับค่าความดันที่ระดับต่างๆ เพื่อดูผลการตอบสนองที่ระดับแรงดันจาก 4.9 bar ลงมาที่ระดับ 3.6 bar ระดับ 2.3 bar ระดับ 1.1 bar และระดับ 0.1 bar ตามลำดับ ได้ผลการตอบสนองทางเวลาโดยประมาณที่ 60 วินาที 90 วินาที 90 วินาที และ 120 วินาที ตามลำดับ ซึ่งผลตอบสนองทางเวลาที่ได้ที่ระดับลดลงจาก 4.9 bar ลงมาที่ 3.6 bar และ 2.3 bar ที่มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากผลการ Simulation สำหรับการลดลงระดับแรงดันจากระดับ 2.3 ลงมาไม่สามารถทำการ Simulation ได้ เนื่องจากขาดข้อมูลของชุดอุปกรณ์ควบคุมแรงดันจากผู้ผลิตในการประกอบการคำนวณสำหรับโปรแกรม Aspen Plus Dynamics อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้ในเบื้องต้นสามารถพิสูจน์ให้เห็นว่าเราสามารถนำใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบป้อนกลับในการควบคุมกระบวนการรีฟอร์มมิงกับเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบขนาดเล็กแบบ Modified Packed Bed ได้

8 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจาก โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

(TRF Master Research Grant หรือ TRF-MAG) จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการเลขที่ MRG-WI525E093 ทางผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณอย่างยิ่งที่สนับสนุนให้งานวิจัยนี้ได้เกิดขึ้นและสำเร็จลุล่วง และขอขอบคุณผู้ร่วมวิจัยและผู้ช่วยวิจัยทุกท่านที่ได้ทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

[1] C. Liao and P. A. Erickson, "Characteristic time as a descriptive parameter in steam reformation hydrogen process," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 1652-1660, March 2008.

[2] T. Rostrup-Nielsen, "Manufacture of hydrogen," *Catalysis Today*, vol. 106, Issues 1-4, pp. 293-296, 15 October 2005.

[3] F. Gallucci and A. Basile, "Pd-Ag membrane reactor for steam reforming reactions: a comparison between different fuels," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 1671-1687, March 2008.

[4] S. Orhan Akansu, Z. Dulger, N. Kahraman, and T.N. Veziroğlu, "Internal combustion engines fueled by natural gas—hydrogen mixtures," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 29, Issue 14, pp. 1527-1539, November 2004.

[5] A. C. Vosloo, "Fischer–Tropsch: a futuristic view," *Fuel Processing Technology*, vol. 71, Issues 1-3, pp. 149-155, June 2001.

[6] M. E. Dry, "High quality diesel via the Fischer–Tropsch process – a review," *J. Chem. Technol. Biotechnol*., vol. 77, pp. 43-50, 2002, doi: 10.1002/jctb.527

[7] M. Nijemeisland and G. A. Dixon, "Comparison of CFD simulations to experiment for convective heat transfer in a gas–solid fixed bed," *Chemical Engineering Journal*, vol.82, pp.231-246, 2001.

[8] H. Freund et. al., "Numerical simulations of single phase reacting flow in randomly packed fixed-bed reactors and experimental validation," *Chemical Engineering Science*, vol. 58, pp. 903-910, 2003.

[9] M. Nijemeisland, G.A. Dixon, and E.H. Stitt, "Catalyst design by CFD for heat transfer and reaction in stream reforming," *Chemical Engineering Science*, vol.59, pp. 5185-5191, 2004.

[10] Aspen Technology Inc., "Aspen Plus Dynamics Simulation," [Online]. Available: https://www.aspentech. com/brochures/Aspen_Dynamics.pdf

[11] J. R.H. Ross, "Natural gas reforming and CO_2 mitigation," *Catalysis Today*, vol. 100, Issues 1-2, pp. 151-158, 15 February 2005.