

การพัฒนาแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอลจากแบบจำลองเสมือนจริง

Development of Linear State Space Model of an Internally Heat Integrated Pressure-swing Distillation Process for Bioethanol Separation from Rigorous Model

ผดุงเกียรติ ทวีการณ^{1*} และ ชัยภพ ศิระวรกุล²

Phadungkiat Thaweekarn^{1*} and Chaiyapop Siraworakun²

^{1*}นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ที่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

²อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ที่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

^{1*}Graduate student of Chemical Engineering of Engineering Faculty, Rajamangala University of Technology Thanyaburi,
39 Moo 1, Rangsit- Nakhonnayok Road, Thanyaburi, PathumThani 12110

²Lecturer of Chemical Engineering of Engineering Faculty, Rajamangala University of Technology Thanyaburi,
39 Moo 1, Rangsit- Nakhonnayok Road, Thanyaburi, PathumThani 12110

*Corresponding author, E-mail: t.phadungkiat@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอล โดยแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในตัวควบคุมกระบวนการขั้นสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมของกระบวนการ โดยเริ่มจากการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspenplus และ Aspen Dynamics และสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นจากการจำลองกระบวนการข้างต้นซึ่งแบบจำลองปริภูมิสถานะที่ได้มีจำนวนตัวแปรสถานะ ตัวแปรขาเข้า และตัวแปรวัดเท่ากับ 181,9 และ 8 ตัวตามลำดับ และนำแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นที่ได้มาเปรียบเทียบกับการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดกับแบบจำลองเสมือนจริงด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการศึกษาศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นที่ได้มีการตอบสนองเชิงพลวัตใกล้เคียงกับแบบจำลองเสมือนจริงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นแบบจำลองปริภูมิสถานะที่ได้สามารถนำไปใช้งานแทนแบบจำลองเสมือนจริงได้

คำสำคัญ: การกลั่นแบบความดันแกว่ง แบบจำลองปริภูมิสถานะ การจำลองกระบวนการ

Abstract

This paper studied the development of linear state space model of an internally heat integrated pressure-swing distillation process (IHIPSD) for bioethanol separation using a rigorous model. The linear state space model could be used in an advanced process control to increase the efficiency of productions. Firstly, the IHIPSD process was simulated by Aspen plus and Aspen Dynamics commercial software. Secondly, the linear state space model was constructed from a rigorous model. The obtained linear state space models consisted of 181 states, nine inputs and eight outputs. Thirdly, the dynamics response of the obtained linear state space model was compared with those of a rigorous model by MATLAB commercial software. The results showed that the responses of linear state space model could be comparable with those of the rigorous model.

Keywords: pressure-swing distillation, state space model, process simulation

1. บทนำ

ปัจจุบันการกลั่นเป็นกระบวนการที่พบมากในอุตสาหกรรมเคมี โดยใช้ในการแยกสารผสมตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ซึ่งปัญหาที่พบส่วนใหญ่ในกระบวนการกลั่นคือการเกิดอะซีโอโทรป (azeotrope) ของสารผสม ส่งผลให้การกลั่นไม่สามารถแยกสารผสมให้เป็นไปตามค่าความบริสุทธิ์ที่ต้องการได้ โดยจากปัญหาดังกล่าวได้มีการเสนอเทคนิคการกลั่นแบบความดันแกว่งเพื่อใช้สำหรับการกลั่นแยกสารผสมอะซีโอโทรป

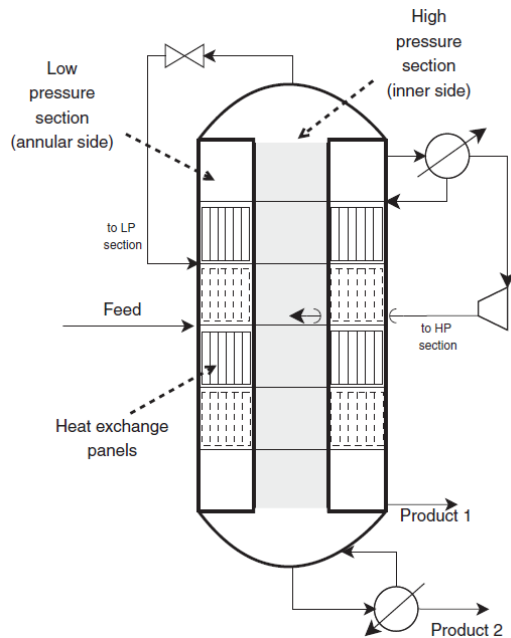
การกลั่นแบบความดันแกว่งอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของจุดอะซีโอโทรปเมื่อความดันของระบบเปลี่ยนไป โดยกระบวนการดังกล่าวจะถูกดำเนินการด้วยหอกลั่นที่มีความดันแตกต่างกันจำนวน 2 คอลัมน์ ซึ่งส่งผลให้มีการใช้พลังงานในการดำเนินงานค่อนข้างสูงด้วยเหตุดังกล่าวได้มีการปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดการใช้พลังงาน โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในระหว่างหอกลั่นทั้งสองซึ่งแนวคิดนี้ถูกนำเสนอโดย Mulia-Soto and Flores-Tlacuahuac ในปี 2011 ด้วยการจำลองกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายใน

สำหรับการแยกไบโอเอทานอลซึ่งกระบวนการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 1 จากการปรับปรุงกระบวนการส่งผลให้กระบวนการมีความซับซ้อนยิ่งขึ้นยากต่อการควบคุม ซึ่งการควบคุมกระบวนการให้ได้ประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องมีแบบจำลองที่มีความแม่นยำและง่ายต่อการคำนวณ ดังนั้นแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นจึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นตัวแทนของกระบวนการนี้ เนื่องจากมีความเป็นเชิงเส้นทำให้ง่ายต่อการคำนวณโดยใช้วิธีกำหนดการเชิงเส้น (linear programming)

แบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space) เป็นแบบจำลองในสภาวะพลวัตชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมของกระบวนการแทนแบบจำลองเสมือนจริงอย่างกว้างขวาง อันเนื่องมาจากแบบจำลองปริภูมิสถานะมีความเป็นเชิงเส้นซึ่งทำให้ง่ายต่อการคำนวณและสามารถนำไปใช้เป็นแบบจำลองในตัวควบคุมขั้นสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมของกระบวนการได้ โดยรูปแบบทั่วไปของแบบจำลองปริภูมิสถานะแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx + Du \quad (2)$$



รูปที่ 1 โครงสร้างกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายใน ที่มา: Jorge Francisco Mulia-Soto and Antonio Flores-Tlacuahuac. (2011)

- โดยที่
- x คือเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ
 - y คือเวกเตอร์ของสัญญาณขาออก
 - u คือเวกเตอร์ของสัญญาณขาเข้า
 - A คือเมทริกซ์ของตัวแปรสถานะ
 - B คือเมทริกซ์ของตัวแปรขาเข้า
 - C คือเมทริกซ์ของตัวแปรวัด
 - D คือเวกเตอร์ป้อนผ่าน

ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการพัฒนาแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอล เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นแบบจำลองในตัวควบคุมขั้นสูง โดยทำการศึกษาผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของแบบจำลองปริภูมิสถานะที่ได้เทียบกับแบบจำลองเสมือนจริง (rigorous model)

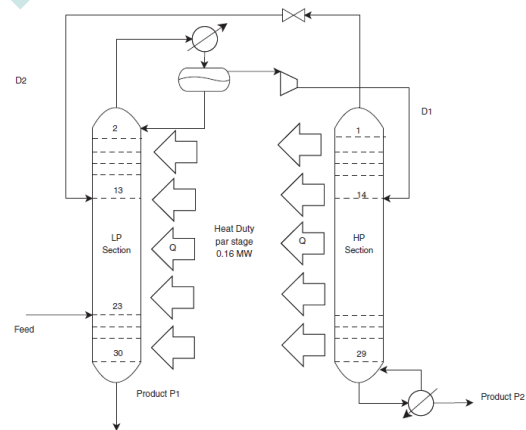
2. วัตถุประสงค์

ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอล

3. อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 กระบวนการ

กระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในได้ถูกเสนอโดย Mulia-Soto และ Flores-Tlacuahuac ในปี 2011 โดยการนำแนวคิดของหอกลั่นแบบความดันแกว่งและหอกลั่นแบบที่มีการรวมความร้อนภายในมารวมกัน โดยแผนผังเปรียบเทียบกระบวนการแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยหอกลั่นจำนวน 2 คอลัมน์ วาล์ว และเครื่องอัดความดัน



รูปที่ 2 แผนผังเปรียบเทียบกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายใน ที่มา: Jorge Francisco Mulia-Soto and Antonio Flores-Tlacuahuac. (2011)

โดยหอกลั่นทั้งสองคอลัมน์มีถ่ายเทความร้อนจากชั้นของหอกลั่นความดันสูงไปยังชั้นของหอกลั่นความดันต่ำ และกระแสป้อนจะถูกป้อนเข้าที่หอกลั่นความดันต่ำ โดยที่น้ำจะถูกแยกออกในกระแสผลิตภัณฑ์ด้านล่าง

ของหอกลิ้น ส่วนสารผสมอะซิโโทรระหว่างน้ำและเอทานอลจะถูกกลั่นออกที่กระแสดผลิตภัณฑ์ด้านบนของหอกลิ้น และผ่านเครื่องอัดความดันเข้าสู่หอกลิ้นความดันสูง โดยเอทานอลจะถูกแยกออกที่กระแสดผลิตภัณฑ์ด้านล่างของหอกลิ้นความดันสูง ส่วนสารผสมระหว่างน้ำกับเอทานอลจะถูกกลั่นออกที่กระแสดผลิตภัณฑ์ด้านบนของหอกลิ้นความดันสูง และรีไซเคิล

3.2 แบบจำลองกระบวนการเสมือนจริง

สร้างแบบจำลองกระบวนการเสมือนจริงของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไอเอทานอลที่สภาวะคงตัว ด้วยโปรแกรม Aspen plus และสร้างแบบจำลองกระบวนการเสมือนจริงที่สภาวะพลวัตด้วยโปรแกรม Aspen dynamic ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งเครื่องมือในการจำลองกระบวนการ ดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย หอกลิ้นชนิด RadFrac จำนวน 2 หน่วย วาล์วชนิด throttling จำนวน 1 หน่วย และ เครื่องอัดความดันจำนวน 1 หน่วย

2. ติดตั้งสายวัดอุณหภูมิตั้งระหว่างเครื่องมือแต่ละชนิด และติดตั้งสายพลังงานของหอกลิ้นทั้งสองหอกลิ้น ดังแสดงในรูปที่ 2

3. ใส่ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละเครื่องมือให้ครบถ้วน ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวอ้างอิงมาจากการวิจัยของ Mulia-Soto และ Flores-Tlacuahuac (Mulia-Soto, 2011)

4. เลือกโหมดการจำลองกระบวนการแบบสถานะคงตัว และเลือกสมการเทอร์โมไดนามิกส์แบบ Wilson-RK

5. เริ่มจำลองกระบวนการที่สภาวะคงตัว

6. เปลี่ยนโหมดการจำลองกระบวนการจากสภาวะคงตัวเป็นสภาวะพลวัต

7. เริ่มการจำลองกระบวนการที่สภาวะพลวัต

8. Export แบบจำลองกระบวนการที่สภาวะพลวัตจากโปรแกรม Aspen plus มายังโปรแกรม Aspen Dynamic แบบ flow-driven

ตารางที่ 1 ค่าสภาวะการจำลองกระบวนการของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	หอกลิ้นความดันต่ำ	หอกลิ้นความดันสูง	วาล์ว	เครื่องอัดความดัน
จำนวนชั้น	30	30	-	-
ชั้นป้อน	23	14	-	-
ชั้นรีไซเคิล	13	-	-	-
สภาวะกระแสป้อน				
-อัตราการไหล (kmol/h)	100	-	-	-
-อุณหภูมิ (°C)	90	-	-	-
-สัดส่วนเชิงโมลของเอทานอล	0.2	-	-	-
ความดัน(atm)	1	10	-	-
ความดันขาออก (atm)	-	-	1	10
พลังงานขาเข้าแต่ละชั้น (MW)	16	-16	-	-
distillate to feed ratio	0.55	0.80	-	-

3.3 การสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้น

สร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้น จากแบบจำลองเสมือนจริงที่ได้ในขั้นตอนก่อนหน้า ด้วยโปรแกรม Aspen dynamic และโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออกของกระบวนการ

ตัวแปรขาเข้า	- อัตราการไหลของกระแสด้านล่างของหอก กลับความดันต่ำ
	- อัตราการไหลของกระแสฟลักซ์ของหอก กลับความดันต่ำ
	- อัตราการไหลของกระแสด้านล่างของหอก กลับความดันสูง
	- อัตราการไหลของกระแสด้านบนของหอก กลับความดันสูง
	- พลังงานของหม้อต้มของหอกกลับความดัน สูง
	- พลังงานของเครื่องควบแน่นของหอกกลับ ความดันต่ำ
	- อัตราการไหลของกระแสป้อน
	- อุณหภูมิของกระแสป้อน
	- สัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลในกระแส ป้อน
	- ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกกลับ ความดันต่ำ
ตัวแปรวัด	- ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอก กลับความดันต่ำ
	- ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกกลับ ความดันสูง
	- ความดันของหอกกลับความดันสูง
	- อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกกลับความดันสูง
	- อุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกกลับความดันต่ำ
	- สัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลในกระแส
	PRODUCT P2
	- สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในกระแส
	PRODUCT P1

1. กำหนดค่าตัวแปรขาเข้าและตัวแปรวัดของกระบวนการ ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรขาเข้า 9 ตัวและตัวแปรวัด 8 ตัว

2. ใช้ชุดคำสั่งในโปรแกรม Aspen dynamic สร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้น

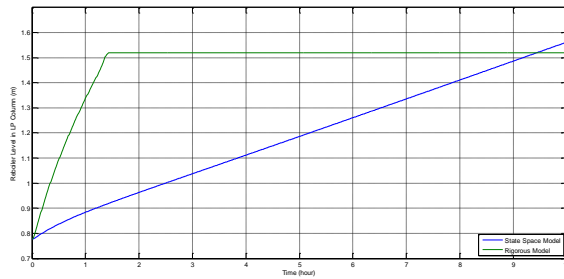
3.4 การวิเคราะห์

วิเคราะห์ข้อมูลโปรแกรม MATLAB ด้วยการวิเคราะห์การเปรียบเทียบผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงกับแบบจำลองเชิงมวด ด้วยการเพิ่มอัตราการไหลของกระแสป้อน

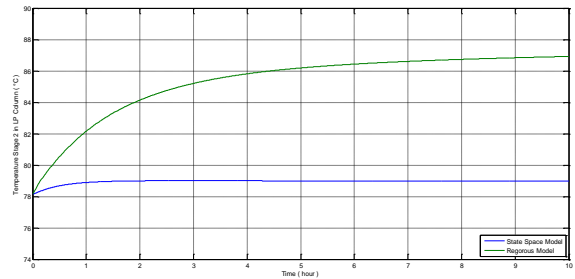
4. ผลงานวิจัยและการวิจารณ์

ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นที่ได้มีจำนวนตัวแปรสถานะ 181 ตัว จำนวนตัวแปรขาเข้า 9 ตัว และจำนวนตัวแปรวัด 8 ตัว โดยเมทริกซ์ของตัวแปรสถานะ (A) มีขนาดเท่ากับ [181X181] เมทริกซ์ของตัวแปรขาเข้า(B) มีขนาดเท่ากับ [181X9] และเมทริกซ์ของตัวแปรวัด (C) มีขนาดเท่ากับ [8X181] โดยในงานวิจัยนี้เมทริกซ์ของตัวแปรป้อนผ่าน (D) มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งแสดงว่าตัวแปรขาเข้าไม่ได้ส่งผลต่อตัวแปรขาออกโดยตรงแต่ส่งผลกับตัวแปรสถานะ

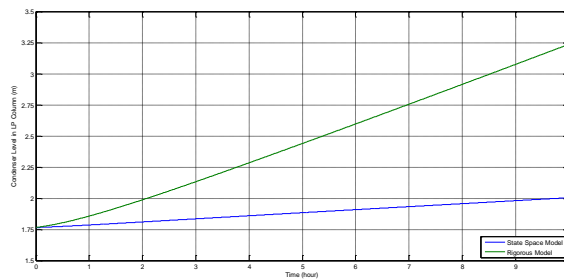
และจากการศึกษาเปรียบเทียบผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นที่ได้กับแบบจำลองเชิงมวด เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของกระแสป้อนจะได้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของแต่ละตัวแปรวัด ซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้



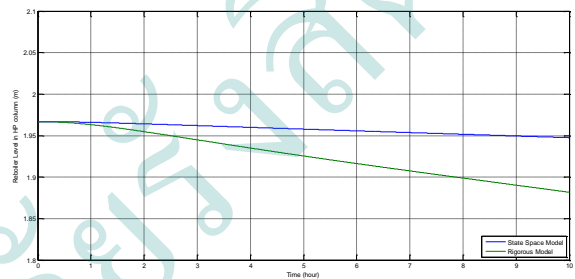
(a) การตอบสนองเชิงพลวัตของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่นความดันต่ำ



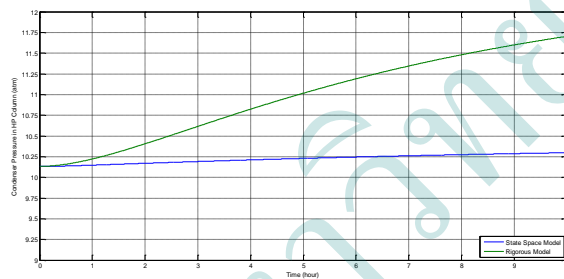
(b) การตอบสนองเชิงพลวัตของอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกลั่นความดันต่ำ



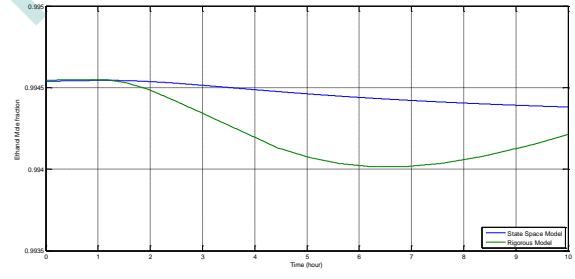
(c) การตอบสนองเชิงพลวัตของระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลั่นความดันต่ำ



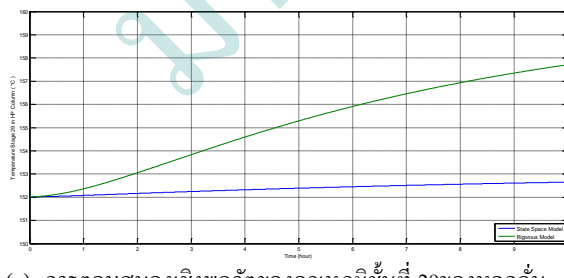
(d) การตอบสนองเชิงพลวัตของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่นความดันสูง



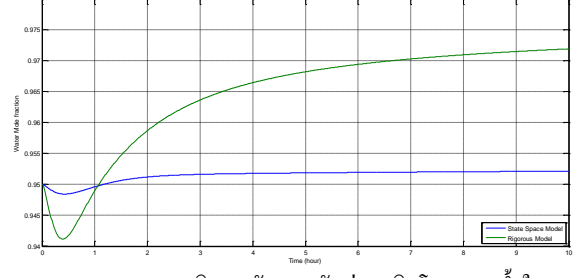
(e) การตอบสนองเชิงพลวัตของความดันของหอกลั่นความดันสูง



(f) การตอบสนองเชิงพลวัตของสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลในกระแส PRODUCT P2



(g) การตอบสนองเชิงพลวัตของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลั่นความดันสูง



(h) การตอบสนองเชิงพลวัตของสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในกระแส PRODUCT P1

รูปที่ 3 แสดงผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไอเอทานอล

โดยรูปที่ 3 แสดงถึงการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอลของแบบจำลองปฏิภูมิสถานะเชิงเส้นกับแบบจำลองเสมือนจริง ซึ่งผลการตอบสนองแสดงให้เห็นว่าการตอบสนองเชิงพลวัตของแบบจำลองปฏิภูมิสถานะเชิงเส้นมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับแบบจำลองเสมือนจริง

ดังนั้นแบบจำลองปฏิภูมิสถานะเชิงเส้นที่ได้จึงสามารถนำมาใช้แทนแบบจำลองเสมือนจริงได้ โดยแบบจำลองปฏิภูมิสถานะเชิงเส้นจะใช้งานได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองเสมือนจริง เมื่อดำเนินงานใกล้เคียงกับจุดดำเนินงานที่สภาวะคงตัว

5. การอภิปรายผล

จากการศึกษาแบบจำลองปฏิภูมิสถานะเชิงเส้นที่ได้สามารถใช้เป็นตัวแทนแบบจำลองเสมือนจริงได้ดีในสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะคงตัว ซึ่งจากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถต่อยอดโดยการนำแบบจำลองปฏิภูมิสถานะเชิงเส้นที่ได้ไปใช้เป็นแบบจำลองในตัวควบคุมขั้นสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมกระบวนการ

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้พบว่าแบบจำลองปฏิภูมิสถานะเชิงเส้นของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอลมีตัวแปรสถานะ ตัวแปรขาเข้า และตัวแปรวัดเท่ากับ 181, 9 และ 8 ตามลำดับ และแบบจำลองปฏิภูมิสถานะเชิงเส้นดังกล่าวมีความใกล้เคียงกับแบบจำลองเชิงมอดสามารถใช้ในการศึกษากระบวนการต่อไปได้

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างสูงจาก ดร.ชัยภพ ศิริวารกุล อาจารย์ที่ปรึกษา งานวิจัย ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

8. เอกสารอ้างอิง

- Jorge Francisco Mulia-Soto and Antonio Flores-Tlacuahuac. (2011). Modeling, simulation and control of an internally heat integrated pressure-swing distillation process for bioethanol separation. *Computers and Chemical Engineering* 35: 1532-1546.
- Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar and Duncan A. Mellichamp. (2004). *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken New Jersey, United States of America.
- William L. Luyben. (2006). *Distillation design and control using aspen™ simulation*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken New Jersey, United States of America.
- Design and Cosimulate Control of High-Fidelity Distillation Tower with Aspen Plus Dynamics. Available from; <http://www.mathworks.com/help/mpc/examples/design-and-cosimulate-control-of-high-fidelity-distillation-tower-with-aspen-plus-dynamics.html> (2013, November 3)