การจำลองและการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าของหอดูดซับแบบพัลส์ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์

นางสาวชัญญา ปลั่งกลาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

MODELLING AND FEEDFORWARD CONTROL OF PULSED BED ADSORBER IN SUGAR REFINERY PROCESS

CHANYA PLANGKLANG

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2022

การจำลองและการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าของหอดูดซับแบบพัลส์ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(ผศ. ดร.อรรถพล มณีแดง)
ประธานกรรมการ

.....

(อ. ดร.ธีระสุต สุขกำเนิด)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....

(อ. ดร.สุพรรณี จันทร์ภิรมณ์)
กรรมการ

.....

(ศ. ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)
กรรมการ

.....

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และประกันคุณภาพ

.....

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ชัญญา ปลั่งกลาง : การจำลองการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าของหอดูดซับแบบพัลส์ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ (MODELING AND FEEDFORWARD CONTROL OF PULSED BED ADSORBER IN SUGAR REFINERY PROCESS)
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ธีระสุต สุขกำเนิด, 120 หน้า

คำสำคัญ: หอดูดซับแบบพัลส์/สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร/ระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสม/การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า/กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์

หอดูดซับแบบพัลส์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ลดค่าความเข้มสีในกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย โดยหอดูดซับแบบพัลส์นี้มีลักษณะการทำงานแบบสถานะคงตัวแบบวัฏจักรซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนในการควบคุม ดังนั้นการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายกระบวนการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์ได้และควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ด้วยการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาทั้งแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนและแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบเส้น (Numerical method of lines) ในการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของแบบจำลองด้วยการประมาณพจน์ในแกนระยะทางและดัดแปลงสมการอนุพันธ์ย่อยให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญด้วยระเบียบวิธีผลต่างแบบจำกัดแล้วอินทิเกรตสมการดังกล่าวด้วยระเบียบวิธีของรุงเง-คุตตา จากการหาค่าสมดุลการดูดซับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และค่าการกระจายตัวในแนวแกนโดยใช้ข้อมูลเบรคทรูของการทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ค่าความเข้มสีขาเข้า 700 ICUMSA ความเข้มข้นของของแข็ง 65 brix อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นศึกษาระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสม (Optimum cycle time) ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและค่าความเข้มสีขาเข้า โดยเมื่อค่าความเข้มสีขาเข้าเพิ่มขึ้นระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมจะมีค่าลดลง และเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมจะมีค่าลดลง จากนั้นควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์เพื่อให้ได้ค่าความเข้มสีขาออกตามที่กำหนด (100 ICUMSA) ด้วยระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าโดยการปรับระยะเวลาครบที่เหมาะสม (ตัวแปรปรับ) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้า (ตัวแปรรบกวน)

พบว่าการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าสามารถควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ได้เมื่อมีการรบกวนกระบวนการแบบขั้นและแบบโคไซน์ และเนื่องจากกระบวนการนี้เป็นมีเวลาหน่วง (time delay) ดังนั้นจึงมีการปรับระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมที่รอบที่ 5 หลังจากรบกวนกระบวนการเพื่อลดการ

พบว่าการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าสามารถควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ได้เมื่อมีการรบกวนกระบวนการแบบขั้นและแบบโคไซน์ และเนื่องจากกระบวนการนี้เป็นมีเวลาหน่วง (time delay) ดังนั้นจึงมีการปรับระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมที่รอบที่ 5 หลังจากรบกวนกระบวนการเพื่อลดการแกว่งของผลตอบสนอง โดยแสดงประสิทธิภาพของการควบคุมด้วยช่วงเวลาตอบสนอง ค่าผลต่างมากที่สุดของความคลาดเคลื่อน และค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนักศึกษา .....

ปีการศึกษา 2565 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

CHANYA PLANGKLANG : MODELLING AND FEEDFORWARD CONTROL OF PULSED BED ADSORBER IN SUGAR REFINERY PROCESS.
THESIS ADVISOR : TERASUT SOOKKUMNERD, 120 PP

Keyword: PULSED BED/CYCLIC STEADY STATE/OPTIMUM CYCLE TIME/FEEDFORWARD CONTROL/SUGAR REFINING

The main objective of this research was to develop the mathematical model of pulsed bed operation in sugar refining, with and without axial dispersion, by using mass transfer coefficient (k), equilibrium constant (K) and axial dispersion coefficient (D_a) from the experiment result of fixed-bed at colorant concentrations of feed syrup at 700 ICUMSA, 65 brix, 70 ^{o}C and feed flow rate 4, 6 and 8 ml/min. The numerical method of lines was then used to solve PDE with the spatial derivative term approximated by finite difference method. The obtained ODEs was later solved by 4th-order Range-Kutta method. The optimum cycle time of pulsed bed operation at different colorant concentrations at feed flow rate of feed sugar syrup at 4 6 and 8 ml/min was then investigated. The analysis showed that the optimum cycle time of pulsed bed column depended on feed flow rate and the colorant concentration in feed sugar syrup. The optimum cycle time decreased when the feed flow rate increased and the optimum cycle time increased when the colorant concentrations in feed sugar syrup increased. The correlation of optimum cycle time and colorant concentrations in feed sugar syrup was subsequently studied. Finally, the effectiveness of feedforward control when the cycle time was used as a manipulating variable when there are step and cosine changes of ICUMSA in feed sugar syrup (disturbance) was investigated. The result of feedforward control of pulsed bed operation showed that the feedforward control successfully compensated the effect of disturbances from

colorant concentrations in feed syrup for both step and cosine functions when the delay time of 5 cycles was added to the feedforward controller.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Chemical Engineering

Academic Year 2022

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ การดำเนินงานวิจัย และให้กำลังใจ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ธีระสุต สุขกำเนิด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือ และทุนการศึกษาตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.สุพรรณี จันทร์ภิรมณ์ ที่อนุเคราะห์เรื่องอุปกรณ์การทดลอง ให้ปรึกษา คำแนะนำ และให้กำลังใจในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณอัมพร ลาดหนองขุ่น ที่ให้ความช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานด้านเอกสาร

ขอขอบพระคุณคุณศรัณย์ ดอกไม้กุล และเจ้าหน้าที่สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่อนุเคราะห์เรื่องเครื่องมือวิเคราะห์ อุปกรณ์การทดลอง ให้ปรึกษา คำแนะนำในการทดลอง และสถานที่ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอบคุณเพื่อน และพี่บัณฑิตศึกษาสาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษาอย่างดีเสมอมา และเป็นกำลังใจให้ตลอดจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ

ชัญญา ปลั่งกลาง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... ค

กิตติกรรมประกาศ..... จ

สารบัญ..... ฉ

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญรูป..... ฏ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 3

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย..... 4

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์..... 5

2.2 กระบวนการลดค่าสีของน้ำเชื่อม..... 6

2.2.1 การลดค่าสีของน้ำเชื่อมด้วยเรซิน..... 7

2.2.2 การลดค่าสีของน้ำเชื่อมด้วยถ่านกัมมันต์..... 7

2.3 ถ่านกัมมันต์..... 7

2.4 กระบวนการดูดซับ..... 8

2.4.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับ..... 8

2.5 หอดูดซับแบบเบดนิ่ง..... 10

2.5.1 ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง..... 10

2.5.2 บริเวณการถ่ายโอนมวล..... 10

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3 การกระจายตัวในแนวแกน....12
2.5.4 แบบจำลองแรงขับเชิงเส้น....13
2.6 แบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่ง....16
2.6.1 แบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน.16
2.6.2 แบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน....17
2.6.3 การหาผลเฉลยของสมการแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่ง....18
2.7 หอดูดซับแบบพัลส์....19
2.8 แบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์....20
2.8.1 แบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน....23
2.8.2 แบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน....23
2.8.3 การหาผลเฉลยของสมการแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์....24
2.9 วิธีเชิงตัวเลขแบบเส้น....25
2.9.1 ระเบียบวิธีผลต่างแบบจำกัด....26
2.10 ระบบควบคุม....28
2.10.1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ....28
2.10.2 ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า....29
2.10.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบควบคุม....29
2.10.4 สัญญาณป้อนเข้า....29
2.10.5 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุม....31
3 วิธีการดำเนินการวิจัย....33
3.1 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง....33
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง....33
3.1.2 วัสดุและสารเคมี....34
3.2 วิธีการทดลอง....35

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1 การหากราฟมาตรฐานสำหรับการเตรียมน้ำเชื่อมที่มีค่าสีต่างๆ ที่ค่าความเข้มข้นของของแข็ง65brix....35
3.2.2 การทดสอบการดูดซับสีในขวดรูปชมพู่....35
3.2.3 การทดลองการดูดซับสีในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง....36
3.2.4 การทดสอบการดูดซับสีในหอดูดซับแบบพัลส์....37
3.3 การสร้างแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง....38
3.3.1 แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน....38
3.3.2 แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน....39
3.4 การแก้สมการแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข....40
3.5 การหาค่าพารามิเตอร์....41
3.5.1 แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน....41
3.5.2 แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน....42
3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่ง....43
3.7 การสร้างแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์....43
3.7.1 แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน....43
3.7.2 แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน....44
3.8 การแก้สมการแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข....45
3.9 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์....45
3.10 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า....45
3.10.1 การสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างเวลาครบรอบที่เหมาะสมกับค่าความเข้มสีขาเข้าของการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์....46
3.10.2 การรบกวนกระบวนการ....46
3.10.3 การหาประสิทธิภาพของการควบคุม....47
4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล....49
4.1 การศึกษาการทำงานและการหาค่าพารามิเตอร์ในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง....49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 การศึกษาการทำงานและระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมของการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์.....63
4.3 การควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ด้วยระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า.....71
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....83
5.1 สรุปผลวิจัย.....83
5.2 ข้อเสนอแนะ.....84
รายการอ้างอิง.....85
ภาคผนวก ก.....89
ภาคผนวก ข.....94
ภาคผนวก ค.....97
ภาคผนวก ง.....110
ภาคผนวก จ.....112
ประวัติผู้เขียน.....120

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองการดูดซับ.....39

4.1 ค่าสมดุลการดูดซับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย สำหรับแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหลขาเข้า 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที.....52

4.2 ค่าสมดุลการดูดซับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และค่าการกระจายตัวในแนวแกน และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย สำหรับแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหลขาเข้า 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที.....53

4.3 เวลาเบรคทรูจากแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่ง.....55

4.4 เวลาประมวลผลของคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหลขาเข้า 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที.....62

4.5 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับของหอดูกซับแบบเบดนิ่งและหอดูดซับแบบพัลส์.....69

4.6 เวลาการคำนวณของหอดูดซับแบบพัลส์.....69

4.7 ประสิทธิภาพของการควบคุมของแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าลดลงแบบขั้นจาก 700 ICUMSA เป็น 500 ICUMSA.....76

4.8 ประสิทธิภาพของการควบคุมของแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าลดลงแบบขั้นจาก 700 ICUMSA เป็น 900 ICUMSA.....77

4.9 ประสิทธิภาพของการควบคุมของแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าลดลงแบบขั้นจาก 700 ICUMSA เป็น 500 ICUMSA.....78

4.10 ประสิทธิภาพของการควบคุมของแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าลดลงแบบขั้นจาก 700 ICUMSA เป็น 900 ICUMSA.....79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.11 ประสิทธิภาพของการควบคุมของแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าแบบฟังก์ชันโคไซน์.....82
4.12 ประสิทธิภาพของการควบคุมของแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าแบบฟังก์ชันโคไซน์.....82
ค.1 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มสีขาออกเมื่อใช้ระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมจากค่าจริงก่อนหาสมการความสัมพันธ์และจากสมการความสัมพันธ์สำหรับแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน.....98
ค.2 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มสีขาออกเมื่อใช้ระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมจากค่าจริงก่อนหาสมการความสัมพันธ์และจากสมการความสัมพันธ์สำหรับแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน.....99
ง.1 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ Norit Mag 30l.....111

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 แผนผังกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์.....6
2.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับตามการแบ่งแยกของ IUPAC.....8
2.3 การกระจายความเข้มข้นของสารถูกดูดซับภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่เวลาต่างๆ.....11
2.4 กราฟเบรคทรูในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง.....12
2.5 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกนภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง.....13
2.6 แบบจำลองแรงขับเชิงเส้น.....14
2.7 ระบบการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์.....19
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีขาออกและเวลาของหอดูดซับแบบพัลส์.....20
2.9 ชั้นของถ่านกัมมันต์ในหอดูดซับแบบพัลส์ รูปที่ (ก) ก่อนการพัลส์เมื่อหอดูดซับทำงานจนถึงระยะเวลาครบรอบ และ รูปที่ (ข) หลังการพัลส์ (ลูกศรแสดงทิศทางการไหลของของไหล).21
2.10 หอดูดซับแบบเบดนิ่งมาต่อกันจำนวน 4 หอดูดซับแบบอนุกรมที่มีลักษณะไหลสวนทางและทำงานเป็นรอบ.....22
2.11 การประมาณสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยสมการเชิงอนุพันธ์สามัญโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบเส้น.....25
2.12 การแบ่งหอดูดซับออกเป็นส่วนๆตามความยาวของดูดซับ เมื่อ i แทนลำดับของจุดบนหอดูดซับที่ถูกแบ่ง และ Z แทนระยะทางจากทางเข้าหอดูดซับจนถึงจุดที่ต้องการพิจารณา.....26
2.13 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....28
2.14 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า.....29
2.15 สัญญาณการป้อนเข้าระบบแบบต่างๆ (ก) สัญญาณป้อนเข้าแบบอิมพัลส์ (ข) สัญญาณป้อนเข้าแบบขั้น (ค) สัญญาณป้อนเข้าแบบแรมป์ (ง) สัญญาณป้อนเข้าแบบไซนูซอยด์ และ (จ) สัญญาณป้อนเข้าแบบโคไซน์ ตามลำดับ.....30
3.1 เครื่องต้นแบบของหอดูดซับแบบเบดนิ่ง.....34
3.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการแก้สมการ.....40
3.3 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้คำสั่ง Datafit ใน Scilab.....42
3.4 สัญญาณค่าความเข้มสีขาเข้าสำหรับการรบกวนระบบแบบโคไซน์.....47

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.1 กราฟเบรคทรูจากการข้อมูลทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที....50
4.2 กราฟเบรคทรูจากการข้อมูลทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที....50
4.3 กราฟเบรคทรูจากการข้อมูลทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที....51
4.4 กราฟเบรคทรูจากการข้อมูลทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของช่วงคำนวณ....52
4.5 การเปรียบเทียบกราฟเบรคทรูที่อัตราการไหล 4 มิลลิตรต่อนาที....54
4.6 การเปรียบเทียบกราฟเบรคทรูที่อัตราการไหล 6 มิลลิตรต่อนาที....54
4.7 การเปรียบเทียบกราฟเบรคทรูที่อัตราการไหล 8 มิลลิตรต่อนาที....55
4.8 การกระจายความเข้มข้นของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (ข) แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน....57
4.9 การกระจายความเข้มข้นของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (ข) แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน....58
4.10 การกระจายความเข้มข้นของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (ข) แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน....59
4.11 ความกว้างของบริเวณการถ่ายโอนมวลของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิตรต่อนาที....60
4.12 ความกว้างของบริเวณการถ่ายโอนมวลของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิตรต่อนาที....60
4.13 อัตราการขยายของบริเวณการถ่ายโอนมวลของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิตรต่อนาที....61

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.14 อัตราการขยายของบริเวณการถ่ายโอนมวลของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิตรต่อนาที.....61
4.15 การเปรียบเทียบการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลการทดลองที่อัตราการไหล 6 มิลลิตรต่อนาที.....64
4.16 การทำนายการทำงานของแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่อัตราการไหล 6 มิลลิตรต่อนาที เมื่อระยะเวลาครบรอบ 6.5 นาที.....65
4.17 การทำนายการทำงานของแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่อัตราการไหล 6 มิลลิตรต่อนาที เมื่อระยะเวลาครบรอบ 8.5 นาที.....65
4.18 การทำนายการทำงานของแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่อัตราการไหล 6 มิลลิตรต่อนาที เมื่อระยะเวลาครบรอบ 7.5 นาที.....66
4.19 สมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมและ ln(C_{inlet}-100) อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกน.....67
4.20 สมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมและ ln(C_{inlet}-100) อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกน.....68
4.21 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาครบรอบคงที่เมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้นจาก 700 เป็น 500 ICUMSA.....70
4.22 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาครบรอบคงที่เมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้นจาก 700 เป็น 900 ICUMSA.....71
4.23 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA.....73

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.25 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวน จาก 700 เป็น 900 ICUMSA.....74
4.26 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 หลังการ รบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA.....75
4.27 การควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในเมื่อมีการ รบกวนระบบแบบฟังก์ชันโคไซน์ ที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที.....80
4.28 การควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในเมื่อมีการ รบกวนระบบแบบฟังก์ชันโคไซน์ ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที.....81
4.29 การควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในเมื่อมีการ รบกวนระบบแบบฟังก์ชันโคไซน์ ที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที.....81
ก.1 ไอโซเทิร์มดูดซับอนุภาคสีในน้ำเชื่อมด้วยถ่านกัมมันต์แบบเส้นตรงที่อุณหภูมิ 70 องศา เซลเซียส.....90
ก.2 กราฟเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที.....90
ก.3 กราฟเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที.....91
ก.4 กราฟเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที.....91
ก.5 กราฟเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที.....92
ก.6 กราฟเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที.....92
ก.7 กราฟเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที.....93

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ข.1 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาครบรอบคงที่ เมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้นจาก 700 เป็น 500 ICUMSA.....95
ข.2 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาครบรอบคงที่ เมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้นจาก 700 เป็น 900 ICUMSA.....95
ข.3 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาครบรอบคงที่ เมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้นจาก 700 เป็น 500 ICUMSA.....96
ข.4 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาครบรอบคงที่ เมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้นจาก 700 เป็น 500 ICUMSA.....96
ค.1 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA.....100
ค.2 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA.....100
ค.3 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA.....101
ค.4 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA.....101

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ค.5 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA.....102
ค.6 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA.....102
ค.7 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA.....103
ค.8 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA.....103
ค.9 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA.....104
ค.10 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA.....104
ค.11 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA.....105
ค.12 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA.....105
ค.13 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA.....106

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ค.14 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA.....106
ค.15 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA.....107
ค.16 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA.....107
ค.17 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนเมื่อมีการรบกวนระบบแบบฟังก์ชันโคไซน์ ที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที.....108
ค.18 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ไม่พิจารณากระจายตัวตามแนวแกนเมื่อมีการรบกวนระบบแบบฟังก์ชันโคไซน์ ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที 108
ค.19 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ไม่พิจารณากระจายตัวตามแนวแกนเมื่อมีการรบกวนระบบแบบฟังก์ชันโคไซน์ ที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที 109

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

งานวิจัยเรื่องแบบจำลองและการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าของหอดูดซับแบบพัลส์ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวมีที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยขน์ที่ได้รับจากงานวิจัย แสดงในรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันน้ำตาลเป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร อีกทั้งยังใช้เป็นวัตถุดิบหลักใน การประกอบอาหารในครัวเรือน ซึ่งน้ำตาลที่ต้องการส่วนใหญ่จะเป็นน้ำตาลที่มีค่าสีต่ำหรือน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์พิเศษ (Super refined sugar) โดยหอดูดซับแบบพัลส์เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการลดค่าความเข้มสีของน้ำเชื่อมเพื่อผลิตน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ [1]

หอดูดซับแบบพัลส์ในกระบวนการลดค่าความเข้มสีของน้ำเชื่อมนั้นมีหลักการทำงานคือป้อนน้ำเชื่อมที่มีค่าสีมาก (700 – 900 ICUMSA) เข้าทางด้านล่างของหอดูดซับให้ไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับขึ้นไปด้านบนและน้ำเชื่อมที่มีค่าสีต่ำ (100 ICUMSA) หรือน้ำเชื่อมที่ถูกดูดซับสีแล้วจะไหลออกทางด้านบนของหอดูดซับ โดยมีการปล่อยตัวดูดซับที่ดูดซับสีจนเต็มแล้วออกทางด้านล่างของหอดูดซับเป็นระยะเพื่อส่งตัวดูดซับนี้เข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพ (Reactivation) และมีการป้อนตัวดูดซับใหม่หรือตัวดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วเข้าทางด้านบนของหอดูดซับ [2-4] โดยช่วงระยะเวลาตั้งแต่การป้อนน้ำเชื่อมเข้าหอดูดซับจนถึงเวลาที่ปล่อยตัวดูดซับที่อิ่มตัวไปปรับปรุงคุณภาพนั้นเรียกว่าระยะเวลาครบรอบ (Cycle time) [5,6] ทั้งนี้ลักษณะการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์เป็นลักษณะภาวะสถานะไม่คงตัว (Unsteady state) แต่เมื่อมีการดูดซับผ่านจำนวนรอบการทำงานไปจำนวนหนึ่งแล้วค่าสีขาออกของกระบวนการเป็นลักษณะฟังก์ชันเป็นคาบ (Periodical function) หรือประพฤติตัวในลักษณะภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร (Cyclic steady state) ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับเนื่องจากช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการการปรับปรุงสภาพของตัวดูดซับและเนื่องจากการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ดังกล่าวที่มีลักษณะการไหลสวนทางกันของน้ำเชื่อมและถ่านกัมมันต์ทำให้แรงขับสำหรับการถ่ายโอนมวลสาร (Driving force of mass transfer) เพิ่มมากขึ้นกว่าการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง อย่างไรก็ตามเมื่อมีการทำงานของระบบผ่านไปสักระยะจะพบว่าน้ำเชื่อมที่ป้อนเข้าหอดูดซับแบบเบดนิ่งจะสัมผัสกับถ่านกัมมันต์ที่ อิ่มตัวแล้วในช่วงแรกของเบด แต่ในหอดูดซับแบบพัลส์น้ำเชื่อมจะสัมผัสกับถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในบริเวณการถ่ายโอนมวล

[2,7] และจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการประยุกต์ใช้หอดูดซับแบบพัลส์ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียและกระบวนการลดค่าสีในน้ำเชื่อม เช่น งานวิจัยของ Mckay ได้สร้างแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์สำหรับระบบกำจัดน้ำเสียเพื่อศึกษาบริเวณการถ่ายโอนมวล (Mass transfer zone) และหาระยะเวลาครบรอบของหอดูดซับแบบพัลส์จากสมการการดูดซับของหอ ดูดซับแบบเบดนิ่ง [7] และงานวิจัยของ Monley ศึกษาแบบจำลองของการแลกเปลี่ยนไอออนด้วย เรซินเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการลดค่าความเข้มสีในน้ำเชื่อมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบ ค่าความเข้มข้นขาเข้า และตัวแปรอื่นๆ [8]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นยังไม่พบงานวิจัยที่อ้างถึงการควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ แต่มีงานวิจัยที่ศึกษาการควบคุมกระบวนการที่เป็นแบบภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรอื่น ๆ ซึ่งเป็นกระบวนการทำงานคล้ายกับหอดูดซับแบบพัลส์ เช่น กระบวนการโครมาโทรกราฟรีแบบจำลองเบดเคลื่อนที่ (Simulated-Moving Bed chromatography : SMB) และกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure-Swing Adsorption : PSA) เป็นต้น โดยพบว่าเมื่อมีการรบกวนระบบที่มีลักษณะการทำงานแบบภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร ทำให้ค่าของตัวแปรควบคุมเบี่ยงเบนออกจากค่าที่กำหนด (Set point) ซึ่งการเบี่ยงเบนดังกล่าวจะพบในรอบถัดๆ ไปของ การดำเนินงาน ทำให้ต้องมีการศึกษาการทำงานและควบคุมระบบนี้อย่างเหมาะสม [5,9-11] ซึ่ง ในงานวิจัยนี้สนใจการนำการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้ามาประยุกต์ใช้ในการควบคุมหอดูดซับ แบบพัลส์โดยการวัดค่าตัวแปรรบกวนก่อนเข้าสู่กระบวนการเพื่อนำไปคำนวณหาตัวแปรปรับ ที่เหมาะสมที่สามารถควบคุมให้ได้ค่าตัวแปรควบคุมที่กำหนดได้ และเนื่องจากระบบการทำงาน การดูดซับภายในหอดูดซับแบบพัลส์นี้เป็นระบบที่ค่อนข้างใช้เวลานาน (Lag time) กว่าที่จะสามารถตรวจวัดค่าตัวแปรควบคุมที่ออกจากระบบได้ ดังนั้นถ้าใช้การควบคุมแบบป้อนกลับอาจทำให้ ไม่สามารถควบคุมระบบได้ทัน ซึ่งจะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบบางส่วนไม่มีคุณภาพหรือมีค่าเบี่ยงเบนออกจากค่าที่กำหนด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแบบจำลองที่ใช้อธิบายการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งเนื่องจากมีปรากฏการ์ณการถ่ายโอนมวลภายในหอดูดซับทั้งสองชนิดเป็นลักษณะเดียวกัน ดังนั้นสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลภายในหอดูดซับแบบพัลส์จากข้อมูลการทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง โดยจะทำการทดลองที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนและแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน และใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบเส้น (Numerical Method of Lines: NMOL) ในการหาผลเฉลยของสมการแบบจำลอง จากนั้นนำการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้ามาประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์นี้ด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมที่ค่าความเข้มสีขาเข้าต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายกระบวนการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ได้ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกน และแบบจำลองที่พิจารณาการการกระจายตัวตามแนวแกน

1.2.2 เพื่อหาค่าเวลาครบรอบที่เหมาะสม (Optimum cycle time) ของหอดูดซับแบบพัลส์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสีขาเข้าและอัตราไหลของน้ำเชื่อมขาเข้า

1.2.3 เพื่อประยุกต์การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward control) ในการควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์เมื่อค่าความเข้มสีขาเข้า 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 สร้างแบบจำลองกระบวนการของการดูดซับแบบพัลส์จากการทำสมการสมดุลมวลโดยพิจารณาการกระจายตามแนวแกน และไม่พิจารณาการกระจายตามแนวแกน มีสมมติฐานของการทำสมการสมดุลมวลสารดังนี้

1.3.1.1 การดูดซับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal)

1.3.1.2 สมการสมดุลการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง (Linear adsorption isotherm)

1.3.1.3 อัตราการถ่ายโอนมวลสารประมาณได้ด้วยแบบจำลองแรงขับเชิงเส้น (LDF : Linear Driving Force Model)

1.3.1.4 ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของถ่านกัมมันต์มีค่าคงที่ หรือพิจารณาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์คงที่ (Uniform Properties)

1.3.2 ประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการของหอดูดซับแบบพัลส์จากการทดลองด้วยหอดูดซับแบบเบดนิ่งในระดับห้องปฏิบัติการ (ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ค่าคงที่ของการดูดซับ และค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายตัวตามแนวแกน) ที่อัตราการไหลขาเข้า 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที

1.3.2.1 ทำการทดลองโดยการบรรจุถ่านกัมมันต์แบบเปียก (Wet packing)

1.3.2.2 สภาวะของน้ำเชื่อมขาเข้าคือ ค่าสี 700 ICUMSA ค่าความหวาน 65 บริกซ์ และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นภาวะปกติในโรงงานอุตสาหกรรม

1.3.3 แก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ได้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบเส้นโดยใช้โปรแกรม Scilab

1.3.4 ตัวแปรที่ศึกษาสำหรับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า มีดังนี้

1.3.4.1 ตัวแปรรบกวน คือ ค่าสีขาเข้า (ค่าปกติในอุตสาหกรรมคือ 700 ICUMSA ถึง 900 ICUMSA)

1.3.4.2 ตัวแปรควบคุม คือ ค่าสีขาออก (ค่าปกติในอุตสาหกรรมคือ 100 ICUMSA)

1.3.4.3 ตัวแปรปรับ คือ ระยะเวลาครบรอบของการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์1.4.2 สามารถใช้ถ่านกัมมันต์ในหอดูดซับแบบพัลส์นี้ได้อย่างคุ้มค่า เมื่อใช้ระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสม

1.4.2 สามารถควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ด้วยระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า จากการประยุกต์ใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาครบรอบของการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์กับค่าสีความเข้มสีขาเข้า

1.4.3 ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมในขั้นสูงในอุตสาหกรรมต่อไปได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

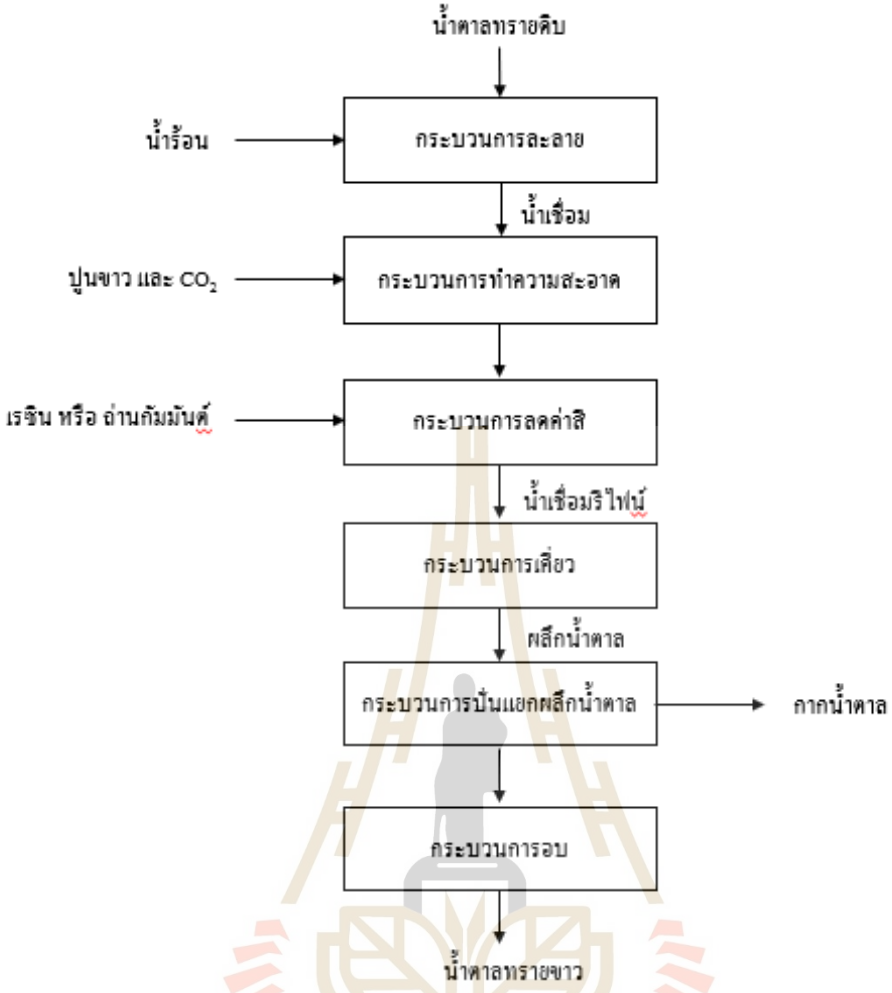
บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองและการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าของหอดูดซับแบบพัลส์ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ โดยแบ่งเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตน้ำตาลทรายขาว กระบวนการดูดซับ หอดูดซับแบบเบดนิ่ง หอดูดซับแบบพัลส์ การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบเส้น และ การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า ดังนี้

2.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์

กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวเป็นกระบวนการกำจัดสิ่งปนเปื้อนและอนุภาคสีออกจากน้ำตาลทรายดิบเพื่อให้ได้น้ำตาลทรายขาวที่มีความบริสุทธิ์ โดยเริ่มจากการนำน้ำตาลทรายดิบมาละลายกับน้ำร้อนเรียกสารละลายที่ได้ในขั้นตอนนี้ว่าแมกมา (Magma) จากนั้นนำไปลดค่าสีและกำจัดสิ่งปนเปื้อนแล้วนำน้ำเชื่อมที่ได้เข้าสู่หม้อเคี่ยวสุญญากาศเพื่อระเหยน้ำออกจนถึงจุดที่น้ำเชื่อมอิ่มตัวทำให้เกิดผลึกน้ำตาล หรือ แมสสิควิท (Massecuite) จากนั้นนำผลึกน้ำตาลที่ได้ไปปั่นแยกออกจากกากน้ำตาล โดยผลึกน้ำตาลที่ได้นี้จะเป็นน้ำตาลทรายขาว (White sugar) และน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ (Refined sugar) ก่อนอบไล่ความชื้นในหม้ออบและนำไปบรรจุเพื่อจำหน่ายต่อไป

โดยกระบวนการลดค่าสีและกำจัดสิ่งปนเปื้อนของน้ำเชื่อมจากน้ำตาลทรายดิบนั้นแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การนำสารละลายน้ำตาลทรายดิบมาผสมกับปูนขาวและคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดการจับสิ่งปนเปื้อนและอนุภาคสีโมเลกุลใหญ่ตกตะกอน จากนั้นกำจัดด้วยการกรองผ่านเครื่องกรองแบบใช้แรงดัน (Pressure filter) และกระบวนการลดค่าสีด้วยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ หรือการลดค่าสีจากการแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน (Ion exchange resin) โดยแสดงแผนผังกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวไว้ในรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 แผนผังกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์

2.2 กระบวนการลดค่าสีของน้ำเชื่อม

กระบวนการนี้น้ำเชื่อมที่ถูกส่งเข้ามาจะมีค่าความเข้มสีอยู่ที่ประมาณ 700 ถึง 900 ICUMSA ซึ่งปริมาณค่าความเข้มสีนี้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำตาลทรายดิบและการทำงานของกระบวนการกำจัดสิ่งปนเปื้อนและสีในกระบวนการก่อนหน้า ซึ่งค่าความเข้มสีของน้ำเชื่อมที่ออกจากกระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำตาลที่ต้องการผลิต โดยน้ำตาลทรายขาวจะมีค่าความเข้มสี 46 ถึง 200 ICUMSA และน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์จะมีค่าความเข้มสีไม่เกิน 45 ICUMSA โดยมีวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ดังนี้

2.2.1 การลดค่าสีของน้ำเชื่อมด้วยเรซิน

การลดค่าสีของน้ำเชื่อมด้วยเรซินเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาลโดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างองค์ประกอบของสารที่ก่อให้เกิดสีในน้ำเชื่อมและประจุบนเรซินใน

หอบรรจุเรซินแบบเบดนิ่ง และเนื่องจากองค์ประกอบของสารที่ก่อให้เกิดสีส่วนใหญ่ในน้ำเชื่อมเป็นประจุลบ ดังนั้นจึงใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบเพื่อลดค่าสีในน้ำเชื่อม และจะใช้เกลือเป็นสารสำหรับฟื้นฟูสภาพเรซิน

2.2.2 การลดค่าสีของน้ำเชื่อมด้วยถ่านกัมมันต์

การลดค่าสีของน้ำเชื่อมด้วยถ่านกัมมันต์ใช้หลักการดูดซับระหว่างถ่านกัมมันต์ (ตัวดูดซับ) และองค์ประกอบของสารที่ก่อให้เกิดสีในน้ำเชื่อมในหอดูดซับแบบต่างๆ เช่น หอดูดซับแบบเบดนิ่ง หอดูดซับแบบฟลูอิดไดซ์ และหอดูดซับแบบพัลส์ เป็นต้น โดยเมื่อถ่านกัมมันต์นี้ดูดซับจนอิ่มตัวแล้วจะถูกนำไปฟื้นฟูสภาพด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยถ่านกัมมันต์ที่นิยมใช้ในทางการค้ามี 2 ประเภท คือ ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder) และถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular)

2.3 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) คือ วัสดุที่มีพื้นที่ผิวภายในและความพรุนสูงซึ่งประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเป็นหลัก (ร้อยละ 87 ถึง 97) และมีธาตุอื่นๆเป็นองค์ประกอบเล็กน้อย เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน กำมะถัน และไนโตรเจน โดยสารองค์ประกอบต่างๆนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบตั้งต้นที่นำมาผลิต ซึ่งถ่านกัมมันต์นี้ผลิตได้จากวัสดุที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นหลัก เช่น ไม้ ถ่านหิน เปลือกเมล็ดของผลไม้ และชีวมวล เป็นต้น โดยถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้ 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) และการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เพื่อเพิ่มผิวภายในโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โดยปกติปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์มีค่ามากกว่า 0.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และบางชนิดมีค่ามากกว่า 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีพื้นที่ผิวจำเพาะภายในมากกว่า 400 ตารางเมตรต่อกรัม และบางชนิดอาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะภายในมากถึง 1000-2500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีความกว้างรูพรุนอยู่ในช่วง 0.3 นาโนเมตรถึงหลายพันนาโนเมตร ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นที่นิยมในกระบวนการดูดซับเพื่อแยกสารหรือทำให้สารบริสุทธิ์ ซึ่งการเลือกใช้ขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของสารถูกดูดซับ อีกทั้งถ่านกัมมันต์นี้ยังสามารถนำไปฟื้นฟูสภาพและนำกลับมาใช้ได้อีกได้

2.4 กระบวนการดูดซับ

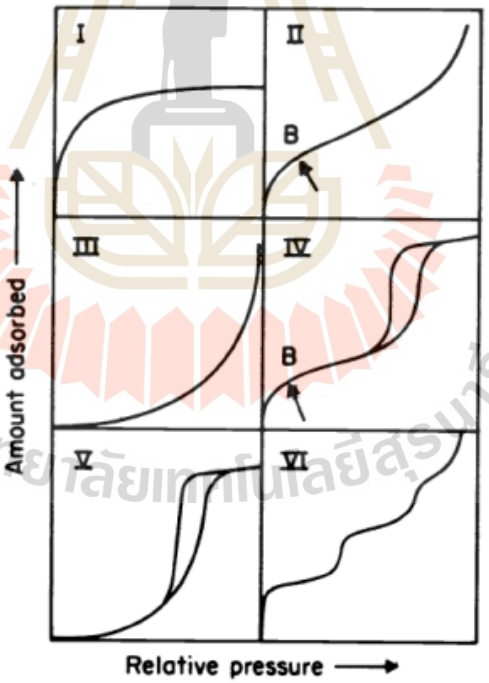
กระบวนการดูดซับสารเป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารที่ต้องการออกจากสารผสมในวัฏภาคของไหล โดยอาศัยการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลของสารที่ต้องการแยกซึ่งเรียกว่าตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาศัย

กลไกการแพร่ไปสะสมอยู่บนพื้นผิวภายในของของแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ ทำให้ความหนาแน่นหรือความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของแข็งมีค่าสูงกว่าในบริเวณที่ไกลออกไปในวัฏภาคของไหล

การดูดซับเกิดขึ้นจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ โดยอาจเป็นแรงดูดอย่างอ่อนที่เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งจะจัดเป็นการดูดซับทางกายภาพ หรือแรงอาจเกิดจากการสร้างพันธะเคมีที่แรงกว่าซึ่งจะจัดเป็นการดูดซับทางเคมี [12]

2.4.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทิร์มการดูดซับ คือ ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในวัฏภาคของไหลในกรณีที่เป็นของเหลว และกับความดันย่อยของสารถูกดูดซับในกรณีที่เป็นแก๊ส ที่สภาวะสมดุลกับสารดูดซับ ที่อุณหภูมิคงที่ โดยไอโซเทิร์มของการดูดซับทางกายภาพสามารถแบ่งออกเป็น 6 ประเภท ตามการจำแนกของ IUPAC ดังนี้



รูปที่ 2.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับตามการแบ่งแยกของ IUPAC [13]

แบบที่ 1 (Type I) เป็นการดูดซับที่พบมากที่สุด แสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยที่ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แล้วจะเพิ่มอย่างช้าๆจนถึงค่าคงที่ ซึ่งจะพบมากในวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (น้อยกว่า 2 นาโนเมตร) เช่น

ถ่านกัมมันต์ โดยจะเกิดปรากฏการณ์การเติมรูพรุน (Pore filling) เนื่องจากอนุภาคของสารถูกดูดซับมีขาดใกล้เคียงกับขนาดของรูพรุน

แบบที่ 2 (Type II) แสดงถึงการดูดซับแบบหลายชั้น โดยช่วงแรกของกราฟจะเป็นลักษณะโค้งคว่ำจากนั้นค่าจะมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง แล้วก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในลักษณะกราฟโค้งหงาย โดยจะมีจุด B คือจุดรอยต่อระหว่างช่วงกราฟโค้งคว่ำและเส้นตรง ซึ่งจุดนี้จะแสดงถึงจุดอิ่มตัวของการดูดซับของสารถูกดูดซับแบบชั้นเดียว และหลังจากจุดนี้จะเริ่มมีการดูดซับแบบหลายชั้นเกิดขึ้น โดยการดูดซับในลักษณะนี้มักจะเกิดขึ้นกับวัสดุที่รูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่

แบบที่ 3 (Type III) เป็นไอโซเทิร์มที่มีลักษณะโค้งหงาย โดยที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ ๆ จะเกิดการดูดซับน้อย เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคของสารถูกดูดซับมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ แต่ที่ความดันสัมพัทธ์สูง ๆ จะมีปริมาณการดูดซับสูงขึ้นเนื่องจากเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น โดยการดูดซับในลักษณะนี้มักพบกับวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

แบบที่ 4 (Type IV) ไอโซเทิร์มประเภทนี้ในช่วงแรกของการดูดซับจะคล้ายกับช่วงแรกของการดูดซับแบบที่ 2 แต่ในช่วงของการคายซับ หรือ ช่วงลดความดันกราฟจะไม่ย้อนกลับลงมาทับกับในช่วงเพิ่มความดัน เนื่องจากเกิดการควบแน่นในหลอดรูเล็ก (Capillary condensation) ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างกราฟสองช่วง เรียกว่า Hysteresis Loop

แบบที่ 5 (Type V) ไอโซเทิร์มประเภทนี้จะคล้ายกับไอโซเทิร์มแบบที่ 3 แต่มีการเกิด Hysteresis Loop โดยมักพบในการดูดซับที่มีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคของสารดูดซับและสารถูกดูดซับมีค่าน้อย

แบบที่ 6 (Type VI) ไอโซเทิร์มประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นแบบขั้น (Stepped isotherm) โดยจะเกิดในระบบดูดซับที่มีแรงระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับสม่ำเสมอ

จากไอโซเทิร์มการดูดซับดังกล่าวจะพบว่า ระบบดูดซับของสารที่มีความเข้มข้นต่ำ (Dilute) ในระบบที่เป็นของเหลว หรือที่ความดันต่ำในระบบของแก๊ส ไอโซเทิร์มจะมีลักษณะเป็นแบบเส้นตรง หรือ Linear Isotherm

2.5 หอดูดซับแบบเบดนิ่ง (Fixed-bed adsorber)

หอดูดซับแบบเบดนิ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการดูดซับสารในอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อย และต้นทุนต่ำ เช่นกระบวนการแยกสาร และการกำจัดของน้ำเสีย เป็นต้น การทำงานของหอดูดซับแบบเบดนิ่งเริ่มจากการบรรจุอนุภาคตัวดูดซับไว้ภายใน จากนั้นป้อนของไหลที่ประกอบด้วยตัวถูกดูดซับให้ไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับ ทำให้เกิดการ

ดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคดูดซับที่ถูกสัมผัส

2.5.1 ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

1. การถ่ายโอนมวลภายนอกอนุภาค (Interparticle mass transfer) เป็นขั้นตอนการพามวล (Convection) และการผสม (Dispersion) ของตัวถูกดูดซับภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคของชั้นตัวดูดซับ โดยการผสมที่เกิดขึ้นนี้แบ่งเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของทิศทางการไหล คือ การผสมในแนวรัศมี (Radial dispersion) และการผสมในแนวแกน (Axial dispersion)

2. การถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาค (Interphase mass transfer) เป็นขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของตัวถูกดูดซับไปที่พื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับด้วยการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางของของไหลที่อยู่ล้อมรอบพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับ

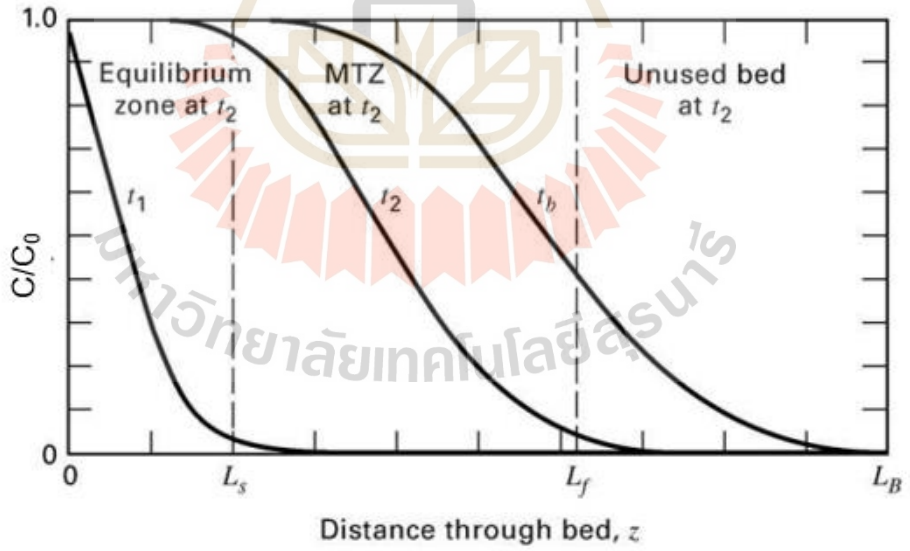
3. การถ่ายโอนมวลภายในอนุภาค (Intraparticle mass transfer) เป็นขั้นตอนการถ่ายโอนมวลจากบริเวณพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับไปภายในรูพนุนของตัวดูดซับ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลไก คือ การถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (Pore diffusion) และการถ่ายโอนมวลบนพื้นผิวรูพรุนของตัวดูดซับ (Surface diffusion)

4. การดูดซับ (Adsorption) เป็นขั้นตอนการดูดซับบนพื้นผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

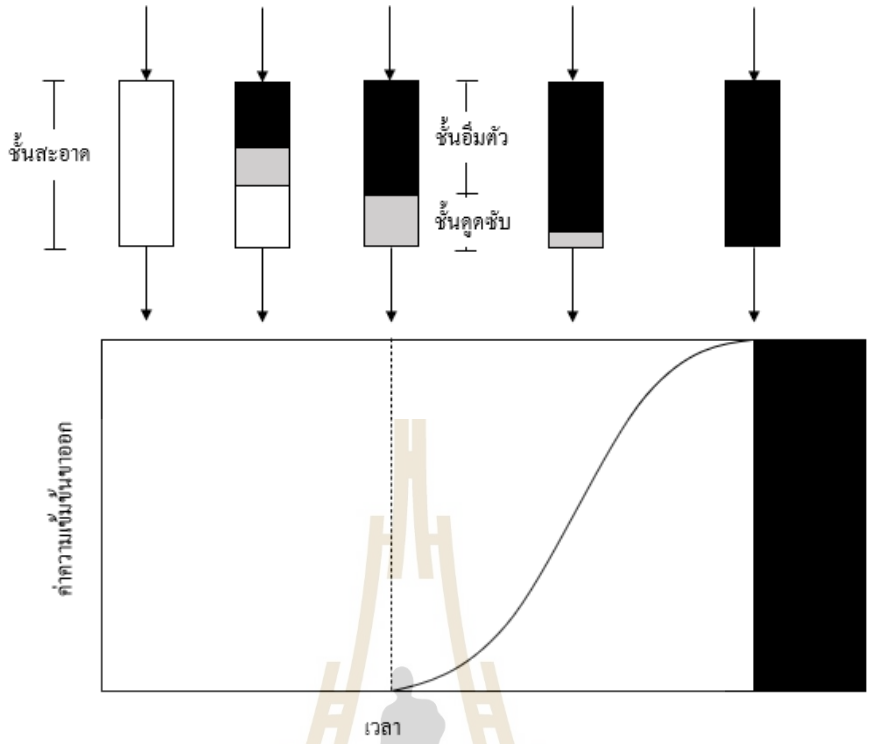
2.5.2 บริเวณการถ่ายโอนมวล (Mass Transfer Zone : MTZ)

บริเวณการถ่ายโอนมวล คือ บริเวณที่มีการดูดซับสารของอนุภาคดูดซับ โดยบริเวณนี้จะขยายขนาดกว้างขึ้นจนเกิดสภาวะอิ่มตัวทั่วทั้งบริเวณของเบดภายในหอดูดซับ จากรูปที่ 2.3 แสดงการกระจายความเข้มข้นของสารถูกดูดซับภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่เวลาต่างๆ โดยที่เวลา t_1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นตั้งแต่ความยาวเบด 0 ถึง L_s โดยยังไม่มีเบดส่วนที่อิ่มตัวเกิดขึ้น ที่เวลา t_2 จะเกิด การอิ่มตัวที่เบดตั้งแต่ความยาว 0 ถึง L_s และเกิดการถ่ายโอนมวลที่บริเวณความยาวเบดตั้งแต่ L_s ถึง L_f โดยที่บริเวณตั้งแต่ L_f เป็นต้นไปยังไม่มีการถ่ายโอนมวลเกิดขึ้น เมื่อบริเวณการถ่ายโอนมวลเคลื่อนที่ไปจนถึงที่เวลา t_b ส่วนปลายของแนวความเข้มข้นจะอยู่ที่บริเวณทางออกของหอดูดซับ ทำให้สามารถตรวจพบความเข้มข้นที่ทางออกจากหอดูดซับที่เวลามากกว่า t_b ซึ่งจะแสดงว่าใกล้เกิดการอิ่มตัวภายในหอดูดซับ ดังนั้นจะต้องนำหยุดการป้อนสารแล้วนำอนุภาคดูดซับนั้นไปฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเวลา t_b นี้จะเรียกว่า เวลาเบรคทรู (Breakthrough time) โดยในทางปฏิบัตินั้นการกำหนดเวลาเบรคทรูจะพิจารณาจากค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ออกจากหอดูดซับที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาที่ความเข้มสีขาออกสูงสุด 100 ICUMSA หรือ

C/C_0 มีค่า 0.143 และถ้าปล่อยให้หอดูดซับทำงานต่อเนื่องที่เวลามากกว่าเวลาเบรคทรู จะพบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อเนื่องจนกระทั่งตัวดูดซับอิ่มตัวทั่วทั้งหอดูดซับหรือตัวดูดซับเข้าถึงสมดุลการดูดซับ ซึ่งเรียกเวลาที่หอดูดซับเข้าสู่สมดุลการดูดซับสุดท้ายนี้ว่า เวลาเข้าสู่สมดุล หรือ t_E (Equilibrium time) ซึ่งเวลา t_E สามารถหาได้จากช่วงของกราฟเบรคทรูที่ค่าความเข้มข้นขาออกมีค่าเข้าใกล้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น หรือ C/C_0 ประมาณ 0.95 ดังนั้นในงานวิจัยนี้สามารถหาความกว้างของบริเวณการถ่ายโอนมวล (Mass transfer zone width) จากช่วง C/C_0 มีค่า 0.143 ถึง C/C_0 มีค่า 0.95 จากกราฟเบรคทรูหรือกราฟโปรไฟล์ความเข้มข้นภายในหอดูดซับ และอัตราการขยายของบริเวณการถ่ายโอนมวล (Rate of mass transfer zone expansion) สามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบริเวณการถ่ายโอนมวลและเวลา เพื่อใช้ศึกษาการดูดซับภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานและพลศาสตร์ของหอดูดซับ แบบเบดนิ่งนี้สามารถศึกษาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายขาออกที่ แต่ละเวลา หรือ กราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ทำให้มีความพยายามในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายกราฟเบรคทรูผ่านการทำสมดุลมวลของอนุภาคตัวถูกดูดซับที่ไหลผ่านเบดนิ่ง ซึ่งแสดงไว้ในหัวข้อ 2.6



รูปที่ 2.3 การกระจายความเข้มข้นของสารถูกดูดซับภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่เวลาต่างๆ



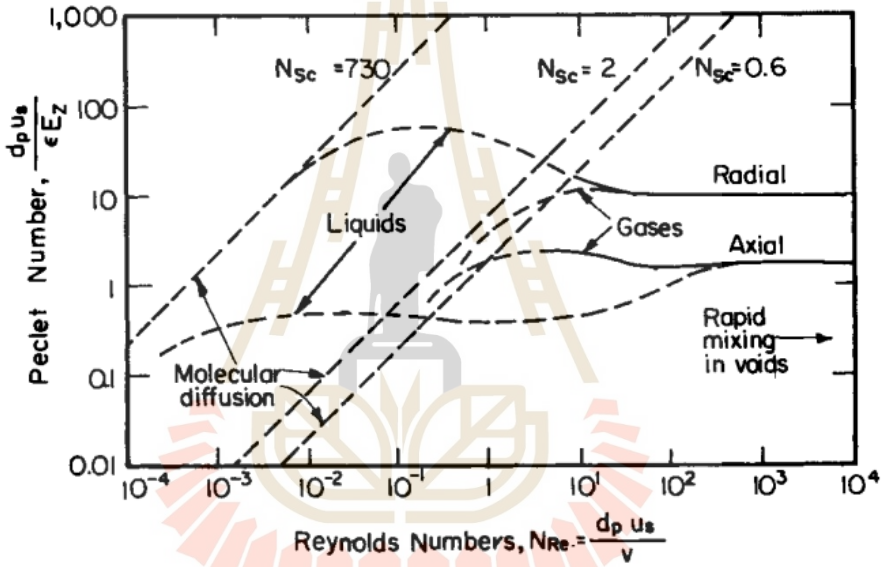
รูปที่ 2.4 กราฟเบรคทรูในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

2.5.3 การกระจายตัวในแนวแกน (Axial dispersion)

การไหลของของไหลผ่านเบดนิ่งจะทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคของของไหล ซึ่งเป็นผลมาจากการผสมเชิงโมเลกุล (Molecular dispersion) และการพามวล (Convection) โดยการกระจายของอนุภาคของไหลสามารถเกิดได้ 2 ทิศทาง คือ การผสมหรือการกระจายตัวในแนวแกน และการผสมหรือการกระจายตัวในแนวรัศมี (Radial dispersion) ซึ่งพบว่าผลกระทบจากการกระจายตัวในแนวรัศมีนั้นจะน้อยกว่าการกระจายตัวในแนวแกนมากเมื่ออัตราส่วนระหว่างขนาดของหอดูดซับและขนาดอนุภาคตัวดูดซับมีค่ามาก ทำให้สามารถตัดการพิจารณาผลกระทบจากการกระจายตัวในแนวรัศมีออกได้ แต่การไหลของของไหลผ่านหอดูดซับนั้นส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่จะเกิดการกระจายตัวในแนวแกน ซึ่งกระจายตัวในแนวแกนนั้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าลดลง ทำให้ไม่สามารถตัดการพิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนได้ โดยเมื่ออัตราเร็วมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ($u \longrightarrow 0$) ผลกระทบของการผสมเนื่องจากการพามวลลดลง และผลกระทบเนื่องจากการกระจายตัวในแนวแกนจากการผสมในระดับโมเลกุลจะเพิ่มขึ้น โดยแสดงสมการแบบจำลองการไหลผ่านหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาผลกระทบของการกระจายตัวในแนวแกนดังสมการที่ (2.1)

$$-D_a \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} + u_i \frac{\partial C}{\partial Z} + \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{Q_0}{C_0}\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right)\frac{\partial q}{\partial t} = 0 \qquad (2.1)$$

ซึ่งสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกนสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และตัวเลขเพคเลคดังรูปที่ 2.5 โดยเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ของของเหลวมีค่าสูงหรือมีค่าเข้าใกล้ 1000 ค่าตัวเลขเพคเลคจะเข้าใกล้ 2 และเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อยหรือความเร็วต่ำจะพบว่าการไหลของของเหลวผ่านเบดนิ่งจะมีผลให้เกิดการกระจายตัวในแนวแกนมากกว่าแก๊ส [12,14-16]

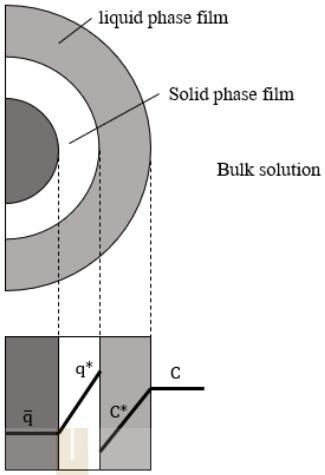


รูปที่ 2.5 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกนภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง [15]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5.4 แบบจำลองแรงขับเชิงเส้น

แบบจำลองแรงขับเชิงเส้นเป็นการจำลองการหาความต้านทานการถ่ายโอนมวลของอนุภาคถูกดูดซับ โดยมีสมมติฐานว่าความต้านทานการถ่ายโอนมวลในแต่ละขั้นตอนเป็นแบบเส้นตรง (Linear operator) แสดงดังรูปที่ 2.6 ดังนั้นจะสามารถหาความต้านทานการถ่ายโอนมวลรวมได้ดังสมการที่ (2.2) เมื่อพจน์ทางซ้ายแสดงถึงการถ่ายโอนมวลภายนอกอนุภาค พจน์แรกทางขวามือแสดงถึงการถ่ายโอนมวลระหว่างอนุภาค และพจน์สุดท้ายแสดงถึงการถ่ายโอนมวลภายในอนุภาค และในกรณีของระบบที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนแสดงในสมการที่ (2.3) ซึ่งแบบจำลองแรงขับเชิงเส้นนี้เป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่นิยมใช้หาความต้านทานการถ่ายโอนมวลในกระบวนการดูดซับ เช่น กระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน [5,17]



รูปที่ 2.6 แบบจำลองแรงขับเชิงเส้น

$$\frac{1}{kK} = \frac{R_p}{3k_f} + \frac{R_p^{\ 2}}{15\varepsilon_p D_p} \tag{2.2}$$

$$\frac{1}{kK} = \frac{R_p}{3k_f} + \frac{R_p^{\ 2}}{15\varepsilon_p D_p} + \frac{D_a}{u_i^{\ 2}}\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right) \tag{2.3}$$

เมื่อ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม [1/วินาที]

K คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ [-]

k_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลผ่านชั้นฟิล์ม [1/วินาที]

R_p คือ รัศมีของอนุภาคตัวดูดซับ [เมตร]

D_a คือ สัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน [เมตร^2/วินาที]

D_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์แพร่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับ [เมตร^2/วินาที]

u_i คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยภายในหอดูดซับ [เมตร/วินาที]

ε_p คือ ค่าความพรุนของตัวดูดซับ [-]

2.5.5 สมการสหสัมพันธ์สำหรับถ่ายโอนมวลในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

ปรากฏการณ์การการถ่ายโอนมวลของอนุภาคถูกดูดซับสำหรับการไหลของของไหลผ่านหอดูดซับแบบเบดนิ่ง เป็นปรากฏการณ์ที่ถูกศึกษามาแล้วอย่างมากมาย ดังนั้นจึงมีการเสนอสมการสหสัมพันธ์ในรูปของตัวแปรไร้หน่วยที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหลในหอดูดซับ คือ ตัวเลข

เรย์โนล์ด (Re) และตัวแปรไร้หน่วยที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานการถ่ายโอนมวลของอนุภาค คือ ตัวเลขเชอร์วูด (Sh) เพื่ออธิบายปรากฏการณ์นี้ ดังนี้ [14]

สมการสหสัมพันธ์สำหรับการไหลที่มีความเร็วสูง (ตัวเลขเรยโนลด์สูง)

Ranz และ Marshall เสนอการไหลของของไหล ดังนี้

$$Sh=\frac{1.09}{\varepsilon}Re^{0.33}Sc^{0.33} \tag{2.4}$$

สมการสหสัมพันธ์สำหรับการไหลที่มีความเร็วต่ำ (ตัวเลขเรยโนลด์ต่ำ)

Petrovic และ Thodos เสนอการไหลของของแก๊ส ดังนี้

$$3<Re<2000, Sh=\frac{0.357}{\varepsilon}Re^{0.64}Sc^{0.33} \tag{2.5}$$

Wilson และ Greankoplis เสนอการไหลของของเหลว ดังนี้

$$0.0015<Re<55, Sh=\frac{1.09}{\varepsilon}Re^{0.33}Sc^{0.33} \tag{2.6}$$

$$55<Re<1050, Sh=\frac{1.09}{\varepsilon}Re^{0.69}Sc^{0.33} \tag{2.7}$$

จากการศึกษาการไหลของของเหลวผ่านเบดนิ่ง Wakao และ Funazkri กล่าวว่าที่อัตราการไหลต่ำ (Re < 3) จะเกิดการกระจายตัวในแนวแกนเนื่องจากการพามวลแบบธรรมชาติ (Natural convection mass transfer) ดังนั้นจะส่งผลให้การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลต่ำเกินความจริง เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบดังกล่าวในงานวิจัยของ Wakao และ Funazkri จึงศึกษาการไหลของของไหลที่ Re > 3 ซึ่งแสดงสมการสหสัมพันธ์ ดังนี้ [14,19]

Wakao และ Funazkri เสนอการไหลของแก๊สและของเหลว ดังนี้

$$3<Re<10000, Sh=2.0+Re^{0.6}Sc^{1/3} \tag{2.8}$$

เมื่อ Re คือ กลุ่มตัวแปรไร้หน่วยตัวเลขเรย์โนล์ด โดยที่ $Re=\frac{d_p u_i \varepsilon_b \rho_f}{\mu}$

Sh คือ กลุ่มตัวแปรไร้หน่วยตัวเลขเชอร์วูด โดยที่ $Sh=\frac{k_f d_p}{D_m}$

Sc คือ กลุ่มตัวแปรไร้หน่วยตัวเลขชมิดท์ โดยที่ $Sc=\frac{\mu}{D_m \rho_f}$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.6 แบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

สมการสมดุลมวลสารของตัวถูกดูดซับที่ไหลผ่านตัวดูดซับภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ประกอบด้วยการถ่ายโอนมวลเนื่องจากการผสมตามแนวแกน การพามวล และการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม แสดงในรูปสมการไร้หน่วยดังนี้

2.6.1 แบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

สมการแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนมีสมมติฐาน ดังนี้

1) กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal system)

2) อัตราเร็วของการดูดซับประมาณได้ด้วยแบบจำลองแรงขับเชิงเส้น (LDF: Linear Driving Force)

3) สมการสมดุลการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง (Linear adsorption isotherm)

4) ไม่พิจารณาการเสื่อมสภาพของถ่านกัมมันต์เนื่องจากการใช้งาน และการปรับปรุงคุณภาพ กล่าวคือค่าคงที่สมดุลการดูดซับของถ่านกัมมันต์มีค่าคงที่

5) ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

$$\frac{\partial C}{\partial t} = u_i \frac{\partial C}{\partial Z} - \frac{Q_0}{C_0}\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right)\frac{\partial q}{\partial t} \qquad (2.8)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k(C - C_{eq}) \qquad (2.9)$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของไหลในรูปตัวแปรไร้หน่วย [-]

โดยที่ $C = \frac{C_i}{C_0}$

C_i คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของไหลที่ตำแหน่งใดๆ [ICUMSA]

C_0 คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของไหลที่สภาวะเริ่มต้น [ICUMSA] ในรูปตัวแปรไร้หน่วย

$C_{eq,i}$ คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลในวัฏภาคของไหลที่ตำแหน่งใดๆ [ICUMSA]

C_{eq} คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลในวัฏภาคของไหลที่ตำแหน่งใดๆ ในรูปตัวแปรไร้หน่วย [-] โดยที่ $C_{eq} = \frac{C_{eq,i}}{C_0}$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

q คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับภายในวัฏภาคตัวดูดซับในรูปตัวแปรไร้หน่วย

โดยที่ $q = \frac{q_i}{Q_0}$

q_i คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับภายในตัวดูดซับที่ตำแหน่งใดๆ [ICUMSA]

Q_0 คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในตัวดูดซับที่สภาวะเริ่มต้น [ICUMSA]

t คือ เวลา [วินาที]

Z คือ ความยาวของเบด [เมตร]

ε_b คือ ความพรุนของเบด

โดยมีที่สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต ดังนี้

สภาวะเริ่มต้น ภายในหอดูดซับจะปราศจากตัวถูกดูดซับ

$C(Z, t=0) = 0$ และ $q(Z, t=0) = 0$

สภาวะขอบเขต

$C(Z=0, t) = C_0$

2.6.2 แบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

สมการแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนมีสมมติฐาน ดังนี้

1) กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่

2) อัตราเร็วของการดูดซับประมาณได้ด้วยแบบจำลองแรงขับเชิงเส้น

3) สมการสมดุลการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

4) ไม่พิจารณาการเสื่อมสภาพของถ่านกัมมันต์เนื่องจากการใช้งาน และการปรับปรุงคุณภาพ กล่าวคือค่าคงที่สมดุลการดูดซับของถ่านกัมมันต์มีค่าคงที่

5) พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - u_i \frac{\partial C}{\partial Z} - \frac{Q_0}{C_0}\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right)\frac{\partial q}{\partial t} \qquad (2.10)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k(C - C_{eq}) \qquad (2.9)$$

สภาวะเริ่มต้น ภายในหอดูดซับจะปราศจากตัวถูกดูดซับ

$C(Z, t=0) = 0$ และ $q(Z, t=0) = 0$

สภาวะขอบเขต

$$\frac{\partial C}{\partial Z}|_{Z=0} = \frac{u}{Da}(C-1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial Z}|_{Z=L} = 0$$

2.6.3 การหาผลเฉลยของสมการแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

จากสมการแบบจำลองดังกล่าวได้มีการศึกษาและมีความพยายามในการหาคำตอบของสมการด้วยวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Analytic solution) ซึ่งถูกเสนอไว้ในรูปของแบบจำลองของคลินเคนเบิร์ก (Klinkenberg) สำหรับแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (สมการที่ 2.11) และแบบจำลองของลาพิดัช (Lapidus) สำหรับแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (สมการที่ 2.12)

ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกน: แบบจำลองของคลินเคนเบิร์ก

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(\sqrt{\xi}-\sqrt{\tau}-\frac{1}{8}\sqrt{\xi}-\frac{1}{8}\sqrt{\tau}\right) \qquad (2.11)$$

เมื่อ $\tau = k\left(t-\frac{Z}{u_i}\right)$

$$\xi = \frac{kKZ}{u_i}\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right)$$

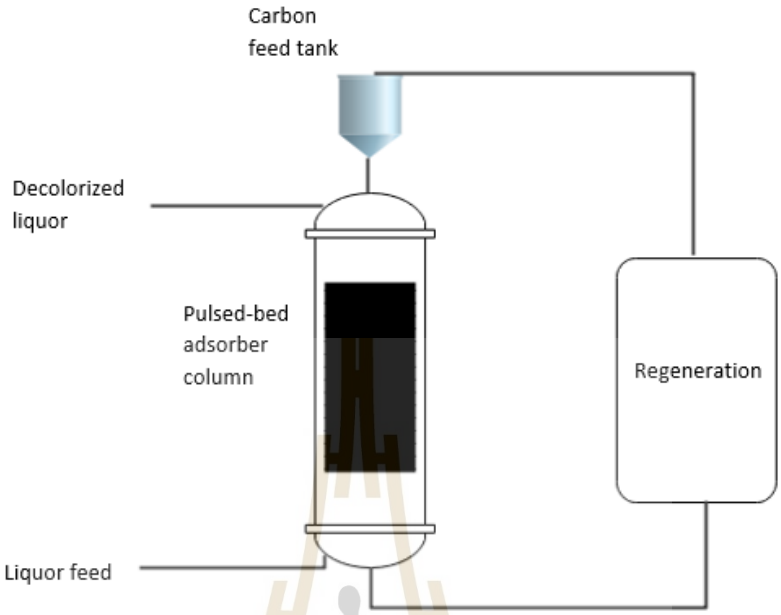
ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกน: แบบจำลองของลาพิดัช

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(\frac{vZ}{2D_a}\right)\left(F(t)+k\int_0^1 F(t)dt\right) \qquad (2.12)$$

$$F(t) = e^{kt}\int_0^1 I_0\left\{2k\left[K\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right)u_i(t-u_i)\right]^{1/2}\right\}\frac{Z}{2\sqrt{\pi D_a u_i^3}}\exp\left[\frac{-Z^3}{4D_a u_i}-\frac{v^3 u_i}{4D_a}-kKu_i\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right)-ku_i\right]du$$

เนื่องจากสมการแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนนั้นเป็นสมการอนุพันธ์เชิงย่อยที่มีความซับซ้อนมากขึ้นทำให้มีความยุ่งยากในการแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ ดังนั้นจึงใช้การแก้ปัญหาด้วยวิธีการหาผลเฉลยเชิงตัวเลข

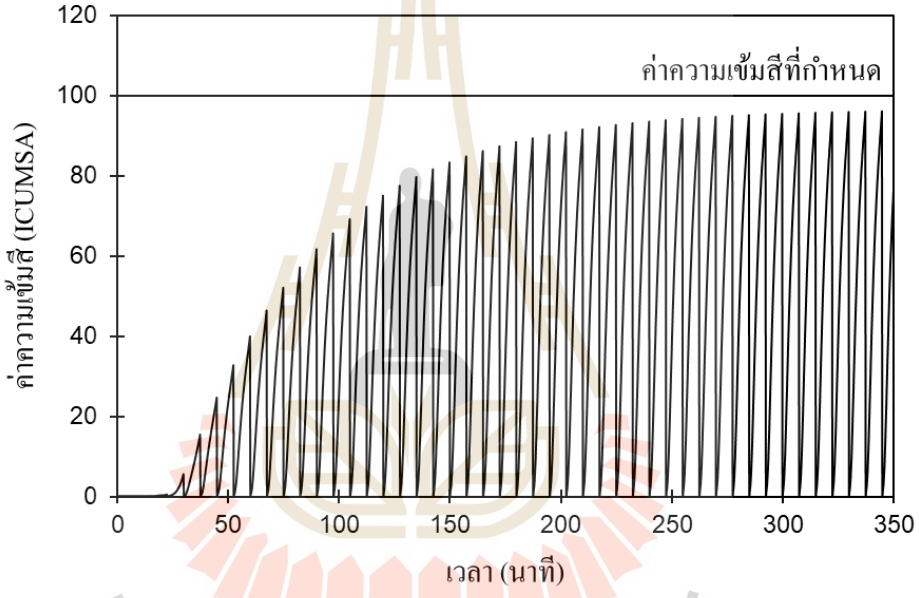
2.7 หอดูดซับแบบพัลส์



รูปที่ 2.7 ระบบการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์

หอดูดซับแบบพัลส์เป็นอุปกรณ์ที่บรรจุตัวดูดซับอยู่ภายใน เช่น ถ่านกัมมันต์ ซึ่งในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์หอดูดซับแบบพัลส์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการลดค่าความเข้มสีของน้ำเชื่อมมีขั้นตอนทำงานคือ ขั้นตอนแรกน้ำเชื่อมจะถูกป้อนเข้าในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของถ่านกัมมันต์ โดยน้ำเชื่อมที่มีค่าความเข้มสีมากถูกป้อนเข้าทางด้านล่างไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับ แล้วน้ำเชื่อมที่มีค่าความเข้มสีต่ำหรือน้ำเชื่อมที่ถูกดูดซับอนุภาคสีแล้วจะไหลออกทางด้านบนของหอดูดซับ และเมื่อเวลาผ่านไปถึงระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมจะทำการหยุดการป้อนน้ำเชื่อมเข้าหอดูดซับ จากนั้นปล่อยถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวออกทางด้านล่างของหอดูดซับเพื่อนำไปทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพ ในขณะเดียวกันนั้นถ่านกัมมันต์ที่ถูกฟื้นฟูประสิทธิภาพหรือถ่านกัมมันต์ใหม่จะถูกปล่อยจากถังเตรียมป้อนถ่านกัมมันต์ (Carbon feed tank) เข้าทางด้านบนของหอดูดซับในปริมาณที่เท่ากันกับถ่านกัมมันต์ที่ถูกนำไปฟื้นฟูประสิทธิภาพ โดยขั้นตอนการดำเนินงานดังกล่าวถือเป็นหนึ่งรอบของการทำงานของหอดูกซับแบบพัลส์ จากนั้นป้อนน้ำเชื่อมเข้าหอดูดซับอีกครั้งและจะทำลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีขาออกและเวลาที่มีลักษณะการทำงานเป็นรอบๆ (Cycle) ของการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์ไว้ในรูปที่ 2.8 โดยช่วงแรกนั้นจะยังไม่ตรวจพบค่าความเข้มสีที่ทางออกของหอดูดซับ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำเชื่อมในหอดูดซับนี้ต้องอาศัยเวลาในระบบ (Space time) เมื่อปล่อยถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวแล้วออกทางด้านล่างและป้อน

ถ่านกัมมันต์ใหม่เข้าทางด้านบนของหอดูดซับ (c=0 และ q=0) ค่าความเข้มสีจะลดลงมาอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดต่ำสุด แล้วค่าความเข้มสีก็จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการดูดซับบริเวณถ่านกัมมันต์ที่เติมเข้าไปใหม่ โดยจะมีลักษณะการทำงานเป็นรอบเช่นนี้ไปหลาย ๆ รอบจนความเข้มสีขาออกมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเป็นคาบ (Periodical function) ทั้งนี้เมื่อค่าความเข้มสีขาออกเป็นฟังก์ชั่นเป็นคาบ ในแต่ละรอบค่าสีขาออกจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่กำหนด (Specification) และมีลักษณะเช่นเดียวกันในรอบถัดๆไป ซึ่งเรียกพฤติกรรมลักษณะนี้ว่าสภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร (Cyclic steady state) โดยปริมาณการปล่อยถ่านกัมมันต์ออกจากหอดูดซับในอุตสาหกรรมนั้นจะอยู่ที่ 5-15 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็นอัตราส่วน 0.05-0.15 เมื่อเทียบกับปริมาณถ่านกัมมันต์ทั้งหมดในหอดูดซับ (x_{pulse}) [18,19]

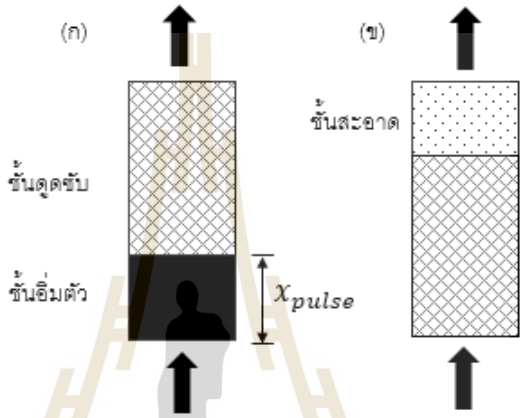


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีขาออกและเวลาของหอดูดซับแบบพัลส์

2.8 แบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์

จากหลักการทำงานของการดูดซับแบบพัลส์ที่กล่าวไปข้างต้น พบว่ามีลักษณะการทำงานในขั้นตอนการดูดซับคล้ายกับการทำงานของหอดูดซับแบบเบดนิ่งหรือกล่าวคือมีลักษณะของการเกิดปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลภายในหอดูดซับที่เหมือนกัน ดังนั้นสมการสมดุลมวลสารของหอดูดซับแบบพัลส์จะเหมือนกับสมการของหอดูดซับแบบเบดนิ่ง แต่เนื่องจากการทำงานของหอดูดซับจะมีการนำถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวแล้วออกทางด้านล่างของหอดูดซับ และมีการป้อนถ่านกัมมันต์ใหม่เข้าทางด้านบนของหอดูดซับทำให้สภาวะเริ่มต้นของหอดูดซับแบบพัลส์ต่างจากแบบเบดนิ่ง คือ หลังจากทำการปล่อยถ่านกัมมันต์ออกทางด้านล่างของหอดูดซับในปริมาณ $X_{pulse}L$ นั้นน้ำเชื่อมในบริเวณดังกล่าวก็

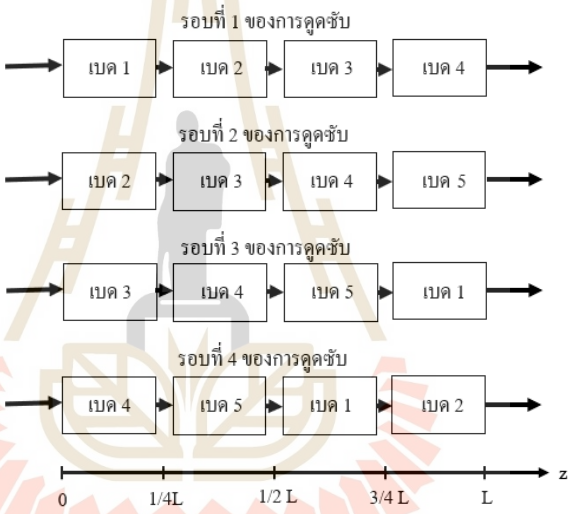
จะถูกปล่อยออกเช่นเดียวกันทำให้โปรไฟล์ความเข้มสีในช่วงนั้นจะหายไปด้วย จากนั้นถ่านกัมมันต์ที่เหลือในหอดูดซับ (ที่ $Z \leq (1- X_{pulse})L$) จะเลื่อนลงมาที่บริเวณทางเข้าด้านล่างของหอดูดซับทำให้โปรไฟล์ความเข้มสีที่เหลือจะถูกเลื่อนลงมาด้วย และป้อนถ่านกัมมันต์เข้าทางด้านบนของหอดูดซับ ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ป้อนเข้าใหม่นี้เป็นถ่านกัมมันต์สะอาดหรือถูกฟื้นฟูสภาพอย่างสมบูรณ์แล้วโดยที่ไม่มีอนุภาคสีเจือปน (c=0 และ q=0) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งสมมติฐานดังกล่าวเหมือนกับในงานวิจัยของ Svedberg และ Roland



รูปที่ 2.9 ชั้นของถ่านกัมมันต์ในหอดูดซับแบบพัลส์ รูปที่ (ก) ก่อนการพัลส์เมื่อหอดูดซับทำงานจนถึงระยะเวลาครบรอบ และ รูปที่ (ข) หลังการพัลส์ (ลูกศรแสดงทิศทางการไหลของของไหล)

งานวิจัยของ Svedberg (1975) ศึกษาแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับที่มีการไหลสวนทางและมีการทำงานเป็นรอบ (Periodic countercurrent operation) ซึ่งแสดงลักษณะการทำงานในรูปที่ 2.10 คือการนำหอดูดซับแบบเบดนิ่งมาต่อกันแบบอนุกรม (Series) จำนวนสี่หอดูดซับ โดยในรอบแรกของการดำเนินงานจะป้อนสารที่หอดูดซับแรกให้ไหลผ่านหอดูดซับหมายเลข 1 2 3 และ 4 เมื่อเวลาผ่านไปถึงจุดเบรคทรู (Breakthrough point) จะหยุดการป้อนเข้าสารแล้วนำถ่านกัมมันต์ในหอดูดซับหมายเลข 1 ไปทำการฟื้นฟูสภาพ ในขณะเดียวกันนั้นก็นำหอดูดซับหมายเลข 5 ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สะอาดมา (c=0 และ q=0) มาต่อที่หอดูดซับสุดท้าย (ต่อหอดูดซับหมายเลข 4) แล้วทำการป้อนสารเข้าหอดูดซับแรก (หอดูดซับหมายเลข 2) ทำเช่นนี้วนไปเรื่อยๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองที่พิจารณาความต้านทานการถ่ายโอนมวลผ่านชั้นฟิล์ม ความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในอนุภาคของตัวดูดซับ และพิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ซึ่งแก้สมการแบบจำลองดังกล่าวด้วยระเบียบวิธีของแครงก์-นิโคสัน (Crank-Nicolson finite difference method) ซึ่งพบว่าการจำลองหอดูดซับในลักษณะนี้สามารถทำให้ใช้ถ่านกัมมันต์ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

งานวิจัยของ Roland (1977) ศึกษาแบบจำลองการดูดซับสารที่มีหลายองค์ประกอบ (Multicomponent) ด้วยถ่านกัมมันต์ โดยการนำหอดูดซับแบบเบดนิ่งมาต่อกันแบบอนุกรมทำให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องในลักษณะการไหลสวนทางกันและมีการทำงานเป็นรอบๆ ซึ่งแสดงลักษณะการทำงานสำหรับการต่อหอดูดซับแบบอนุกรมจำนวนสี่หอดูดซับในรูปที่ 2.10 โดยการทำงานในกระบวนการนี้นั้นมีลักษณะคล้ายกับการทำงานในหอดูดซับแบบพัลส์เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Svedberg ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ โดยพิจารณาความต้านทานการถ่ายโอนมวลผ่านชั้นฟิล์ม (Film resistance) และการถ่ายโอนมวลภายในอนุภาคของตัวดูดซับ (Pore resistance) และไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ซึ่งแก้สมการแบบจำลองดังกล่าวด้วยระเบียบวิธีคอลโลเคชัน (Collocation method) [3,19-20]



รูปที่ 2.10 หอดูดซับแบบเบดนิ่งต่อกันแบบอนุกรมจำนวน 4 หอดูดซับ โดยมีลักษณะไหลแบบสวนทางและทำงานเป็นรอบ

สมการการทำสมดุลมวลของตัวถูกดูดซับที่ไหลผ่านตัวดูดซับภายในหอดูดซับแบบพัลส์ประกอบด้วยการถ่ายโอนมวลเนื่องจากการผสมตามแนวแกน การพามวล และการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเช่นเดียวกับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ถูกแสดงไว้ในรูปสมการไร้หน่วยดังนี้

2.8.1 แบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

สมการแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนมีสมมติฐาน ดังนี้

1) กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่

2) อัตราเร็วของการดูดซับประมาณได้ด้วยแบบจำลองแรงขับเชิงเส้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3) สมการสมดุลการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

4) ไม่พิจารณาการเสื่อมสภาพของถ่านกัมมันต์เนื่องจากการใช้งาน และการปรับปรุงคุณภาพ กล่าวคือค่าคงที่สมดุลการดูดซับของถ่านกัมมันต์มีค่าคงที่

5) ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

$$\frac{\partial C}{\partial t} = u_i \frac{\partial C}{\partial Z} - \frac{Q_0}{C_0}\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right)\frac{\partial q}{\partial t} \tag{2.8}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k(C\text{-}C_{eq}) \tag{2.9}$$

สภาวะเริ่มต้น

ที่รอบแรกของการดูดซับ

$C(Z, t=0) = 0$ และ $q(Z, t=0) = 0$

ที่รอบถัดไปของการดูดซับ ($t=Nt_{cycle}$)

$$C = \begin{cases} 0 \text{ เมื่อ } Z \geq (1- X_{pulse})L \\ C(t=Nt_{cycle}, Z-X_{pulse}L) \text{ เมื่อ } Z \leq (1- X_{pulse})L \end{cases}$$

$$q = \begin{cases} 0 \text{ เมื่อ } Z \geq (1- X_{pulse})L \\ q(t=Nt_{cycle}, Z-X_{pulse}L) \text{ เมื่อ } Z \leq (1- X_{pulse})L \end{cases}$$

สภาวะขอบเขต

$C(Z=0, t) = C_0$

2.8.2 แบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

สมการแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนมีสมมติฐาน ดังนี้

1) กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่

2) อัตราเร็วของการดูดซับประมาณได้ด้วยแบบจำลองแรงขับเชิงเส้น

3) สมการสมดุลการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

4) ไม่พิจารณาการเสื่อมสภาพของถ่านกัมมันต์เนื่องจากการใช้งาน และการปรับปรุงคุณภาพ กล่าวคือค่าคงที่สมดุลการดูดซับของถ่านกัมมันต์มีค่าคงที่

5) พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - u_i \frac{\partial C}{\partial Z} - \frac{Q_0}{C_0}\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right)\frac{\partial q}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k(C\text{-}C_{eq}) \quad (2.11)$$

สภาวะเริ่มต้น

ที่รอบแรกของการดูดซับ

$C(Z, t=0) = 0$ และ $q(Z, t=0) = 0$

ที่รอบถัดไปของการดูดซับ ($t=Nt_{cycle}$)

$$C = \begin{cases} 0 \text{ เมื่อ } Z \geq (1- X_{pulse})L \\ C(t=Nt_{cycle}, Z-X_{pulse}L) \text{ เมื่อ } Z \leq (1- X_{pulse})L \end{cases}$$

$$q = \begin{cases} 0 \text{ เมื่อ } Z \geq (1- X_{pulse})L \\ q(t=Nt_{cycle}, Z-X_{pulse}L) \text{ เมื่อ } Z \leq (1- X_{pulse})L \end{cases}$$

สภาวะขอบเขต

$$\frac{\partial C}{\partial Z}\Big|_{Z=0} = \frac{u}{Da}(C-1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial Z}\Big|_{Z=L} = 0$$

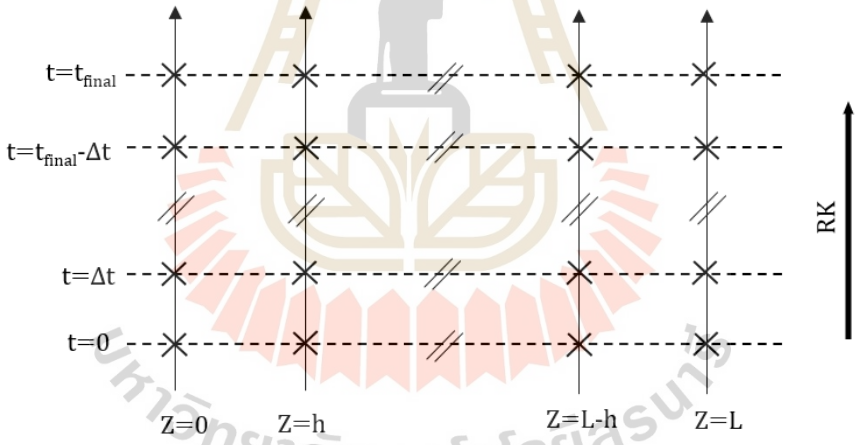
2.8.3 การหาผลเฉลยของสมการแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์

จากสมการแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์ที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย และจากการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ที่ต้องมีการนำตัวดูดซับที่อิ่มตัวออกจากหอดูดซับและนำตัวดูดซับใหม่ป้อนเข้าหอดูดซับ ทำให้แบบจำลองนี้มีความซับซ้อนและไม่สามารถแก้ปัญหาด้วยวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขในการหาผลเฉลยของแบบจำลองนี้ ในงานวิจัยของ Roland ใช้วิธีเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ (Method of characteristics) ในการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์สามัญและอินทิเกรตสมการดังกล่าวด้วยการปรับปรุงระเบียบวิธีของออยเลอร์ (Modified Euler method) [19] แต่ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบเส้นในการหาผลเฉลยของแบบจำลอง เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวก มีผลเฉลยที่ยอมรับได้และได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถใช้ได้ดีกับกระบวนการที่ภาวะสถานะไม่คงตัว [21]

2.9 วิธีเชิงตัวเลขแบบเส้น

วิธีเชิงตัวเลขแบบเส้นเป็นวิธีที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์สามัญโดยใช้การประมาณค่าในพจน์ Spatial derivative ด้วยระเบียบวิธีผลต่างแบบจำกัด (Finite difference) ระเบียบวิธีองค์ประกอบจำกัด (Finite element) และระเบียบวิธีปริมาณจำกัด (Finite volume) จากนั้นหาผลเฉลยของสมการที่ได้นี้ด้วยวิธีการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ เช่น ระเบียบวิธีของออยเลอร์ และระเบียบวิธีของรุงเงคุตตาเป็นต้น โดยอินทิเกรตจากเวลาเริ่มต้น (t=0) จนเวลาสุดท้าย ($t=t_{final}$) [22-23]

การหาผลเฉลยด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบเส้นจะต้องแบ่งจำนวนจุดบนแกนระยะทาง ($0 \le Z \le L$) ให้เหมาะสมเนื่องจากจะส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องของผลเฉลยของสมการ ซึ่งจำนวนจุดที่แบ่งนี้ขึ้นอยู่กับความกว้างของช่วงคำนวณ (Step size) ซึ่งสามารถการหาความกว้างของช่วงคำนวณที่เหมาะสมด้วยการเพิ่มจำนวนจุดบนแกนระยะทางจนกระทั่งค่าของผลเฉลยไม่เปลี่ยนแปลง เพื่อช่วยลดผลกระทบของความคลาดเคลื่อนจากการตัดปลาย (Truncation error)



รูปที่ 2.11 การประมาณสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยสมการเชิงอนุพันธ์สามัญโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบเส้น

ขนาดความกว้างของช่วงคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.13) ดังนี้

$$h=L/(N-1) \qquad (2.13)$$

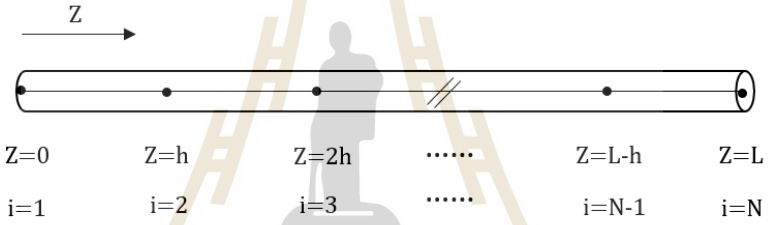
เมื่อ h คือ ขนาดความกว้างของช่วงคำนวณ [เมตร]

L คือ ความยาวของเบด [เมตร]

N คือ จำนวนจุดบนแกนระยะทาง

2.9.1 ระเบียบวิธีผลต่างแบบจำกัด

จากการทำสมการสมดุลมวลการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งและแบบพัลส์ (สมการที่ 2.8 และ 2.10) พบว่าเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่มีตัวแปรต้น 2 ตัว คือเวลาและระยะทาง โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างแบบจำกัดในการประมาณพจน์ Spatial derivative หรือพจน์ที่ขึ้นกับระยะทางได้ดังนี้ ใช้วิธีการประมาณแบบทวนลม หรือ Bias-upwinding approximation ในการประมาณพจน์ผลจากการพามวลของของไหล $\left(\frac{\partial C}{\partial Z}\right)$ เนื่องจากการพามวลของของไหลจะขึ้นกับทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลภายในหอดูดซับคือเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา และใช้วิธีการประมาณแบบตรงกลาง หรือ Central difference approximation ในการประมาณพจน์ผลจากการผสมของของไหล $\left(\frac{\partial^2 C}{\partial Z^2}\right)$ เนื่องจากการผสมของของไหลภายในหอดูดซับไม่ขึ้นทิศทางการไหล



รูปที่ 2.12 การแบ่งหอดูดซับออกเป็นส่วนๆตามความยาวของดูดซับ เมื่อ i แทนลำดับของจุดบนหอดูดซับที่ถูกแบ่ง และ Z แทนระยะทางจากทางเข้าหอดูดซับจนถึงจุดที่ต้องการพิจารณาการประมาณพจน์การผลจากการพามวลของของไหล $\left(\frac{\partial C}{\partial Z}\right)$

จุดที่ 1 ประมาณค่าอนุพันธ์โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างจำกัดแบบไปข้างหน้า (Forward difference approximation) ดังนี้

$$\frac{\partial C(i)}{\partial Z} = \frac{-C(i)+C(i+1)}{h} + O(h) \qquad (2.14)$$

จุดที่ 2 ถึง 3 ประมาณค่าอนุพันธ์โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างจำกัดแบบไปข้างหน้า (Forward difference approximation) ดังนี้

$$\frac{\partial C(i)}{\partial Z} = \frac{-C(i-1)+C(i)}{h} + O(h) \qquad (2.15)$$

จุดที่ 3 ถึง N-4 ประมาณค่าอนุพันธ์โดยใช้ 5 point bias-upwinding approximation ดังนี้

$$\frac{\partial C(i)}{\partial Z}=\frac{3C(i+1)+10C(i)-18C(i-1)+6C(i-2)-C(i-3)}{12h}+O(h^4) \qquad (2.16)$$

จุดที่ N-4 ถึง N ประมาณค่าอนุพันธ์โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างจำกัดแบบย้อนหลัง (Backward difference approximation) ดังนี้

$$\frac{\partial C(i)}{\partial Z}=\frac{-C(i-1)+C(i)}{h}+O(h) \qquad (2.17)$$

การประมาณพจน์ผลจากการกระจายตัวของของไหล $\left(\frac{\partial^2 C}{\partial Z^2}\right)$

จุดที่ 1 ประมาณค่าอนุพันธ์โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างจำกัดแบบไปข้างหน้า (Forward difference approximation) ดังนี้

$$\frac{\partial^2 C(i)}{\partial Z^2}=\frac{\frac{-145}{6}C(i)+96C(i+1)-36C(i+2)+\frac{32}{3}C(i+3)-\frac{3}{2}C(i+4)}{12h^2}+O(h^4) \qquad (2.18)$$

จุดที่ 2 ประมาณค่าอนุพันธ์โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างจำกัดแบบไปข้างหน้า (Forward difference approximation) ดังนี้

$$\frac{\partial^2 C(i)}{\partial Z^2}=\frac{10C(i)-15C(i+1)-4C(i+2)+14C(i+3)-6C(i+4)+C(i+5)}{12h^2}+O(h^4)$$

(2.19)

จุดที่ 3 ถึง N-2 ประมาณค่าอนุพันธ์โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างจำกัดแบบตรงกลาง (Central difference approximation) ดังนี้

$$\frac{\partial^2 C(i)}{\partial Z^2}=\frac{-C(i+2)+16C(i+1)-30C(i)+16C(i-1)-C(i-2)}{12h^2}+O(h^4) \quad (2.20)$$

จุดที่ N-1 ประมาณค่าอนุพันธ์โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างจำกัดแบบย้อนหลัง (Backward difference approximation) ดังนี้

$$\frac{\partial^2 C(i)}{\partial Z^2}=\frac{10C(i+1)-15C(i)-4C(i-1)+14C(i-2)-6C(i-3)-C(i-4)}{12h^2}+O(h^4)$$

(2.21)

จุดที่ N ประมาณค่าอนุพันธ์โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างจำกัดแบบย้อนหลัง (Backward difference approximation) ดังนี้

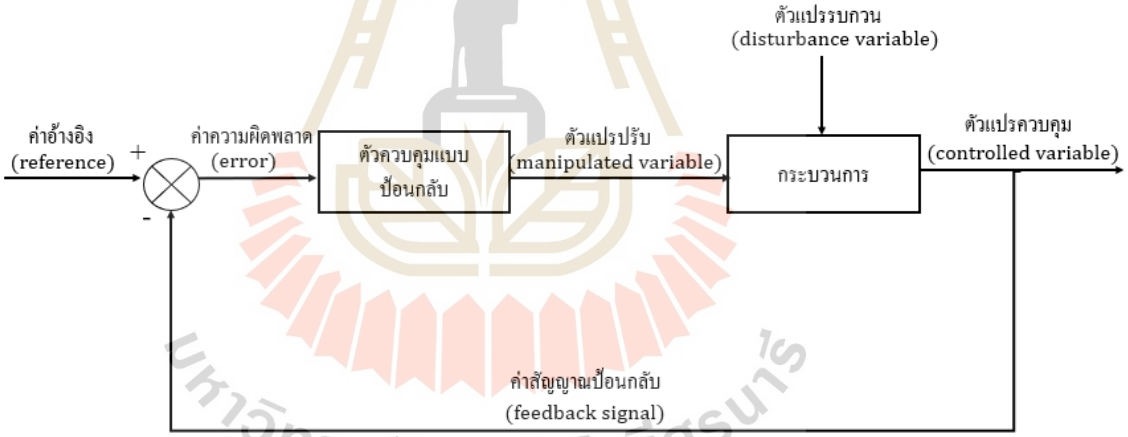
$$\frac{\partial^2 C(i)}{\partial Z^2} = \frac{\frac{-145}{6}C(i) + 96C(i-1) - 36C(i-2) + \frac{32}{3}C(i-3) - \frac{3}{2}C(i-4) - 50\frac{\partial C(i)}{\partial Z}\Delta Z}{12h} + O(h^4) \quad (2.22)$$

2.10 ระบบควบคุม

ระบบควบคุม หมายถึง การควบคุมระบบหรือกระบวนการให้ได้ค่าตัวแปรควบคุมตามที่กำหนด

2.10.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control)

การควบคุมแบบป้อนกลับมีหลักการคือการวัดค่าตัวแปรควบคุมที่ออกจากกระบวนการแล้วส่งสัญญาณป้อนกลับเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง จากนั้นนำผลต่างที่ได้ไปคำนวณเพื่อปรับตัวแปรปรับให้ได้ค่าของตัวแปรควบคุมตามที่กำหนด ซึ่งแสดงแผนผังการทำงานของการควบคุมแบบป้อนกลับไว้ดังรูป 2.13

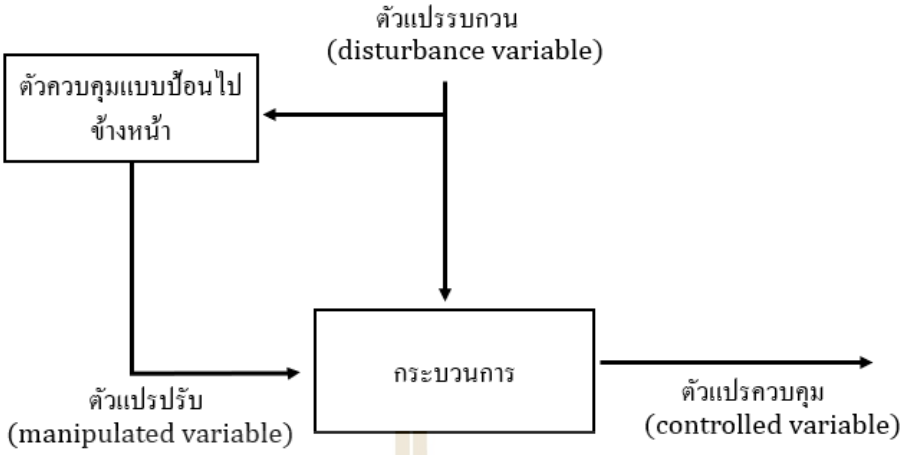


รูปที่ 2.13 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

2.10.2 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward control)

การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้ามีหลักการทำงานคือวัดค่าตัวแปรรบกวนก่อนเข้าระบบแล้วส่งสัญญาณไปยังสมการหรือแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรรบกวนและการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ เพื่อปรับตัวแปรปรับให้ได้ค่าแปรควบคุมตามค่าที่กำหนด ดังนั้นประสิทธิภาพของการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้านี้ต้องอาศัยความถูกต้องของสมการหรือแบบจำลองดังกล่าว ซึ่งแสดงแผนผังการทำงานของการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าไว้ดังรูป 2.14 [24-26]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.14 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

2.10.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบควบคุม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการควบคุมพื้นฐานของระบบใดๆ สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. หาจากสมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ของตัวแปรใดๆ แล้วนำไปจัดให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออกหรือฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วฟังก์ชันถ่ายโอนนี้จะถูกเขียนอยู่ในรูปของโดเมนความถี่มากกว่าโดเมนเวลา

2. หาจากการทดสอบผลตอบสนองของระบบด้วยการป้อนค่าตัวแปรขาเข้าใดๆ แล้วบันทึกผลตอบสนองของตัวแปรขาออกที่ได้ จากนั้นนำไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออกของระบบ

2.10.4 สัญญาณป้อนเข้า

1) สัญญาณป้อนเข้าแบบอิมพัลส์ (Impulse)

$$f(t) = \begin{cases} M & t=0 \\ 0 & t\neq 0 \end{cases}$$

2) สัญญาณป้อนเข้าแบบขั้น (Step) สัญญาณนี้จะแสดงถึงการที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t<0 \\ M & t\geq 0 \end{cases}$$

3) สัญญาณป้อนเข้าแบบแรมป์ (Ramp) สัญญาณนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตามเวลา

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t<0 \\ At & t\geq 0 \end{cases}$$

4) สัญญาณป้อนเข้าแบบเป็นช่วง (Periodical signal) คือ สัญญาณที่มีรูปร่างเหมือนกันในทุกๆช่วงเวลา เช่น ฟังก์ชันไซนูซอยด์ (Sinusoidal function) และ ฟังก์ชันโคไซน์ (Cosine function) เป็นต้น

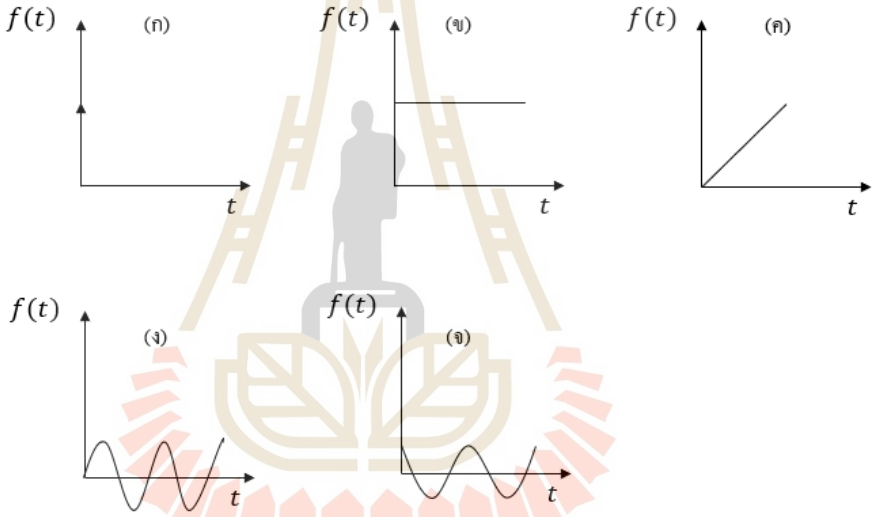
$$f(t) = \begin{cases} 0 & t<0 \\ A\sin(\omega t) & t\geq 0 \end{cases}$$

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t<0 \\ A\cos(\omega t) & t\geq 0 \end{cases}$$

เมื่อ $f(t)$ คือ ฟังก์ชันของสัญญาณที่ขึ้นกับตัวแปรเวลา

t คือ เวลา

M, A และ ω คือ ค่าคงตัว



รูปที่ 2.15 สัญญาณการป้อนเข้าระบบแบบต่างๆ (ก) สัญญาณป้อนเข้าแบบอิมพัลส์ (ข) สัญญาณป้อนเข้าแบบขั้น (ค) สัญญาณป้อนเข้าแบบแรมป์ (ง) สัญญาณป้อนเข้าแบบไซนูซอยด์ และ (จ) สัญญาณป้อนเข้าแบบโคไซน์ ตามลำดับ

2.10.5 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุม

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุมมีหลักการพื้นฐานคือการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงหรือถูกรบกวน โดยการเลือกสัญญาณป้อนเข้าที่จะนำมาทดสอบระบบนี้จะขึ้นอยู่กับรูปแบบการทำงานของกระบวนการในสภาวะการณ์ทำงานจริง โดยที่สัญญาณแบบขั้นบันไดจะแสดงถึงระบบที่ถูกรบกวนและทำให้เปลี่ยนแปลงในทันทีทันใด

สัญญาณแบบแรมป์แสดงถึงการค่อยๆเปลี่ยนแปลงตามเวลา และสัญญาณแบบเป็นช่วงแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของระบบอย่างเป็นช่วงๆตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน เป็นต้น

จากการศึกษาการควบคุมการทำงานของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน และกระบวนการโครมาโทรกราฟรีแบบจำลองเบดเคลื่อนที่พบว่าทั้งสองกระบวนการนี้มีลักษณะการทำงานแบบฟังก์ชันชั่วระยะเวลา (Periodical function) หรือประพฤติตัวในลักษณะภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร (Cyclic steady state) เช่นเดียวกับกระบวนการดูดซับภายในหอดูดซับแบบพัลส์ดังที่กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้า โดยจากการศึกษากระบวนการที่เกี่ยวข้องดังกล่าวพบว่ามีการใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานของแต่ละขั้นตอน (Time duration ในกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน และ switching time ในกระบวนการโครมาโทรกราฟรีแบบจำลองเบดเคลื่อนที่) เป็นตัวแปรปรับสำหรับการควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการให้ได้ค่าตัวแปรควบคุมตามที่กำหนดเนื่องจากตัวแปรดังกล่าวส่งผลกระทบโดยตรงต่อตัวแปรควบคุมที่ออกจากระบบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ระยะเวลาครบรอบเป็นตัวแปรปรับในการศึกษาการควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ [10,17,27] โดยในงานวิจัยดังกล่าวมีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมจากผลตอบสนองของกระบวนการที่เกิดขึ้นดังนี้

1. ช่วงเวลาตอบสนอง (Response time) คือ ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มป้อนสัญญาณรบกวนระบบจนกระทั่งผลตอบสนองเริ่มเข้าใกล้ค่าผลตอบสนองในสภาวะคงตัวหรือมีค่าความผิดพลาดจากค่าผลตอบสนองในสภาวะคงตัวไม่เกินร้อยละ 5 หรือร้อยละ 2 ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่บ่งบอกว่าระบบใช้เวลานานเท่าใดในการปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงตัว สำหรับกระบวนการที่เป็นสภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรค่าของช่วงเวลาตอบสนองจะหมายถึงจำนวนรอบของกระบวนการก่อนเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรหลังจากมีการรบกวนการทำงานของกระบวนการ

2. ค่าผลต่างมากที่สุดของความคลาดเคลื่อน (Maximum error) คือ ค่าผลต่างมากที่สุดของตัวแปรควบคุมกับค่าที่กำหนด (Set point) หลังเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร

ค่าผลต่างมากที่สุด = ค่าที่กำหนด – ค่าความเข้มสีขาออก (2.23)

3. ค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อน (Integral of Square of Error: ISE)

$$SE=\int_0^t e^2(t)dt \qquad (2.24)$$

เมื่อ $e^2(t)$ คือ กำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตัวแปรควบคุมกับค่าที่กำหนด

T คือ เวลาที่พิจารณา [วินาที]

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเรื่องการจำลองและการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าของหอดูดซับแบบพัลส์ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาแบบจำลองที่สามารถอธิบายการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ โดยแบบจำลองดังกล่าวพัฒนาจากค่าพารามิเตอร์ของการทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง อีกทั้งยังศึกษาหาระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมและการควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ด้วยการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า ซึ่งมีวิธีการดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1) เครื่องต้นแบบของหอดูดซับแบบเบดนิ่งดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 23 เซนติเมตร
2) ปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump)
3) อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Temperature-controlled water bath)
4) อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaking water bath)
5) เครื่องรีแฟลกโตมิเตอร์ (Refractometer)
6) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)
7) เครื่องเขย่าตะแกรง (Sieve shaker)
8) เครื่องชั่ง
9) นาฬิกาจับเวลา
10) ขวดรูปชมพู่พร้อมฝาเกลียว
11) บีกเกอร์
12) ช้อนตักสาร
13) แท่งแก้วคนสาร
14) กระดาษกรอง
15) กระปุกพลาสติกพร้อมฝาปิดสำหรับเก็บตัวอย่าง

16) เตาอบ

17) เครื่องกรองสุญญากาศ

18) ผ้าขาวบาง

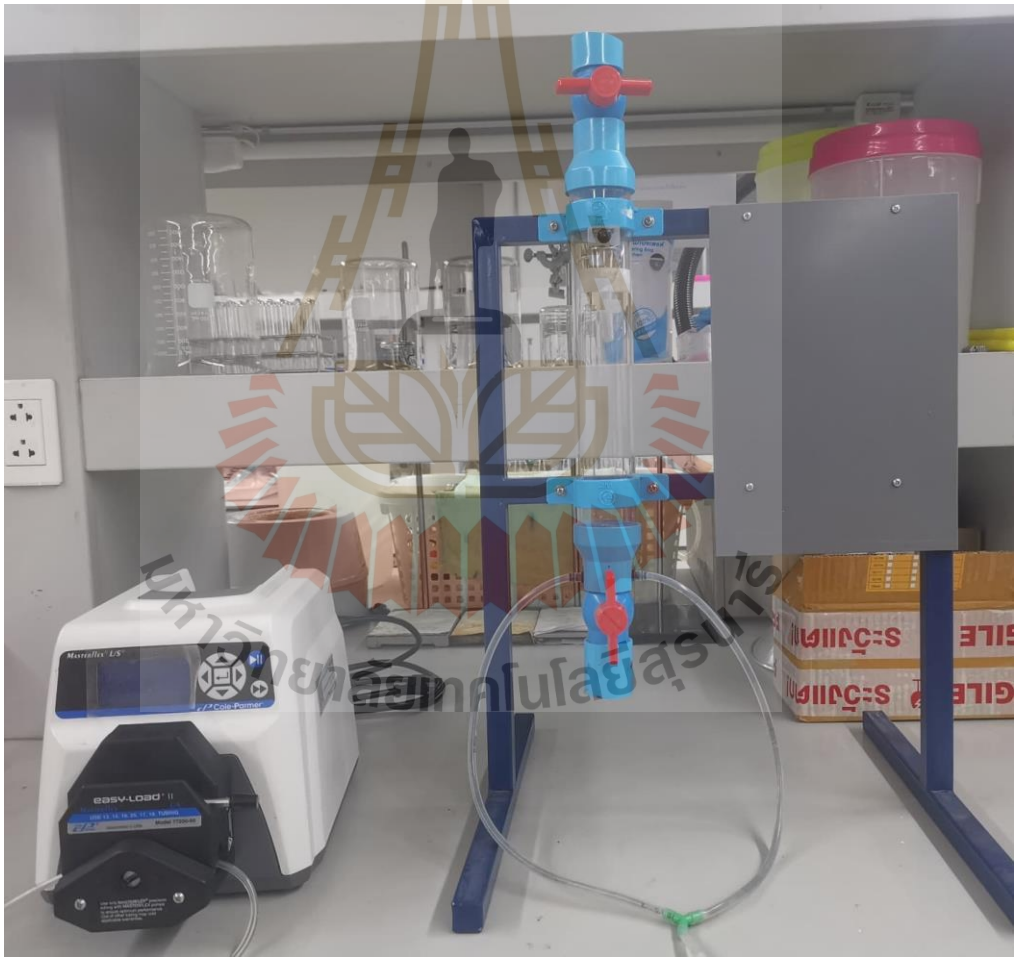
3.1.2 วัสดุและสารเคมี

1) ถ่านกัมมันต์ทางการค้า Norit Mag 30I

2) น้ำตาลทรายแดง

3) น้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์จากน้ำอ้อย

4) น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)



รูปที่ 3.1 เครื่องต้นแบบของหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การหากราฟมาตรฐาน (Calibration curve) สำหรับการเตรียมน้ำเชื่อมที่มีค่าสีต่างๆ ที่ค่าความเข้มข้นของของเข็ง 65 Brix

1) เติมน้ำตาลทรายแดงลงในบีกเกอร์ 4 บีกเกอร์ น้ำหนักบีกเกอร์ละ 5 10 15 และ 20 กรัม ตามลำดับ
2) เติมน้ำตาลทรายขาวลงในแต่ละบีกเกอร์ โดยให้แต่ละบีกเกอร์มีน้ำหนักรวมของน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายแดง 65 กรัม
3) เติมน้ำปราศจากไอออนลงไปบีกเกอร์ละ 35 มิลลิลิตร และคนให้สารละลายผสมเข้าด้วยกันด้วยแท่งแก้วคนสาร ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิคงที่ 70 องศาเซลเซียส
4) รอจนสารละลายเย็นตัวลงแล้วนำสารละลายที่เตรียมไว้แต่ละบีกเกอร์ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร
5) นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเข้มสีในสารละลายโดยใช้สมการที่ 3.1

$$\text{ICUMSA} = \frac{\text{Abs}(420\text{nm}) \times 10000}{\text{conc. of total solid}(\text{g}/\text{cm}^3) \times \text{cell length (mm)}} \qquad (3.1)$$

6) นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำตาลทรายขาวและค่าความเข้มสีในหน่วย ICUMSA เพื่อดูปริมาณน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายแดงที่ต้องใช้ในการเตรียมน้ำเชื่อมที่ค่าความหวาน 65 Brix ที่ค่าความเข้มสีต่างๆ

3.2.2 การทดสอบการดูดซับสีในขวดรูปชมพู่ (Flask test)

1) นำถ่านกัมมันต์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.3 มิลลิเมตร มาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2) ใส่ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไว้ลงในขวดรูปชมพู่ปริมาณ 0.1 0.5 2.5 5.5 15.0 17.5 20.0 และ 30.0 กรัม ตามลำดับ และบีกเกอร์ที่ไม่ใส่ถ่านกัมมันต์สำหรับเป็นบีกเกอร์ควบคุมจากนั้นเติมน้ำเชื่อมที่มีค่าสี 700 ICUMSA ค่าความหวาน 65 Brix และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละขวดปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วปิดฝาขวดรูปชมพู่ให้สนิท

3) นำไปใส่ในอ่างอวบคุมอุณภูมิแบบเขย่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4) นำตัวอย่างที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ เพื่อแยกถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำเชื่อม จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มสีด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

3.2.3 การทดลองการดูดซับสีในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง (Fixed bed column test)

1) นำถ่านกัมมันต์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.3 มิลลิเมตร มาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2) นำถ่านที่เตรียมไว้ไปแช่ในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีการคนถ่านกัมมันต์เป็นระยะ เพื่อกำจัดฟองอากาศที่อยู่ภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้อย่างทั่วถึง

3) ทำการบรรจุถ่านกัมมันต์แบบเปียก (Wet packing) ลงในหอดูดซับ โดยการเทของผสมระหว่างถ่านกัมมันต์และน้ำปราศจากไอออนลงไปในคอลัมน์ และมีการเปิดวาล์วด้านล่างให้น้ำไหลออกตลอดเวลา แต่ระดับน้ำต้องสูงกว่าระดับของเบดตลอดการบรรจุจนมีระดับของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์สูง 20 เซนติเมตร แล้วทำการปิดวาล์ว

4) ป้อนน้ำเชื่อมที่เตรียมไว้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ค่าความเข้มสี 700 ICUMSA และค่าความหวาน 65 Brix ผ่านปั๊มเข้าทางด้านล่างคอลัมน์ จากนั้นเริ่มจับเวลา

5) เก็บตัวอย่างน้ำเชื่อมที่ไหลออกทางด้านบนของคอลัมน์ โดยจะเริ่มเก็บตัวอย่างแรก เมื่อถึงเวลาคงอยู่ (Space time)

6) นำตัวอย่างที่เก็บได้ไปวิเคราะห์ค่าความหวานด้วยเครื่องรีแฟลกโตมิเตอร์ และวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)

7) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีที่ทางออกของหอดูดซับและเวลา หรือ กราฟเบรคทรู

3.2.4 การทดลองการดูดซับสีในหอดูดซับแบบพัลส์ (Pulsed bed column test)

1) นำถ่านกัมมันต์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.3 มิลลิเมตร มาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2) นำถ่านที่เตรียมไว้ไปแช่ในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีการคนถ่านกัมมันต์เป็นระยะ เพื่อกำจัดฟองอากาศที่อยู่ภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้อย่างทั่วถึง
3) ทำการบรรจุถ่านกัมมันต์แบบเปียกลงในหอดูดซับ โดยการเทของผสมระหว่างถ่านกัมมันต์และน้ำปราศจากไอออนลงไปในคอลัมน์ และมีการเปิดวาล์วด้านล่างให้น้ำไหลออกตลอดเวลา แต่ระดับน้ำต้องสูงกว่าระดับของเบดตลอดการบรรจุ จนมีระดับของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์สูง 23 เซนติเมตร แล้วทำการปิดวาล์วน้ำ
4) ป้อนน้ำเชื่อมใสไม่มีสีที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และค่าความหวาน 65 Brix ผ่านปั๊มเข้าทางด้านล่างคอลัมน์ จนค่าความหวานที่ทางออกของคอลัมน์มีค่า 65 Brix เพื่อไล่น้ำปราศจากไอออนที่อยู่ภายในคอลัมน์
5) ป้อนน้ำเชื่อมที่เตรียมไว้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ค่าความเข้มสี 700 ICUMSA และค่าความหวาน 65 Brix ผ่านปั๊มเข้าทางด้านล่างคอลัมน์ จากนั้นเริ่มจับเวลา
6) เก็บตัวอย่างน้ำเชื่อมที่ไหลออกทางด้านบนของคอลัมน์ทุก 3 นาที
7) หยุดป้อนน้ำเชื่อมเมื่อถึงระยะเวลาครบรอบ (cycle time) แล้วเปิดวาล์วด้านล่างคอลัมน์เพื่อนำถ่านกัมมันต์บางส่วนออก
8) ป้อนถ่านกัมมันต์เข้าทางด้านบนของคอลัมน์ แล้วกดสวิตซ์ปั๊มเพื่อทำการป้อนน้ำเชื่อมเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์
9) ทำซ้ำข้อที่ 6-8 จำนวน 10 ครั้ง
10) นำตัวอย่างที่เก็บได้ไปวิเคราะห์ค่าความหวานด้วยเครื่องรีแฟลกโตมิเตอร์ และวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)
11) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีที่ทางออกของหอดูดซับและเวลา หรือ กราฟเบรคทรู

3.3 การสร้างแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

ในงานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการดูดซับภายในหอดูดซับแบบพัลส์จากการพัฒนาแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง โดยเริ่มจากการทำสมดุลมวลภายใน

หอดูดซับทั้งวัฏภาคของแข็ง และวัฏภาคของเหลว ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน และแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ดังนี้

3.3.1 แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการดูดซับภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่งจากการทำสมดุลมวลภายในหอดูดซับทั้งวัฏภาคของแข็ง และวัฏภาคของไหล ซึ่งแสดงในสมการที่ 2.8 และ 2.9 ในรูปตัวแปรไร้หน่วย โดยมีสมมติฐานของแบบจำลอง ดังนี้

สมมติฐานของแบบจำลอง

1) กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่

2) อัตราเร็วของการดูดซับประมาณได้ด้วยแบบจำลองแรงขับเชิงเส้น

3) สมการสมดุลการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

4) ค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับมีค่าคงที่

5) ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

$$\frac{\partial C}{\partial t} = u_i \frac{\partial C}{\partial Z} - \frac{Q_0}{C_0}\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right)\frac{\partial q}{\partial t} \tag{2.8}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k(C - C_{eq}) \tag{2.9}$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

เงื่อนไขเริ่มต้น คือ

$$C(Z, t=0) = 0 \quad \text{และ} \quad q(Z, t=0) = 0$$

เงื่อนไขขอบเขต คือ

$$C\left(Z=0, t\right) = C_0$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองการดูดซับ

ชื่อพารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
เส้นผ่านศูนย์กลางหอดูดซับ	0.05	เมตร [m]
ความสูงหอดูดซับ	0.2	เมตร [m]
เส้นผ่านศูนย์กลางถ่านกัมมันต์	1.12	มิลลิเมตร [mm]
ค่าช่องว่างภายในเบด	0.4	-
ค่าความหนาแน่นของน้ำเชื่อม	1315.30	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [kg/m^3]
ค่าความหนืดของน้ำเชื่อม	0.0124	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรวินาที [kg/ms]
สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคสีในน้ำเชื่อม (D_m)	6.55×10^{-11}	ตารางเมตรต่อวินาที [m^2/s]
สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคสีภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (D_e)	6.55×10^{-11}	ตารางเมตรต่อวินาที [m^2/s]

3.3.2 แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

ในงานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการดูดซับภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่งจากการทำสมดุลมวลภายในหอดูดซับทั้งวัฏภาคของแข็ง และวัฏภาคของไหล ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.9) และ (2.8)

สมมติฐานของแบบจำลอง

1) กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่

2) อัตราเร็วของการดูดซับประมาณได้ด้วยแบบจำลองแรงขับเชิงเส้น

3) สมการสมดุลการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

4) ค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับมีค่าคงที่

5) พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - u_i \frac{\partial C}{\partial Z} - \frac{Q_0}{C_0}\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right)\frac{\partial q}{\partial t} \qquad (2.10)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k(C\text{-}C_{eq}) \qquad (2.9)$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

เงื่อนไขเริ่มต้น คือ

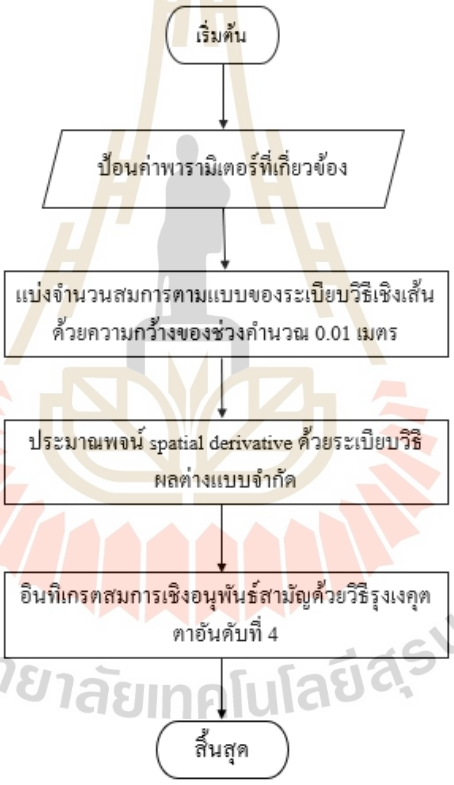
$$C(Z,t=0) = 0 \text{ และ } q(Z,t=0) = 0$$

เงื่อนไขขอบเขต คือ

$$\frac{\partial C}{\partial Z}\Big|_{Z=0} = \frac{u}{Da}(C-1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial Z}\Big|_{Z=L} = 0$$

3.4 การแก้สมการแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข



รูปที่ 3.2 แผนภูมิขั้นตอนการแก้สมการ

จากการทำสมดุลมวลของการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งจะได้บางสมการเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ทำให้ไม่สามารถแก้ได้โดยตรงในโปรแกรม Scilab ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบเส้นเพื่อประมาณพจน์ในแกนระยะทางให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญด้วยการประมาณค่าแบบ Finite difference โดยประมาณพจน์ผลจากการพามวลของของไหลด้วย Central approximation และประมาณพจน์ผลของการกระจายตัวในแนวแกนด้วย Bias upwind

approximation จากนั้นอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์สามัญที่ได้ด้วยวิธีรุงเงคุตตาลำดับที่สี่ (Runge Kutta) โดยค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และแสดงลำดับขั้นตอนการแก้สมการไว้ในรูปที่ 3.4 ดังนี้ และการหาความกว้างของช่วงคำนวณที่เหมาะสมสำหรับการแก้สมการแบบจำลองในสมการนี้ด้วยการลดความกว้างของช่วงคำนวณทีละครึ่งจนกระทั่งผลเฉลยที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งความกว้างของช่วงคำนวณนั้นหาได้จากสมการที่ (2.12)

3.5 การหาค่าพารามิเตอร์

ในงานวิจัยนี้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับไหลและการดูดซับภายในหอดูดซับแบบพัลส์จากข้อมูลการทดลองการดูดซับภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ดังนี้

3.5.1 แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

ใช้วิธีหาเส้นโค้งที่เหมาะสม (Curve fitting) ระหว่างผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับใน หอดูดซับแบบเบดนิ่งและสมการแบบจำลองของคลินเคนเบิร์ก เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และค่าคงที่สมดุลการดูดซับที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GRG Nonlinear ในฟังก์ชัน Solver โดยมีการกำหนดวัตถุประสงค์และข้อจำกัด ดังนี้

3.5.1.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) คือค่าผลรวมของผลต่างกำลังสองของความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดระหว่างค่าความเข้มสีขาออกต่อค่าความเข้มสีขาเข้าที่ได้จากการทดลองและได้จากสมการแบบจำลองของคลินเคนเบิร์ก แสดงในสมการที่ (3.2) ดังนี้

$$\text{Objective function}=\min \sum_{j=1}^{3}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{C_{exp,i,j}}{C_{0,j}}-\frac{C_{Klinkenberg,i,j}}{C_{0,j}}\right)^2 \qquad (3.2)$$

โดยที่ j เท่ากับ 1 2 และ 3 คือการทดลองที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิตรต่อนาที หรือ เลขเรย์โนล (Re) 4.68 x 10^{-3} 7.02 x10^{-3} และ 9.36 x10^{-3} ตามลำดับ

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลการทดลองที่แต่ละอัตราการไหล

เมื่อ $C_{0,j}$ คือ ค่าความเข้มสีขาเข้าที่ในการทดลองที่อัตราการไหล j [ICUMSA]

$C_{exp,i,j}$ คือ ค่าความเข้มสีขาออกที่ได้จากการทดลองที่เวลา i และอัตราการไหล j [ICUMSA]

$C_{Klinkenber,i,j}$ คือ ค่าความเข้มสีขาออกที่ได้จากสมการคลินเคนเบิร์กที่เวลา i และอัตราการไหล j [ICUMSA]

3.5.2.2 ข้อจำกัด (Constrain)

3.5.2.3 ค่าคงที่การดูดซับคงที่เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น

3.5.2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น

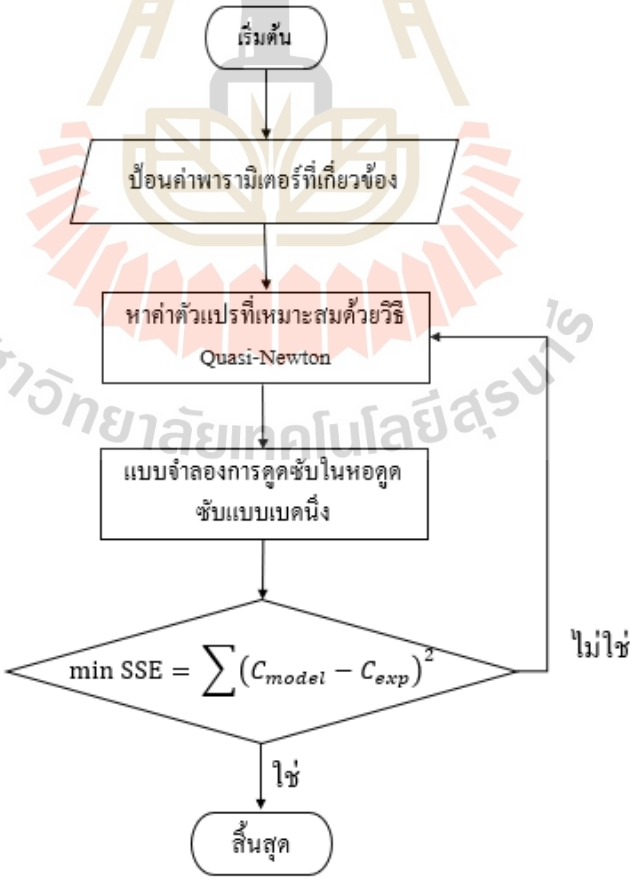
3.5.2 แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

3.5.2.1 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์กระจายตัวในแนวแกน

ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกนจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเพคเลคและตัวเลขเรย์โนล (รูปที่ 2.4) โดยพิจารณาที่เลขเรย์โนล 4.68 x 10^{-3} 7.02 x10^{-3} และ 9.36 x10^{-3} หรือที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิตรต่อนาที ตามลำดับ

3.5.2.2 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และค่าคงที่การดูดซับ

ใช้วิธีการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมด้วยวิธีการคล้ายนิวตัน หรือ Quasi-Newton [28] เพื่อทำให้ค่าความเข้มสีขาออกระหว่างข้อมูลผลการทดลองของการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งและสมการแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งมีค่าผลต่างกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด (Least square error) โดยใช้คำสั่ง Datafit ในโปรแกรม Scilab



รูปที่ 3.3 แผนภูมิขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้คำสั่ง Datafit ในโปรแกรม Scilab

3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

แบบจำลองที่ใช้อธิบายการทำงานของหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ได้สามารถตรวจสอบความถูกต้องจากการหาค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองของค่าความเข้มสีที่ทางออกของคอลัมน์ที่ได้จากข้อมูลการทดลอง และแบบจำลองที่กล่าวมาก่อนหน้า ซึ่งแสดงสมการการหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE) ดังนี้

$$MAE=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|C_{model}-C_{exp}\right|}{n} \tag{3.11}$$

3.7 การสร้างแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์

แบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์ของงานวิจัยนี้พัฒนามาจากแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง เนื่องจากมีการเกิดปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลภายในหอดูดซับเช่นเดียวกัน ดังนั้นจากการทำสมดุลมวลภายในหอดูดซับแบบพัลส์จะได้สมการเช่นเดียวกับการทำสมดุลมวลภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่งดังแสดงในสมการที่ (2.7) ถึง (2.9) แต่การเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขเริ่มต้นที่รอบถัดไปของการพัลส์ โดยค่าความเข้มสีของสารละลายที่ตำแหน่งสุดท้ายก่อนการพัลส์จะมีค่าเท่ากับค่าความเข้มสีของสารละลายที่ตำแหน่งแรกของการพัลส์ในรอบถัดไป และมีการเติมถ่านกัมมันต์ที่สะอาดเข้าทางด้านบนของหอดูดซับ (C_i=0) ซึ่งแบ่งการศึกษาแบบจำลองของหอดูดซับแบบพัลส์นี้ออกเป็น 2 กรณี คือ แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน และแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

3.7.1 แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

สมการสมดุลมวลสารภายในหอดูดซับแบบพัลส์สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนแสดงในสมการที่ (2.7) และ (2.8) ดังนี้

สมมติฐานของแบบจำลอง

1) กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่

2) อัตราเร็วของการดูดซับประมาณได้ด้วยแบบจำลองแรงขับเชิงเส้น

3) สมการสมดุลการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

4) ค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับมีค่าคงที่

5) ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

6) ป้อนถ่านกัมมันต์สะอาดที่ยังไม่ผ่านการดูดซับเข้าทางด้านบนของหอดูดซับ

$$\frac{\partial C}{\partial t} = u_i \frac{\partial C}{\partial Z} - \frac{Q_0}{C_0}\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right)\frac{\partial q}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k(C\text{-}C_{eq}) \quad (2.9)$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

เงื่อนไขเริ่มต้น คือ

รอบที่แรกของการดำเนินงาน

$C(Z, t=0) = 0$ และ $q(Z, t=0) = 0$

รอบอื่นๆของการดำเนินงาน

$$C = \begin{cases} 0 \text{ เมื่อ } Z \geq (1- X_{pulse})L \\ C(t=Nt_{cycle}, Z-X_{pulse}L) \text{ เมื่อ } Z \leq (1- X_{pulse})L \end{cases}$$

$$q = \begin{cases} 0 \text{ เมื่อ } Z \geq (1- X_{pulse})L \\ q(t=Nt_{cycle}, Z-X_{pulse}L) \text{ เมื่อ } Z \leq (1- X_{pulse})L \end{cases}$$

เงื่อนไขขอบเขต คือ

$C(Z=0, t) = C_0$

3.7.2 แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

สมการสมดุลมวลสารภายในหอดูดซับแบบพัลส์สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนแสดงในสมการที่ (3.6) และ (3.7) ดังนี้

สมมติฐานของแบบจำลอง

1) กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่

2) อัตราเร็วของการดูดซับประมาณได้ด้วยแบบจำลองแรงขับเชิงเส้น

3) สมการสมดุลการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

4) ค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับมีค่าคงที่

5) พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

6) ป้อนถ่านกัมมันต์สะอาดที่ยังไม่ผ่านการดูดซับเข้าทางด้านบนของหอดูดซับ

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - u_i \frac{\partial C}{\partial Z} - \frac{Q_0}{C_0}\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right)\frac{\partial q}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k(C\text{-}C_{eq}) \quad (2.9)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

เงื่อนไขเริ่มต้น คือ

รอบที่แรกของการดำเนินงาน

$C(Z, t=0) = 0$ และ $q(Z, t=0) = 0$

รอบอื่นๆของการดำเนินงาน

$$C = \begin{cases} 0 \text{ เมื่อ } Z \geq (1- X_{pulse})L \\ C(t=Nt_{cycle}, Z-X_{pulse}L) \text{ เมื่อ } Z \leq (1- X_{pulse})L \end{cases}$$

$$q = \begin{cases} 0 \text{ เมื่อ } Z \geq (1- X_{pulse})L \\ q(t=Nt_{cycle}, Z-X_{pulse}L) \text{ เมื่อ } Z \leq (1- X_{pulse})L \end{cases}$$

เงื่อนไขขอบเขต คือ

$$\frac{\partial C}{\partial Z}|_{Z=0} = \frac{u}{Da}(C - 1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial Z}|_{Z=L} = 0$$

3.8 การแก้สมการแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

เนื่องจากแบบจำลองของหอดูดซับแบบพัลส์ถูกพัฒนามาจากหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ดังนั้นจึงใช้วิธีการหาผลเฉลยของหอดูดซับแบบพัลส์ด้วยวิธีเดียวกับการหาผลเฉลยของหอดูดซับแบบเบดนิ่งและใช้ขนาดความกว้างของช่วงคำนวณเท่ากับการหาผลเฉลยของหอดูดซับแบบเบดนิ่งด้วยดังแสดงในหัวข้อ 3.4 เมื่อมีการพิจารณาและตรวจสอบแล้วว่าวิธีดังกล่าวมีความถูกต้องตามหัวข้อ 3.6

3.9 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์

งานวิจัยนี้ตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มสีขาออกที่ได้จากแบบจำลองและได้จากการทำการทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์ที่เวลาต่างๆ

3.10 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

ในการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเพื่อควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ในกระบวนการลดค่าสีของน้ำเชื่อมในงานวิจัยนี้มีการพิจารณาตัวแปรต่างๆ ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตัวแปรปรับ (Manipulated variable) คือ ระยะเวลาครบรอบ (Cycle time)

ตัวแปรรบกวน (Disturbance variable) คือ ค่าความเข้มสีขาเข้า (Inlet concentration)

ตัวแปรควบคุม (Controlled variable) คือ ค่าความเข้มสีขาออก (Outlet concentration)

3.10.1 การสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างเวลาครบรอบที่เหมาะสมกับค่าความเข้มสีขาเข้าของการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์

การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าในการควบคุมการทำงานหอดูดซับแบบพัลส์ต้องอาศัยสมการความสัมพันธ์ระหว่างเวลาครบรอบที่เหมาะสมกับค่าความเข้มสีขาเข้าที่อัตราการไหลต่างๆ เพื่อควบคุมค่าสีขาออกให้ได้ตามที่กำหนด (ค่าสีขาออก ≤ 100 ICUMSA) โดยเริ่มจากการหาระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมที่ค่าความเข้มสีขาเข้าต่างๆ คือ 500 600 700 800 900 1000 และ 1200 ICUMSA จากแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์ที่สร้างไว้ในหัวข้อ 3.7 และ ใช้การทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมและค่าความเข้มสีขาเข้า ซึ่งแสดงไว้ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\boldsymbol{\tau}_{cycle,opt}$ และ $\ln(C_{inlet}-100)$

เมื่อ $\boldsymbol{\tau}_{cycle,opt}$ คือ ระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมของหอดูดซับแบบพัลส์

C_{inlet} คือ ค่าความเข้มสีขาเข้า

3.10.2 การรบกวนกระบวนการ

จากขั้นตอนการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าในการควบคุมกระบวนการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์โดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรรบกวนและตัวแปรควบคุมดังกล่าว มีขั้นตอนการรบกวนเพื่อสังเกตุผลตอบสนองระบบ ซึ่งนำไปใช้ในการหาประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมในหัวข้อ 3.10.3 ดังนี้

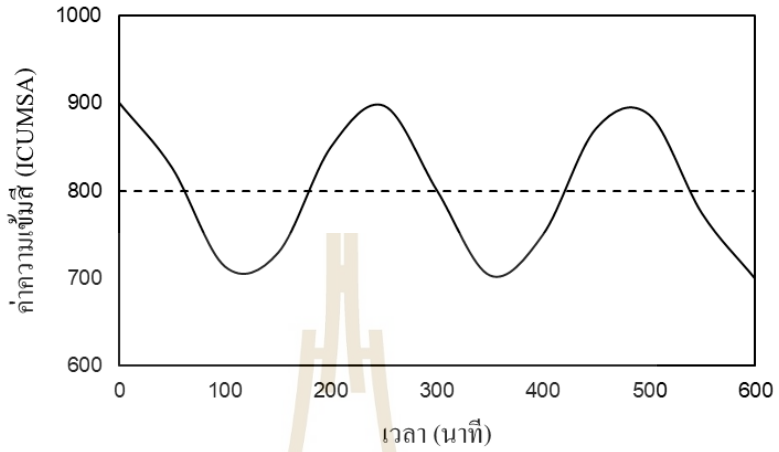
3.10.2.1 เมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้น

การรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนแปลงค่าสีขาเข้าแบบขั้น คือ เปลี่ยนแปลงจากค่าสีขาเข้าลดลงแบบทันทีทันใดจาก 700 เป็น 500 ICUMSA และ เปลี่ยนแปลงจากค่าสีขาเข้าเพิ่มขึ้นทันทีทันใดจาก 700 เป็น 900 ICUMSA แล้วสังเกตผลตอบสนองของระบบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มสีขาออกของหอดูดซับ

3.10.2.2 เมื่อมีการรบกวนระบบแบบโคไซน์

การรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนแปลงค่าสีขาเข้าแบบโคไซน์ คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าสีขาเข้าเพิ่มขึ้นและลดลงแบบแกว่งตั้งแต่ค่าสี 700 ถึง 900 ICUMSA ในลักษณะของฟังก์ชันโคไซน์ โดยมีค่าเฉลี่ยของค่าความเข้มสี 800 ICUMSA และคาบของการแกว่ง

4 ชั่วโมง ซึ่งการรบกวนระบบในลักษณะนี้ใช้แทนการรบกวนที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ จากนั้นสังเกตผลตอบสนองของระบบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มสีขาออกของหอดูดซับ



รูปที่ 3.4 สัญญาณค่าความเข้มสีขาเข้าสำหรับการรบกวนระบบแบบโคไซน์

3.10.3 การหาประสิทธิภาพของการควบคุม

ในงานวิจัยนี้หาประสิทธิภาพของการควบคุมจากคุณลักษณะของผลตอบสนองหลังมีการรบกวนกระบวนการการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากในขั้นตอนที่ 3.10.2 ดังนี้

3.10.3.1 ช่วงเวลาตอบสนอง หาจากจำนวนรอบของการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ก่อนเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรหลังจากมีการรบกวนการทำงานของระบบหรือมีผลต่างจากผลตอบสนองที่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรไม่เกินร้อยละ 2

3.10.3.2 ค่าผลต่างมากที่สุดของความคลาดเคลื่อน หาจากค่าผลต่างมากที่สุดของค่าความสีขาออกกับค่าความเข้มสีที่กำหนด (100 ICUMSA) หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร

3.10.3.3 ค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสองช่วงเวลาของผลตอบสนองเนื่องจากในงานวิจัยมีการรบกวนระบบแบบฟังก์ชันชั่วระยะในลักษณะของฟังก์ชันโคไซน์ โดยหาค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนได้จากสมการดังนี้

1) ช่วงของผลตอบสนองในภาวะชั่วครู่

$$SE=\frac{\int_{t_0}^{t_{bcss}} e^2(t)dt}{N_{cycle}} \qquad (3.12)$$

2) ช่วงตอบสนองในภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร

$$ISE=\frac{\int_{t_{bcss}}^{t_{css}} e^2(t)dt}{N_{cycle}} \quad (3.13)$$

เมื่อ $e^2(t)$ คือ กำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตัวแปรควบคุมกับค่าที่กำหนด

t คือ เวลาที่พิจารณา [วินาที]

t_0 คือ เวลาที่เริ่มมีการรบกวนระบบ [วินาที]

t_{bcss} คือ เวลาสุดท้ายก่อนระบบเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร [วินาที]

t_{fcss} คือ เวลาสุดท้ายหลังระบบเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร [วินาที]

N_{cycle} คือ จำนวนรอบของหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณา

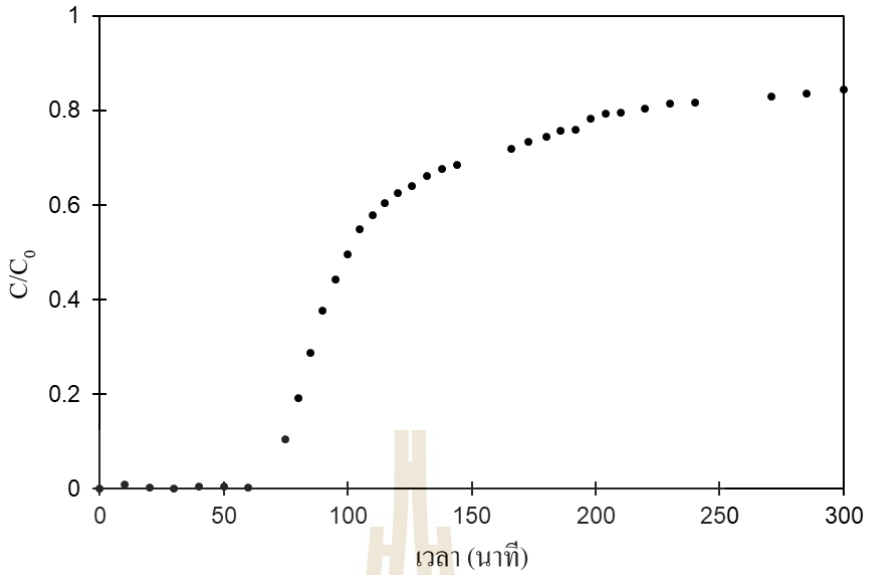
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

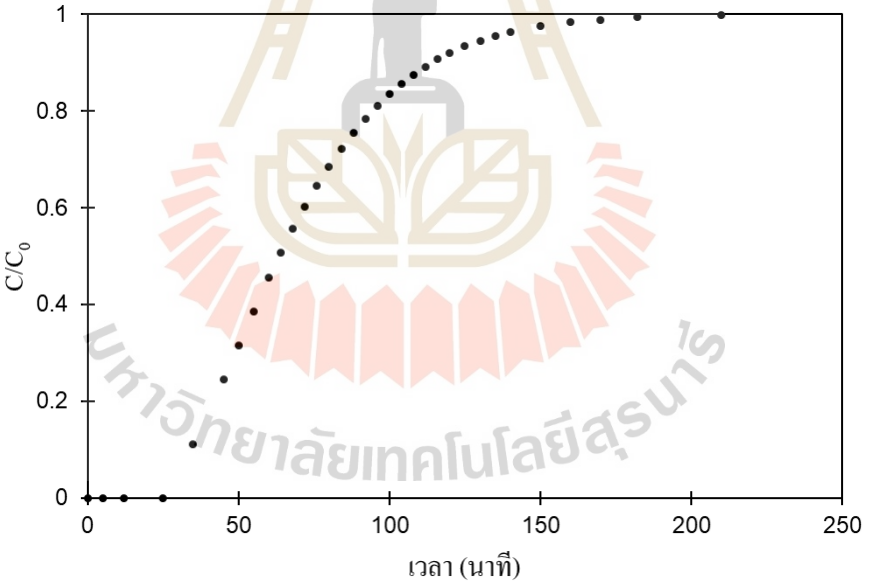
ผลการทดลองและการอภิปรายผลแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การศึกษาและการหาค่าพารามิเตอร์ในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง การศึกษาการทำงานและระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมของการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์ และการควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ด้วยระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การศึกษาการทำงานและการหาค่าพารามิเตอร์ในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

จากผลการทดลองการดูดซับอนุภาคสีของน้ำเชื่อมด้วยถ่านกัมมันต์ในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการติดตามความเข้มสีที่ทางออกของหอดูดซับเทียบกับเวลาถูกแสดงไว้ในรูปของกราฟเบรคทรู (รูปที่ 4.1 ถึง 4.3) จากนั้นนำข้อมูลเบรคทรูที่ได้ดังกล่าวมาประมาณค่าสมดุลการดูดซับ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับแบบจำลอง หอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนด้วยวิธีการทำเส้นโค้งที่เหมาะสมกับสมการคลินเคนเบิร์ก ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้นั้นในตารางที่ 4.1 จากตารางดังกล่าวพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลต่ำกว่าทั้งสองอัตราการไหลอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำจะส่งผลให้การประมาณค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ต่ำเกินจริงโดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบที่มีการกระจายตัวในแนวแกน ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งของ Ruthven และ งานวิจัยของ Wakao และ Funazkri [14, 29]

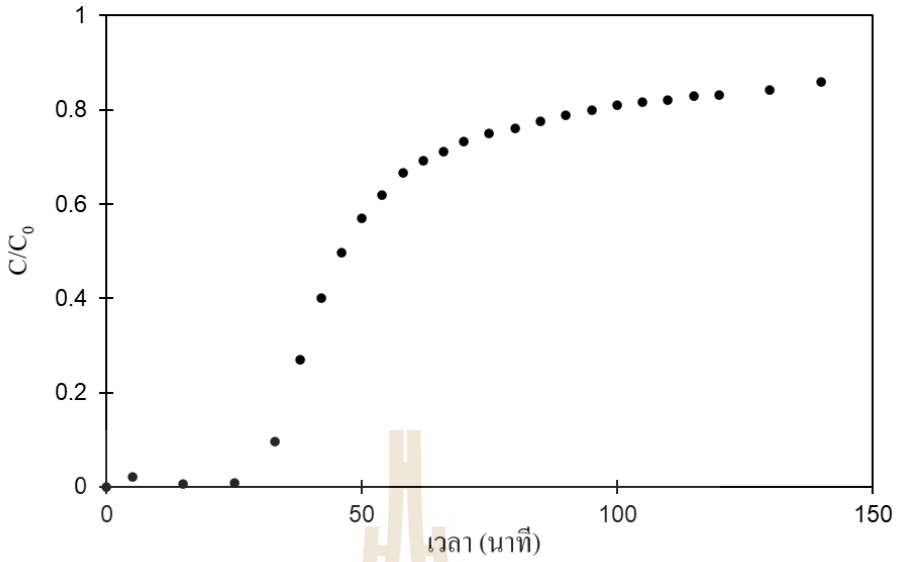


รูปที่ 4.1 กราฟเบรคทรูจากการข้อมูลทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 4 มิลลิตรต่อนาที



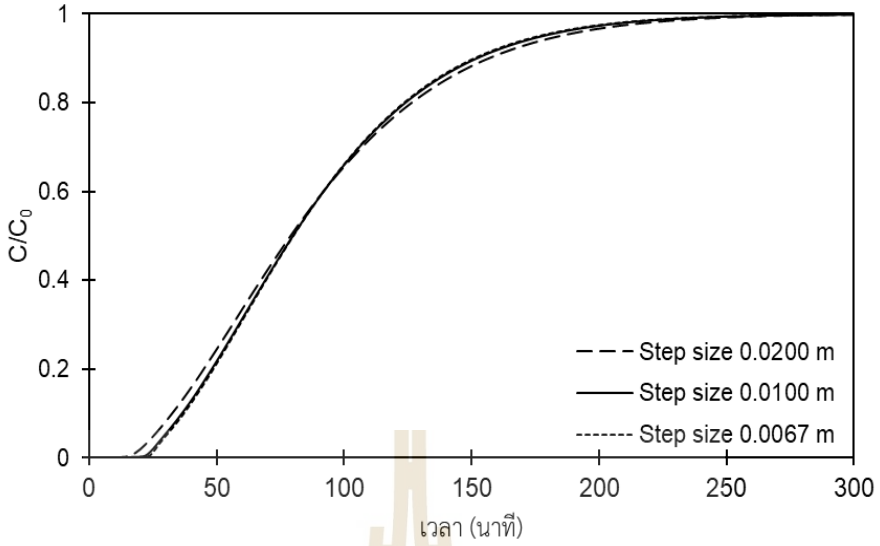
รูปที่ 4.2 กราฟเบรคทรูจากการข้อมูลทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 6 มิลลิตรต่อนาที

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.3 กราฟเบรคทรูจากการข้อมูลทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 8 มิลลิตรต่อนาที

จากการหาผลเฉลยของสมการแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งพบว่าความกว้างของช่วงคำนวณมีผลต่อความถูกต้องของผลเฉลยของสมการ โดยจากผลการศึกษาการหาความกว้างของช่วงคำนวณสำหรับแก้สมการแบบจำลองนี้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบเส้นพบว่าแบบจำลองที่ความกว้างของช่วงคำนวณ 0.02 เมตร กราฟเบรคทรูมีความแตกต่างจากกราฟ เบรคทรูที่ใช้ความกว้างของช่วงคำนวณ 0.01 เมตร เล็กน้อย แต่เมื่อลดความกว้างของช่วงคำนวณจาก 0.01 เมตร เป็น 0.0067 เมตร พบว่ากราฟเบรคทรูที่ได้จากทั้งสองความกว้างของช่วงคำนวณนั้นซ้อนทับกันหรือความเข้มสีขาออกมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.4 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ความกว้างของช่วงคำนวณที่เหมาะสมคือ 0.01 เมตร เนื่องจากมีความถูกต้องมากเพียงพอและใช้เวลาในการแก้สมการน้อยกว่าความกว้างของช่วงคำนวณ 0.0067 เมตร ซึ่งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) ระหว่างค่าความเข้มสีขาออกที่ได้จากข้อมูลการทดลองและแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่าแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนนี้สามารถใช้ทำนายการทำงานของหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิตรต่อนาทีได้ แต่ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองเนื่องจากมีผลกระทบจากการกระจายตัวในแนวแกนเกิดขึ้นและเมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อย (Re<1) หรืออัตราเร็วของการไหลในหอดูดซับมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ พบว่าการกระจายตัวในแนวแกนเป็นผลมาจากการผสมที่เกิดขึ้นในระดับโมเลกุล [16]



รูปที่ 4.4 กราฟเบรคทรูของการดูดซับภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของช่วงคำนวณ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสมดุลการดูดซับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย สำหรับแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหลขาเข้า 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เลขเรย์โนลด์	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (s^{-1})	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE)
4	4.68×10^{-3}	1.58	2.35×10^{-4}	6.66×10^{-2}
6	7.02×10^{-3}		8.08×10^{-4}	1.08×10^{-1}
8	9.36×10^{-3}		8.09×10^{-4}	6.86×10^{-2}

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกนจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเพคเลคและตัวเลขเรย์โนลด์ (รูปที่ 2.4) และนำข้อมูลการทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งมาประมาณค่าสมดุลการดูดซับและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลด้วยวิธีการทำเส้นโค้งที่เหมาะสมจากคำสั่ง Datafit ในโปรแกรม Scilab และใช้ความกว้างของช่วงคำนวณ 0.01 เมตร ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้ถูกแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกนจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณามีค่าตัวเลขเพคเลคคงที่ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลต้องเพิ่ม

มากขึ้นเพื่อไปชดเชยให้ค่าตัวเลขเพคเลคคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จากนั้นเปรียบเทียบค่าความเข้มสีขาออกที่ทำนายได้จากแบบจำลองทั้งสองชนิดกับข้อมูลการทดลองพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) ระหว่างค่าความเข้มสีขาออกที่ได้จากข้อมูลการทดลองและแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งทั้งสองแบบมีค่าไม่ต่างกันมากนัก กล่าวคือแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนสามารถอธิบายการทำงานของหอดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งได้ดีกว่าแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนอยู่เล็กน้อย เนื่องจากแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยน้อยกว่าแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

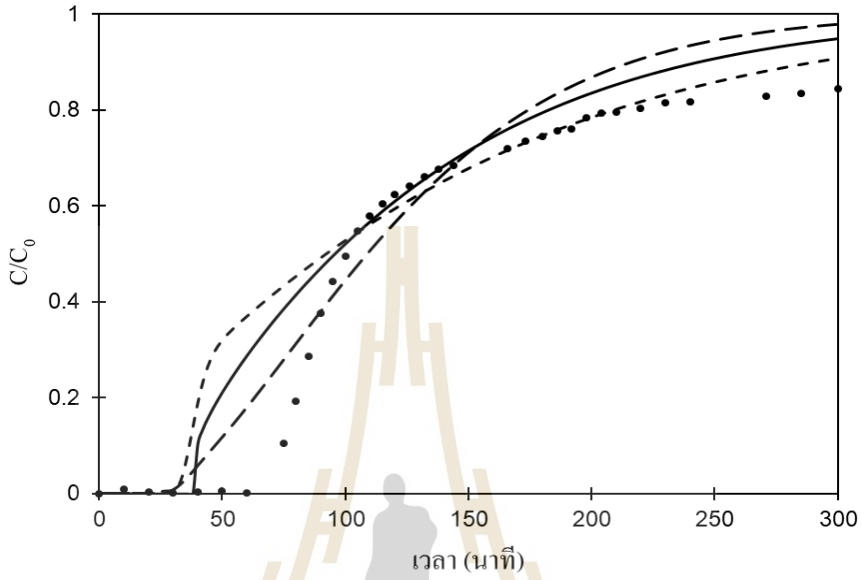
ตารางที่ 4.2 ค่าสมดุลการดูดซับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ค่าการกระจายตามแนวแกน และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย สำหรับแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหลขาเข้า 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เลขเรย์โนลด์	ค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (s^{-1})	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกน (m^2/s)	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE)
4	4.68×10^{-3}	1.44	6.50×10^{-4}	1.41×10^{-7}	7.19×10^{-2}
6	7.02×10^{-3}		9.57×10^{-4}	1.50×10^{-7}	7.58×10^{-2}
8	9.36×10^{-3}		9.68×10^{-4}	1.95×10^{-7}	6.34×10^{-2}

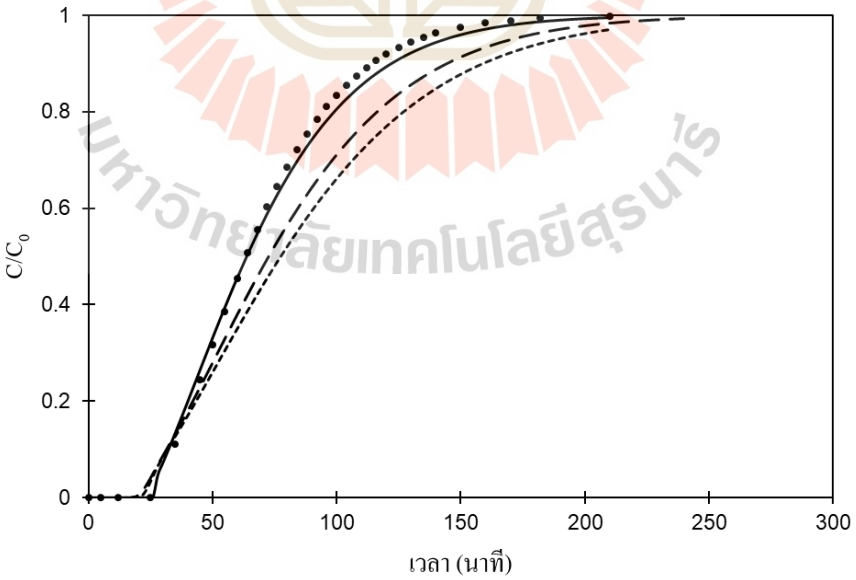
จากรูปที่ 4.5 ถึง 4.7 แสดงการเปรียบเทียบกราฟเบรคทรูของแต่ละอัตราการไหล โดยเวลาเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนและพิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งงานวิจัยนี้พิจารณาค่าความเข้มสีสูงสุดที่ยอมรับได้ที่ออกจากหอดูดซับเพื่อใช้กำหนดเวลาเบรคทรูที่ 100 ICUMSA หรือ C/C_0 มีค่า 0.143 (ค่าความเข้มสีเริ่มต้น 700 ICUMSA) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นเวลาเบรคทรูจะลดลง โดยในช่วงแรกจะเกิดการดูดซับเร็ว และการดูดซับจะลดลงเมื่อใกล้เข้าสู่สมดุลการดูดซับ

โดยที่อัตราการไหล 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาเบรคทรูของแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนจะมีค่ามากกว่าแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนอยู่

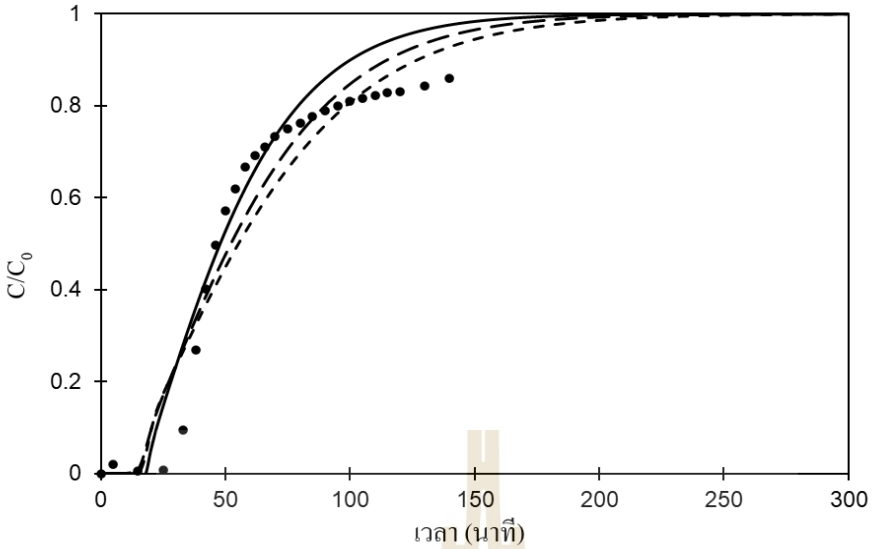
เล็กน้อย เนื่องจากความกว้างของบริเวณการถ่ายโอนมวลที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวในแนวแกน ดังแสดงในโปรไฟล์ความเข้มข้นภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่งดังรูปที่ 4.8 ถึง 4.10 และแสดงความกว้างของบริเวณการถ่ายโอนมวลในรูปที่ 4.11 ถึง 4.14



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบกราฟเบรคทรูที่อัตราการไหล 4 มิลลิตรต่อนาที ระหว่างข้อมูลการทดลอง(•), สมการ Klinkenberg (—), แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (– –)และ แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (- -)



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบกราฟเบรคทรูที่อัตราการไหล 6 มิลลิตรต่อนาที ระหว่างข้อมูลการทดลอง (•), สมการ Klinkenberg (—), แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (– –)และ แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (- -)



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบกราฟเบรคทรูที่อัตราการไหล 8 มิลลิตรต่อนาที ระหว่างข้อมูลการทดลอง (•), สมการ Klinkenberg (—), แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (– –)และ แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (- -)

ตารางที่ 4.3 เวลาเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

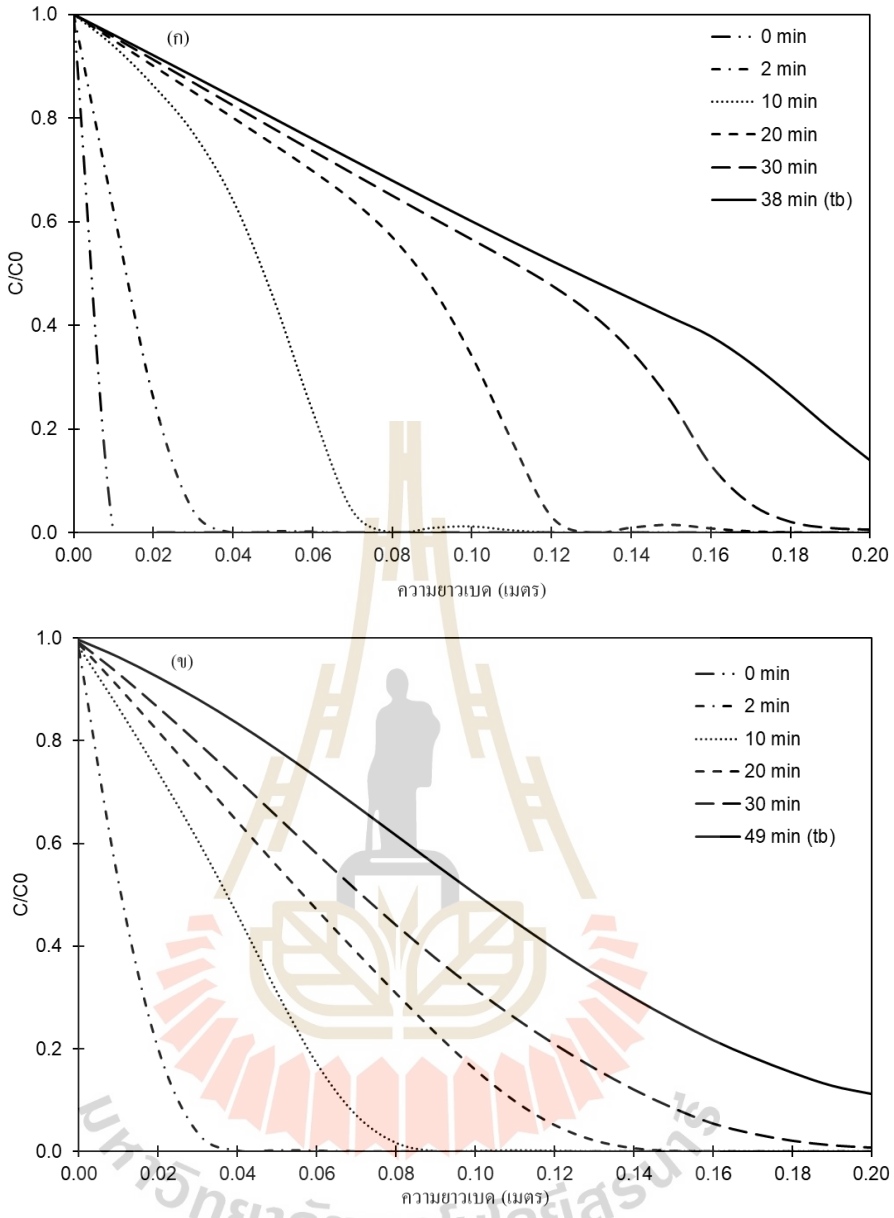
ค่าความเข้มสีเริ่มต้น (ICUMSA)	แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน			แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน		
	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)					
	4	6	8	4	6	8
	เวลาเบรคทรู (นาที)			เวลาเบรคทรู (นาที)		
500	40	33	23	55	38	25
700	38	30	21	49	34	22
900	35	28	20	45	30	20

จากรูปที่ 4.8 ถึง 4.10 แสดงการกระจายของแนวคลื่นของความเข้มข้นของการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาเบรคทรูพบว่ามีลักษณะเป็นแนวคลื่นแบบกระจาย (Dispersive wavefront) เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน พบว่าอัตราการขยายตัวของบริเวณการถ่ายโอนมวลจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจาก 0.0158 เมตรต่อนาที ที่เวลาเริ่มต้น แล้วค่อยๆลดลงเหลือ 0.033 เมตรต่อนาที ที่เวลา

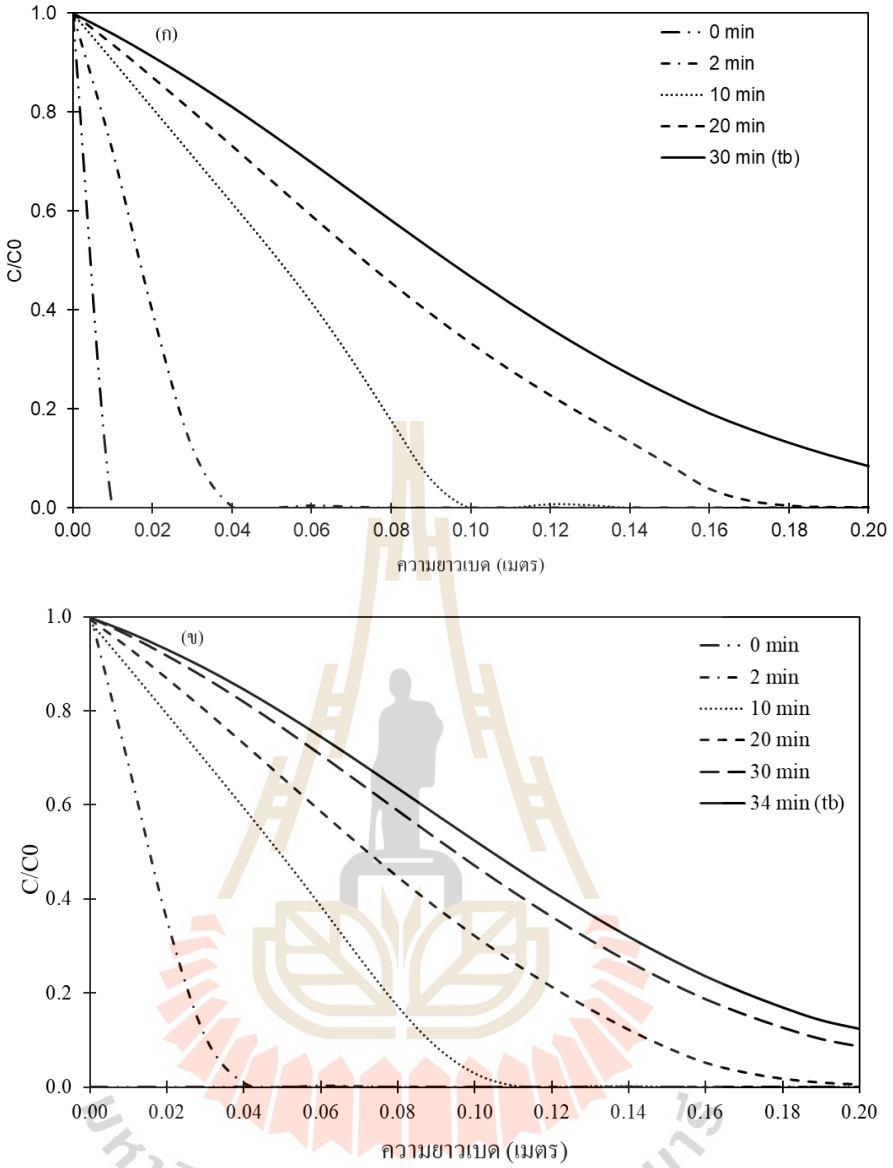
เบรคทรู คิดเป็นร้อยละ 79.11 ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งสามอัตราการไหลโดยที่ค่าเฉลี่ยของทั้งสามอัตราการไหลนี้คิดเป็นร้อยละ 76.23 และอัตราการขยายตัวของบริเวณการถ่ายโอนมวลมีแนวโน้มที่จะลดลงหลังจากเวลาเบรคทรูดังแสดงในรูปที่ 4.13 ถึง 4.14 อีกทั้งยังพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นความกว้างของบริเวณการถ่ายโอนมวลจะขยายตัวเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยอัตราการขยายตัวของบริเวณการถ่ายโอนมวลที่เวลาเบรคทรูนี้จะนำไปใช้ในการทำนายค่าเริ่มต้น (Initial guess) ของเวลาครบรอบที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ต่อไป

แต่ที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนจะมีค่ามากกว่าแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เนื่องจากในระบบที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่เลขเรย์โนลด์มีค่าน้อย (Re<3) จะส่งผลให้เกิดการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ต่ำเกินความจริง [14] ดังนั้นจึงส่งผลให้เวลาเบรคทรูที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนมีค่ามากกว่าแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนมาก แต่ยังไม่พบผลกระทบนี้สำหรับที่อัตราการไหล 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที และจากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อ ค่าความเข้มสีขาเข้าเพิ่มขึ้น เวลาเบรคทรูมีค่าลดลง เนื่องจากผลต่างระหว่างค่าความเข้มสีในวัฏภาคตัวดูดซับและวัฏภาคของไหลมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นแรงขับของการถ่ายโอนมวล จึงส่งผลให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในช่วงแรกและลดลงเมื่อเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ทำให้บริเวณการถ่ายโอนมวลขยายตัวอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเนื่องจากปริมาณตัวถูกดูดซับที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ตำแหน่งดูดซับบนพื้นผิวภายในถ่านกัมมันต์จะถูกใช้ไปรวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้เวลาเบรคทรูมีค่าลดลง โดยแสดงกราฟเบรคทรูที่ค่าความเข้มสีขาเข้า 500 700 และ 900 ICUMSA ไว้ในภาคผนวก ก

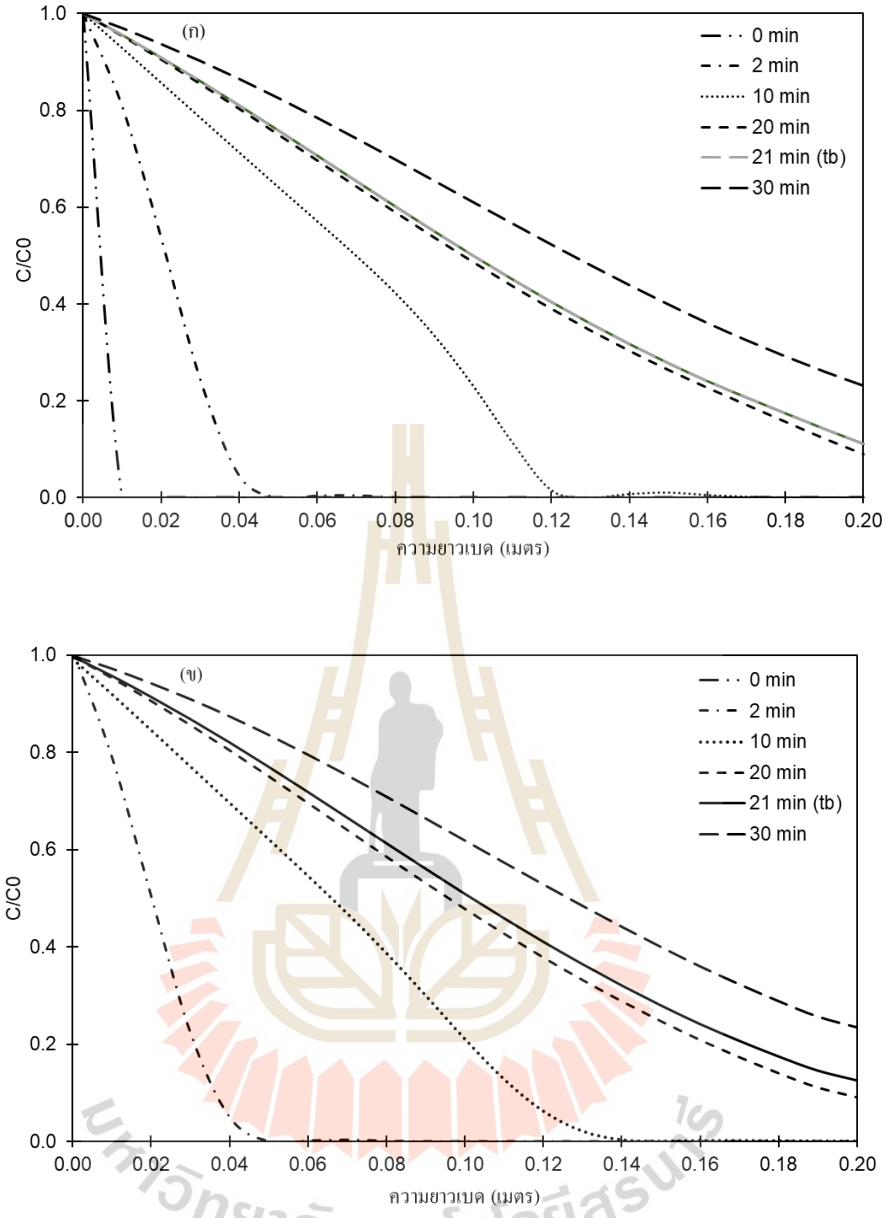
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



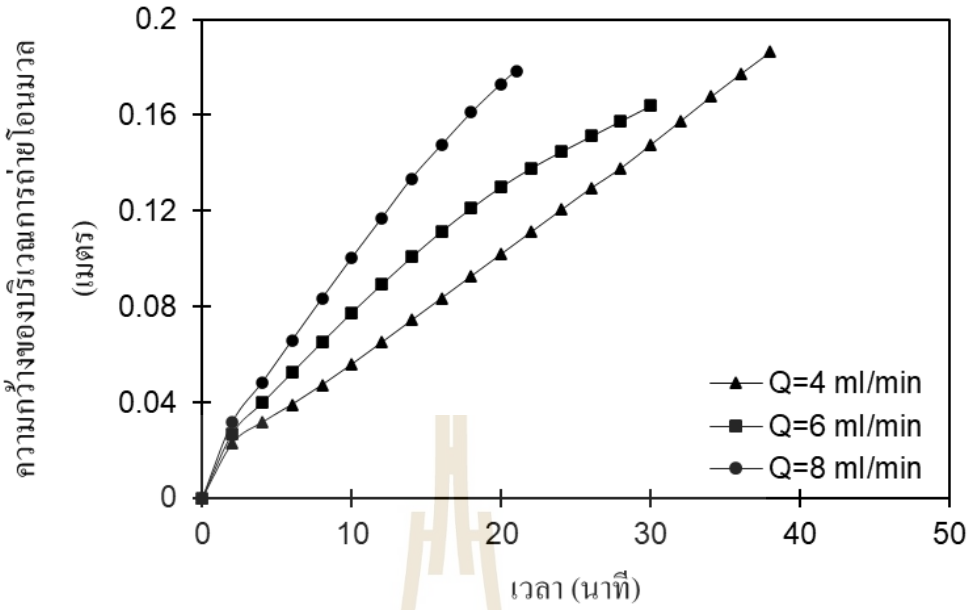
รูปที่ 4.8 การกระจายความเข้มข้นของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 4 มิลลิตรต่อนาที (ก) แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (ข) แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน



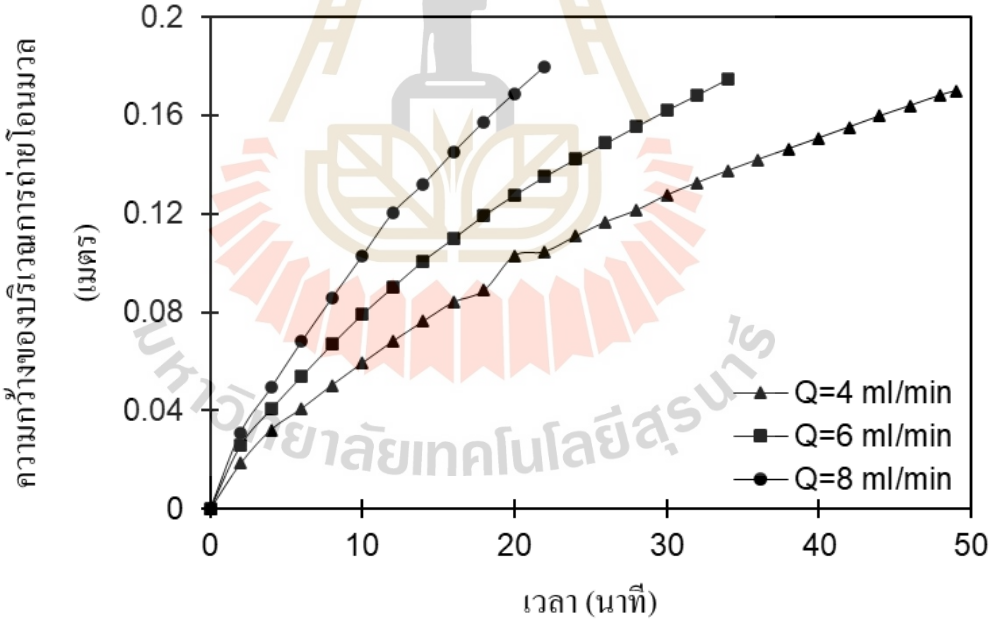
รูปที่ 4.9 การกระจายความเข้มข้นของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 6 มิลลิตรต่อนาที (ก) แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (ข) แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน



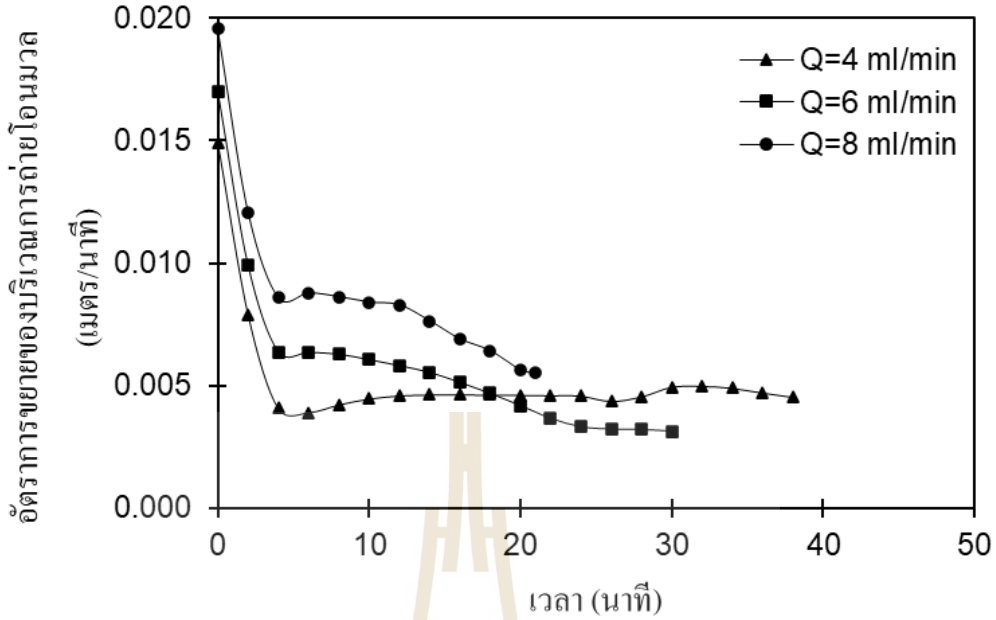
รูปที่ 4.10 การกระจายความเข้มข้นของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 8 มิลลิตรต่อนาที (ก) แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน (ข) แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน



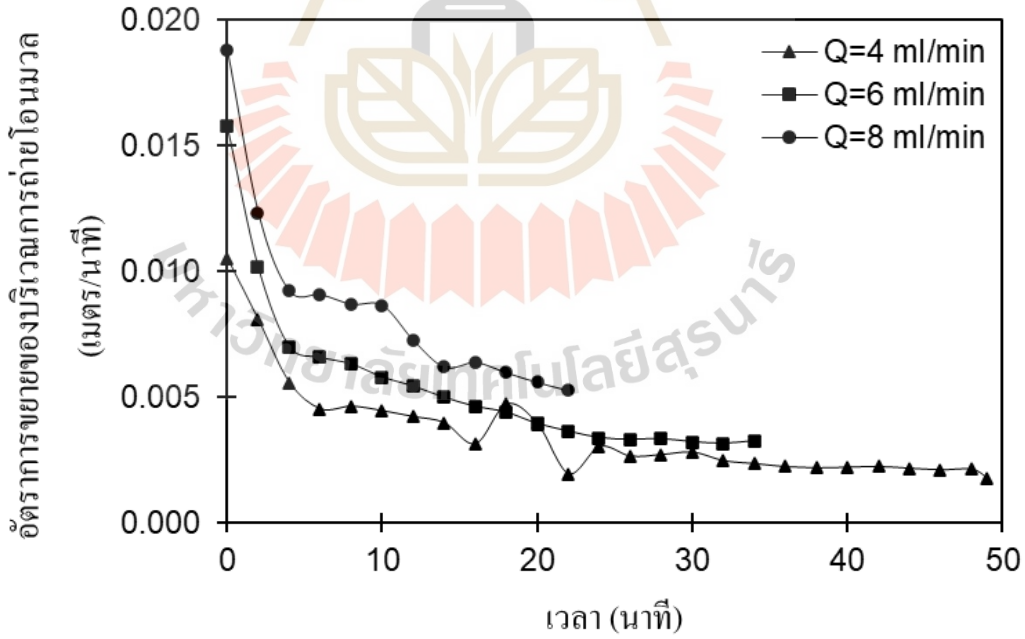
รูปที่ 4.11 ความกว้างของบริเวณการถ่ายโอนมวลของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.12 ความกว้างของบริเวณการถ่ายโอนมวลของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.13 อัตราการขยายของบริเวณการถ่ายโอนมวลของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.14 อัตราการขยายของบริเวณการถ่ายโอนมวลของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิตรต่อนาที

จากผลการศึกษาเวลาประมวลผลของคอมพิวเตอร์ (CPU time) ที่ใช้สำหรับแก้สมการในโปรแกรม Scilab ด้วยคอมพิวเตอร์ Asus, Intel Core i7-5500U CPU และ RAM 4.00 GB พบว่าแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนใช้เวลาเฉลี่ย 1.27 วินาที และแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนใช้เวลาเฉลี่ย 1.73 วินาที ซึ่งเมื่อเพิ่มการพิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนจะต้องใช้เวลาประมวลผลเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญเฉลี่ย 0.46 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.4

เนื่องจากปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่งเกิดขึ้นเช่นเดียวกับการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์ ดังนั้นจึงนำค่าสมดุลการดูดซับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกนที่ได้จากข้อมูลการทดลองในหอดูดซับแบบเบดนิ่งมาประยุกต์ใช้กับหอดูดซับแบบพัลส์ได้ และนำอัตราการขยายของบริเวณการถ่ายโอนมวลภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่เวลาเบรคทรูของอัตราการไหลเดียวกันมาทำนายค่าเริ่มต้นของระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ได้

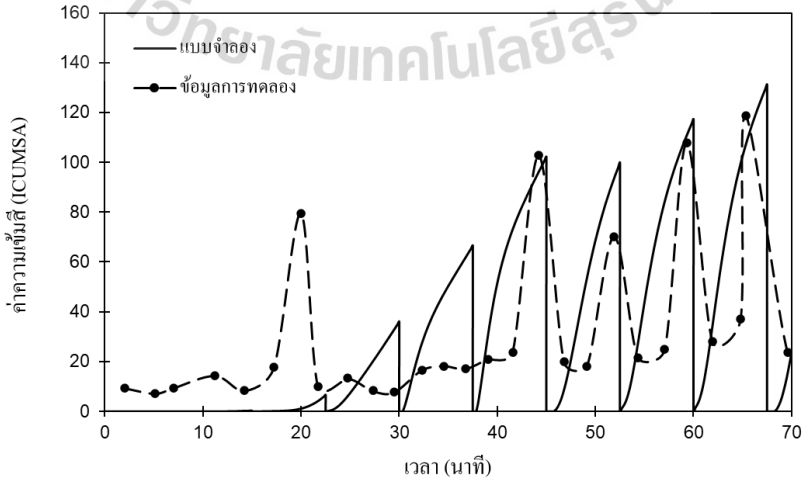
ตารางที่ 4.4 เวลาประมวลผลของคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่อัตราการไหลขาเข้า 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลาประมวลผลของคอมพิวเตอร์ (วินาที)	
	แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกน	แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกน
4	1.30	1.75
6	1.30	1.73
8	1.20	1.70

4.2 การศึกษาการทำงานและระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมของการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์

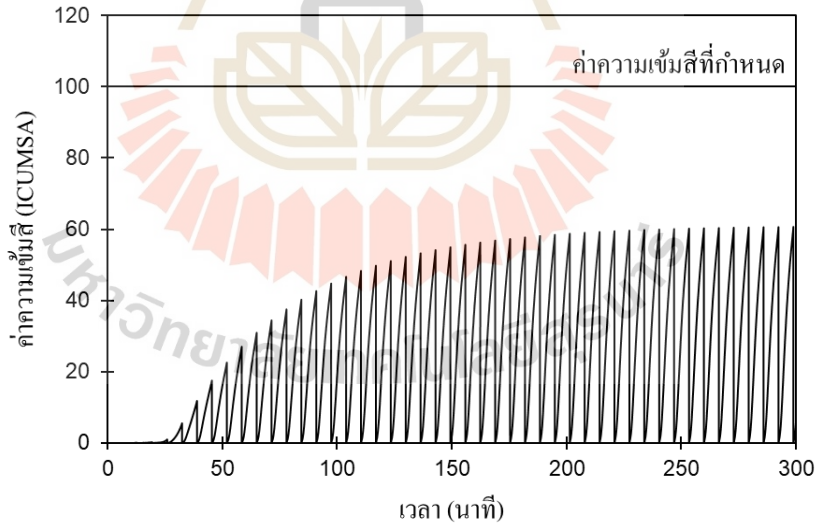
จากการนำค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งมาประยุกต์ใช้กับการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์ (ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2) โดยแสดงผลการเปรียบเทียบการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ที่ได้จากแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนและจากข้อมูลการทดลองที่อัตราการไหล 6 มิลลิตรต่อนาทีในรูปที่ 4.15 ซึ่งจากการคำนวณเวลาคงอยู่ของ

สารภายในหอดูดซับ (Space time) ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่า 21.67 นาที แต่จากการทดลองสามารถตรวจวัดค่าความเข้มสีขาออกได้ตั้งแต่เวลา 2 นาทีแรก เนื่องจากที่ช่วงแรกของการดูดซับมีอนุภาคถ่านกัมมันต์ละเอียด (Fine activated carbon) ปนออกมาซึ่งส่งผลให้มี ความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำเชื่อมนั้นๆ และพบว่าในช่วงเวลา 20.00 29.50 และ 34.58 นาที ค่าความเข้มสีขาออกที่ได้จากข้อมูลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนกับแบบจำลองอยู่มากเนื่องจากในการทดลองนี้ยังไม่สามารถควบคุมปริมาณถ่านกัมมันต์ที่นำออกไปปรับปรุงคุณภาพได้ เป็นผลมาจากในการทดลองนี้ปล่อยถ่านกัมมันต์ให้ตกอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วงในเวลาที่เท่ากัน ซึ่งความหนืดของน้ำเชื่อมจะทำให้ถ่านกัมมันต์จับตัวกันเป็นก้อนและตกลงมาได้ยากขึ้นและทำให้ถ่านกัมมันต์เกาะติดที่บริเวณรอบหอดูดซับ โดยเมื่อปล่อยถ่านกัมมันต์ออกน้อยเกินจะส่งผลให้ค่าความเข้มสีที่ทางออกมีค่ามาก และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ออกมากเกินจะส่งผลให้ค่าความเข้มสีที่ทางออกของหอดูดซับมีค่าน้อย แต่ที่เวลา 44.25 54.38 59.33 และ 65.33 นาที พบว่าแบบจำลองการทำงานของหอดูดซับสามารถอธิบายข้อมูลการทดลองได้ดี เพราะค่าความเข้มสีขาออกที่ได้จากแบบจำลองและจากข้อมูลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าความเข้มสีขาออกที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองมีค่า 21.34 และมีแนวโน้มว่าแบบจำลองสามารถอธิบายข้อมูลการทดลองได้ดีขึ้นเมื่อทำการทดลองไปจนเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร แต่ในทางปฏิบัตินั้นยังไม่สามารถทำการทดลองจนเข้าสู่สภาวะดังกล่าวได้เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ จากข้อมูลดังกล่าวนั้นพบว่าแบบจำลองการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ที่พัฒนามาจากข้อมูลการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งนี้สามารถใช้อธิบายการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ได้

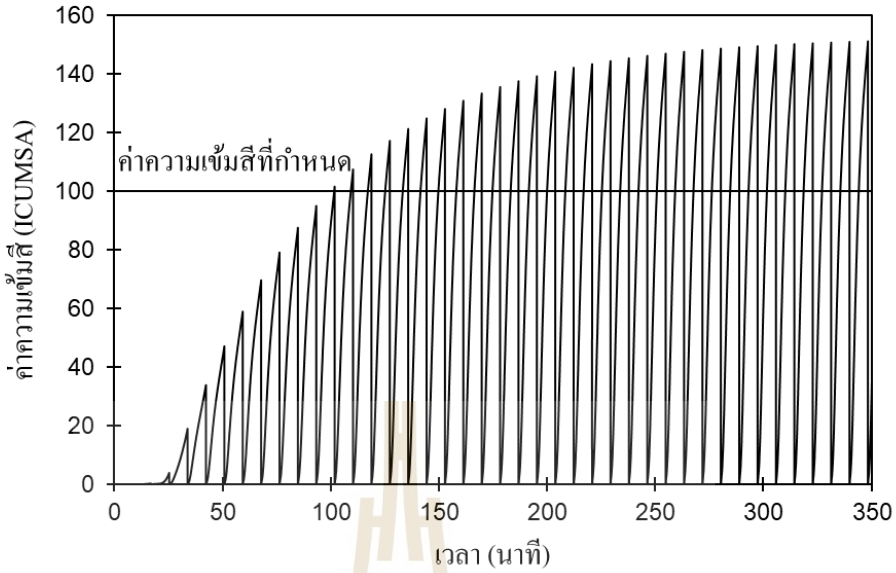


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลการทดลองที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที

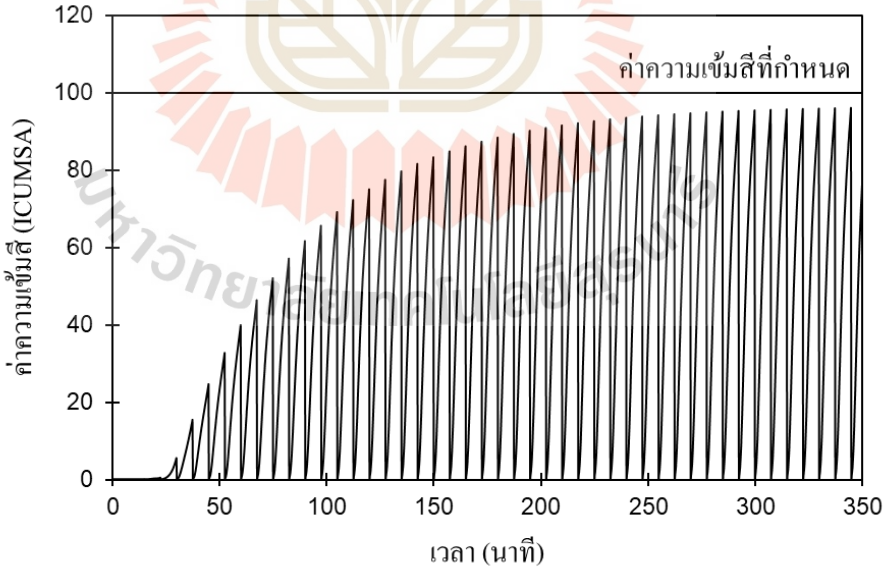
จากการศึกษาแบบจำลองการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ถึง 4.18 พบว่าค่าความเข้มสีขาออกเริ่มเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรตั้งแต่รอบที่ 23 ถึง 30 ของทั้งสามอัตราการไหล โดยเมื่อระยะเวลาครบรอบ (τ_{cycle}) มีค่าน้อยจะส่งผลให้ค่าความเข้มสีขาออกมีค่าน้อยกว่าค่าความเข้มสีที่กำหนด (100 ICUMSA) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.16 และส่งผลให้ใช้ถ่านกัมมันต์ได้ไม่เต็มประสิทธิภาพเนื่องจากถ่านกัมมันต์นั้นยังสามารถดูดซับได้อีก แต่เมื่อระยะเวลาครบรอบมีค่ามากจะส่งผลให้ค่าความเข้มสีขาออกมีค่ามากเกินค่าความเข้มสีที่กำหนดซึ่งแสดงในรูปที่ 4.17 ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าความเข้มสีขาออกตามที่กำหนดและสามารถใช้ถ่านกัมมันต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสม ($\tau_{cycle,opt}$) กับการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ที่ค่าความเข้มสีขาเข้าต่างๆ และที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที โดยจากการนำอัตราการขยายตัวของบริเวณการถ่ายโอนมวลที่เวลาเบรคทรูมาทำนายค่าเริ่มต้นที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที และค่าความเข้มสีขาเข้า 700 ICUMSA จะได้ค่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสม 7.5 นาที ดังแสดงในรูป 4.18 ซึ่งพบว่าค่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมมีค่ามากกว่าค่าทำนายเริ่มต้นเนื่องจากอัตราการขยายตัวของบริเวณการถ่ายโอนมวลจะลดลงหลังจากเวลาเบรคทรู ตามที่ได้อภิปรายไว้ในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง



รูปที่ 4.16 การทำนายการทำงานของแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อระยะเวลาครบรอบ 6.5 นาที (ระยะเวลาครบรอบ < ระยะเวลารบรอบที่เหมาะสม)



รูปที่ 4.17 การทำนายการทำงานของแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อระยะเวลาครบรอบ 8.5 นาที (ระยะเวลาครบรอบ > ระยะเวลารบรอบที่เหมาะสม)

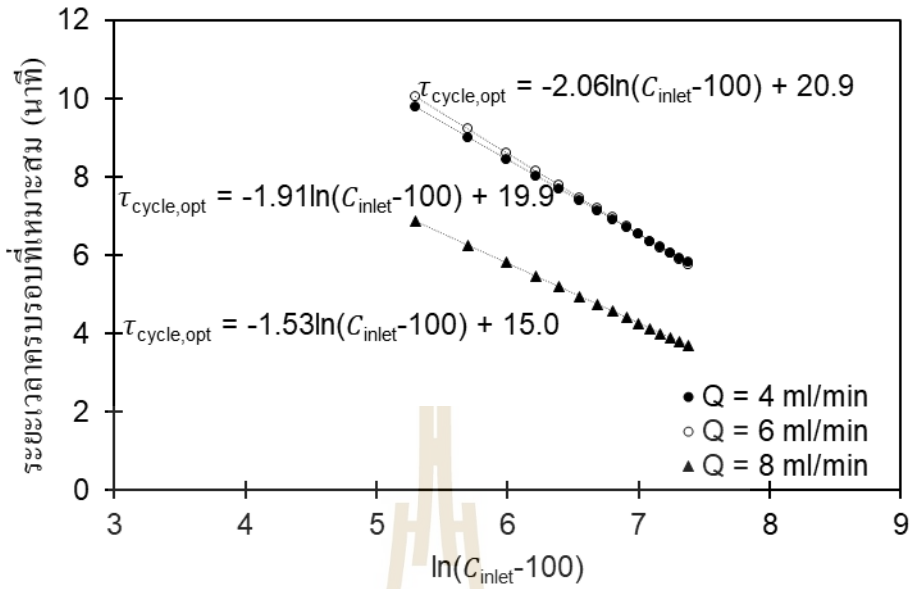


รูปที่ 4.18 การทำนายการทำงานของแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อระยะเวลาครบรอบ 7.5 นาที (ระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสม)

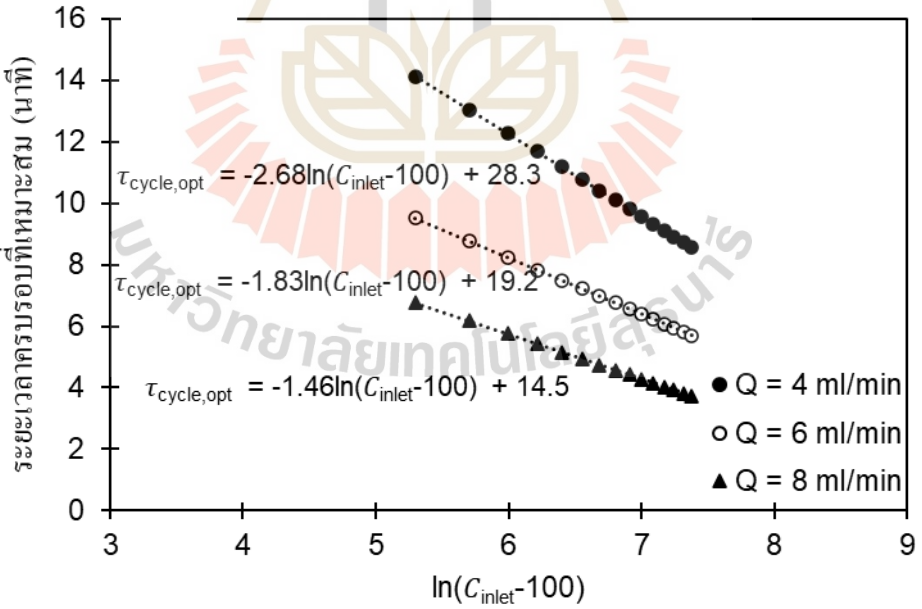
จากการศึกษาระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้า พบว่าเมื่อค่าความเข้มสีขาเข้าลดลงค่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือใช้ระยะเวลาในการดูดซับในหอดูดซับได้นานขึ้น เนื่องจากการอัตราขยายตัวของบริเวณถ่ายโอนมวลลดลง ซึ่งสอดคล้องกับเวลาเบรคทรูของหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.3 และเมื่อค่าความเข้มสีขาเข้าลดลงจนเท่ากับค่าความเข้มสีขาออกที่กำหนดค่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นมากจนไม่จำเป็นต้องมีการพัลส์เกิดขึ้น (ค่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมมีค่าเป็นอนันต์) ซึ่งจากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถแสดงระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมไว้ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง $\tau_{cycle,opt}$ และ $\ln(C_{inlet}-100)$ สำหรับแบบจำลองการทำงานของหอดูดซับที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนและแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.19 พบว่าที่อัตราการไหล 4 และ 6 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมค่อนข้างใกล้เคียงกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ค่าความเข้มสีมากและมีค่ามากกว่าที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาทีอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการขยายตัวของบริเวณการถ่ายโอนมวลลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นค่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมจึงมีค่าลดลงด้วย

จากการศึกษาระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล พบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมลดลง ซึ่งสอดคล้องกับเวลาเบรคทรูที่ลดลงของหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่แสดงไว้ในหัวข้อก่อนหน้า และเมื่อพิจารณาผลของการกระจายตัวในแนวแกนต่อระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมพบว่าที่อัตราการไหล 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมของแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนจะมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนเล็กน้อย เนื่องจากอัตราการขยายตัวของบริเวณการถ่ายโอนมวลมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลเวลาเบรคทรูและกราฟโปรไฟล์ความเข้มข้นของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่มีค่าต่างกันเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวในแนวแกน แต่ที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมของแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนจะมีค่ามากกว่าแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนมาก เนื่องจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ต่ำเกินจริงซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่อภิปรายไว้ในการดูดซับแบบเบดนิ่ง



รูปที่ 4.19 สมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมและ ln(C_{inlet}-100) ที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกน



รูปที่ 4.20 สมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมและ ln(C_{inlet}-100) ที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกน

จากการศึกษาปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ของหอดูดซับแบบเบดนิ่งและแบบพัลส์ที่เวลาเท่ากันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหอดูดซับทั้งสองชนิด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าหอดูดซับแบบพัลส์สามารถดูดซับอนุภาคสีได้มากกว่าหอดูดซับแบบเบดนิ่งเฉลี่ยร้อยละ 56.4 และ ร้อยละ 45.6 ของแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนและพิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนตามลำดับ เนื่องจากลักษณะการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ที่ไหลสวนทางกันระหว่างน้ำเชื่อมและถ่านกัมมันต์ ทำให้น้ำเชื่อมที่มีค่าความเข้มสีต่ำสัมผัสกับถ่านกัมมันต์ใหม่ที่บริเวณด้านบนของหอดูดซับ ทำให้แรงขับในการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้นมากกว่าการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง อีกทั้งการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ที่ระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมยังสามารถทำให้ใช้ถ่านกัมมันต์อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการทำงานของหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่มีการหยุดการทำงานเพื่อนำถ่านกัมมันต์ไปฟื้นฟูสภาพที่เวลาเบรคทรู

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับของหอดูกซับแบบเบดนิ่งและหอดูดซับแบบพัลส์

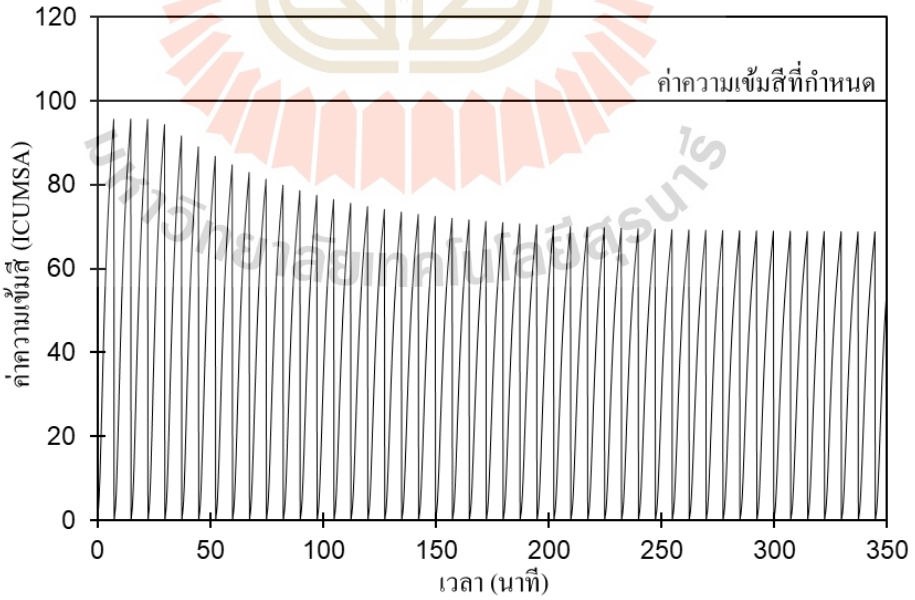
อัตราการไหล (มิลลิลิตร/นาที)	ปริมาณการดูดซับในตัวดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ (ICUMSA/กรัม)			
	แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน		แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน	
	หอดูดซับเบดนิ่ง	หอดูดซับแบบพัลส์	หอดูดซับเบดนิ่ง	หอดูดซับแบบพัลส์
4	0.20	0.39	0.31	0.57
6	0.16	0.40	0.21	0.38
8	0.11	0.28	0.14	0.26

จากผลการศึกษาเวลาประมวลผลของคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับแก้สมการในโปรแกรม Scilab ด้วยคอมพิวเตอร์ Asus, Intel Core i7-5500U CPU และ RAM 4.00 GB พบว่าแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนใช้เวลาเฉลี่ย 72.5 วินาที/50 รอบ หรือคิดเป็น 1.45 วินาที/รอบ และแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนใช้เวลาเฉลี่ย 92.9 วินาที/50 รอบ หรือคิดเป็น 1.86 วินาที/รอบ ซึ่งจะพบว่าทั้งสองแบบจำลองใช้เวลาประมวลผลต่างกัน 0.41 วินาที อย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และพบว่าการแก้สมการในหอดูดซับแบบพัลส์ใช้เวลาใกล้เคียงกับแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

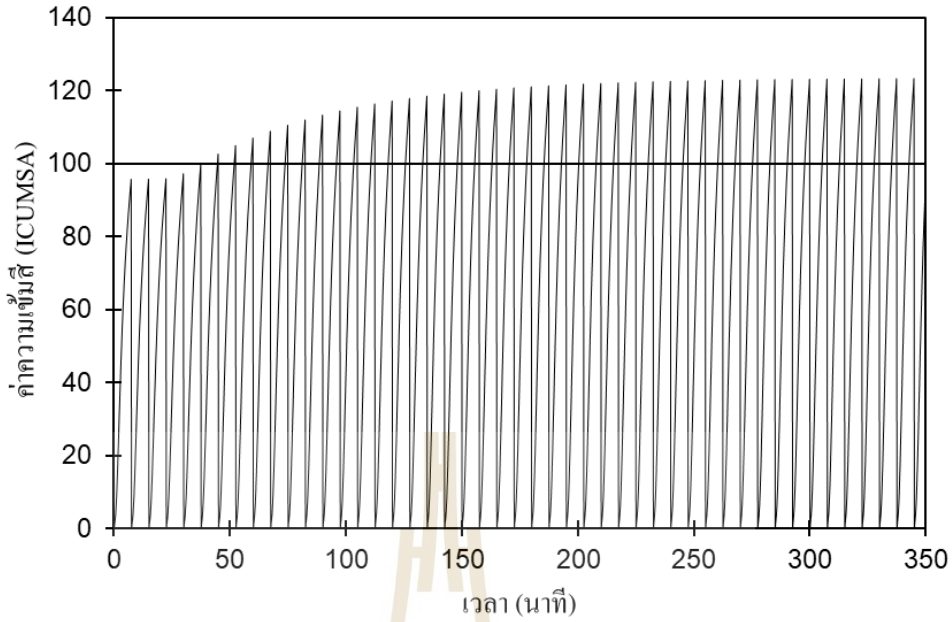
ตารางที่ 4.6 เวลาการคำนวณของหอดูดซับแบบพัลส์

อัตราการไหล (มิลลิลิตร/นาที)	เวลาประมวณผลของคอมพิวเตอร์ (วินาที/50รอบ)	
	แบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน	แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน
4	72.1	92.4
6	72.8	93.6
8	72.6	92.9

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงการทำงานของแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์เมื่อมีการรบกวนการทำงานของกระบวนการหลังเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าแบบขั้นโดยไม่มีการควบคุมกระบวนการของการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์ (ระยะเวลาครบรอบคงที่) พบว่าเมื่อค่าความเข้มสีขาเข้าเพิ่มมากขึ้นแบบขั้นจาก 700 เป็น 900 ICUMSA จะส่งผลให้ค่าความเข้มสีขาออกเพิ่มมากขึ้นจนเกินค่าที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 4.22 และเมื่อค่าความเข้มสีขาเข้าลดลงแบบขั้นจาก 700 เป็น 500 ICUMSA จะส่งผลให้ค่าความเข้มสีขาออกลดลงไปต่ำกว่าค่าที่กำหนดมากดังแสดงในรูปที่ 4.21 ทำให้ใช้ถ่านกัมมันต์ได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้ามาประยุกต์ใช้ในการควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ เพื่อควบคุมค่าความเข้มสีขาออกให้ได้ตามที่ค่ากำหนด



รูปที่ 4.21 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาครบรอบคงที่ เมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้นจาก 700 เป็น 500 ICUMSA



รูปที่ 4.22 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาครบรอบคงที่ เมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้นจาก 700 เป็น 900 ICUMSA

4.3 การควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ด้วยระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

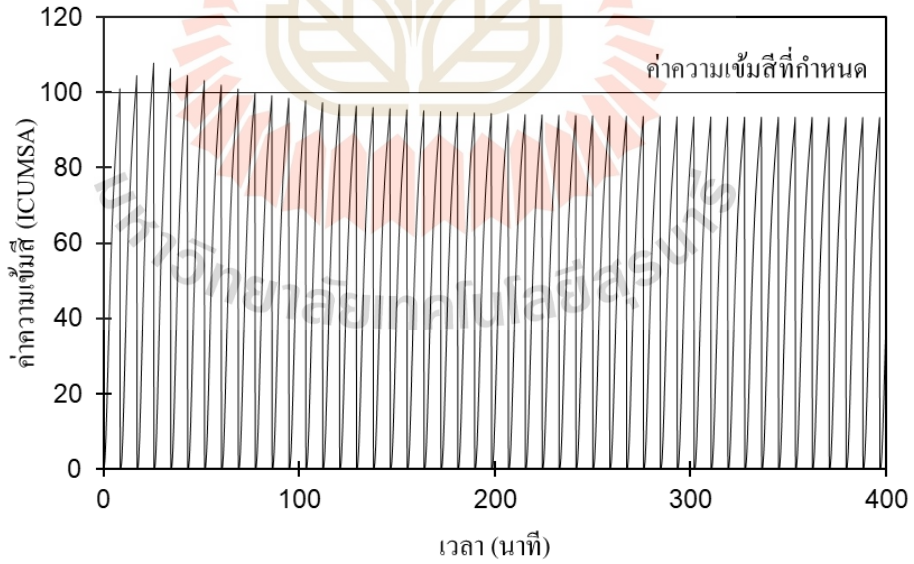
จากการศึกษาการควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ด้วยระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าโดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง $\tau_{cycle,opt}$ และ ln(C_{inlet}-100) ที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าเมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเมื่อลดค่าความเข้มสีขาเข้าแบบขั้นจาก 700 ICUMSA เป็น 500 ICUMSA และมีการปรับระยะเวลาครบรอบใหม่ทันทีพบว่าในช่วงแรกของผลตอบสนองจะมีการแกว่งขึ้นสูงกว่าค่าที่กำหนดก่อนที่จะปรับตัวเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรดังแสดงในรูปที่ 4.23 และเมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเพิ่มค่าความเข้มสีขาเข้าแบบขั้นจาก 700 ICUMSA เป็น 900 ICUMSA พบว่าในช่วงแรกของผลตอบสนองจะมีการแกว่งลงต่ำกว่าค่าที่กำหนดมากก่อนที่จะปรับตัวเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรดังแสดงในรูปที่ 4.25 ซึ่งการแกว่งของผลตอบสนองที่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดและมากกว่าค่าที่กำหนดของทั้งสามอัตราการไหลมีค่าเฉลี่ยประมาณ 5 รอบแรกหลังการรบกวนกระบวนการ (แสดงการทำนายการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์โดยการปรับระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมทันทีหลังมีการรบกวนระบบในภาคผนวก ค) ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการดูดซับนี้เป็นกระบวนการที่มีเวลาหน่วง (Delay time) ทำให้ค่าความเข้มสีก่อนหน้ายังคงเหลืออยู่ในหอดูดซับ ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมทันที

ค่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความเข้มสีขาเข้าก่อนหน้า ทำให้ในช่วงแรกนี้มีการแกว่งของผลตอบสนองมากดังนั้นจึงทำการลดผลกระทบของเวลาหน่วงของกระบวนการดังกล่าว โดยการเพิ่มเวลาหน่วงของการควบคุมหรือปรับค่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมที่รอบที่ 5 ของการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์หลังจากมีการรบกวนกระบวนการ พบว่าสามารถควบคุมผลตอบสนองให้ใกล้เคียงค่าที่กำหนดและมีความคงตัวของผลตอบสนองมากกว่าการปรับระยะเวลาครบรอบทันทีซึ่งแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.26 และแสดงค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนก่อนและหลังเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรในตารางที่ 4.5 ถึง 4.8

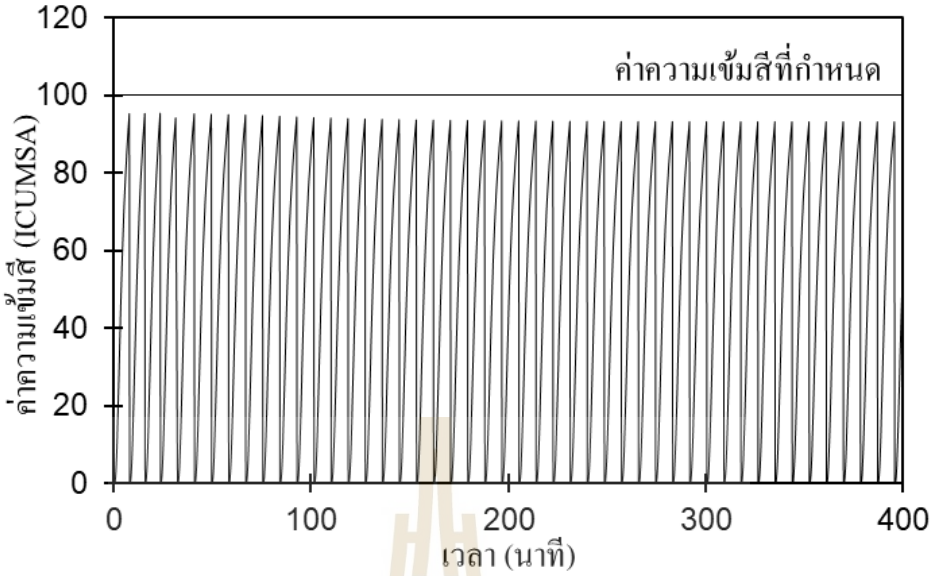
จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 แสดงประสิทธิภาพการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าสำหรับแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน พบว่าเมื่อปรับระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 หลังรบกวนกระบวนการส่งผลให้ผลตอบสนองสามารถปรับตัวเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรได้เร็วกว่าการปรับระยะเวลาครบรอบทันทีหลังรบกวนกระบวนการซึ่งพิจารณาจากค่าช่วงเวลาตอบสนองที่น้อยกว่า และพบว่าที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาทีมีค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าอีกสองอัตราการไหล เนื่องจากที่อัตราการไหลนี้สามารถควบคุมค่าความเข้มสีขาออกให้เข้าใกล้ค่าที่กำหนดมากกว่าซึ่งพิจารณาได้จากค่าผลต่างมากที่สุดของความคลาดเคลื่อนและค่าความเข้มสีขาออกที่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร และพบว่าที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาทีมีค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าอีกสองอัตราการไหลอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความละเอียดที่ไม่เพียงพอการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง $\tau_{cycle,opt}$ และ ln(C_{inlet}-100) ซึ่งแสดงร้อยละความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าความเข้มสีขาออกเมื่อใช้ระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมจากค่าจริงก่อนหาสมการความสัมพันธ์และหาจากสมการความสัมพันธ์ในตารางที่ ค.1 และ ค.2 (ในภาคผนวก ค) อีกทั้งยังพบว่าค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบก่อนเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรของอัตราการไหล 4 และ 6 มิลลิลิตรต่อนาที ของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมทันทีมีค่าน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมที่รอบที่ 5 หลังการรบกวนกระบวนการถึงแม้ว่าช่วงเวลาตอบสนองจะมีค่ามากกว่าก็ตาม ซึ่งเป็นผลมาจากบางช่วงของผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมทันทีมีการแกว่งเกินค่าที่กำหนดไปเล็กน้อยและบางช่วงสามารถควบคุมให้มีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดเล็กน้อยจึงส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำดังแสดงในรูปที่ 4.23 แต่ผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมที่รอบที่ 5 หลังมีการรบกวนกระบวนการพบว่าสามารถควบคุมผลตอบสนองทั้งหมดให้อยู่ในค่าที่กำหนดได้แต่ ค่าผลตอบสนองห่างจากค่าที่กำหนดมากกว่าการปรับระยะเวลาครบรอบทันที ส่งผลให้เกิด ความคลาด

เคลื่อนมากกว่าถึงแม้ว่าจะสามารถควบคุมการทำงานได้ดีกว่าก็ตามดังแสดงในรูปที่ 4.24 ดังนั้นค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบอาจไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของการควบคุมของระบบนี้ได้โดยตรง

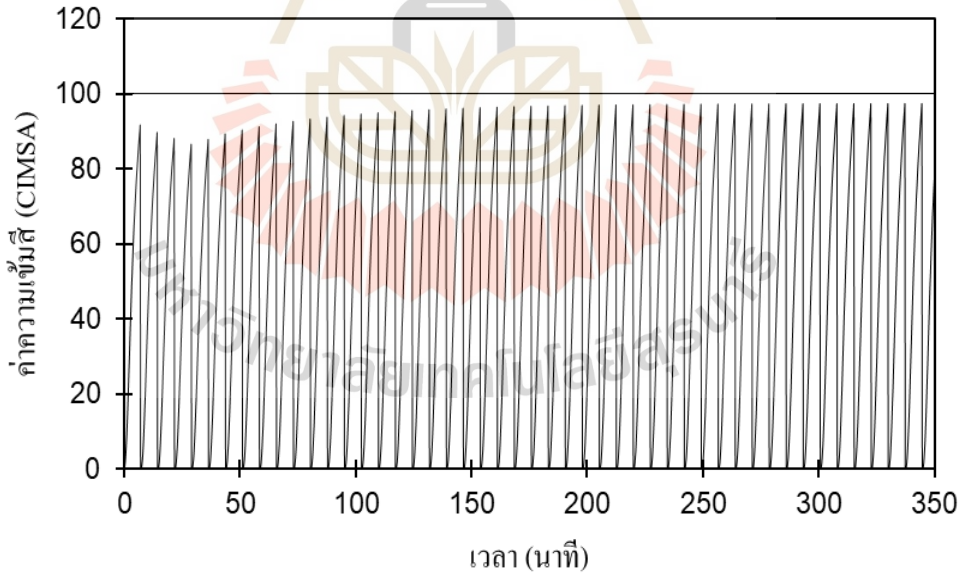
จากตารางที่ 4.9 และ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าสำหรับแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน พบว่าเมื่อปรับระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 หลังรบกวนกระบวนการส่งผลให้ผลตอบสนองสามารถปรับตัวเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรได้เร็วกว่าการปรับระยะเวลาครบรอบทันที ซึ่งพิจารณาจากค่าช่วงเวลาตอบสนองที่น้อยกว่าเช่นเดียวกับในแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน และพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นผลกระทบจากเวลาหน่วงของกระบวนการจะลดลงซึ่งพิจารณาจากค่าช่วงเวลาตอบสนองที่ใกล้เคียงกันระหว่างการปรับระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมทันทีและการปรับระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมที่รอบที่ 5 หลังรบกวนกระบวนการ เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นอัตราการขยายตัวของบริเวณการถ่ายโอนมวลจะมากขึ้นด้วยทำให้โปรไฟล์ของค่าความเข้มสีหลุดออกจากหอดูดซับได้เร็วขึ้นซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้อภิปรายในการดูดซับแบบเบดนิ่ง แต่ไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจนของผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อมีการรบกวนกระบวนการจาก 700 ICUMSA เป็น 500 ICUMSA และจาก 700 ICUMSA เป็น 900 ICUMSA



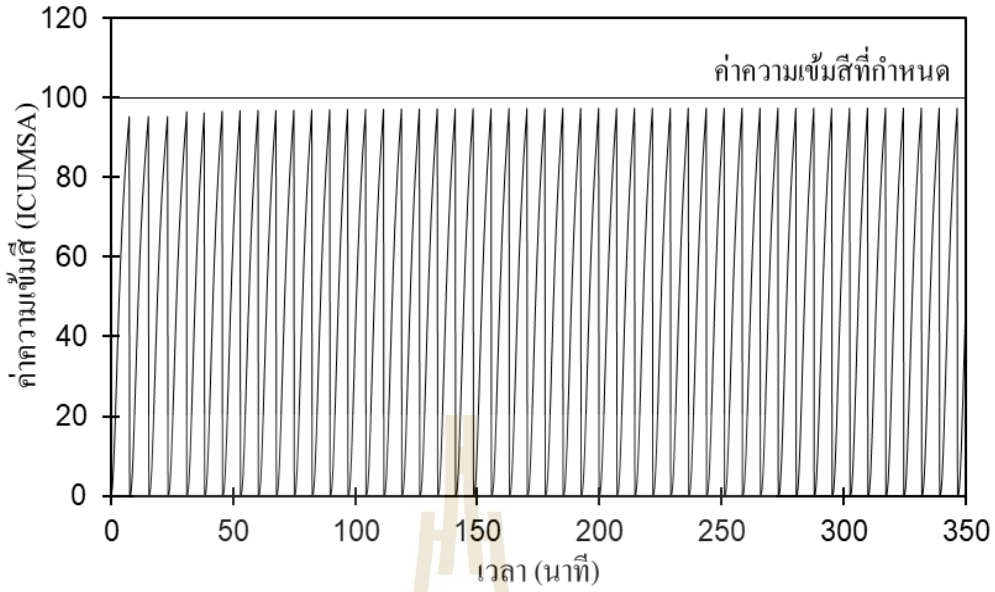
รูปที่ 4.23 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA



รูปที่ 4.24 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA



รูปที่ 4.25 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบพิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA



รูปที่ 4.26 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบพิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนาก 700 เป็น 900 ICUMSA

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพของการควบคุมของแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าลดลงแบบขั้นจาก 700 ICUMSA เป็น 500 ICUMSA

รอบที่มีการปรับระยะเวลาครบรอบ	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ช่วงเวลาตอบสนอง (รอบ)	ค่าผลต่างมากที่สุดของความคลาดเคลื่อน (ICUMSA)	ค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบ		ค่าความเข้มสีขาออกที่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร
				ก่อนเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร	หลังเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร	
ทันที	4	18	21.35	1482.29	3672.68	78.65
รอบที่ 5		15	21.36	1772.95	3679.90	78.65
ทันที	6	19	6.79	118.05	344.87	93.21
รอบที่ 5		7	6.82	178.13	355.86	93.19
ทันที	8	18	10.75	218.67	616.15	89.25
รอบที่ 5		13	10.75	205.89	624.58	89.25

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพของการควบคุมของแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าเพิ่มขึ้นแบบขั้นจาก 700 ICUMSA เป็น 900 ICUMSA

รอบที่มีการปรับระยะเวลาครบรอบ	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ช่วงเวลาตอบสนอง (รอบ)	ค่าผลต่างมากที่สุดของความคลาดเคลื่อน (ICUMSA)	ค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบ		ค่าความเข้มสีขาออกที่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร
				ก่อนเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร	หลังเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร	
ทันที	4	17	22.98	4947.41	3297.74	78.38
รอบที่ 5		13	21.61	2804.18	3212.23	78.39
ทันที	6	17	4.53	521.73	64.81	97.35
รอบที่ 5		0	4.73	-	61.76	97.38
ทันที	8	13	10.81	779.23	410.77	90.82
รอบที่ 5		14	9.16	112.69	365.31	90.84

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพของการควบคุมของแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าลดลงแบบขั้นจาก 700 ICUMSA เป็น 500 ICUMSA

รอบที่มีการปรับระยะเวลาครบรอบ	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ช่วงเวลาตอบสนอง (รอบ)	ค่าผลต่างมากที่สุดของความคลาดเคลื่อน (ICUMSA)	ค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบ		ค่าความเข้มสีขาออกที่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร
				ก่อนเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร	หลังเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร	
ทันที	4	22	8.71	234.50	809.15	91.30
รอบที่ 5		7	5.76	183.12	271.09	95.12
ทันที	6	22	8.93	164.72	572.44	91.08
รอบที่ 5		15	8.96	233.90	587.62	91.04
ทันที	8	16	2.72	140.57	32.34	97.28
รอบที่ 5		12	10.02	190.29	522.56	89.98

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

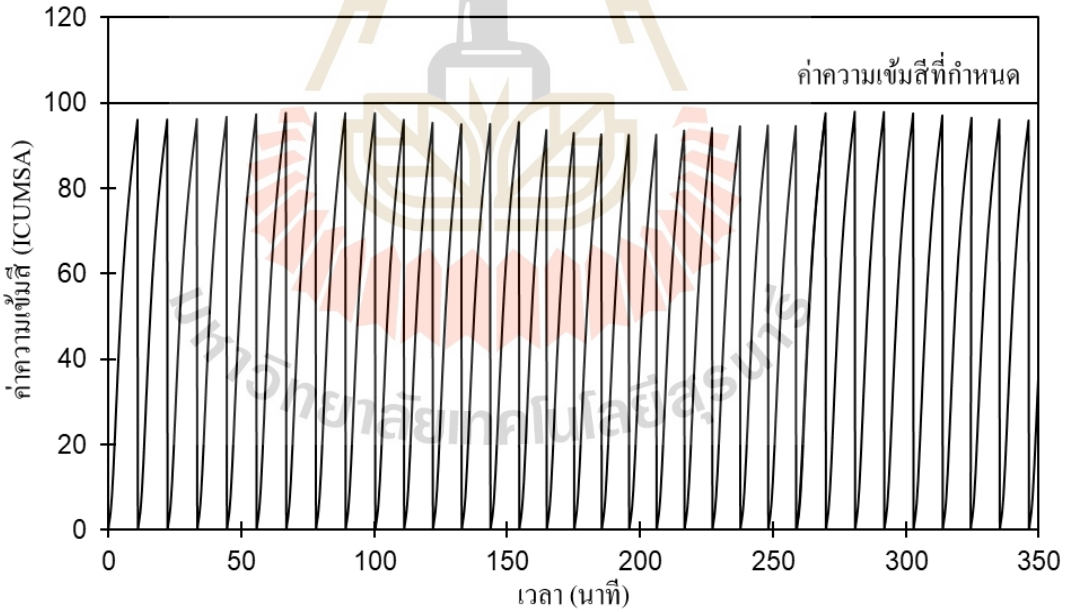
ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพของการควบคุมของแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าเพิ่มขึ้นแบบขั้นจาก 700 ICUMSA เป็น 900 ICUMSA

รอบที่มีการปรับระยะเวลาครบรอบ	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ช่วงเวลาตอบสนอง (รอบ)	ค่าผลต่างมากที่สุดของความคลาดเคลื่อน (ICUMSA)	ค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบ		ค่าความเข้มสีขาออกที่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร
				ก่อนเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร	หลังเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร	
ทันที	4	16	9.11	1238.57	608.13	92.54
รอบที่ 5		10	7.42	187.07	512.51	92.58
ทันที	6	17	6.89	654.48	196.82	94.97
รอบที่ 5		13	4.99	92.02	161.69	95.01
ทันที	8	17	3.63	321.56	22.26	98.14
รอบที่ 5		17	13.85	242.59	828.51	86.15

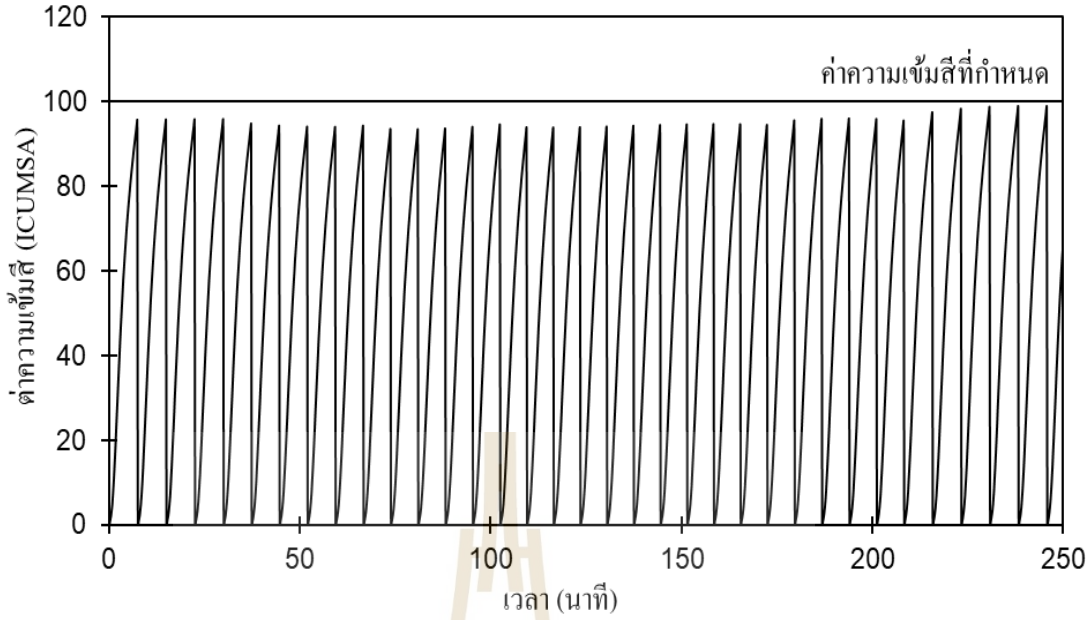
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากการศึกษาการควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์เมื่อมีการรบกวนกระบวนการแบบโคไซน์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสีขาเข้าเฉลี่ย 800 ICUMSA โดยมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงแบบแกว่งตั้งแต่ค่าความเข้มสี 700 ถึง 900 ICUMSA และคาบของการแกว่งที่ 4 ชั่วโมง โดยมีการปรับค่าระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมทุกๆ 5 รอบหลังมีการรบกวนกระบวนการ พบว่าการควบคุมแบบป้อนไปข้างนี้สามารถควบคุมค่าความเข้มสีขาออกให้อยู่ในค่าที่กำหนดได้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.27 ถึง 4.29 และแสดงค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนก่อนและหลังเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรในตารางที่ 4.9 และ 4.10

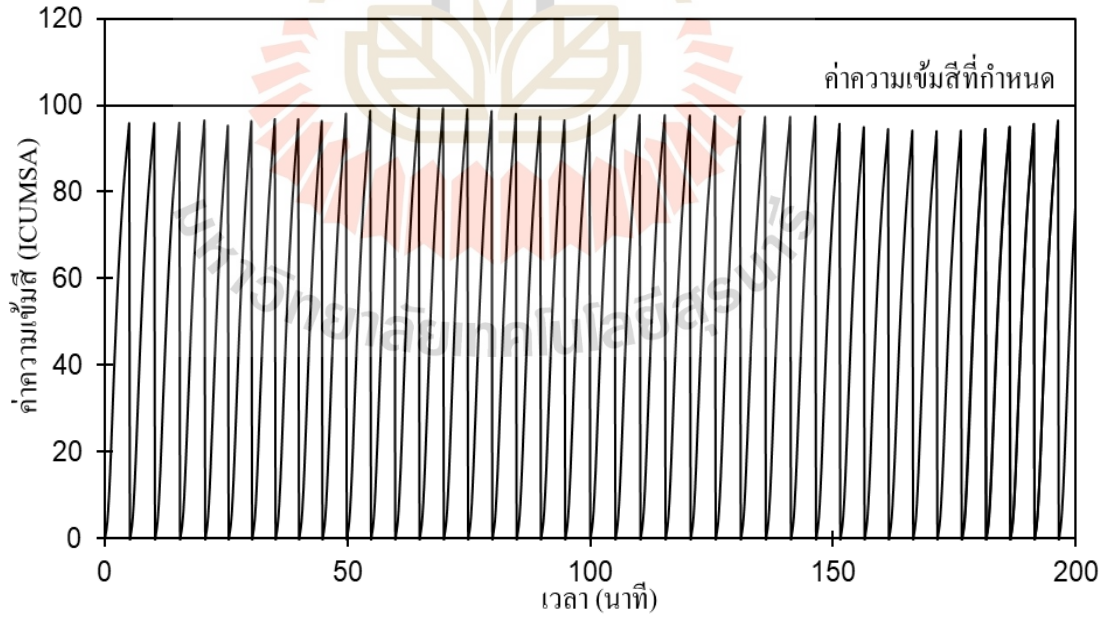
จากตารางที่ 4.10 และ 4.11 แสดงประสิทธิภาพการควบคุมแบบควบคุมไปข้างหน้าเมื่อมีการรบกวนกระบวนการแบบโคไซน์ พบว่าช่วงเวลาการปรับตัวของผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักรของทั้งสามอัตราการไหลไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มที่ชัดเจน แต่ที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาทีมีแนวโน้มที่ค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าอีกสองอัตราการไหลซึ่งจะเห็นได้ชัดในแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน



รูปที่ 4.27 การควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนเมื่อมีการรบกวนระบบแบบฟังก์ชันโคไซน์ ที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.28 การควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนเมื่อมีการรบกวนระบบแบบฟังก์ชันโคไซน์ ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.29 การควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนเมื่อมีการรบกวนระบบแบบฟังก์ชันโคไซน์ ที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพของการควบคุมของแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าแบบฟังก์ชันโคไซน์

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ช่วงเวลาตอบสนอง (รอบ)	ค่าผลต่างมากที่สุดของความคลาดเคลื่อน (ICUMSA)	ค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบ	
			ก่อนเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร	หลังเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร
4	13	20.82	2197.72	1648.97
6	19	2.93	90.29	23.04
8	17	5.73	8.21	58.82

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพของการควบคุมของแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการรบกวนกระบวนการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้าแบบฟังก์ชันโคไซน์

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ช่วงเวลาตอบสนอง (รอบ)	ค่าผลต่างมากที่สุดของความคลาดเคลื่อน (ICUMSA)	ค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบ	
			ก่อนเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร	หลังเข้าสู่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร
4	22	4.99	151.84	98.37
6	20	2.93	147.74	40.04
8	7	5.73	24.01	14.69

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลวิจัย

จากผลการศึกษาแบบจำลองและควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. แบบจำลองการดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนสามารถอธิบายการทำงานของหอดูดซับแบบเบดนิ่งได้ดีกว่าแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน โดยแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนใช้เวลาในการคำนวณเฉลี่ย 1.73 วินาที แบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนใช้เวลาเฉลี่ย 1.27 วินาที ซึ่งทั้งสองแบบจำลองนี้ใช้เวลาในการคำนวณต่างกันเพียงเล็กน้อยหรือประมาณ 0.46 วินาที

2. แบบจำลองการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ค่าสมดุลการดูดซับ และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกนที่ได้จากข้อมูลการทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งขนาดเดียวกันและอัตราการไหลเดียวกันได้ สามารถอธิบายการทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์ทั้งแบบที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนและแบบจำลองที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนได้

3. ระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมขึ้นกับค่าความเข้มสีขาเข้าและอัตราการไหล พบว่าเมื่อค่าความเข้มสีขาเข้าเพิ่มขึ้นระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมมีค่าลดลง ค่าความเข้มสีลดลงระยะเวลาครบรอบมีค่าเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมมีค่าลดลง อัตราการไหลลดลงระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยสามารถแสดงในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่าง $\tau_{cycle,opt}$ และ ln(C_{inlet}-100) ที่อัตราการไหล 4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที โดยที่สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถใช้ได้สำหรับค่าความเข้มสีขาเข้ามากกว่า 100 ICUMSA

4. ผลการศึกษาการควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์ด้วยการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า พบว่าสามารถควบคุมให้ค่าความเข้มสีขาออกให้อยู่ในค่าที่กำหนดได้หลังมีการรบกวนกระบวนการแบบขั้นและแบบโคไซน์โดยการปรับระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 หลังการรบกวนกระบวนการ เพื่อลดผลกระทบจากเวลาหน่วงของกระบวนการ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทำการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์ควรมีการปรับปรุงระบบควบคุมปริมาณการพัลส์เพื่อให้ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่พัลส์ในแต่ละรอบคงที่ เพื่อลดกระทบจากปริมาณการพัลส์ของถ่านกัมมันต์ภายในหอดูดซับ

2. ศึกษาผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณถ่านกัมมันต์ที่นำออกไปปรับปรุงคุณภาพ (X_{pulse}) ซึ่งทำได้โดยการปรับค่าตัวแปร X_{pulse} ในแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ และศึกษาผลกระทบของขนาดของอนุภาคถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการทดลองการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งเพิ่มเติม เพื่อนำไปหาค่าสมดุลการดูดซับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน

3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์หลังปรับปรุงคุณภาพ (reactivation) แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งส่งผลให้ค่าสมดุลการดูดซับ (K) เปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งการศึกษานี้ต้องใช้เวลามากเนื่องจากต้องมีการปรับเปลี่ยนสมมุติฐานในการสร้างแบบจำลอง

4. ศึกษาการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่าง $\tau_{cycle,opt}$ และ C_{inlet} เพื่อปรับปรุงให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเมื่อนำสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใช้สำหรับควบคุมหอดูดซับแบบพัลส์แบบป้อนไปข้างหน้า พบว่าที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาทีมีค่าผลต่างมากที่สุดของความคลาดเคลื่อน และค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบมากกว่าอีก 2 อัตราการไหลอย่างเห็นได้ชัด

5. ศึกษาการนำแบบจำลองการดูดซับแบบพัลส์ไปใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งอาจเริ่มจากการใช้อัตราการไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์เดียวกัน ถ่านกัมมันต์ชนิดเดียวกัน

รายการอ้างอิง

[1] J.L.A. Azevedo, Sugar decolorization - strategies and solutions, in, University o Coimbra, 2017, pp. 128.

[2] J.K. Conlee, A Pulse Bed Granular Carbon System for Refining Glucose, Starch - Stärke, 23 (1971) 366-369.

[3] U.G. Svedberg, Numerical solution of multicolumn adsorption processes under periodic countercurrent operation, Chemical Engineering Science, 31 (1976) 345-353.

[4] J.-H.Liang, Pulsed-Bed Moving-Granular Activated Carbon System, in: C.C. Chou (Ed.) Handbook of sugar refining: a manual for the design and operation of sugar refining facilities, John Wiley & Sons, New York, USA, 2000.

[5] K. Klatt, F. Hanisch, G. Dünnebier, Model-based control of a simulated moving bed chromatographic process for the separation of fructose and glucose, Journal of Process Control, 12 (2002) 203-219.

[6] M. Minceva, L.S. Pais, A.E. Rodrigues, Cyclic steady state of simulated moving bed processes for enantiomers separation, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 42 (2003) 93-104.

[7] G. McKay, Design models for adsorption systems in wastewater treatment, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 31 (1981) 717-731.

[8] M. J.P., Mathematical model of an ion exchange column, in: The South African Sugar Technologists's Association, South Africa, 1988, pp. 56-64.

[9] A. Küpper, S. Engell, Engineering of Online Optimizing Control - A Case Study: Reactive SMB Chromatography, IFAC Proceedings Volumes, 41 (2008) 964-969.

[10] W. Du, K.A.M. Alkebsi, Model predictive control and optimization of vacuum pressure swing adsorption for carbon dioxide capture, in: 2017 6th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (AdCONIP), 2017, pp. 412-417.

[11] M.D. Urich, Dynamic Modeling, Predictive Control and Optimization of a Rapid Pressure Swing Adsorption System, in, Lehigh University, Ann Arbor, 2018, pp. 144.

[12] C. Tangsathitkulchai, Adsorption process, Suranaree University of Technology, 2011.

[13] Z. Alothman, A Review: Fundamental Aspects of Silicate Mesoporous Materials, Materials, 5 (2012) 2874-2902.

[14] D.M. Ruthven, John Wiley & Son, New York, USA, 1984.

[15] C. Tien, Adsorption calculations and modeling, Butterworth-Heinemann, United States of America, 1930.

[16] J. Delgado, A Critical Review of Dispersion in Packed Beds, Heat and Mass Transfer, 42 (2006) 279-310.

[17] Z.-Y. Han, R. Xing, D.-H. Zhang, Y.-H. Shen, Q. Fu, Z.-Y. Ding, C.-X. Tian, Vacuum pressure swing adsorption system for N2/CH4 separation under uncertainty, Chemical Engineering Research and Design, 142 (2019) 245-256.

[18] C.C. Chou, Handbook of sugar refining : A manual for the design and operation of sugar refining facilities, (1936).

[19] R. Klaus, R.C. Aiken, D.W.T. Rippin, Simulated binary isothermal adsorption on activated carbon in periodic countercurrent column operation, AIChE Journal, 23 (1977) 579-586.

[20] T. Sookkumnerd, Numerical Modeling of Industrial-Scale Pulsed Bed Adsorber for Colorant Removal in Sugar Refining, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 559 (2019) 012019.

[21] D. Margaris, Method of lines vs. method of characteristics in predicting slow and rapid transients in natural gas compressible pipeline flow, International Review of Mechanical Engineering, 4 (2010) 393-398.

[22] W.E. Schiesser, The Numerical Method of Lines: Integration of Partial Differential Equations, in, 1991.

[23] A.V. Alfio Quarteroni, Numerical approximation of partial differential equations, Springer-Verlag, Berlin, New York, 1994.

[24] W.L. Luyben, Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers, McGraw-Hill College; Subsequent edition, 1989.

[25] G.D. Corder, P.L. Lee, Feedforward control of a wastewater plant, Water Research, 20 (1986) 301-309.

[26] ส. จันทร์จรมานิตย์, ตำราวิชาควบคุม (control systems), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่, 2564.

[27] H. Khajuria, E.N. Pistikopoulos, Optimization and Control of Pressure Swing Adsorption Processes Under Uncertainty, AIChE Journal, 59 (2013) 120-131.

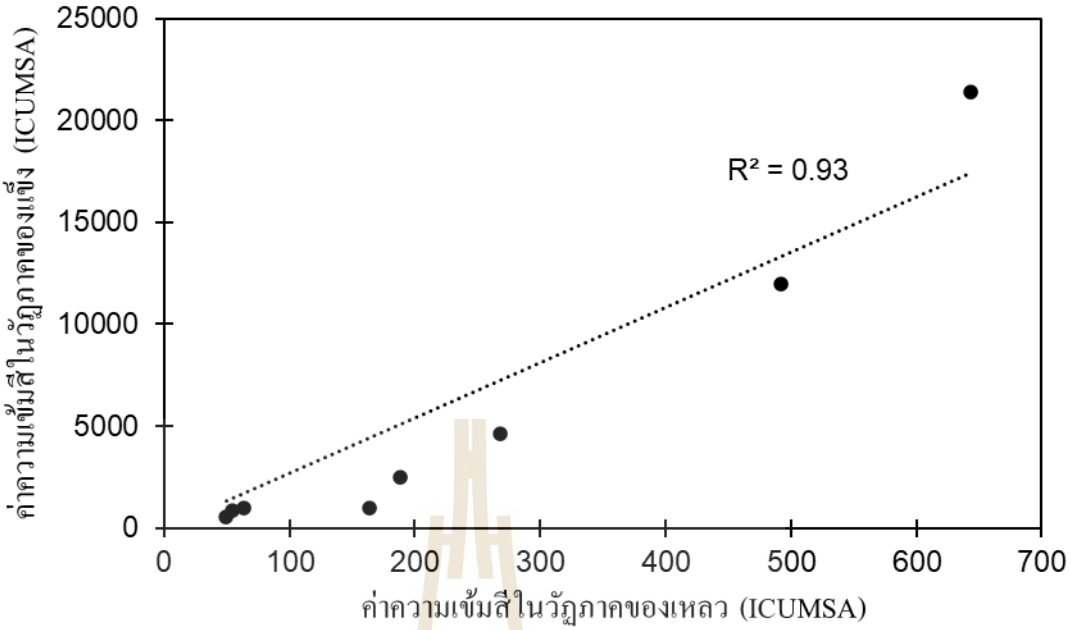
[28] S.C. Chapra, R.P. Canale, Numerical Methods for Engineers, McGraw-Hill Higher Education, 2010.

[29] Wakao, N. and T. Funazkri, Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid mass transfer coefficient in packed beds: Corrrelation of sherwood numbers. Chemicak Engineering Science, 1978. 33(10): p. 1375-1384

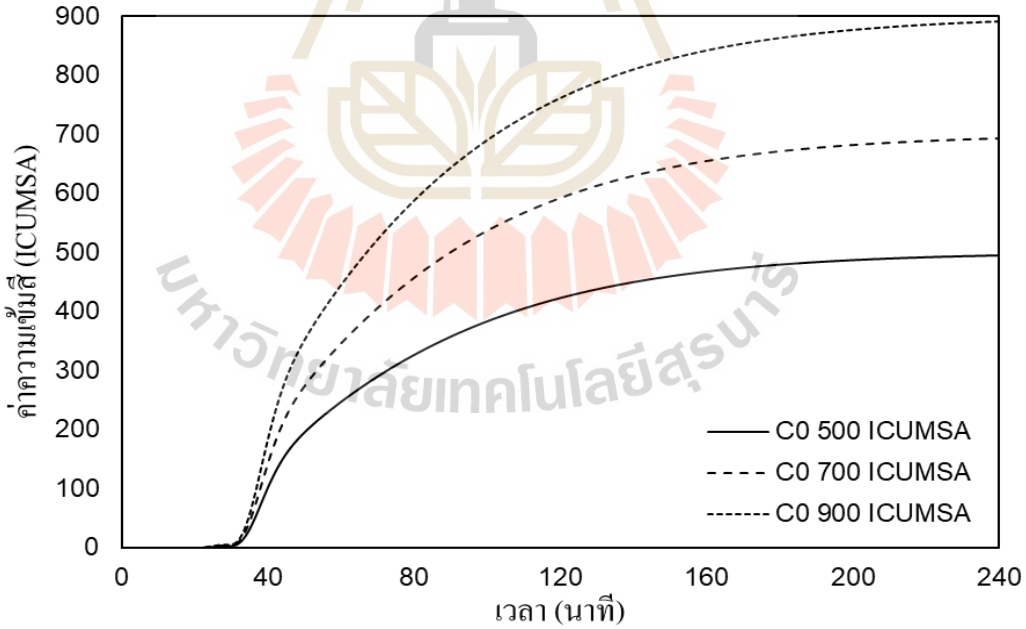
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งเพิ่มเติม

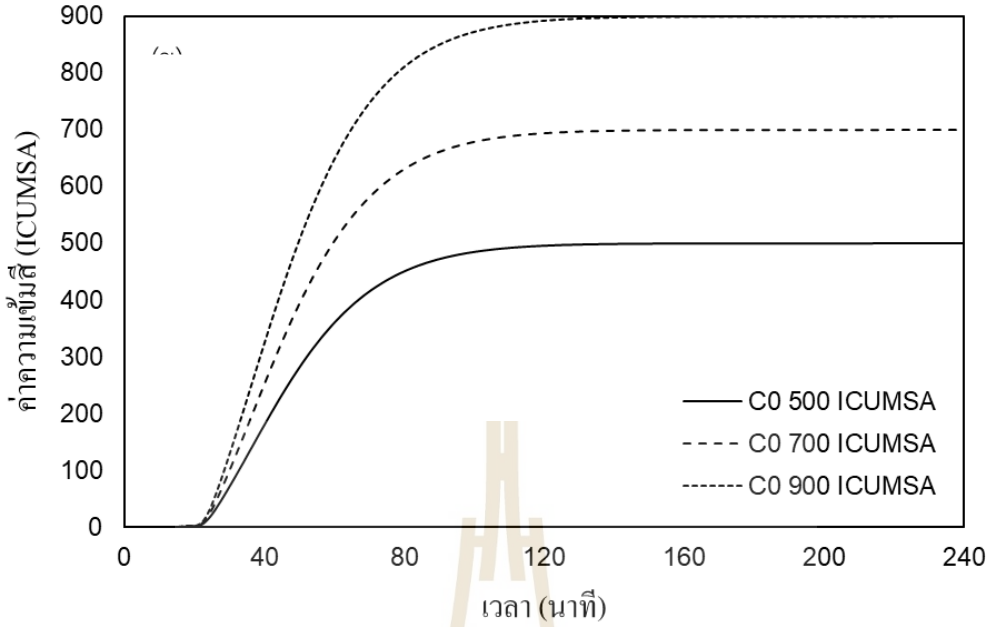
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



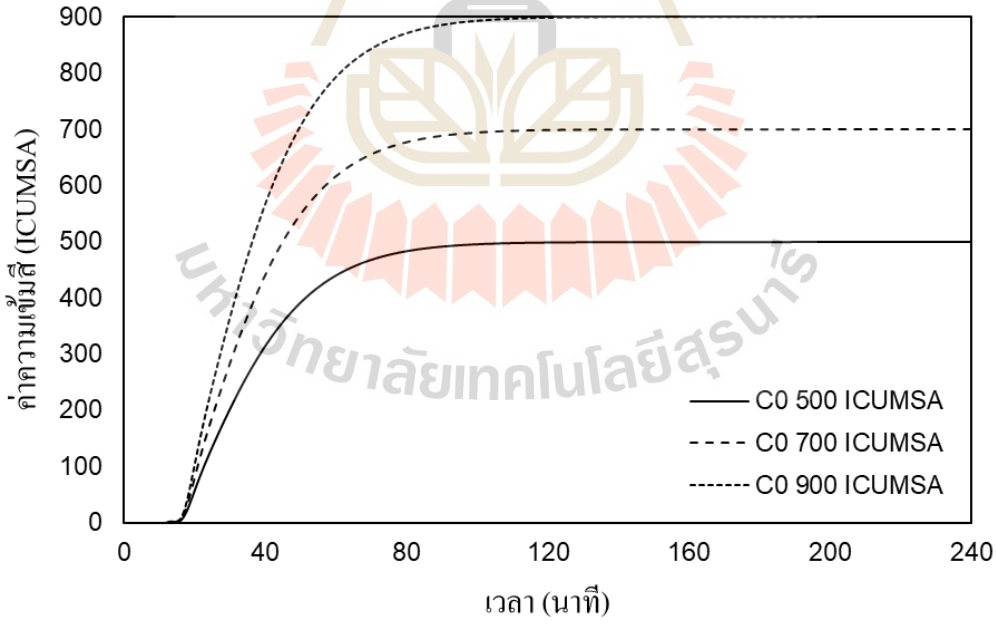
รูปที่ ก.1 ไอโซเทิร์มดูดซับอนุภาคสีในน้ำเชื่อมด้วยถ่านกัมมันต์แบบเส้นตรงที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



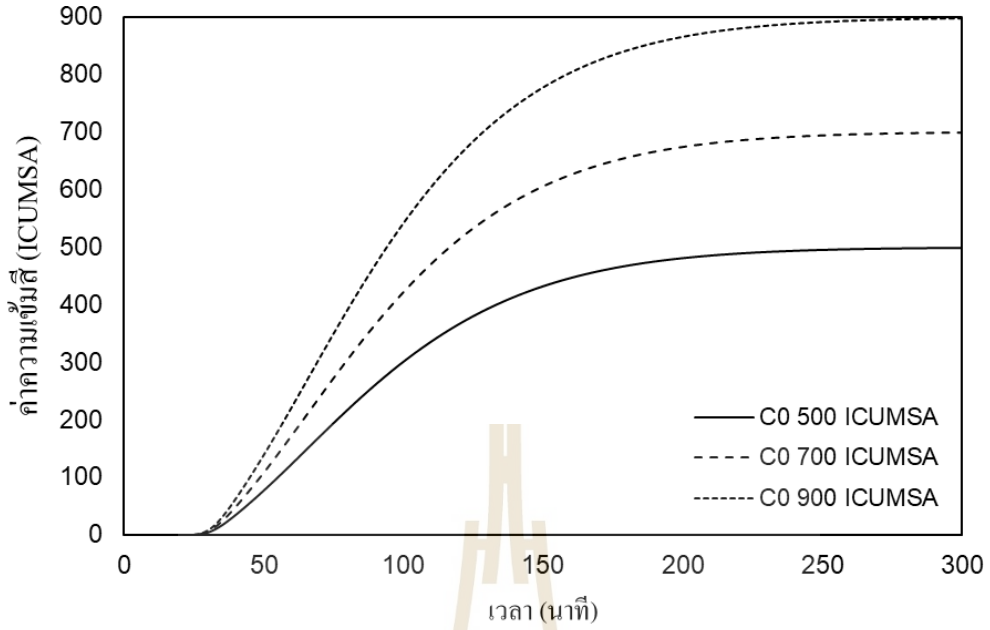
รูปที่ ก.2 กราฟเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้า ที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที



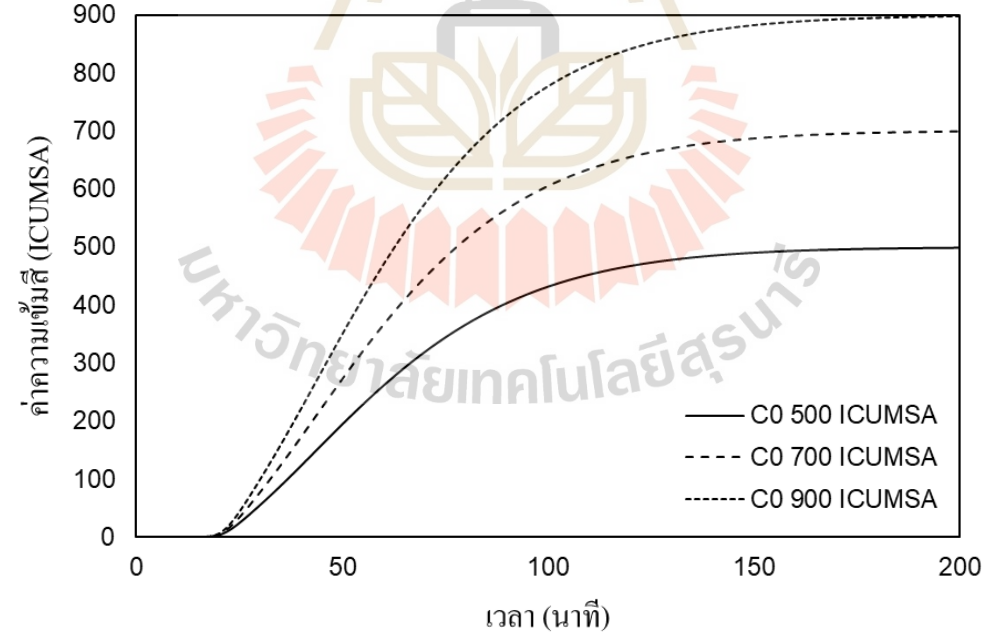
รูปที่ ก.3 กราฟเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้า ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที



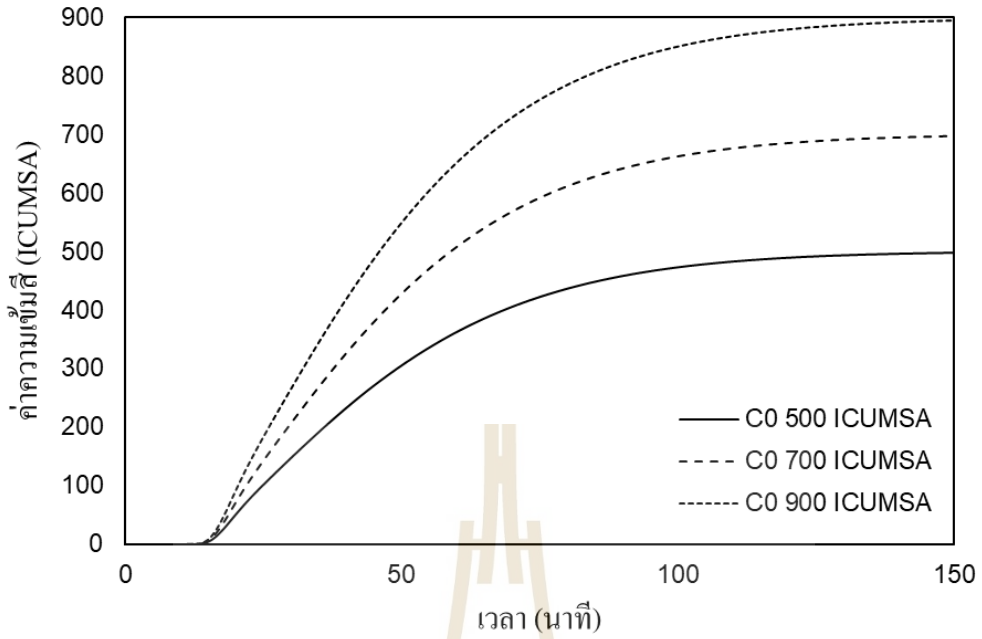
รูปที่ ก.4 กราฟเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้า ที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ ก.5 กราฟเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้า ที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ ก.6 กราฟเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้า ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที

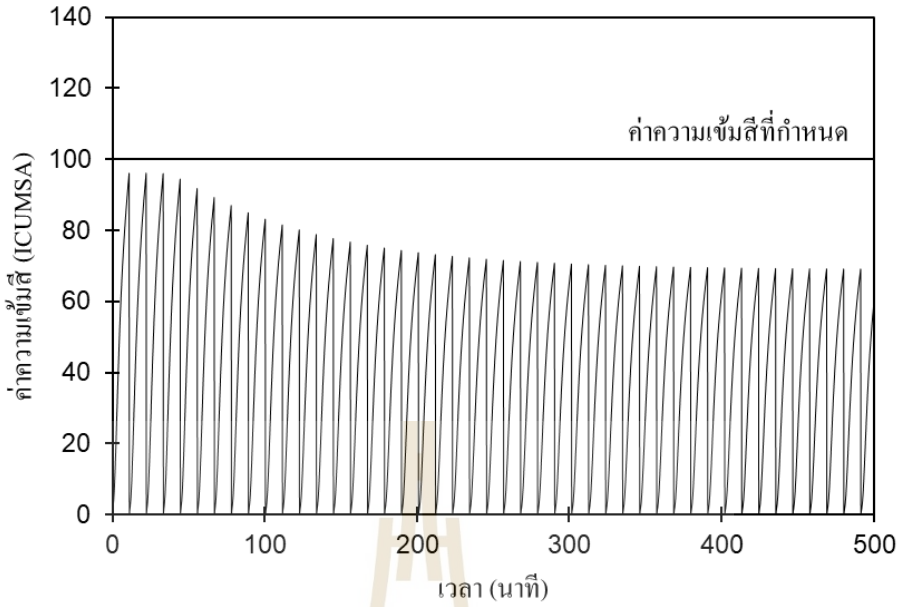


รูปที่ ก.7 กราฟเบรคทรูของแบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีขาเข้า ที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที

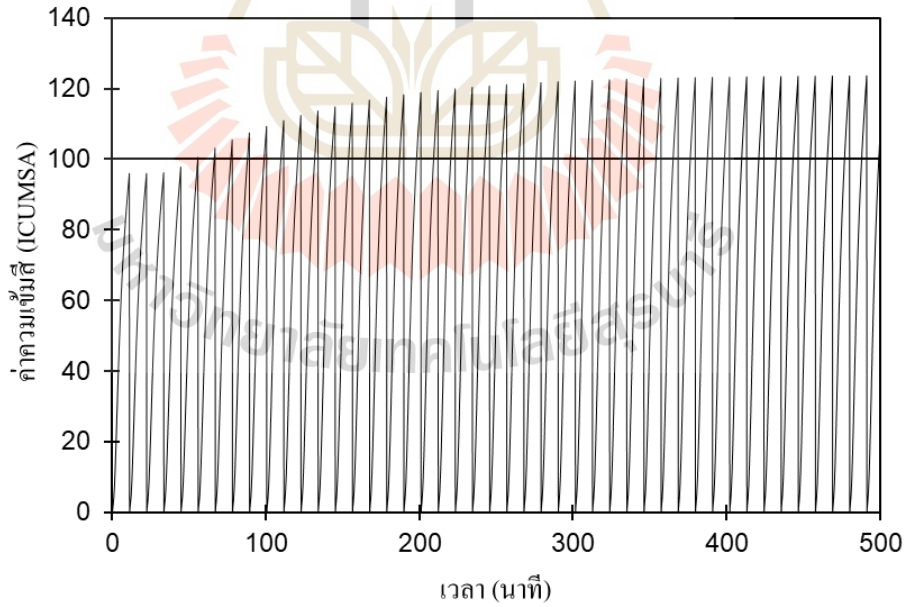
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

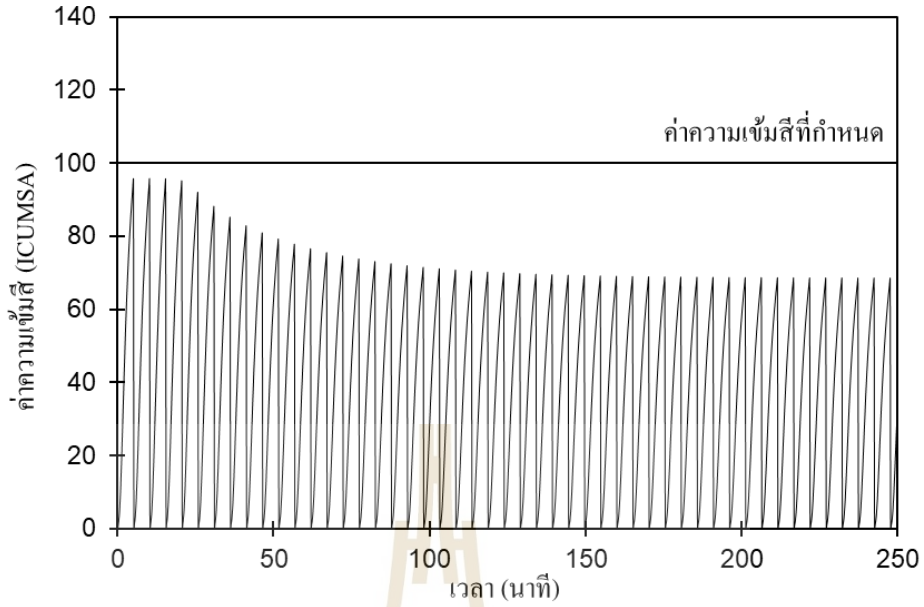
ข้อมูลการดูดซับในหอดูดซับแบบพัลส์เพิ่มเติม



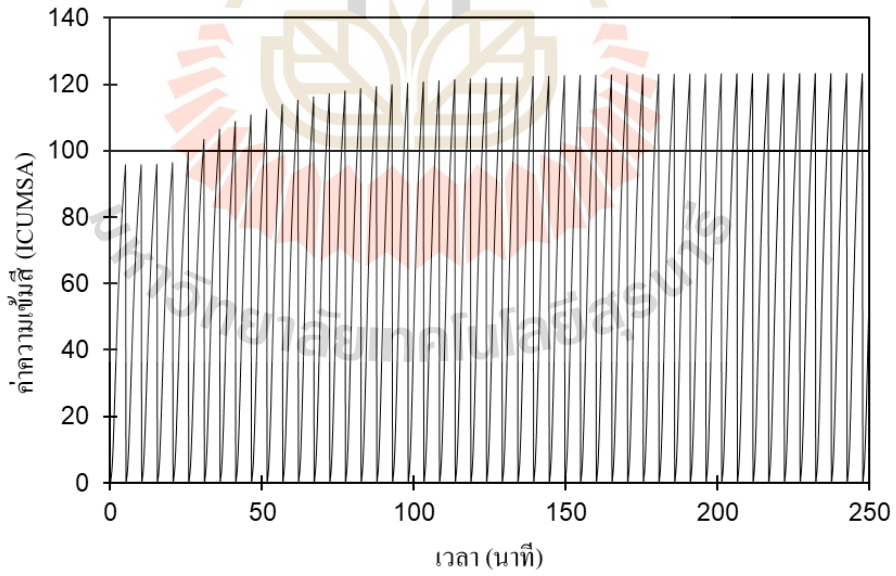
รูปที่ ข.1 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาครบรอบคงที่เมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้นจาก 700 เป็น 500 ICUMSA



รูปที่ ข.2 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาครบรอบคงที่เมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้นจาก 700 เป็น 900 ICUMSA



รูปที่ ข.3 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาครบรอบคงที่เมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้นจาก 700 เป็น 500 ICUMSA



รูปที่ ข.4 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน ที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาครบรอบคงที่เมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้นจาก 700 เป็น 900 ICUMSA

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเพิ่มเติม

ตารางที่ ค.1 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มสีขาออกเมื่อใช้ระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมจากค่าจริงก่อนหาสมการความสัมพันธ์และจากสมการความสัมพันธ์ สำหรับแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

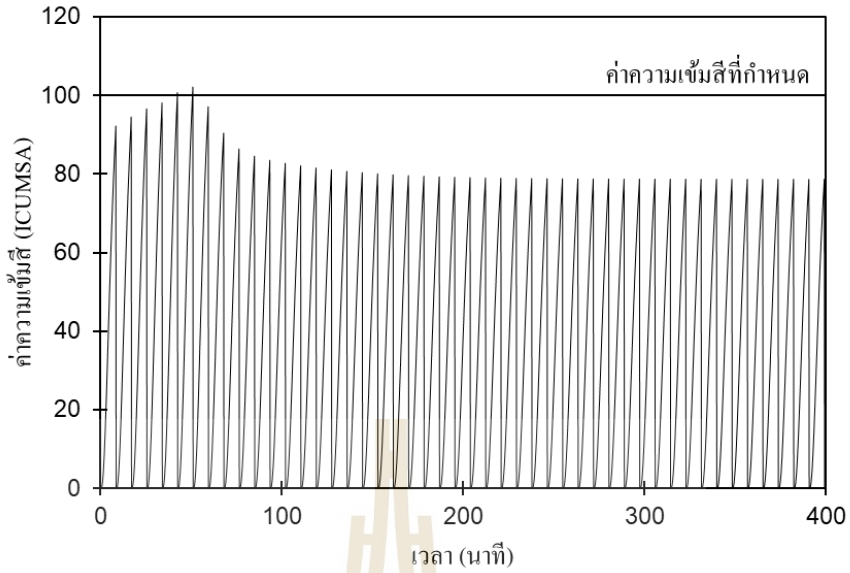
อัตราการไหล	**ค่าความเข้มสีขาออกที่สภาวะสถานะคงตัวแบบวัฏจักร [ICUMSA]**								
	4 มิลลิลิตรต่อนาที			**6 มิลลิลิตรต่อนาที**			**8 มิลลิลิตรต่อนาที**		
ค่าความเข้มสีเริ่มต้น [ICUMSA]	**ค่าจริง**	**ความสัมพันธ์**	**ร้อยละความคลาดเคลื่อน**	**ค่าจริง**	**ความสัมพันธ์**	**ร้อยละความคลาดเคลื่อน**	**ค่าจริง**	**ความสัมพันธ์**	**ร้อยละความคลาดเคลื่อน**
500	99.03	78.63	20.60	99.29	92.96	6.38	98.80	89.18	9.73
600	97.07	83.96	13.51	94.64	93.42	1.29	95.61	91.31	4.49
700	99.27	85.67	13.70	96.56	95.27	1.34	93.83	97.40	3.80
800	96.60	83.75	13.31	95.09	93.71	1.46	97.14	90.74	6.59
900	98.90	78.35	20.78	98.68	97.14	1.56	97.95	90.76	7.34

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

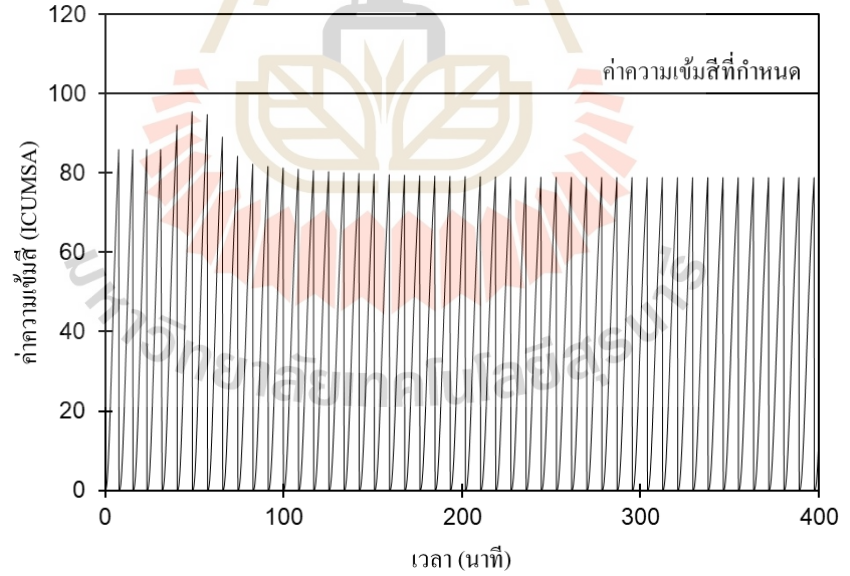
ตารางที่ ค.2 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มสีขาออกเมื่อใช้ระยะเวลาครบรอบที่เหมาะสมจากค่าจริงก่อนหาสมการความสัมพันธ์และจากสมการความสัมพันธ์ สำหรับแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกน

อัตราการไหล	ค่าความเข้มสีขาออกที่สภาวะสถานะแบบวัฏจักร [ICUMSA]								
	4 มิลลิลิตรต่อนาที			6 มิลลิลิตรต่อนาที			8 มิลลิลิตรต่อนาที		
ค่าความเข้มสีเริ่มต้น [ICUMSA]	ค่าจริง	ความสัมพันธ์	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	ค่าจริง	ความสัมพันธ์	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	ค่าจริง	ความสัมพันธ์	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
500	99.03	91.31	7.79	96.86	91.68	5.35	97.64	97.64	0.00
600	95.94	95.93	0.01	95.64	95.64	0.01	99.76	99.76	0.00
700	96.51	96.51	0.00	93.57	96.14	2.74	96.38	96.38	0.00
800	98.96	93.43	5.59	98.42	92.96	5.55	98.96	98.96	0.00
900	99.01	93.04	6.03	95.45	95.45	0.00	98.99	98.99	0.00

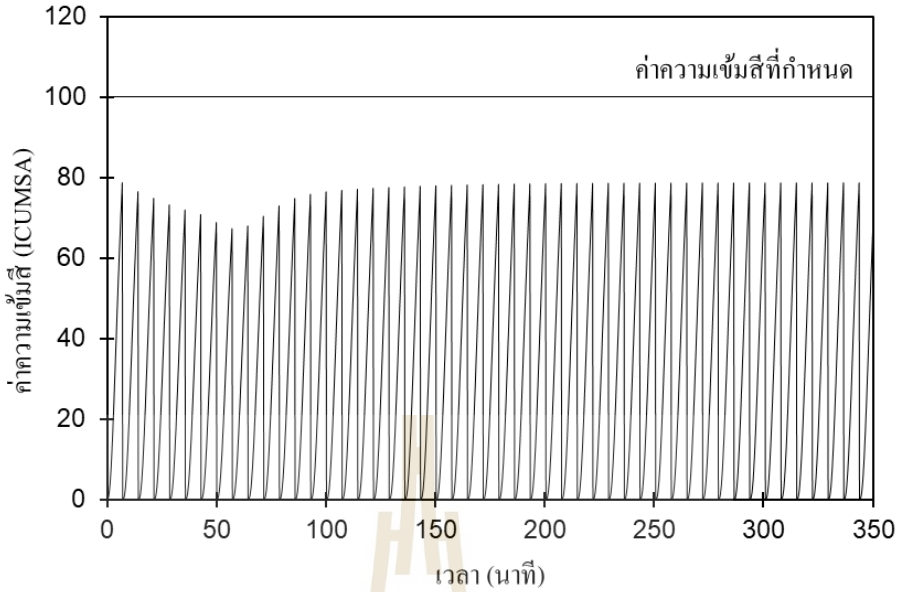
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



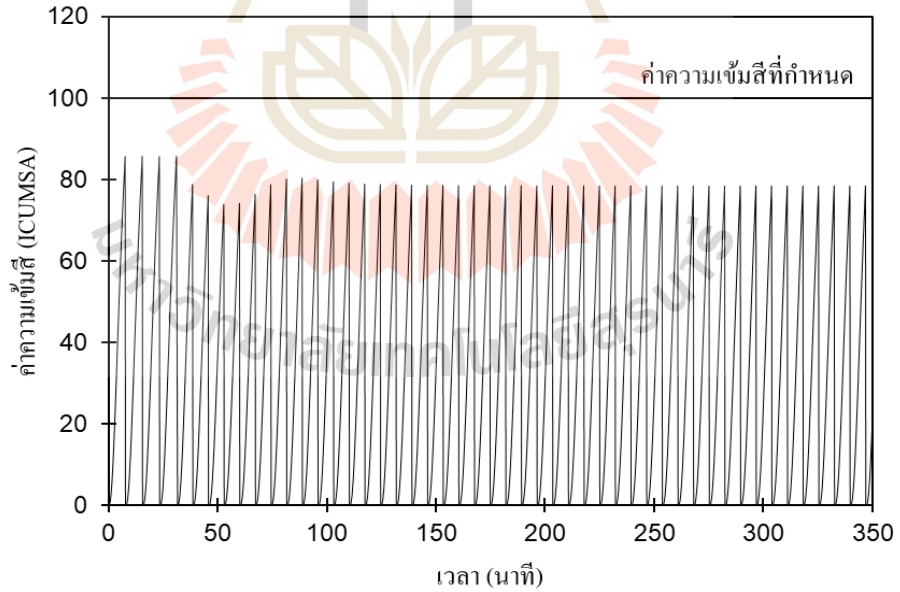
รูปที่ ค.1 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวในแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาครบรอบทันทีเมื่อมีการรบกวนระบบแบบขั้นจาก 700 เป็น 500 ICUMSA



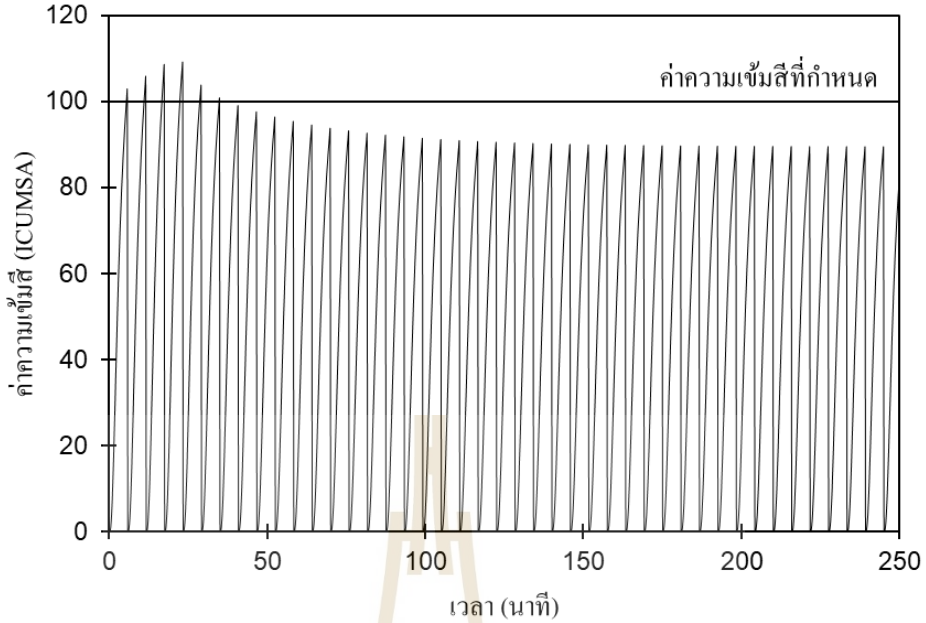
รูปที่ ค.2 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA



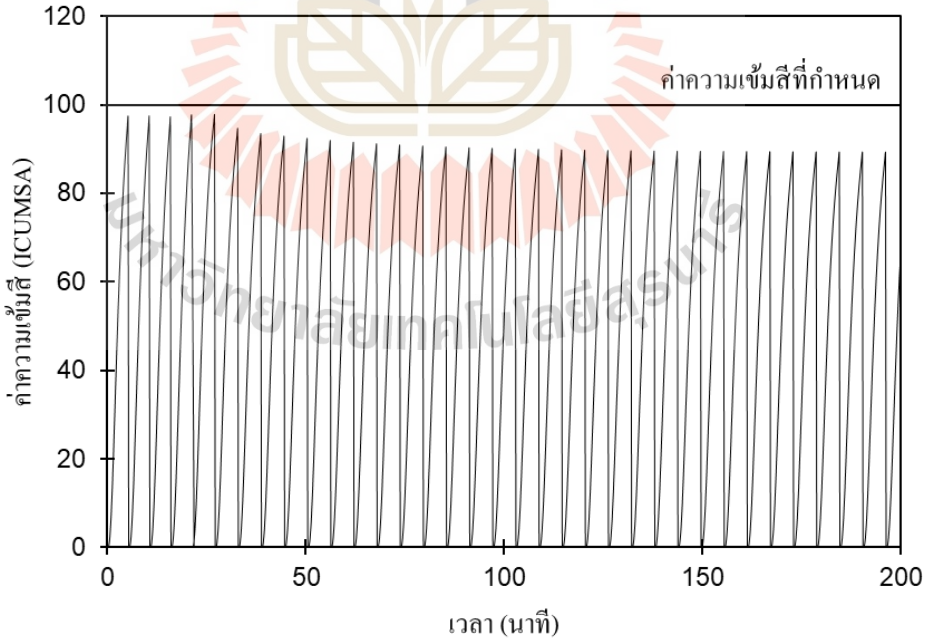
รูปที่ ค.3 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA



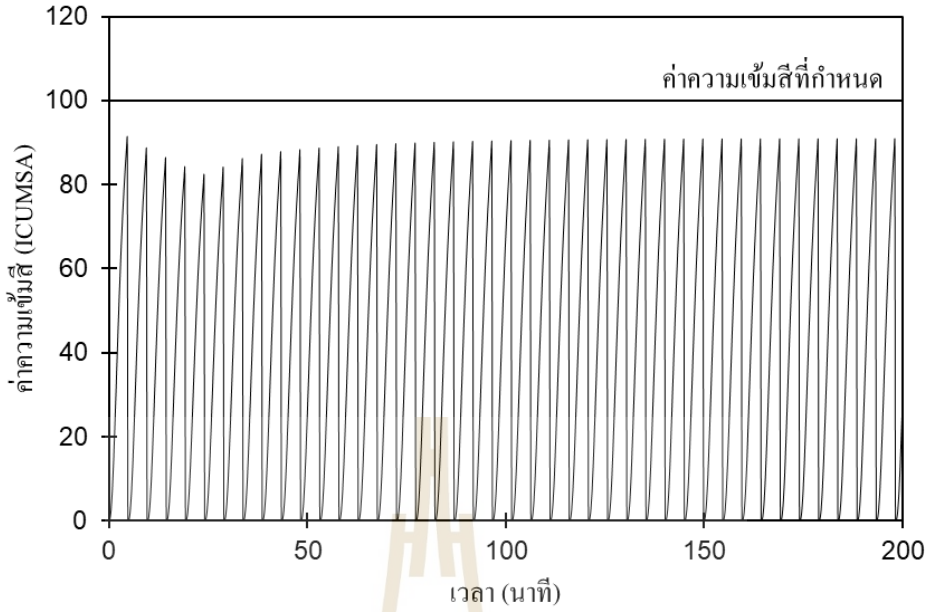
รูปที่ ค.4 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA



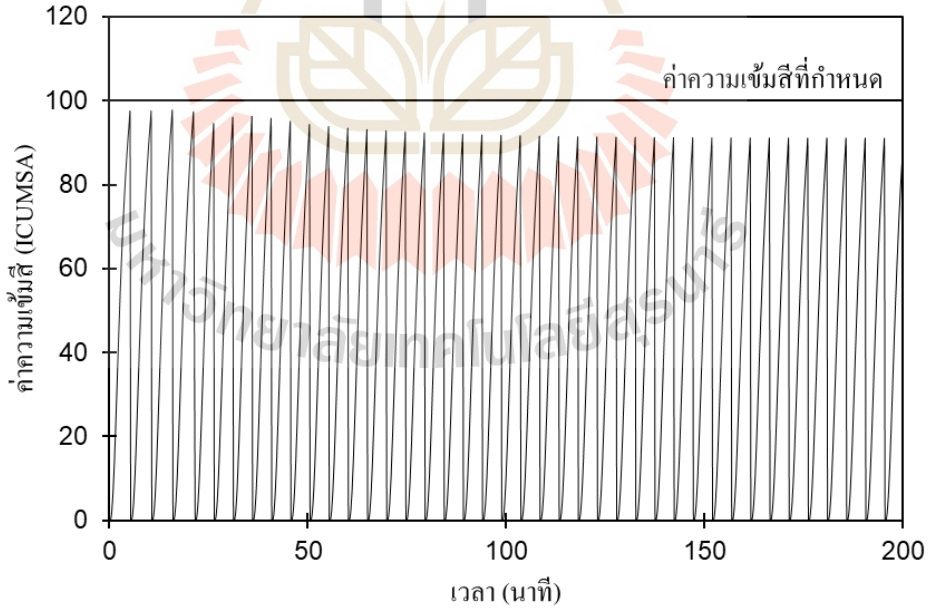
รูปที่ ค.5 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA



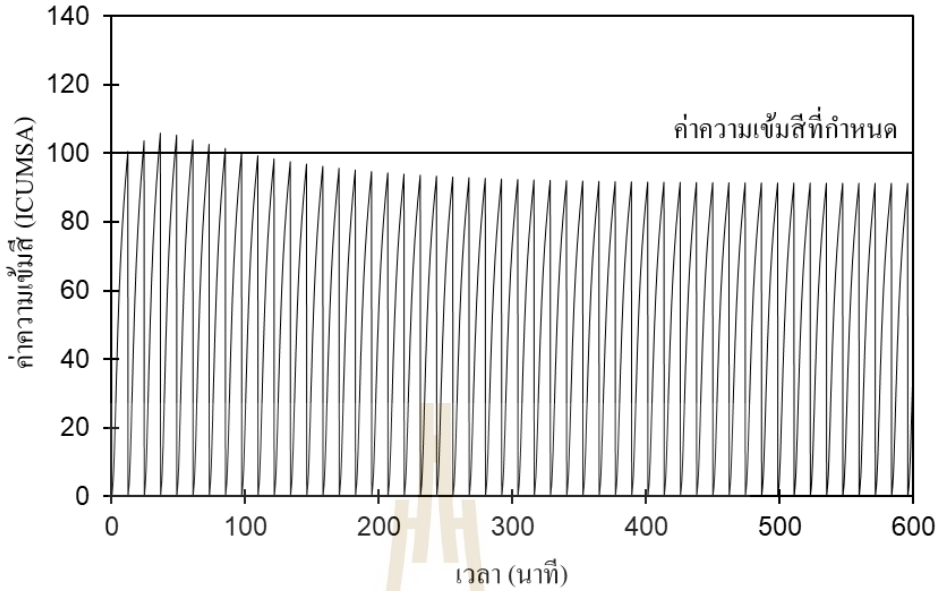
รูปที่ ค.6 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA



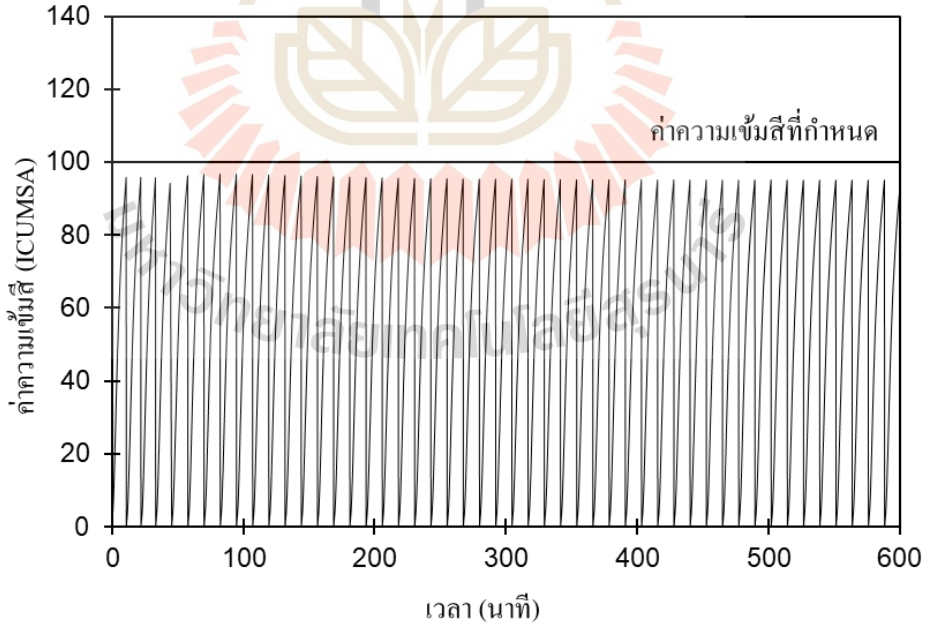
รูปที่ ค.7 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA



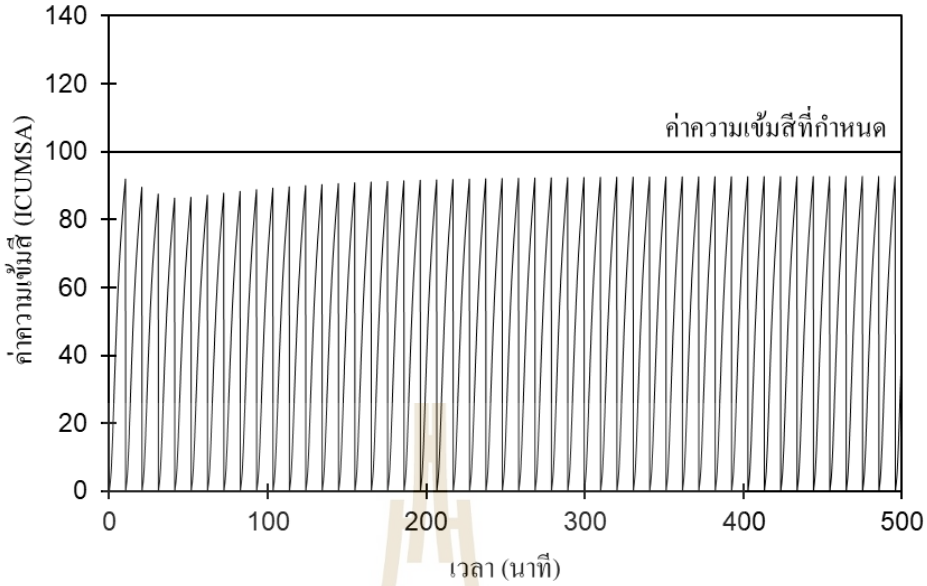
รูปที่ ค.8 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA



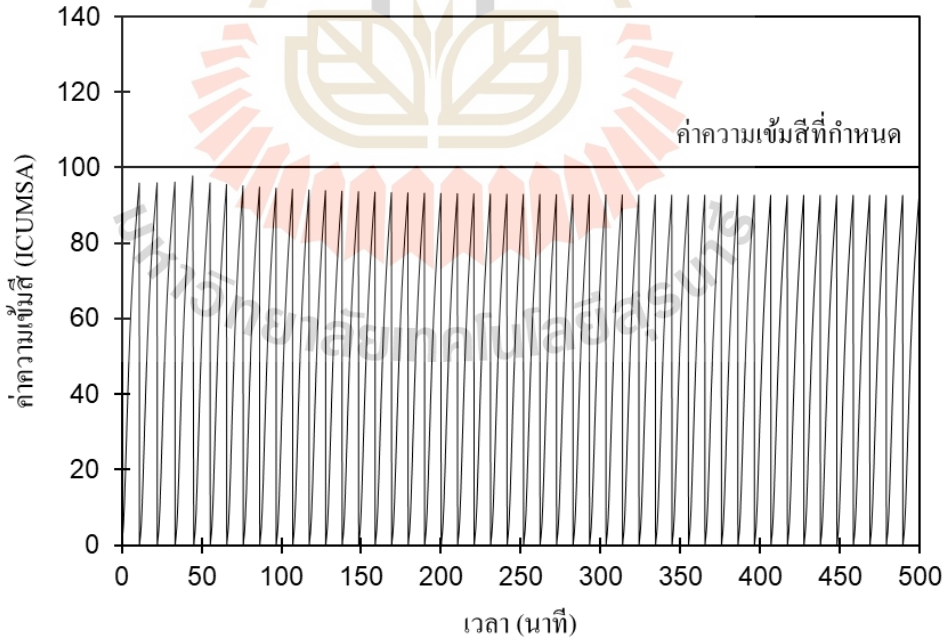
รูปที่ ค.9 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบพิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA



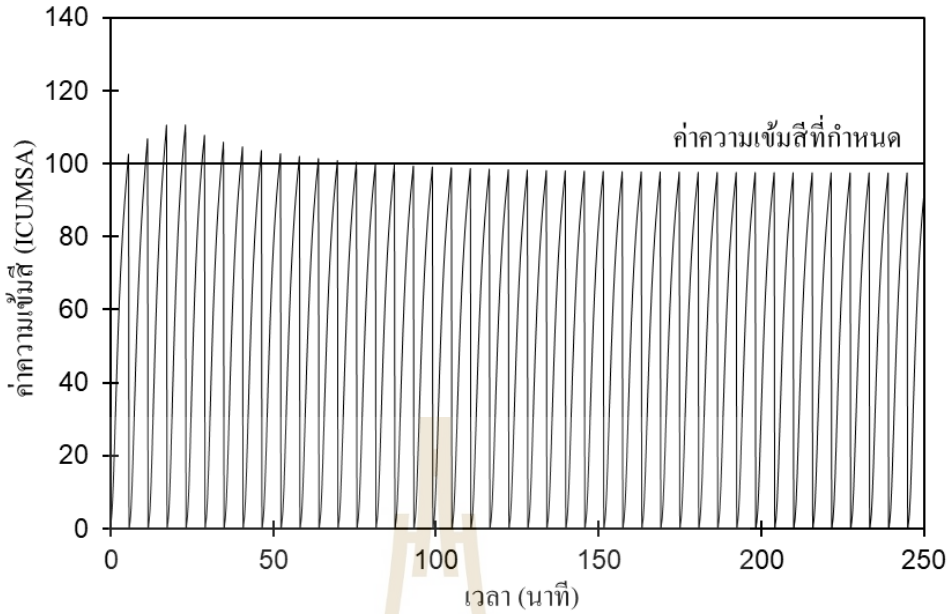
รูปที่ ค.10 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบพิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA



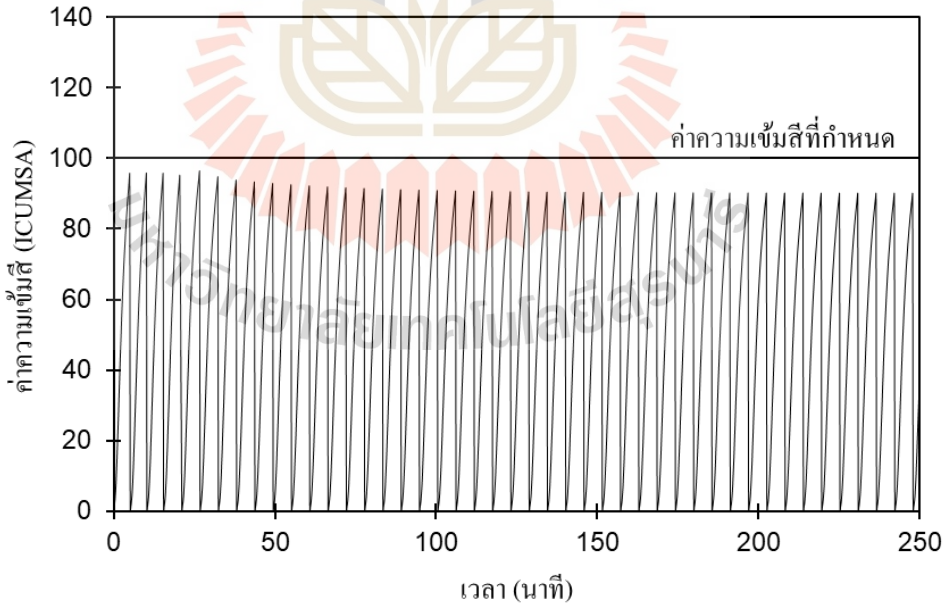
รูปที่ ค.11 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบพิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA



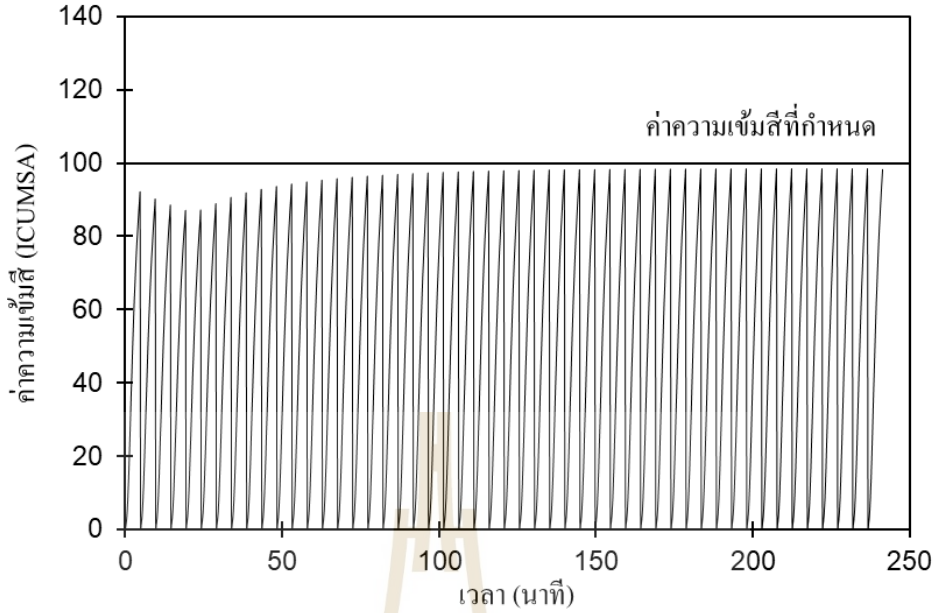
รูปที่ ค.12 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบพิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA



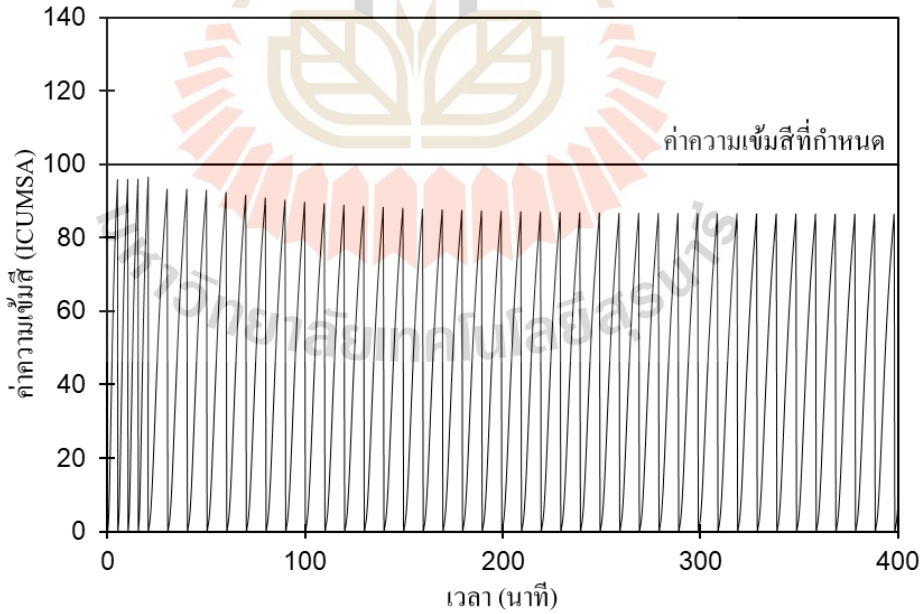
รูปที่ ค.13 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบพิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA



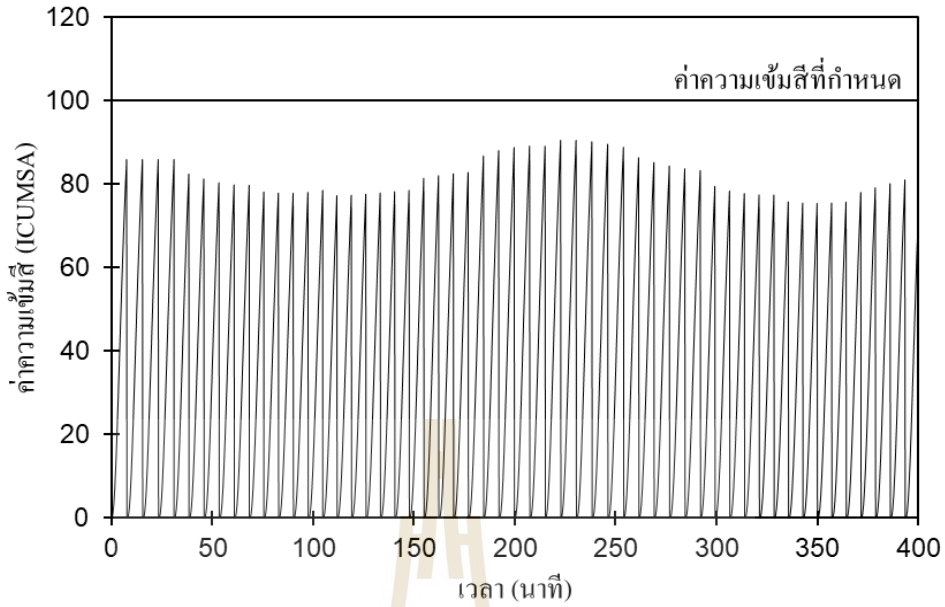
รูปที่ ค.14 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบพิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 500 ICUMSA



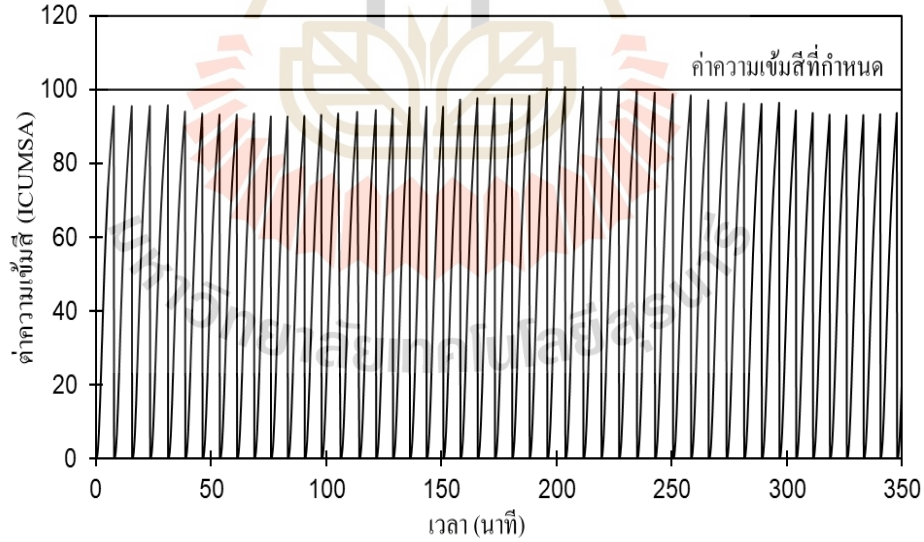
รูปที่ ค.15 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบพิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบทันทีหลังการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA



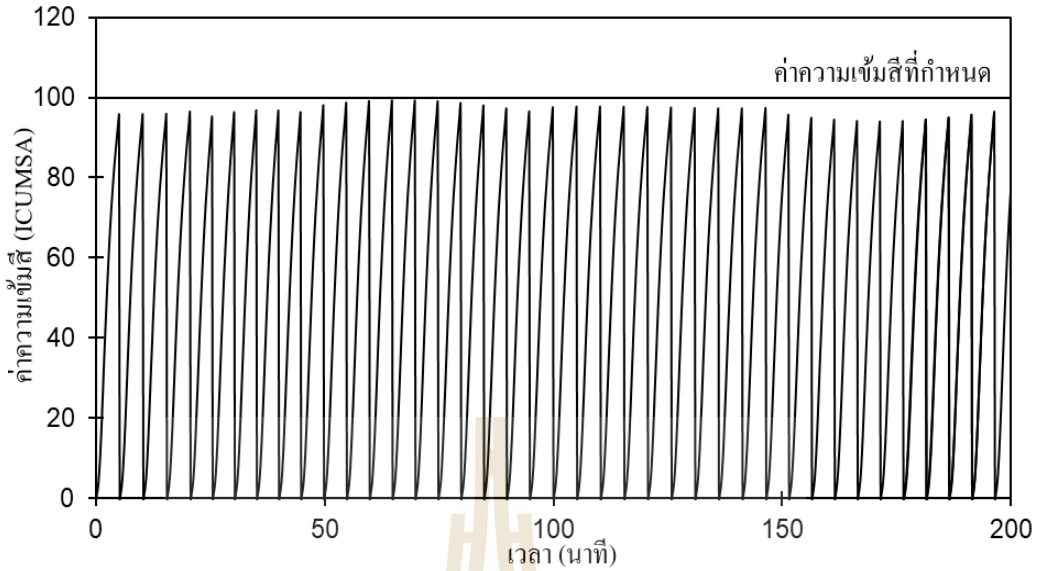
รูปที่ ค.16 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์แบบพิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาครบรอบที่รอบที่ 5 ของการรบกวนจาก 700 เป็น 900 ICUMSA



รูปที่ ค.17 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ที่ไม่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนเมื่อมีการรบกวนระบบแบบฟังก์ชันโคไซน์ ที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ ค.18 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ไม่ที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนเมื่อมีการรบกวนระบบแบบฟังก์ชันโคไซน์ ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ ค.19 การทำงานของหอดูดซับแบบพัลส์จากแบบจำลองหอดูดซับแบบพัลส์ไม่ที่พิจารณาการกระจายตัวตามแนวแกนเมื่อมีการรบกวนระบบแบบฟังก์ชันโคไซน์ ที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง

คุณสมบัติถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์

ในงานวิจัยนี้ใช้ถ่านกัมมันต์ทางการค้า Norit MAG 301 ของบริษัท Norit โดยผลิตจากถ่านหินชนิดคัดเกรดพิเศษที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นส่วนประกอบ เพื่อปรับค่าความเป็นกรดเบส ซึ่งถ่านกัมมันต์ชนิดนี้นิยมใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ อีกทั้งยังผ่านมาตราฐานและได้รับใบรับรองจาก Kosher ซึ่งแสดงคุณสมบัติไว้ในตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ Norit MAG 301

คุณสมบัติ		หน่วย
พื้นที่ผิว (BET surface area)	849.22	เมตร^2/กรัม
ปริมาตรรูพรุน (Pore volume)	0.54	เซนติเมตร^2/กรัม
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average pore diameter)	25.28	อังสตรอม
ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density)	0.46	กรัม/มิลลิลิตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Particle size)	1.3	มิลลิเมตร
Iodine number	>1000	มิลลิกรัม/กรัม
Molasses number	>210	-
Abrasion number	>68	-
Food Chemical Codex	ผ่าน	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Engineering Journal issn: 0125-8281

Article

Modelling and Feedforward Control of Pulsed Bed Adsorption Column for Colorant Removal in Sugar Syrup

Chanya Plangklang[a], and Terasut Sookkumnerd[b,*]

School of Chemical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
E-mail: [a]chanya.plangklang@gmail.com, [b,*]terasut@sut.ac.th (Corresponding author)

Abstract. In sugar refining, pulsed bed adsorption columns are used to remove colorants in sugar syrup. The pulsed bed adsorption column is a cyclic steady state operation that maximize the adsorbent utilization due to the increased driving force but requires special attention on control and optimization. The modelling and feedforward control of the pulsed bed adsorption columns is investigated in this article. The aim of this research is to develop the mathematical model of pulsed bed adsorption column by using the parameters obtained from breakthrough of fixed bed column and to investigate the optimum cycle time at different colorant concentrations in feed sugar syrup. The analysis showed that the optimum cycle time of pulsed bed adsorption column depended on feed flow rates and the colorant concentrations in feed sugar syrup. As the feed flow rate and colorant concentration increased, the optimum cycle time decreased. The feedforward control successfully compensated the effects of disturbances from colorant concentrations in feed syrup for both step and cosine functions and yielded the sugar syrup that met its specification.

Keywords: Pulsed bed, cyclic steady state, optimum cycle time, feedforward control, sugar refining.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ENGINEERING JOURNAL Volume 27 Issue 1
Received 25 July 2022
Accepted 24 January 2023
Published 31 January 2023
Online at https://engj.org/
DOI:10.4186/ej.2023.27.1.29

DOI:10.4186/ej.2023.27.1.29

Nomenclature

C	The outlet concentration [dimensionless]
C_0	The concentration at initial time in liquid phase [ICUMSA]
C_{eq}	The concentration at equilibrium in liquid phase [ICUMSA]
C_{inlet}	The inlet concentration [ICUMSA]
$C_{exp,i}$	The outlet concentration from experiment at time i [dimensionless]
$C_{exp,i}$	The outlet concentration from mathematical model at time i [dimensionless]
k	The mass transfer coefficient [1/s]
K	The equilibrium constant [dimensionless]
L	The height of pulsed bed column [m]
N	The number of cycles [cycle]
q	The concentration in adsorbent phase [dimensionless]
q_0	The concentration at initial time in adsorbent phase [ICUMSA]
t	Time [s]
v	The interstitial velocity of sugar syrup [m/s]
X_{pulse}	The ratio of adsorbent was removed and replaced per amount of all adsorbent bed
Z	The distance from entrance of column [m]
ε	The bed porosity [dimensionless]
τ	The dimensionless parameter in Klinkenberg's equation
τ_{cyc}	The cycle time of pulsed bed adsorber [min]
$\tau_{cyc,opt}$	The optimum cycle time of pulsed bed adsorber [min]
ξ	The dimensionless parameter in Klinkenberg's equation

1. Introduction

Sugar is the important constituent in the food industries, consumer products and other industries. Its color is one of the important specifications of high value-added refined sugar. In general, the color of the high quality exported super refined sugar must be less than 10 ICUSMA; hence, the colorant in sugar syrup for crystallizing super refined sugar must be less than 100 ICUMSA. The unit operations for removal of colorants in sugar syrup have long been developed and discussed [1-5].

Traditionally, carbonatation and ion exchange resin were used to remove the colorants in syrup. However, the wasted brine used in the regeneration of ion exchange resin was pollutant which need to be treated. Due to the less environmental impact and the lower cost for onsite reactivation, the application of granular activated carbon (GAC) pulsed bed adsorption columns for colorant removal in sugar refining is gradually increasing. In pulsed bed adsorption column, the high color sugar syrup leaving carbonatator (normally 700 – 900 ICUMSA) is fed at the bottom and low color sugar syrup (less than 100 ICUMSA) leaves at the top of the column. Periodically, the exhausted GAC is withdrawn from the bottom and fed to the onsite reactivation in the nearby furnace while the same amount of new GAC is fed at the top of the column [2-4]. Consequently, the pulsed bed adsorption column is the cyclic steady state operation in which the concentration of colorants in treated sugar syrup is a periodical function after certain number of cycles has reached [4]. The concentration gradient between phases in a pulsed bed adsorption column is higher than that in a fixed-bed adsorption column and the mass transfer in pulsed bed operation is much higher and the rate of mass transfer is enhanced. Because of the enhanced mass transfer, the pulsed bed operation generally requires lower capital investment, smaller space requirement, lower energy for regeneration and lower operating cost [4]. The cycle time is referred as the period of this periodical removal of exhausted and addition of new GAC [5, 6]. Because of the periodical simulated countercurrent movement of GAC, the driving force and, hence, mass transfer of colorants is enhanced when comparing with the conventional fixed-bed adsorption column [2, 7]. Although pulsed bed adsorption column has widely applied to the wastewater treatment and sugar refining as well as other industries, only limited number of publications has been available. For example, McKay modelled pulsed bed adsorption columns in wastewater treatment, predicted the wavefront rate and estimated cycle time based on the equations of the fixed bed model [11]. Morley studied the mathematical model of the ion-exchange columns with regeneration operation and performed numerical analysis to determine the optimum condition of color removal when varying the number of cycles, inlet concentration of feed flow rate and other parameters [12].

Based on the literature, no research directly related to the application of GAC pulsed bed adsorption column on removal of colorants in sugar syrup was published. Furthermore, no previous attempt has been made on the process control of the pulsed bed adsorption even though it is widely accepted that disturbances in cyclic steady-state operations; for example, simulated-moving bed chromatography and pressure-swing adsorption do cause the deviation from the desired set point. As a result, the process control of cyclic steady-state operations should be studied and properly tuned [6, 9-11].

As a result, the aim of this research is to develop the mathematical model of pulsed bed adsorption column in sugar refining by using the parameters obtained from the breakthrough curve of fixed-bed column and the modification of the initial conditions at the beginning of each cycle. To investigate the pulsed-bed adsorption column, the numerical analysis is then performed and the optimum cycle time at different colorant concentration in feed sugar syrup is evaluated. Finally, the effectiveness of feedforward control when there are changes of ICUMSA in feed sugar syrup using cycle time as the manipulating variable is investigated for the disturbance of colorant in feed syrup for both step and cosine functions. The finding reported in this article should benefit engineers who work in sugar refining as well as academics who are

DOI:10.4186/ej.2023.27.1.29

interested in modelling, optimization and control of cyclic steady-state operation of adsorption processes. It should be pointed out that the linear driving force model is chosen to model the mass transfer of colorant between syrup and adsorbent since it was reported by Cortes [16] that the adsorption of colorants on GAC was linear when the ICUMSA of sugar syrup is less than 2,000. Since Cortes [16] reported that the adsorption equilibrium constant increased with temperature, the chemisorption of colorants on GAC played an important role.

2. Experimental Procedure

2.1. Material

Granular Activated Carbon (GAC) Norit Mag 30I from supplier in average particle size of 1.3 mm. (12x30 mesh size screen) was washed with deionized water and dried in an oven at 105°C for 24 hr. The feed sugar syrup of 700 ICUMSA and 65 Brix was prepared by dissolved refined sugar (Mitr Phol), brown sugar (Aro) in deionized water at temperature 70°C in a water bath.

2.2. Fixed-bed Experiment

The GAC was packed in the column by wet packing method in a column with diameter of 5 cm. and length of 20 cm. After packing, the sugar syrup was fed at bottom of column with the flow rates of 4, 6 and 8 ml/min, respectively. The temperature of 60°C was maintained by heating the feed syrup. The samples were collected at the top of column until the breakthrough curve was obtained. The samples were analysed by measuring the absorbance at 420 nm (with the cell length of 10 mm) according to the ICUMSA method (International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis) and shown in Eq. (1).

$$ICUMSA = \frac{Absorbance(420nm)x10000}{conc.\,of\,total\,solid(g/cm^3)\,x\,cell\,length\,(mm)} \quad (1)$$

2.3. Breakthrough Curve of Fixed-bed Column

Based on the linear driving force model and plug flow assumption, Ruthven [17] show that the concentration profile of eluent for linear adsorption isotherm can be explained by Klinkenberg's equation, Eq. (2) to (4).

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2}erfc\left(\sqrt{\xi} - \sqrt{\tau} - \frac{1}{8}\sqrt{\xi} - \frac{1}{8}\sqrt{\tau}\right) \quad (2)$$

where

$$\tau = k\left(t - \frac{Z}{v}\right) \quad (3)$$

and

$$\xi = \frac{kKZ}{v}\left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right) \quad (4)$$

The breakthrough curve from fixed-bed experimental was thus used to determine mass transfer coefficient and equilibrium constant from nonlinear regression by minimize the summation square of error of the experimental results and the values obtained from Klinkenberg's equation at the exit of fixed bed column (Z = L). The bed porosity (ε) for GAC bed was set at 0.4 as suggested by Ruthven [17] and Tangsathitkulchai [18].

2.4. Modelling and Numerical Analysis of Fixed-bed and Pulsed Bed Adsorption Column

With the assumptions of linear adsorption isotherm, linear driving force model, plug flow assumption, the mathematical model of fixed bed column was shown in Eq. (5) and (6)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v\frac{\partial C}{\partial Z} - \frac{q_0}{C_0}\left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)\frac{\partial q}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k(C - C_{eq}) \quad (6)$$

The initial conditions of fixed-bed column are

$$C(Z, t = 0) = 0 \text{ and } q(Z, t = 0) = 0 \quad (7)$$

The boundary conditions of fixed-bed column is

$$C(Z = 0, t) = C_0 \quad (8)$$

Equations (5) and (6) were solved by numerical method of lines (NMOL) with spatial derivative terms approximated by 5 point biased up-winding approximation with the step sizes of 0.01 m [19-20]. The 4th-order Runge Kutta method was then used to solved the resulted ordinary differential equation, using SCILAB [21]. The accuracy of the mathematical model is validated by comparing with the breakthrough curve obtained from experiment and numerical analysis using the mean absolute error (MAE) which was defined in Eq. (9).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|C_{model,i} - C_{exp,i}\right|}{n} \quad (9)$$

Because the mass transfer in the fixed bed and in the pulsed bed are exactly the same, the mathematical model of pulsed bed adsorption column was adapted from that of fixed-bed column with the modification of initial conditions at the beginning of each cycle so that the pulse of exhausted GAC and the addition of new GAC was taken into account.

The initial conditions at the first cycle of pulsed bed are

$$C(Z, t = 0) = 0 \text{ and } q(Z, t = 0) = 0 \quad (10)$$

The initial conditions at the beginning of N+1th cycle which represent the 10% removal of GAC at the bottom

DOI:10.4186/ej.2023.27.1.29

of the column and 10% addition of novel GAC at the top of the column are

$$C = \begin{cases} 0 \; when \; Z \geq (1-0.1)L \\ C(t = Nt\tau_{cycle}, Z - 0.1L) \; if \; Z \leq (1-0.1)L \end{cases} \quad (11)$$

$$q = \begin{cases} 0 \; when \; Z \geq (1-0.1)L \\ q(t = Nt\tau_{cycle}, Z - 0.1L) \; if \; Z \leq (1-0.1)L \end{cases} \quad (12)$$

The boundary condition after the first interval is

$$C(Z = 0, t) = C_0 \quad (13)$$

Equations (5) and (6) along with the initial and boundary conditions of pulsed bed adsorption column were solved by numerical method of lines using the value of K and k obtained from fitting with the breakthrough curve.

2.5. Estimating the Optimum Cycle Time of Pulsed Bed Adsorber Column

The optimum cycle time was first estimated from the rate of mass transfer zone expansion at the breakthrough. By using the pulse of 2 cm (corresponding to the 10% pulse - the 10% pulsing is within the normal operating range of 5 – 15% as reported by Liang [3]), the initial guess of pulse time is the ratio of 0.02 and rate of mass transfer zone expansion. The iteration of optimum cycle time was then performed by small increases of the first estimate until the concentration of colorants in product syrup reached its specification of 100 ICUMSA. In order to study the effect of colorant concentrations in feed syrup on optimum cycle time, the concentration (C_{inlet}) of colorants in feed syrup was varied from 500 ICUMSA to 1200 ICUMSA and the optimum cycle time ($\tau_{cycle,opt}$) of pulsed bed column at each flow rate was determined by using the same approach. The relationship of the optimum cycle time and colorant concentration in feed syrup was correlated by linear regression.

2.6. Feedforward Control of Pulsed Bed Adsorption Column

The feedforward control of pulsed bed adsorption column when there is the disturbance of colorant in feed sugar syrup using the cycle time (τ_{cycle}) as the manipulated variable and the outlet concentration of colorants (C) as the controlled variable as shown in Fig. 1 was investigated. When there is the change in C_{inlet}, the cycle time was adjusted based on the relationship of $\tau_{cycle,opt}$ and C_{inlet} obtained in Section 2.5.

The feedforward control performance when there were step disturbance and cosine disturbance were then investigated. The step disturbance, when C_{inlet} changed 700 to 500, and 700 to 900 ICUMSA represented the scenario when the colorant concentration in feed sugar syrup in the actual raw sugar processes decreased and increased respectively. While the cosine function with the average of 800 ICUMSA, the amplitude of 100 ICUMSA and the period of 4 hours represented the scenario in the real sugar refining plants that the colorant concentrations in feed syrup fluctuated.

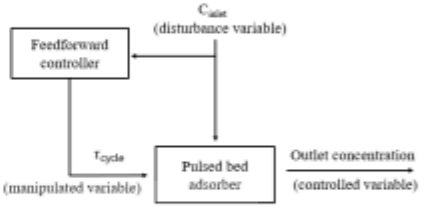


Fig. 1. Block diagram of feedforward control of pulsed bed adsorption column.

3. Result and Discussion

The equilibrium constant (K) and mass transfer coefficient (k) from nonlinear regression with Klinkenberg's equation were shown in Table 1. Because the mass transfer coefficient increased when feed flow rate increased, the mass transfer coefficient at 4 ml/min was the lowest due to the lowest value of Reynold number.

Table 1. Parameter estimated from breakthrough curve of fixed-bed column.

Flowrate [ml/min]	K [-]	k [1/s]	Mean Absolute Error (MAE)
4	1.58	2.35×10^{-4}	6.66×10^{-2}
6		8.08×10^{-4}	1.08×10^{-1}
8		8.09×10^{-4}	6.86×10^{-2}

By using the parameters listed in Table 1, the breakthrough curve at 4, 6 and 8 ml/min were able to be correlated as shown in Fig. 2. The small MAE may probably cause by the axial dispersion that was neglected in this model. Further communication on the effect of axial dispersion will be published subsequently. It should be noted that the breakthrough time generally decreased when the flow rate increased.

Since the linear adsorption isotherm of colorants on GAC was reported [16], it was expected that the mass transfer zone was not constant [17]. Consequently, the concentration profile inside the column at different flow rates was shown in Fig. 3. Based on Fig. 3, it was obvious that the width of mass transfer zone was not constant. By using the value of C/C_0 at breakthrough point of 0.143, which was the specification, the mass transfer zone width and the rate of mass transfer zone expansion were shown in Fig. 4 and Fig. 5.

DOI:10.4186/ej.2023.27.1.29

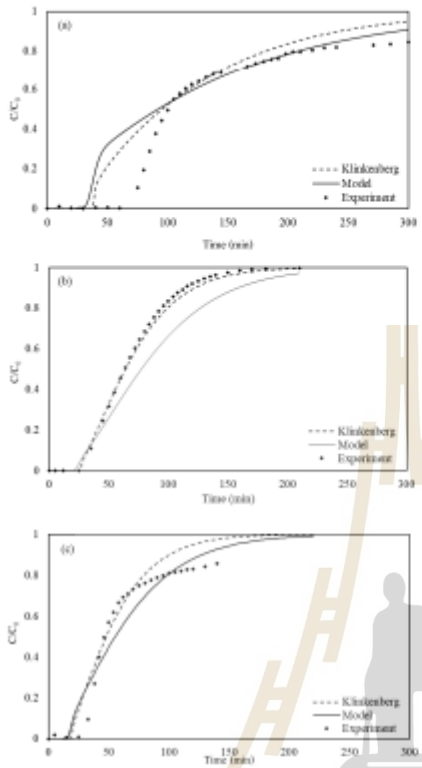


Fig. 2. Comparison between breakthrough curve from experiment, Klinkenberg and the model of fixed-bed column at different flow rates (a) 4 ml/min (b) 6 ml/min and (c) 8 ml/min.

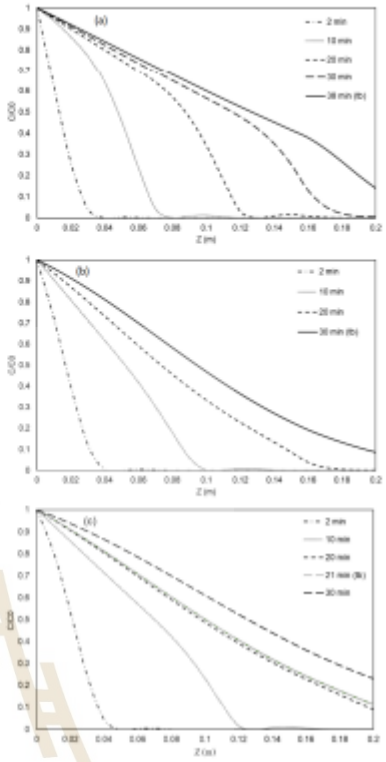


Fig. 3. Concentration profiles inside a fixed bed column obtained from a model at different flow rates (a) 4 ml/min (b) 6 ml/min and (c) 8 ml/min.

From Fig. 5, it was obvious that the rate of mass transfer zone expansion depended on the flow rate. At the flow rate of 8 ml/min, the mass transfer zone expanded at the highest speed than the other flow rates and would result in the lowest breakthrough time. Since the mass transfer zone must not move beyond the pulse bed adsorption column for the successful run of pulsed bed adsorption, the breakthrough time and the rate of mass transfer zone expansion usually affected the optimum cycle times in the pulsed bed adsorption column which would be discussed next.

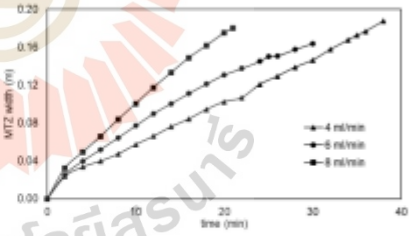


Fig. 4. Mass transfer zone width in a fixed bed column at flow rate of 4, 6, and 8 ml/min.

DOI:10.4186/ej.2023.27.1.29

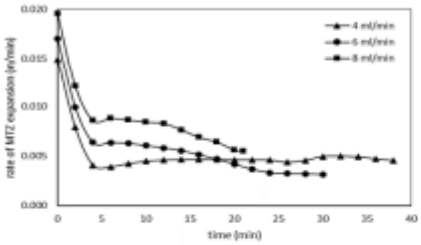


Fig. 5. Rate of mass transfer zone (MTZ) expansion in fixed bed at flow rate of 4, 6 and 8 ml/min.

It should be further noted that the rate of mass transfer zone expansion shown in Fig. 5 was from the beginning of fixed bed operation to the breakthrough point. The rate of mass transfer zone expansion probably decreased further after the breakthrough. Nevertheless, these rates of mass transfer zone expansion at the breakthrough were used as the initial guesses of optimum cycle time in the pulsed bed operation.

The numerical analysis of pulsed bed adsorption column was performed based on the parameters listed in Table 1 and shown in Fig. 6.

From Fig. 6, the cyclic steady state behavior of pulsed bed adsorption column was clearly established after 23 to 30 cycles. It should be noted that the cyclic steady states were also reached after 23 to 30 cycles at the flow rate of 4 and 8 ml/min. By using the initial guess of cycle time from the rate of mass transfer zone expansion obtained in fixed bed, it was observed that there was the optimum cycle time at the corresponding flow rate and the colorant concentration in feed sugar syrup. For the feed sugar syrup of 700 ICUMSA and at the flow rate of 6 ml/min, the optimum cycle time is 7.68 min.

When the cycle time was higher than the optimum cycle time, the exit concentration of colorants at the cyclic steady state will be higher than its specification of 100 ICUMSA. On the other hand, if the cycle time is less than the optimum one, the GAC will not be used efficiently – the removal of GAC which could still adsorb colorants occurred. Therefore, it is particularly of engineers' interests to investigate the optimum cycle time at different flow rates and different colorants concentration.

It should be further pointed out that this optimum cycle times were higher than the initial guesses due to the fact that the rate of mass transfer zone expansion decreased after the breakthrough time. Using the approach similar to the one described above, the relationship of the optimum cycle time and the colorant concentrations in feed sugar syrup at different flow rate were shown in Fig. 7.

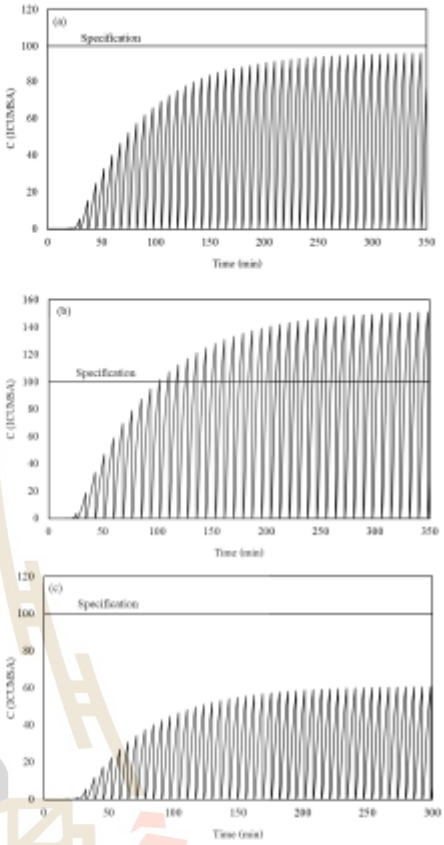


Fig. 6. The predicted performance of pulsed bed column at inlet concentration 700 ICUMSA of feed flow rate 6 ml/min. (a) optimum cycle time of 7.68 min (b) cycle time < optimum cycle time and (c) cycle time > optimum cycle time.

Based on Fig. 7, it was obvious that the optimum cycle time increased when the inlet concentration decreased since the mass transfer zone would move at the lower speed and the frequency of pulsing would definitely be less. Furthermore, when the inlet concentration was 100 ICUMSA which was the specification of the process, there was no need to run the pulsed bed adsorption columns and the correlation yielded the optimum cycle time of infinity which reflected this fact.

DOI:10.4186/ej.2023.27.1.29

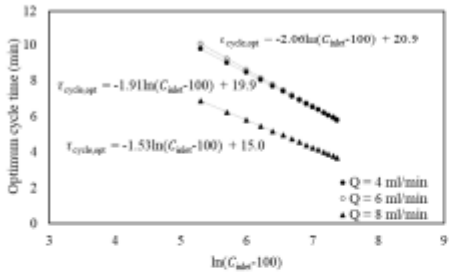


Fig. 7. Relationship between inlet concentration and optimum cycle time of pulsed bed adsorber column at feed flow rates of 4, 6 and 8 ml/min.

In addition, the optimum cycle time at 4 ml/min and 6 ml/min were very close to each other, especially at higher colorant concentration in feed sugar syrup while the optimum cycle time at 8 ml/min was significantly less than at 4 or 6 ml/min. It should be pointed out that the longer breakthrough time in fixed bed column would result in the shorter optimum cycle time. Furthermore, the mass transfer zone at 8 ml/min moved at the higher speed and the lower optimum cycle time was thus required. Consequently, the control of feed flow rate of syrup must be applied in order to operate the pulsed bed adsorption column efficiently. Alternatively, the more advance control of industrial pulsed bed adsorption column where the feed flow rate was the disturbance must be investigated in the future.

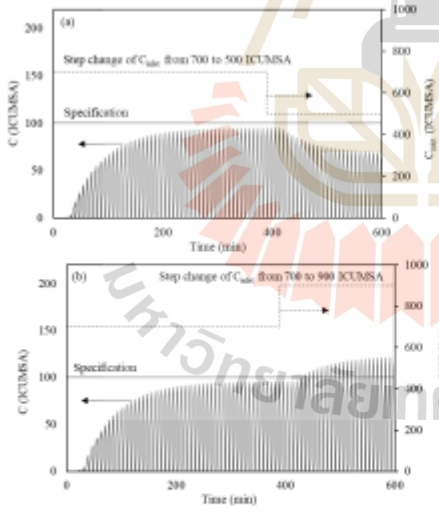


Fig. 8. The predicted performance of pulsed bed column at constant cycle time of flow rate 6 ml/min (a) inlet concentration changed 700 to 500 ICUMSA and (b) inlet concentration changed 700 to 900 ICUMSA.

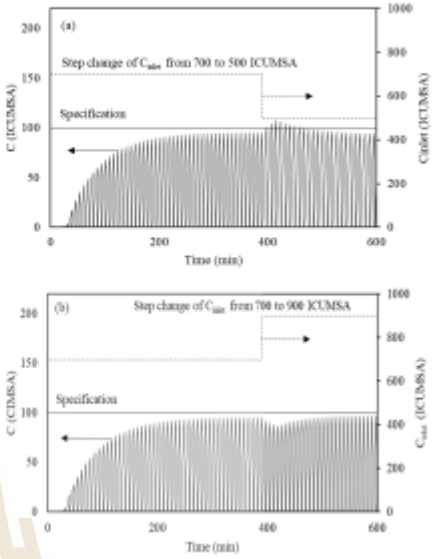


Fig. 9. The predicted performance of pulsed bed model for step change at flow rate 6 ml/min (a) cycle time adjusted immediately for step change of inlet concentration from 700 to 500 ICUMSA and (b) cycle time adjusted immediately for step change of inlet concentration from 700 to 900 ICUMSA.

In order to investigate the advantage of using feedforward control on pulsed bed adsorption column, the numerical investigation of pulsed bed adsorption column and pulsed bed adsorption column without and with feedforward control were shown in Fig. 8 and Fig. 9, respectively. In Fig. 8, the performance of pulsed bed adsorption column with the step change of colorant concentration in feed sugar syrup without feedforward control was shown and it was obvious that the product did not meet its specification since the product would have the color of 120 ICUMSA. On the other hand, when the colorant concentration in feed syrup decreased from 700 to 500 ICUMSA, the GAC was not fully utilized. Hence, the application of feedforward control of pulsed bed adsorption column should be beneficial.

Therefore, the concept of feedforward control by using the cycle time as the manipulated variable was investigated and their performances were illustrated in Fig. 9. From Fig. 9a and 9b, the performance of feedforward control with the immediate adjustment of the cycle time when there was a change in colorant concentration in feed sugar syrup was shown. It was found that there was the undesirable effect between the first and the eighth cycle after the disturbance since the

DOI:10.4186/ej.2023.27.1.29

product had the color exceeded 100 ICUMSA for approximately 7 cycles before it decreased to 100 ICUMSA after reaching the new cyclic steady state. This temporally negative effect probably caused by the large time constant of the pulsed bed adsorption column – the effect of colorant concentration in feed sugar syrup was normally observed only after 4 to 8 cycles (depending on flow rates). The same phenomenon was observed in the fixed bed adsorption column.

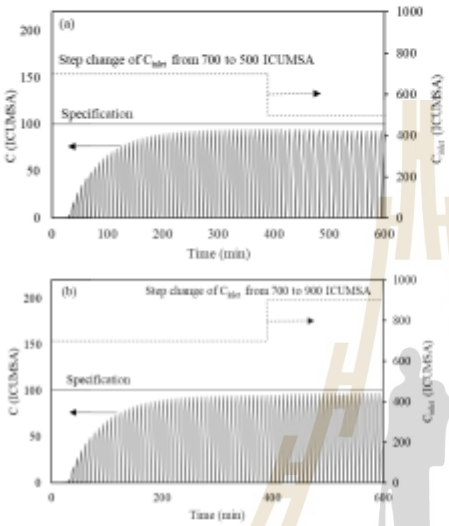


Fig. 10. The predicted performance of pulsed bed model for step change at flow rate 6 ml/min (a) cycle time adjusted with the delay of 5 cycles for a step change of inlet concentration from 700 to 500 ICUMSA and (b) cycle time adjusted with the delay of 5 cycles for a step change of inlet concentration from 700 to 900 ICUMSA.

In order to remedy this negative effect, the delay of 5 cycles was added to the manipulated variable. When this delay was added, the performance of pulsed bed adsorber were much better as presented in Fig. 10a and 10b. There was no temporally undesirable effect and the color of sugar syrup leaving the pulsed bed adsorption column was within its specification of 100 ICUMSA for all cycles.

The performance of feedforward control of pulsed bed column with the delay of manipulated variable was further investigated with the periodical disturbance of colorant concentration in feed syrup using cosine function which should represented the fluctuation of colorant concentrations in feed syrup observed in real sugar refining processes and the results were shown in Fig. 11.

From Fig. 11, it was obvious that the feedforward control of pulsed bed column was able to produce the product sugar syrup than met its specification with the efficient utilization of GAC. On the other hand, the pulsed bed adsorption column without feedforward control did not produce the sugar syrup that met its specification.

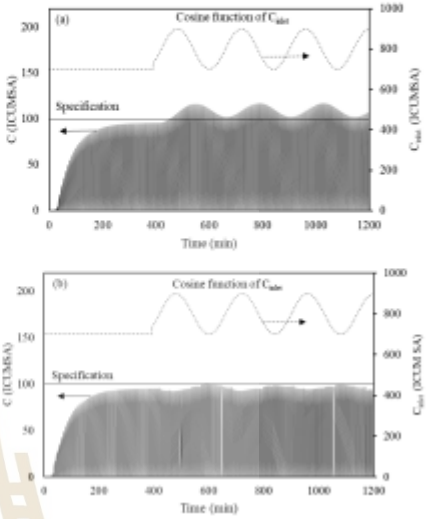


Fig. 11. The predicted performance of pulsed bed column of inlet concentration changes of 700 ICUMSA to cosine function (a) without feedforward control and (b) cycle time adjusted with the delay of 5 cycles.

As a result, the concept of feedforward control when applying to pulsed bed adsorption columns in sugar refining process would enhance the operation of pulsed bed adsorption column. However, in order to efficiently control pulsed bed adsorption column, further studies on feedforward are required, especially on the effect of other disturbances as well as the online parameter estimation on equilibrium constant of adsorption – the disturbance that comes from the reactivation of spent activated carbon. Furthermore, the more advanced process control which could yield the acceptable syrup when there are several disturbances; for example, feed flow rates and colorant concentrations in sugar syrup at the same time, should be investigated.

4. Conclusion

In conclusion, the model of pulsed bed adsorption column in sugar refining process was developed and solved by using the parameters obtained from the breakthrough experiment. The feedforward control using the cycle time as the manipulated variable, was able to compensate the disturbance of colorants concentration in feed sugar syrup. Further investigation on the effect of

DOI:10.4186/ej.2023.27.1.29

axial dispersion is currently undergoing and is going to be published subsequently.

Acknowledgement

Chanya Plangklang is grateful for the financial support by Suranaree University of Technology.

References

[1] J. L. A. Azevedo, "Sugar decolorization—strategies and solutions," Ph.D. dissertation, University of Coimbra, 2017.

[2] E. Hugot, *Handbook of Cane Sugar Engineering*. Elsevier Science, 1986.

[3] J. H. Payne, *Unit Operations in Cane Sugar Production*. Elsevier Science, 1982.

[4] J. C. P. Chen and C. C. Chou, *Cane Sugar Handbook: A Manual for Cane Sugar Manufacturers and Their Chemists*. John Wileys & Sons, 1993.

[5] P. Rein, *Cane Sugar Engineering*. Bartens, 2016.

[6] J. K. Conlee, "A pulse bed granular carbon system for refining glucose," *Starch-Stärke*, vol. 23, no. 10, pp. 366-369, 1971.

[7] J.-H. Liang, "Pulsed-bed moving-granular activated carbon system," in *Handbook of Sugar Refining: A Manual for the Design and Operation of Sugar Refining Facilities*, C. C. Chou, Ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2000.

[8] U. G. Svedberg, "Numerical solution of multicolumn adsorption processes under periodic countercurrent operation," *Chemical Engineering Science*, vol. 31, pp. 345-353, 1976.

[9] M. Minceva, L. S. Pais, and A. E. Rodrigues, "Cyclic steady state of simulated moving bed processes for enantiomers separation," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 42, pp. 93-104, 2003.

[10] K. Klatt, F. Hanisch, and G. Dünnebier, "Model-based control of a simulated moving bed chromatographic process for the separation of fructose and glucose," *Journal of Process Control*, vol. 12, pp. 203-219, 2002.

[11] G. McKay, "Design models for adsorption systems in wastewater treatment," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 31, pp. 717-731, 1981.

[12] J. P. Morley, "Mathematical model of an ion exchange column," in *Proceedings of The South African Sugar Technologists's Association*, South Africa, 1988, vol. 62, pp. 56-64.

[13] A. Küpper and S. Engell, "Engineering of online optimizing control—A case study: Reactive SMB chromatography," IFAC Proceedings, vol. 41, pp. 964-969, 2008.

[14] M. D. Urich, "Dynamic modeling, predictive control and optimization of a rapid pressure swing adsorption system," doctoral dissertaion, Lehigh University, 2018.

[15] W. Du and K. A. M. Alkebsi, "Model predictive control and optimization of vacuum pressure swing adsorption for carbon dioxide capture," in *2017 6th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (AdCONIP)*, 2017, pp. 412-417.

[16] R. A. Cortes, "Direct white sugar production: optimization and chemical regeneration of fixed-bed activated carbon adsorbers," M.S. Thesis, Dept. of Biological & Agricultural Engineering, Louisiana State University, L.A., USA, 2007.

[17] D. M. Ruthven, *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. New York, USA: John Wiley & Son,1984.

[18] C. Tangsathitkulchai, "Adsorption process," Suranaree University of Technology, 2011.

[19] W. E. Schisser, *The Numerical Method of Lines. Integration of Partial Differential Equations*. Elsevier, 1991.

[20] W. E. Schisser, *A Compendium of Partial Differential Equation Models. Method of Lines Analysis with Matlab*. Cambridge University Press, 2009.

[21] A. V. Wouwer, P. Saucer, and C. Vilas, *Simulation of ODE/PDE Models with Matlab, Octave and Scilab. Scientific and Engineering Applications*. Springer Charm, 2014.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

DOI:10.4186/ej.2023.27.1.29

Terasut Sookkumnerd.
Bangkok, November 28th, 1973.
B.Eng. (Chemical Engineering), Kasetsart University, Bangkok, 1993.
M.S. (Chemical Engineering), Lehigh Univeristy, Bethlehem, USA, 1996.
Ph.D. (Chemical Engineering), Lehigh Univeristy, Bethlehem, USA, 2000.
He has worked at School of Chemcial Engineering at Suranaree University of Technology since 2000 where he has conducted research on sugar processes.
Dr.Terasut Sookkumnerd is a member and also a board of TIChE (The Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry).

Chanya Plangklang.
Buriram, May 24th, 1996.
B.Eng. (Chemical Engineering), Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 2018.
She is studying Chemcial Engineering for her master at Suranaree University of Technology and she is expected to graduate in 2023.
Chanya Plangklang is a member of TIChE (The Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry).

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวชัญญา ปลั่งกลาง เกิดเมื่อวันที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2539 อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ เข้าศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนมารีย์อนุสรณ์ จังหวัดบุรีรัมย์ ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนบุรีรัมย์พิทยาคม จังหวัดบุรีรัมย์ เข้าศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยได้รับทุนการศึกษา 84 พรรษาซึ่งเป็นทุนภายในมหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาด้วยเกียรตินิยมอันดับสองเมื่อปี พ.ศ. 2561 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ด้วยทุนการศึกษากิตติบัณฑิตซึ่งเป็นทุนภายในมหาวิทยาลัย และในขณะที่ทำการศึกษาได้มีโอกาสปฏิบัติหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอน (TA) และเป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการ (RA) ในสาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้เข้าร่วมนำเสนองานในงานประชุมวิชาการนานาชาติของสมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย (Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry: TiChE) และปี พ.ศ. 2566 ได้ตีพิมพ์ผลงานวิชาการเรื่อง “Modelling and Feedforward Control of Pulsed Bed Adsorption Column for Colorant Removal in Sugar Syrup” ในวารสาร “Engineering Journal”

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี