

การพัฒนาแบบจำลองพลวัตสำหรับระบบการควบคุมการดูดซึมของไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพ
ในเวเนจูรีสคริปเตอร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF DYNAMIC MODEL FOR ABSORPTION CONTROL SYSTEM OF
HYDROGEN SULFIDE FROM BIOGAS IN VENTURI SCRUBBER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแบบจำลองพลวัตสำหรับระบบการควบคุมการ ดูดซึมของไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพในเวทจิวส์คาร์บ เบอร์
โดย	นายวาทัญญู ชมวิเชียร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	พงศ์ธร เจริญศุภนิมิตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รุ่งทิwa เมธาอาภาานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(พงศ์ธร เจริญศุภนิมิตร)

..... กรรมการ
(พิมพ์พร พลเพชร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(วีรวรรณ วีรชัยพิเชษฐ์กุล)

วทัญญู ชมวิเชียร : การพัฒนาแบบจำลองพลวัตสำหรับระบบการควบคุมการดูดซึมของไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพในเวนจูรีสครับเบอร์. (DEVELOPMENT OF DYNAMIC MODEL FOR ABSORPTION CONTROL SYSTEM OF HYDROGEN SULFIDE FROM BIOGAS IN VENTURI SCRUBBER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : พงศ์ธร เจริญศุภนิมิตร

งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการพัฒนาแบบจำลองพลวัตสำหรับการควบคุมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในเวนจูรีสครับเบอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เจือปนในก๊าซชีวภาพ โดยในกระบวนการที่ใช้ก๊าซชีวภาพ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเป็นกรดควรถูกกำจัดเพื่อป้องกันความเสียหายต่ออุปกรณ์ในกระบวนการลำดับถัดไป ในงานนี้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกดูดซึมด้วยสารละลายเหล็กไอออน(III) (Fe^{3+}) ซึ่งเป็นสารดูดซึมที่ใช้ในเวนจูรีสครับเบอร์ โดยปกติแล้วปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพป้อนเข้าสู่เวนจูรีมีความไม่แน่นอนได้ แม้ว่าก๊าซชีวภาพได้รับมาจากแหล่งผลิตเดียวกันก็ตาม เนื่องจากความหลากหลายของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ดังกล่าว ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกของเวนจูรีจึงมีค่าไม่คงที่หากอัตราการป้อนสารดูดซึมไม่มีการปรับเปลี่ยน ดังนั้นการควบคุมความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ณ ทางออกโดยการปรับอัตราการป้อนของสารดูดซึมมีความสำคัญอย่างยิ่ง จากการศึกษาในงานวิจัยในอดีตพบว่าแบบจำลองที่สามารถอธิบายการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในเวนจูรีสครับเบอร์ถูกพัฒนาขึ้นที่สภาวะคงตัว ทว่าแบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถใช้ออกกระบวนการควบคุมได้โดยตรง ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองพลวัตที่มีพื้นฐานจากแบบจำลองที่สภาวะคงตัวจึงถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ หลังการพัฒนาแบบจำลองพลวัตเสร็จสิ้น ตัวแปรอธิบายลักษณะเฉพาะของกระบวนการ เช่น เกนของกระบวนการ (process gain (K)), ค่าคงที่เวลาของกระบวนการ (process time constant (τ)) และ ค่าเวลาหน่วง (time delay (t_d)) ถูกใช้เพื่อการออกแบบหน่วยควบคุมแบบพี ไอ ดี (PID: proportional-integral-derivative) โดย ใช้ โป ร แ ก ร ม แม็ ท แล บ (MATLAB) ทำที่สุดการทดสอบหน่วยควบคุมพีไอดีที่ออกแบบนั้นพบว่าหน่วยควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ณ ทางออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070298921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: absorption, hydrogen sulfide absorption, PID controller

Watanyu Chomwichain : DEVELOPMENT OF DYNAMIC MODEL FOR ABSORPTION CONTROL SYSTEM OF HYDROGEN SULFIDE FROM BIOGAS IN VENTURI SCRUBBER . Advisor: Pongtorn Charoensuppanimit

This work presents a scheme for the development of dynamic model for control of hydrogen sulfide (H_2S) concentration in a venturi scrubber, an absorption apparatus for a removal of H_2S contained in biogas. In biogas processing, H_2S is an acid gas that must be removed to prevent possible damages of process equipment. In this work, H_2S was absorbed using ferric (Fe^{3+}) solution as a solvent fed to the venturi scrubber. At the scrubber inlet, H_2S content of biogas could be varied although the biogas is obtained from the same source. Such variability certainly affects the concentration of H_2S at the venturi outlet if the solvent feed rate remains constant. Thus, it is crucial to control the outlet concentration of H_2S by automatic adjustments of the solvent feed rate. According to the previous study, the steady state model capable of describing the absorption behavior of H_2S was available which, in fact, cannot be utilized directly for the control scheme development. Therefore, we develop the dynamic model and execute the model using MATLAB. The model characteristics required for the design of a control system, e.g. process gain (K), process time constant (τ) and time delay (t_d) are subsequently determined in order to estimate the parameters contained in the proportional–integral–derivative control model (PID). Finally, the obtained PID controller appears capable of maintaining effectively the desired outlet concentration of H_2S .

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.พงศ์ธร เจริญสุขณิมิตร อาจารย์ที่ปรึกษาที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการดำเนินการวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรณเจตพงศ์ชัย ที่ให้คำแนะนำการดำเนินงานและแนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินการไปได้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.รุ่งทิวา เมธาอาภาานนท์ ประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ดร.พิมพ์พร พลเพชร กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ดร.วีรวรรณ วีรชัยพิเชษฐกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้เกียรติตอบรับเป็นกรรมการการในการสอบวิทยานิพนธ์และทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณสำนักบริหารเทคโนโลยีสารสนเทศ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่อำนวยความสะดวกจัดหาโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการคำนวณในวิทยานิพนธ์ทำให้ข้าพเจ้าสามารถใช้โปรแกรม MATLAB ได้สะดวกและไม่เสียค่าใช้จ่าย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจจนสามารถสำเร็จการดำเนินการวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วทัณญ ชมวิเชียร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ 1	
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี ความรู้ทั่วไป และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	4
2.2 เวนจิวรีสครบเปอร์.....	8
2.3 ตัวดูดซึมและปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	10
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	15
3.1 การแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สถานะคงตัวเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พลวัต ...	15
3.2 การแปลงแบบจำลองพลวัตจากให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ทที่ 1 ..	16
3.3 ออกแบบตัวควบคุม PID	21
3.4 การทดสอบตัวควบคุม PID ด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวน.....	22

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 25

 4.1 การเทียบผลการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สภาวะคงตัวกับแบบจำลองทาง
 คณิตศาสตร์พลวัต 25

 4.2 การแปลงแบบจำลองพลวัตจากให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ที่ 1.. 26

 4.3 ออกแบบตัวควบคุม PID 32

 4.4 การทดสอบตัวควบคุม PID ด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวน..... 34

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง..... 42

 บรรณานุกรม..... 43

 ประวัติผู้เขียน..... 46



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1. สัดส่วนก๊าซชีวภาพที่ใช้ในแบบจำลอง	2
ตารางที่ 2. สัดส่วนก๊าซชีวภาพในการทดลองของ C. Maia (2017)	10
ตารางที่ 3. ผลเปรียบเทียบค่าจากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ	13
ตารางที่ 4 แสดงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ K_{gain} , τ และ t_d ณ ช่วงการดำเนินการต่างๆตามหัวข้อ 3.2.1.1 – 3.2.1.2	28
ตารางที่ 5 แสดงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ K_D ณ ช่วงการดำเนินการต่างๆตามหัวข้อ 3.2.2.1 – 3.2.2.3.....	31
ตารางที่ 6 แสดงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ τD ณ ช่วงการดำเนินการต่างๆตามหัวข้อ 3.2.2.1 – 3.2.2.3.....	31
ตารางที่ 7 แสดงค่า K_p K_i K_D และ N จากการดำเนินการคำสั่ง Auto-tuning ในโปรแกรม MATLAB Simulink	32
ตารางที่ 8 แสดงแบบจำลองที่นำมาทดสอบกับตัวควบคุม PID โดยแบบจำลองที่ 0 เป็นแบบจำลอง จาก K_{gain} , τ และ t_d ที่เป็นค่าเฉลี่ย และแบบจำลองที่ 1 – 6 เป็นแบบจำลองที่สุ่มเลือกขึ้นมา.....	33
ตารางที่ 9 แสดงแบบจำลองเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนที่นำมาทดสอบกับตัวควบคุม PID โดย แบบจำลองที่ 0 เป็นแบบจำลองจาก K_D และ τD ที่เป็นค่าเฉลี่ย และแบบจำลองการรบกวนที่ 1 – 4 เป็นแบบจำลองที่สุ่มเลือกขึ้นมา.....	37

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1. แผนผังของกระบวนการควบคุมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	4
รูปที่ 2. แผนผังกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยจุลินทรีย์	5
รูปที่ 3. แผนผังกระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	6
รูปที่ 4. เครื่องปฏิกรณ์ในกระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก). หอแพ็คคอลัมน์ ข). หอลำดับ ชั้น ค) หอสเปรย์	6
รูปที่ 5. เครื่องปฏิกรณ์ในกระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบเวนจูรีสครับเบอร์	8
รูปที่ 6. ชุดการทดลองการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยวงกลมสีแดงคือตำแหน่งของเวนจูรีสครับ เบอร์	11
รูปที่ 7. ตัวแปรในวิธีการของ open loop สำหรับตัวแปร Process gain (K_{gain}), Time constant (τ) และ Time delay (t_d)	17
รูปที่ 8. ตัวแปรในวิธีการของ open loop สำหรับตัวแปร Disturbance gain (K_D) และ Disturbance time constant (τD)	19
รูปที่ 9. ผังหน่วยควบคุม PID ในโปรแกรม MATLAB Simulink	21
รูปที่ 10. ผังหน่วยควบคุม PID ที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบขั้นในโปรแกรม MATLAB Simulink	22
รูปที่ 11. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าโดยเพิ่มขึ้น ร้อยละ 10 จากของเดิม ณ เวลาที่ 0.3 วินาที	23
รูปที่ 12. ผังหน่วยควบคุม PID ที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบกราฟรูปร่างขั้นในโปรแกรม MATLAB Simulink	23
รูปที่ 13. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าแบบกราฟรูปร่าง ขั้น ณ เวลาที่ 0.3 วินาที	24
รูปที่ 14. กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สถานะคงตัวกับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พลวัตโดยเทียบเชิงระยะทาง	26

รูปที่ 15. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรับตัวแปรปรับโดยการปรับความเร็วของของเหลว
 ขึ้นขึ้นจาก 40 เมตรต่อวินาทีไปที่ 41 เมตรต่อวินาที(บน) และกราฟการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น
 ขาออก(ล่าง)..... 27

รูปที่ 16. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรับตัวแปรปรับโดยการปรับความเข้มข้นขาเข้าขึ้น
 ขึ้นจาก 0.030 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรไปที่ 0.031 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร(บน) และกราฟการ
 เปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นขาออก(ล่าง) 30

รูปที่ 17. กราฟแสดงการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดออร์ที่ 1 โดยใช้ K_{gain} , τ และ
 t_d ที่มาจากค่าเฉลี่ยและไม่มีการรบกวนด้วยตัวแปรรบกวน 32

รูปที่ 18. กราฟเปรียบเทียบการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดออร์ที่ 1 โดยใช้แบบจำลอง
 จากตารางที่ 8 และไม่มีการรบกวนด้วยตัวแปรรบกวน..... 34

รูปที่ 19. กราฟแสดงการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดออร์ที่ 1 โดยใช้ K_{gain} , τ และ
 t_d ที่มาจากค่าเฉลี่ย แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวน K_D และ τD เป็นค่าเฉลี่ยโดยมีการ
 รบกวนด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนแบบขั้นที่เวลา 0.3 วินาที..... 35

รูปที่ 20. กราฟเปรียบเทียบการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดออร์ที่ 1 เมื่อมีการ
 เปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบขั้นโดยใช้แบบจำลองจากตารางที่ 8 36

รูปที่ 21. กราฟเปรียบเทียบการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดออร์ที่ 1 สำหรับแบบจำลอง
 เปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบขั้นโดยใช้แบบจำลองการ
 เปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนจากตารางที่ 9 38

รูปที่ 22. กราฟแสดงการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดออร์ที่ 1 โดยใช้ K_{gain} , τ และ
 t_d ที่มาจากค่าเฉลี่ย แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวน K_D และ τD เป็นค่าเฉลี่ยโดยมีการ
 รบกวนด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนแบบกราฟรูปร่างที่เวลา 0.3 วินาที..... 39

รูปที่ 23 กราฟเปรียบเทียบการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดออร์ที่ 1 เมื่อมีการ
 เปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบกราฟรูปร่างโดยใช้แบบจำลองจากตารางที่ 8 39

รูปที่ 24. กราฟเปรียบเทียบการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดออร์ที่ 1 สำหรับแบบจำลอง
 การเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบกราฟรูปร่างโดยใช้
 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนจากตารางที่ 9 41

บทที่ 1 บทนำ

1.1 บทนำ

การบริโภคพลังงานในปัจจุบันเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของจำนวนประชากรเศรษฐกิจและเทคโนโลยี โดยแหล่งพลังงานหลักที่ถูกใช้เพื่อตอบสนองความต้องการดังกล่าวคือแหล่งพลังงานจากฟอสซิลซึ่งขาดความยั่งยืน (Non-Sustainable) เนื่องจากแหล่งพลังงานดังกล่าวใช้แล้วหมดไป ด้วยเหตุนี้การบริโภคพลังงานจากแหล่งทางเลือก (Renewable energy) เช่น ก๊าซชีวภาพ (Bio Gas) ได้รับความสนใจในปัจจุบันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยเนื่องจากแหล่งพลังงานดังกล่าวผลิตได้จากซากเหลือทิ้งทางเกษตรกรรม (Biomass)

ก๊าซชีวภาพเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในซากเหลือทิ้งโดยใช้จุลินทรีย์ที่สภาวะไร้ออกซิเจน ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซหลายชนิดโดยมีส่วนประกอบหลักคือก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และส่วนประกอบอื่นๆเช่น ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ การใช้ก๊าซชีวภาพให้ได้ประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพของก๊าซโดยการแยกสารประกอบที่ปนเปื้อนและเป็นอันตรายต่อกระบวนการปลายทาง เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตัวอย่างเช่น 1) การสันดาปก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตพลังงาน ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อรวมกับไอน้ำก่อให้เกิดสารประกอบกรดมีฤทธิ์กัดกร่อนทำลายอุปกรณ์และเครื่องมือซึ่งให้โทษต่อมนุษย์¹หากถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ ดังนั้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จำเป็นต้องถูกแยกออกจากก๊าซชีวภาพก่อนกระบวนการสันดาป 2) การปรับปรุงประสิทธิภาพการให้ความร้อนของก๊าซชีวภาพโดยการเปลี่ยนให้เป็นก๊าซไฮโดรเจนผ่านกระบวนการรีฟอร์มด้วยไอน้ำ เนื่องจากการปนเปื้อนของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระดับสัดส่วนในล้านส่วน (ppm) เป็นพิษกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการรีฟอร์มด้วยไอน้ำ² ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ควรถูกแยกออกจากก๊าซชีวภาพเพื่อป้องกันการเสื่อมประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ด้วยเหตุผลข้างต้นกระบวนการแยกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพจึงเป็นจุดสนใจหลักของงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งกระบวนการที่ได้รับความสนใจคือกระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เวเนจิวรีสแครบเบอร์ (Venturi Scrubber) ที่มีสารประกอบเหล็ก (III) เป็นสารดูดซึม³⁻⁷ โดยงานวิจัยในอดีตมีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายปรากฏการณ์ดูดซึมในหอเวเนจิวรี⁷ ทว่าหน่วยควบคุมการทำงานของหอดูดซึมชนิดนี้ยังไม่ได้รับการพัฒนาสืบเนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว อันที่จริงหน่วยควบคุมการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความจำ

เป็นต่อหอดูดูดซึมชนิดเวนจูรีเป็นอย่างมาก เนื่องจากความไม่แน่นอนของปริมาณกำมะถันในวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ยังผลให้สัดส่วนของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพมีความไม่แน่นอน (Disturbance input) แม้ว่าจะมาจากวัตถุดิบชนิดเดียวกันก็ตาม ดังนั้นการเพิ่มหน่วยควบคุมในกระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความคาดหวังเพื่อควบคุมปริมาณของก๊าซดังกล่าวไม่ให้เกินระดับที่ยอมรับได้ เช่นในกระบวนการรีฟอร์มก๊าซชีวภาพด้วยไอน้ำ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์

- พัฒนาแบบจำลองพลวัตสำหรับกระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้หอscrubเบอร์แบบเวนจูรี โดยการพัฒนาดังกล่าวใช้แบบจำลองที่สถานะคงตัวเป็นพื้นฐาน
- ออกแบบหน่วยควบคุมสำหรับกระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้แบบจำลองพลวัตที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยฉบับนี้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) สัดส่วนของสารประกอบในก๊าซชีวภาพสำหรับการพัฒนาหน่วยควบคุมได้จาก⁸ ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักมูลสัตว์จากการเกษตร

ตารางที่ 1. สัดส่วนก๊าซชีวภาพที่ใช้ในแบบจำลอง

ก๊าซชีวภาพ	ร้อยละส่วนประกอบ
มีเทน	60
คาร์บอนไดออกไซด์	33
ไนโตรเจน	1
ความชื้น	6
รวม	100
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	4,000 – 10,000

- 2) อุณหภูมิและความดันในการพัฒนาแบบจำลองและหน่วยควบคุมกระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์คือ 300 เคลวิน และ 1 บรรยากาศ ซึ่งเป็นสภาวะปกติในการเก็บก๊าซชีวภาพ

- 3) ตัวแปรต้น (Inputs) ที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตาม (Output) หรือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสายก๊าซขาออก ประกอบไปด้วย ตัวแปรปรับ (Manipulated input) และตัวแปรรบกวน (Disturbance input) ดังแสดงในสมการ 1

$$C_{g,out}(s) = \frac{K_{gain}e^{-t_d s}}{\tau s + 1} V_L(s) + \frac{K_D}{\tau_D s + 1} C_{g,in}(s) \quad \text{สมการ 1}$$

โดย $V_L(s)$ คือความเร็วของสารดูดซึมซึ่งเป็นตัวแปรปรับ $C_{g,in}(s)$ คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสายก๊าซขาเข้าซึ่งเป็นตัวแปรรบกวน และ $C_{g,out}(s)$ คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสายก๊าซขาออก

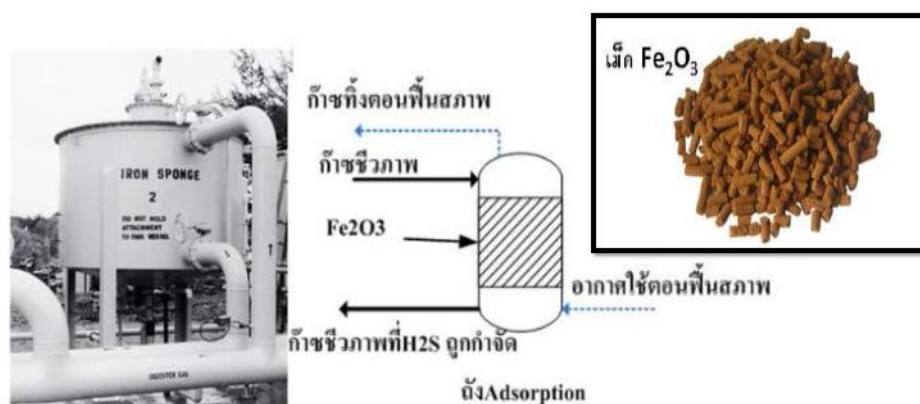
- 4) การพัฒนาสมการที่ 1 เพื่อหาพารามิเตอร์เฉพาะตัวของระบบ เช่น เกนของโปรเซส (K_{gain}) ค่าความหน่วงเวลา (t_d) และ ค่าเกนจากตัวแปรรบกวน (K_D) เป็นต้นจำเป็นต้องกำหนดขอบเขตของตัวแปรปรับและตัวแปรรบกวน ดังนั้น ความเร็วของสารละลายตัวดูดซึม ($V_L(s)$) กำหนดให้มีค่าระหว่าง 30 ถึง 50 เมตรต่อวินาที และ ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสายก๊าซขาเข้า ($C_{g,in}(s)$) มีค่าระหว่าง 0.027 – 0.033 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร
- 5) เพื่อทดสอบความสามารถของหน่วยควบคุมที่ถูกออกแบบในงานวิจัย ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออก ($C_{g,out}(s)$) กำหนดให้มีค่าไม่เกิน 10^{-5} กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานสำหรับความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษกับตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการรีฟอร์มด้วยไอน้ำ

บทที่ 2 ทฤษฎี ความรู้ทั่วไป และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

กระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์^{5, 9, 10} แบ่งได้เป็น 2 กระบวนการหลักดังต่อไปนี้

1. กระบวนการแบบแห้งหรือกระบวนการดูดซับ เป็นกระบวนการดูดซับโดยให้ก๊าซชีวภาพไหลผ่านตัวดูดซับ ซึ่งตัวดูดซับมีความสามารถในการจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เป็นส่วนประกอบในก๊าซชีวภาพดังรูปที่ 1



ที่มา: คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

รูปที่ 1. แผนผังของกระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

จากรูปที่ 1 ตัวดูดซับถูกบรรจุลงในถังปฏิกรณ์และให้ก๊าซชีวภาพไหลผ่านถังปฏิกรณ์จนตัวดูดซับอยู่ในสภาพอิ่มตัว ตัวดูดซับที่อิ่มตัวแล้วจะถูกฟื้นฟูสภาพด้วยอากาศและนำกลับมาใช้ใหม่ สารดูดซับที่นิยมใช้ในกระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์คือ ถ่านกัมมันต์ เหล็กออกไซด์ในรูปผงเม็ดหรือฝอยเหล็ก โดยสมการเคมีที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับเป็นไปตามสมการเคมี 1



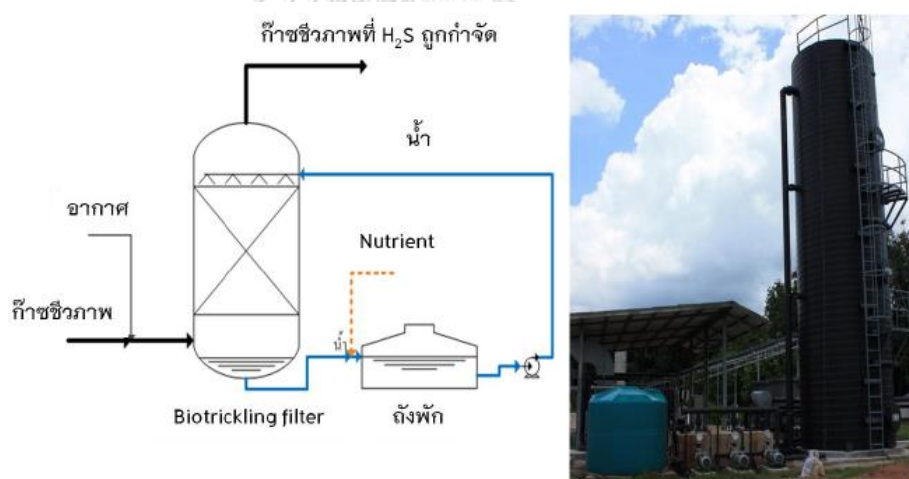
เนื่องจากตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับที่จำกัด เมื่อถึงจุดอิ่มตัวการฟื้นฟูสภาพโดยใช้อากาศเป็นสิ่งจำเป็น ดังแสดงในสมการเคมี 2



เนื่องจากตัวดูดซับต้องผ่านกระบวนการฟื้นฟูสภาพหลังการใช้งานไปได้ระยะเวลาหนึ่งกระบวนการดูดซับโดยใช้ของแข็งบรรจุในหอดูดซับไม่สามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นข้อเสียของกระบวนการดูดซับประเภทนี้

2. กระบวนการแบบเปียก

กระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยจุลินทรีย์^{11, 12} กระบวนการนี้ใช้จุลินทรีย์ในการเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เป็นกำมะถันในรูปของแข็ง โดยก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกผสมกับอากาศและไหลผ่านน้ำเพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำ จากนั้นสารละลายดังกล่าวจะถูกป้อนผ่านจุลินทรีย์เพื่อให้จุลินทรีย์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์และเปลี่ยนเป็นกำมะถันในรูปของแข็ง หรือในรูปของสารละลายซัลเฟต ทว่ากระบวนการนี้มีประสิทธิภาพการกำจัดไม่สูงเมื่อเทียบกับกระบวนการแบบแห้งเนื่องจากจุลินทรีย์ใช้เวลานานในการย่อยสลายสารละลายที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์



รูปที่ 2. แผนผังกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยจุลินทรีย์

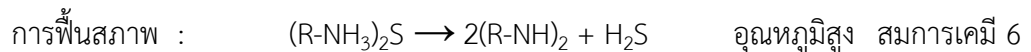
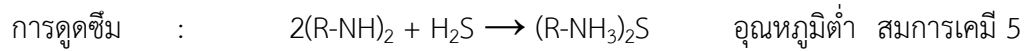
กระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์¹⁰ กระบวนการนี้ดำเนินการโดยนำก๊าซชีวภาพไหลผ่านตัวดูดซับที่อยู่ในรูปสารละลายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับสารละลายดูดซับ คงเหลือก๊าซชีวภาพที่ปราศจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพื่อป้อนสู่กระบวนการปลายทางต่อไป สารละลายที่ใช้เป็นสารดูดซับจะถูกนำไปฟื้นฟูสภาพเพื่อนำสารละลายดังกล่าวกลับมาใช้งานใหม่ โดยสารละลายดูดซับในกระบวนการนี้มีฤทธิ์เป็นเบสดังปรากฏในสมการเคมีดังนี้

ก) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยาเคมีดังสมการเคมี 3 และ 4

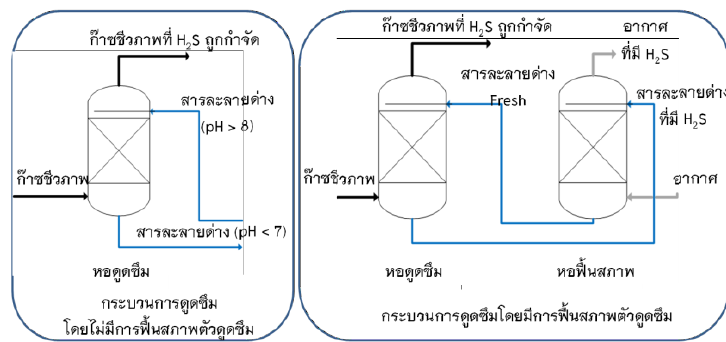


เนื่องจากการใช้สารดูดซึมนชนิดนี้ไม่สามารถคืนสภาพได้ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมีค่าสูงในการกำจัดสารดูดซึม

ข) สารละลายกลุ่มเอมีน สารดูดซึมนชนิดนี้สามารถฟื้นสภาพได้โดยมี ปฏิกิริยาเคมีดังสมการเคมี 5 และ 6

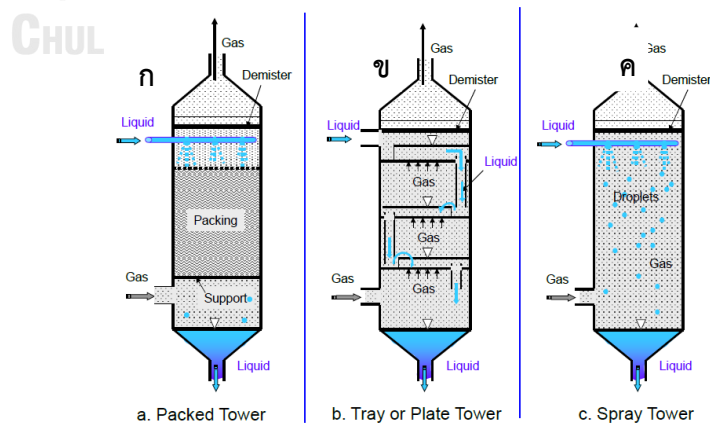


เนื่องจากหลังการฟื้นสภาพ ซัลเฟอร์ออกมาในรูปของก๊าซทำให้การจับทำได้ยากดังนั้นการใช้สารดูดซึมอีกชนิดหนึ่งคือเหล็กไออน(III) (ferric chelate, Fe^{3+}) มีความจำเป็น



ที่มา: คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

รูปที่ 3. แผนผังกระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์



รูปที่ 4. เครื่องปฏิกรณ์ในกระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก) หอแพ็คคอลัมน์ ข) หอลำดับชั้น ค) หอสเปรย์

ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ในกระบวนการดูดซึ่มก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

1. แบบหอดูดซึ่ม สารที่สภาวะก๊าซเข้าหอดูดซึ่มทางด้านล่างของหอแล้วเคลื่อนสู่ด้านบนและสารละลายดูดซึ่มที่เป็นของเหลวจะเข้าทางด้านบนแล้วออกทางด้านด้านล่างของหอ โดยภายในหอดูดซึ่มจะมีลักษณะที่แตกต่างกันดังนี้

ก) หอบแบบแพ็ค³ (Pack column tower)

ภายในหอดูดซึ่มบรรจุวัตถุขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างของเหลวและก๊าซ ซึ่งหลักการทำงานคือของเหลวที่เป็นสารละลายดูดซึ่มถูกป้อนเข้าหอทางด้านบนของหอดูดซึ่ม โดยของเหลวดังกล่าวไหลผ่านวัตถุเหล่านี้ทำให้ของเหลวกระจายตัวออกทำให้พื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของก๊าซกับสารละลายตัวดูดซึ่มเพิ่มขึ้น

ข) หอลำดับชั้น (Tray or plate tower)

ภายในมีลักษณะเป็นถาดชั้นเพื่อรองรับของเหลวที่เป็นสารละลายดูดซึ่มสามารถไหลลงจากด้านบนสู่ด้านล่างของหอดูดซึ่ม ซึ่งการรองรับของเหลวดังกล่าวมีไว้เพื่อเพิ่มเวลาให้ของเหลวอยู่ในหอดูดซึ่มนานขึ้นทำให้มีเวลาการทำปฏิกิริยาของก๊าซกับสารละลายตัวดูดซึ่มเพิ่มขึ้น

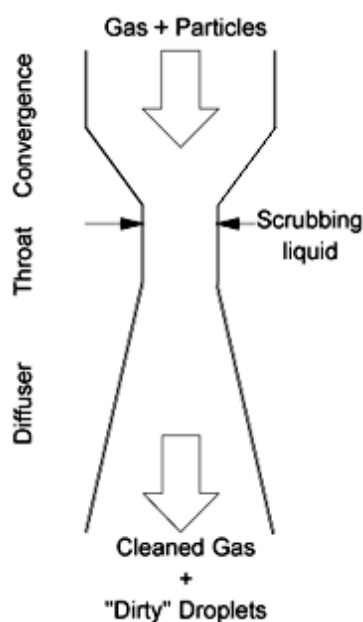
ค) หอสเปรย์ (Spray tower)

ของเหลวที่เป็นสารละลายดูดซึ่มถูกทำให้เป็นละอองหยดจากด้านบนหอเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยากับก๊าซที่ไหลขึ้นมาจากก้นหอ

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาระหว่างสารดูดซึ่มกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีสภาพเป็นของแข็งหรือสารแขวนลอย ด้วยเหตุดังกล่าวหอดูดซึ่มชนิดแพ็คไม่เหมาะกับกระบวนการนี้ เพราะผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือสารแขวนลอยอาจทำให้เกิดการอุดตันของช่องว่างระหว่างวัตถุที่บรรจุในหอดูดซึ่ม สำหรับหอดูดซึ่มชนิดลำดับชั้นนั้นให้ประสิทธิภาพการดูดซึ่มไม่สูงเพราะบริเวณที่ทำปฏิกิริยาถูกจำกัดเพียงบริเวณถาดรองรับของเหลวในหอ และหอดูดซึ่มแบบหอสเปรย์ให้ผลดีในการดูดซึ่ม ทว่าเครื่องปฏิกรณ์อีกประเภทมีประสิทธิภาพการดูดซึ่มดีกว่า คำอธิบายของเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวเรียบเรียงไว้ในหัวข้อถัดไป

2. แบบเวนจูรีสครับเบอร์^{7, 13, 14}

จากรูปที่ 5 สสารสถานะแก๊สเข้าสู่เวนจูรีสครับเบอร์ทางด้านบนซึ่งเป็นทางเดียวกับทางเข้าของสารละลายดูดซึมที่เป็นของเหลว เวนจูรีสครับเบอร์จะมีลักษณะเป็นท่อกลวง ซึ่งส่วนกลางของท่อจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่น้อยกว่าทางเข้าและทางออกในลักษณะคอคอด เพื่อให้ก๊าซกับสารละลายตัวดูดซึมทำปฏิกิริยากันง่ายยิ่งขึ้น โดยหลักการการทำงานจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 5. เครื่องปฏิกรณ์ในกระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบเวนจูรีสครับเบอร์

2.2 เวนจูรีสครับเบอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลักการการทำงานของเวนจูรีสครับเบอร์คือ สารที่เป็นของเหลวไหลเข้าผ่านส่วนคอคอดทำให้ของเหลวที่เข้ามาปะทะผนังของเวนจูรีสครับเบอร์แล้วเกิดแรงเฉือนระหว่างของเหลวกับผนังทำให้ของเหลวที่ไหลมารวมกันที่ผนังแตกออกเป็นละออง ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของเหลวดูดซับกับก๊าซที่ไหลลงมาพร้อมๆกัน

ทั้งนี้สาเหตุที่เลือกเวนจูรีสครับเบอร์เพื่อเป็นอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้เนื่องจากในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายดูดซึมคือเหล็กไอออน(III) เมื่อสารละลายดูดซึมทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือกำมะถันในสถานะของแข็ง โดยการเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งนี้ส่งผลเสียต่อหอดูดซับชนิดแพ็คคอลัมน์เพราะเกิดการอุดตันได้ง่าย ในขณะที่เวนจูรีสครับเบอร์เกิดการอุดตันได้ยากกว่ารวมถึงการดูแลรักษาของเวนจูรีสครับเบอร์ง่ายกว่าด้วยลักษณะทางกายภาพที่เป็นท่อกลวงของอุปกรณ์ชิ้นนี้

ข้อเสียของเวเนเจอร์สรีบเบอร์คือการเกิดความดันลดยิ่งสูงเพราะลักษณะที่เป็นคอคอดส่วนกลาง แต่การเกิดความดันลดยิ่งสูงทำให้เกิดแรงเหวี่ยงระหว่างหยดของเหลวกับผนังซึ่งเป็นกลไกหลักไม่สามารถเลี้ยงได้ รวมถึงการฟุ้งกระจายของอนุภาคที่เกิดขึ้นได้ง่าย ทว่าสิ่งที่กล่าวมาทั้งหมดสำหรับการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เวเนเจอร์สรีบเบอร์ที่ดีกว่าอุปกรณ์แบบอื่นๆ ทำให้ในงานวิจัยนี้เลือกเวเนเจอร์สรีบเบอร์เป็นอุปกรณ์ในการศึกษาเพื่องานวิจัยชิ้นนี้

2.3 ตัวดูดซึมและปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง

สำหรับกระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในงานวิจัยนี้ สารดูดซึมคือสารละลาย เหล็กไอออน(III) (ferric chelate, Fe^{3+}) เนื่องด้วยการใช้สารละลายนี้ให้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการดูดซึมเป็นของแข็งซึ่งการแยกเซลล์เพอร์ออกไซด์จากสารละลายดูดซึมทำได้ง่าย อีกทั้งกระบวนการคืนสภาพของสารละลายดูดซึมสามารถทำได้โดยการใช้ก๊าซออกซิเจนหรืออากาศทำให้การคืนสภาพของสารละลายดูดซึมทำได้โดยง่ายเช่นกัน

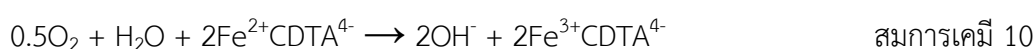
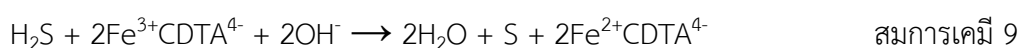
การทำปฏิกิริยาเคมีของเหล็กไอออน(III)กับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์⁵ ตามสมการเคมี 7 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือกำมะถันในรูปของแข็ง และเหล็กไอออน (II) จะถูกเปลี่ยนเป็นเหล็กไอออน(II) (Fe^{2+})



ทั้งนี้เหล็กไอออน (III) ที่ถูกเปลี่ยนเป็นเหล็กไอออน (II) จะถูกคืนสภาพกลับมาเป็นเหล็กไอออน (III) ได้ดังสมการเคมี 2 โดยนำไปทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนและน้ำดังต่อไปนี้



สำหรับเหล็กไอออน(III) ที่อยู่ในรูปของ ferric *trans*-1,2-diaminocyclohexane-tetraacetate ($Fe^{3+}CDTA^{4-}$) จากงานวิจัยของ S. Piche (2005) และคณะ³ การทดลองถูกดำเนินการโดยใช้สารละลาย ferric CDTA ทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยจัดชุดการทดลองแบบแพ็คคอลัมน์ (pack column) เพื่อประเมินความสามารถในการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของ ferric CDTA ซึ่งสมการเคมีจะเป็นไปตามสมการเคมี 9 และ 10



ผลสรุปที่ได้คือ สารละลาย ferric CDTA สามารถดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ถึงร้อยละ 91 โดยมีความเข้มข้นของสารละลาย ferric CDTA ที่ 2000 ppm ซึ่งมีค่า pH ประมาณ 10.5

จากงานวิจัยของ C. Maia (2017) และคณะ⁶ การทดลองถูกดำเนินการโดยใช้สารละลาย ferric EDTA ((ethylenedinitrilo) tetraacetatoferrate) โดยจัดชุดการทดลองเป็นแพ็คเกจคอลัมน์ โดยให้ก๊าซเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์และสารละลายดูดซึมเข้าทางด้านบน

ตารางที่ 2. สัดส่วนก๊าซชีวภาพในการทดลองของ C. Maia (2017)

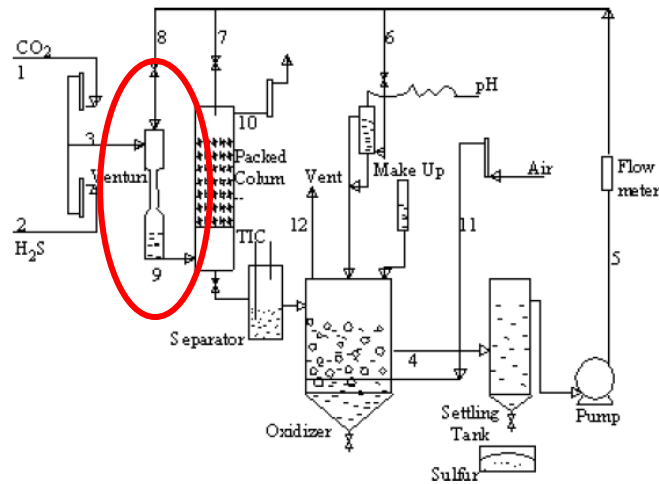
ส่วนประกอบ	ร้อยละ
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	2.2
ออกซิเจน	0.3
คาร์บอนไดออกไซด์	14.0
ไนโตรเจน	2.4
ฮีเลียม	81.1

จากการทดลองดังกล่าว อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพมีค่า 340 มิลลิลิตรต่อนาทีและอัตราการไหลของสารละลายดูดซึมมีค่า 80 มิลลิลิตรต่อนาที โดยผลการทดลองที่ได้คือสารละลาย ferric EDTA สามารถดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพได้สูงถึงร้อยละ 95

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากงานวิจัยของ J.S. Ahari (2008) และคณะ⁷ ได้ทำการทดลองการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้สารละลายเหล็กไอออน (III) (ferric chelate solution) เป็นสารละลายดูดซึมโดยใช้อุปกรณ์เวนจูร์สแครบเบอร์โดยใช้ชุดการทดลองดังรูปที่ 6.

ก๊าซตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยเป็นก๊าซผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสัดส่วนของไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ที่ร้อยละ 2 กับสารละลายดูดซึมเหล็กไอออน (III) (ferric chelate solution) ความเข้มข้น 2000 ppm ที่มีค่า pH เท่ากับ 9 และควบคุมอัตราการไหลที่ 2 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 6. ชุดการทดลองการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยวงกลมสีแดงคือตำแหน่งของเวนจูร์สครับเบอร์

J.S. Ahari (2008) ออกแบบสมการเพื่ออธิบายกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยอ้างอิงตามสมมติฐานดังนี้

1. ของเหลวที่หยดลงมาเป็นหยดทรงกลมมีรัศมีเท่ากันทุกหยด
2. อุณหภูมิสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไม่มีการเปลี่ยนแปลง
3. ไม่สนใจผลของการบีบอัดของก๊าซ
4. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์กับสารละลายตัวดูดซึมเหล็กไอออนเร็วมาก
5. ไม่สนใจการเปลี่ยนแปลงของมวลในก๊าซและของเหลวจากกระบวนการดูดซึม
6. ไม่สนใจกระบวนการกักต่อนจากอุปกรณ์
7. การหยุดของของเหลวสม่ำเสมอทั่วทั้งเวนจูร์สครับเบอร์

จากการสร้างสมการสมดุลของแรงในหยดของเหลวได้ดังนี้

$$\rho_L \left(\frac{\pi d_p^3}{6} \right) \frac{dV_L}{dt} = C_D \left(\frac{\pi d_p^2}{4} \right) \frac{\rho_g}{2} (V_g - V_L) |V_g - V_L| + \rho_L \left(\frac{\pi d_p^3}{6} \right) g \quad \text{สมการ 2}$$

$$\frac{dV_L}{dt} = \frac{dV_L}{dZ} \frac{dZ}{dt} = V_L \frac{dV_L}{dZ} \quad \text{สมการ 3}$$

จากสมการ 2 และ 3

$$\frac{dV_L}{dZ} = \frac{g}{V_L} + \frac{3C_D \rho_g (V_g - V_L)(V_g - V_L)}{4d_p \rho_L V_L} \quad \text{สมการ 4}$$

ทั้งนี้ตัวแปร C_D คือค่าสัมประสิทธิ์แดรก (drag coefficient) สามารถคำนวณได้จาก

$$C_D = \frac{25.8}{Re^{0.81}} \quad \text{สมการ 5}$$

สมการที่ 5 และ 6 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วของเหลวกับความเร็วก๊าซ

$$V_g = \frac{G_0}{\varepsilon A} \quad \text{สมการ 6}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{L_0}{V_L A} \quad \text{สมการ 7}$$

จากความสัมพันธ์ของการทำสมดุลมวลสาร

$$\frac{\partial(v_g C_g)}{\partial z} = -N_A \pi d_p^2 C_d \quad \text{สมการ 8}$$

$$\frac{\partial(V_L C_L)}{\partial z} = \frac{6}{d_p} N_A \quad \text{สมการ 9}$$

เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เร็วมากดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยานี้ถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่ช้าที่สุดซึ่งคือการถ่ายโอนมวลสาร

$$N_A = K C_g \quad \text{สมการ 10}$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร (K) คำนวณได้จากสมการ 11

$$K = \frac{Dg}{d_p} (2 + 0.6Re^{0.5} Sc^{0.33}) \quad \text{สมการ 12}$$

ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นหยด (average droplet concentration (C_d)) คำนวณได้จากสมการ 12, 13 และ 14

$$C_d = \frac{(n v)}{(\text{venturi volume})} \quad \text{สมการ 12}$$

$$n = \frac{L}{\pi d_p^3 / 6} \quad \text{สมการ 13}$$

$$v = \frac{(V_{\text{venturi}})}{(V_L)} \quad \text{สมการ 14}$$

ทั้งนี้ สมการที่ 4 อธิบายความเร็วของเหลว ซึ่งในที่นี้คือสารละลายดูดซึม สมการที่ 8 อธิบายความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสถานะก๊าซ และสมการที่ 9 อธิบายความเข้มข้นของเหล็กไอออน (III) ในสถานะของเหลว

ตารางที่ 3. ผลเปรียบเทียบค่าจากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

อัตราการไหลของก๊าซ (มิลลิลิตร/นาที)	ปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซึม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)		ร้อยละความ แตกต่าง
	การทดลอง	แบบจำลอง	
807.00	16.10	16.10	0.00
2375.00	47.50	47.50	0.00
2960.00	59.18	59.19	0.02
3550.00	70.93	70.95	0.03
3940.00	78.60	78.70	0.13

การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 2-14 มีผลดังแสดงในตารางที่ 3 จากตารางดังกล่าวพบว่าความคลาดเคลื่อนน้อยมาก แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของแบบจำลองในการอธิบายพฤติกรรมดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในหอดูดซึมแบบวนจวน

สำหรับการออกแบบหน่วยควบคุมกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ แบบจำลองที่เหมาะสมจำเป็นต้องใช้ในรูปแบบวัด แต่งานวิจัยดังกล่าวแสดงแบบจำลองและผลที่สภาวะคงตัวเท่านั้น ดังนั้นการดัดแปลงแบบจำลองดังกล่าวจึงถูกดำเนินการในงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งถูกสรุปไว้ในหัวข้อ 3.1

หมายเหตุ คำอธิบายตัวแปรของงานวิจัย⁷

A [m^2]	cross-sectional area of venturi scrubber
C_D [-]	drag coefficient
C_g [$kmole/m^3$]	gas-phase H_2S concentration
C_L [$kmole/m^3$]	liquid-phase H_2S concentration
C_d [m^{-3}]	droplet concentration
d_p [m]	mean diameter of droplet
G_0 [m^3/s]	volume flow rate of gas
g [m/s^2]	gravitational acceleration
K [m/s]	mass transfer coefficient
L_0 [m^3/s]	volume flow rate of liquid
N_A [$kmole/m^2.s$]	overall mass transfer rate
n [-]	number of droplets formed per second
Re [-]	Reynolds number
Sc [-]	Schmidt number
T [K]	temperature
t [s]	contact time
V_g [m/s]	gas velocity
V_L [m/s]	liquid velocity
e [-]	voidage

q_g [kg/m ³]	gas phase density
q_L [kg/m ³]	liquid phase density

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการดูดซึมโดยใช้เวเนจูรีสคาร์บอนในการดูดซึมสารเคมีชนิดอื่นนอกเหนือจากกระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพ

F. Ahmadvand และคณะ (2010)¹⁵ คิดค้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายการทำงานของเวเนจูรีสคาร์บอนในกระบวนการกำจัดฝุ่นละอองในอากาศ โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเทียบกับผลการทดลอง โดยชุดการทดลองที่ใช้เวเนจูรีสคาร์บอนถูกออกแบบที่ความยาว 72 เซนติเมตร มีรัศมีส่วนที่กว้างที่สุด 16 เซนติเมตรและรัศมีส่วนที่แคบที่สุด 8 เซนติเมตร ให้ความเร็วของก๊าซ 60 75 และ 85 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สภาวะคงตัวถูกใช้เพื่ออธิบายการถ่ายเทโมเมนตัมและการถ่ายโอนมวลสารในแนวตั้งและแนวรัศมี จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าการคำนวณโดยใช้แบบจำลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลอง

M. Ali และคณะ (2013)¹⁶ คำนวณประสิทธิภาพการดูดซึมซิมไอโอดีนจากก๊าซในเวเนจูรีสคาร์บอนผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไทรฟอสเฟตเป็นสารดูดซึม การจำลองกระบวนการดูดซึมนี้นี้ตั้งค่ามีความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไทรฟอสเฟตร้อยละโดยมวลที่ 0.5 และ 0.2 ตามลำดับโดยมีอัตราการไหลที่ 300 ถึง 400 ลิตรต่อชั่วโมง ส่วนก๊าซเข้ามีความเข้มข้นของไอโอดีนที่ 40 ถึง 82 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลจากการใช้แบบจำลองคำนวณประสิทธิภาพการดูดซึมซิมไอโอดีนคือประสิทธิภาพการดูดซึมไอโอดีนสูงถึงร้อยละ 99.5 และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายดูดซึมพบว่าประสิทธิภาพการดูดซึมซิมไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้น

จากผลการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าไม่มีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาดัดแปลงเพื่อออกแบบหน่วยควบคุม ด้วยเหตุนี้งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักตามที่กล่าวข้างต้นคือ การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์จากสภาวะคงตัวไปเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพลวัตเพื่อใช้ในการออกแบบหน่วยควบคุมต่อไป

บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 การแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สภาวะคงตัวเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พลวัต

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มาจากการศึกษาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สภาวะคงตัวซึ่งไม่สามารถนำไปสู่ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมได้จำเป็นต้องทำการดัดแปลงสมการสภาวะคงตัว ทั้งนี้สมการสภาวะคงตัวมีความคล้ายคลึงกับสมการความต่อเนื่อง (the continuity equations)¹⁷ ทำให้สามารถเพิ่มพจน์ความสัมพันธ์ของเวลากับระยะทางเข้าไปได้

ทำการแก้ไขสมการ 4 โดยเพิ่มพจน์ความสัมพันธ์ของเวลากับระยะทางได้สมการ 15

$$\left(\frac{dV_L}{dt} + V_L \frac{dV_L}{dz}\right) = g + \frac{3C_D \rho g}{4d_p \rho_L} (V_g - V_L)(V_g - V_L) \quad \text{สมการ 15}$$

จากสมการ 8 หลังจากทำการดัดแปลงโดยหลักการเดียวกันได้สมการ 16

$$\frac{dC_g}{dt} + V_g \frac{dC_g}{dz} + C_g \frac{dV_g}{dz} = -N_A \pi d_p^2 C_d \quad \text{สมการ 16}$$

จากสมการ 15 กับ 16 พจน์ที่เป็นอนุพันธ์ของระยะทางทำการประมาณค่าได้ดังนี้

$$\left(\frac{dV_L}{dz}\right) \approx \frac{V_L(i) - V_L(i-1)}{\Delta z} \quad \text{สมการ 17}$$

$$\left(\frac{dV_g}{dz}\right) \approx \frac{V_g(i) - V_g(i-1)}{\Delta z} \quad \text{สมการ 18}$$

$$\left(\frac{dC_g}{dz}\right) \approx \frac{C_g(i) - C_g(i-1)}{\Delta z} \quad \text{สมการ 19}$$

รวมสมการ 15 กับ 17 ได้สมการ 20 ดังนี้

$$\frac{dV_L(i)}{dt} = C_D \left(\frac{3}{2d_p}\right) \left(\frac{\rho g}{2\rho_L}\right) (V_g(i) - V_L(i)) |V_g(i) - V_L(i)| + g - V_L(i) \left(\frac{V_L(i) - V_L(i-1)}{\Delta z}\right) \quad \text{สมการ 20}$$

รวมสมการ 16 18 และ 19 ได้สมการ 21 ดังนี้

$$\frac{dC_g(i)}{dt} = -V_g(i) \frac{C_g(i) - C_g(i-1)}{\Delta z} - C_g(i) \frac{V_g(i) - V_g(i-1)}{\Delta z} - N_A \pi d_p^2 C_d \quad \text{สมการ 21}$$

ประมาณค่าอนุพันธ์ของเวลาได้ดังนี้

$$\frac{V_L(i)-V_L(i-1)}{\Delta t} = C_D \left(\frac{3}{2d_p} \right) \left(\frac{\rho_g}{2\rho_L} \right) (V_g(i) - V_L(i)) |V_g(i) - V_L(i)| + g - V_L(i) \left(\frac{V_L(i)-V_L(i-1)}{\Delta z} \right) \quad \text{สมการ 22}$$

$$\frac{C_g(i)-C_g(i-1)}{\Delta t} = -V_g(i) \frac{C_g(i)-C_g(i-1)}{\Delta z} - C_g(i) \frac{V_g(i)-V_g(i-1)}{\Delta z} - N_A \pi d_p^2 C_d \quad \text{สมการ 23}$$

โดยกำหนด ค่า $\Delta t = 0.02$ วินาที และ $\Delta z = 0.01$ เมตร

ขั้นตอนต่อไปคือการตรวจสอบผลจากการคำนวณระหว่างการคำนวณจากแบบจำลองพลวัต (สมการ 22 กับ 23) กับแบบจำลองสภาวะคงตัว (สมการ 4 กับ 8) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการแปลงแบบจำลองสภาวะคงตัว

3.2 การแปลงแบบจำลองพลวัตจากให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ทที่ 1

เนื่องจากสมการที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุม PID ซึ่งอยู่ในรูปของทีโดเมนมีความซับซ้อนมากจำเป็นต้องแปลงให้สมการนั้นอยู่ในรูปของสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันซึ่งสามารถทำได้โดยวิธีแปลงสมการแบบลาปลาซแต่วิธีการนี้ดำเนินการได้ยากเพราะความซับซ้อนของสมการ ดังนั้นวิธีการแปลงสมการให้อยู่ในรูปสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันดำเนินการโดยวิธีของการประมาณค่าสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ทที่ 1 แบบโอเพินลูป

การประมาณค่าสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ทที่ 1 แบบโอเพินลูป (open loop transfer function modeling first order approximate)

ในการออกแบบตัวควบคุมจำเป็นต้องจัดรูปของแบบจำลองพลวัตให้อยู่ในรูปของแบบจำลองสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ทที่ 1 โดยใช้วิธีโอเพินลูป (open loop) และจัดให้อยู่รูปของสมการ 24 ซึ่งเป็นแบบจำลองสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ทที่ 1

$$C_{g,out}(s) = \frac{K_{gain} e^{-t_d s}}{\tau s + 1} V_L(s) + \frac{K_D}{\tau_D s + 1} C_{g,in}(s) \quad \text{สมการ 24}$$

โดยกำหนดให้ $C_{g,out}$ คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกเป็นตัวแปรควบคุม

V_L คือความเร็วของสารละลายตัวดูดซึมที่เป็นของเหลวเป็นตัวแปรปรับ

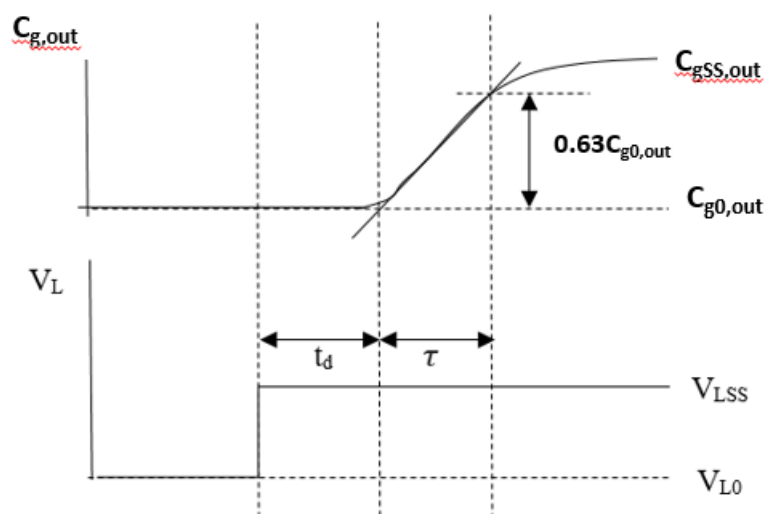
$C_{g,in}$ คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าเป็นตัวแปรรบกวน

3.2.1 การประมาณค่าเกณฑ์ของกระบวนการ (Process gain (K_{gain})), ค่าคงที่เวลาของกระบวนการ (Time constant (τ)) และค่าเวลาหน่วง (Time delay (t_d)) จากพจน์ตัวแปรปรับ $V_L(s)$

วิธีการที่ได้มาซึ่งตัวแปรเกณฑ์ของกระบวนการ (K_{gain}), ค่าคงที่เวลาของกระบวนการ (τ) และค่าเวลาหน่วง (t_d) ในสมการที่ 24 ดังนี้

- 1) สร้างกราฟความสัมพันธ์จากสมการที่ 20 และ 21 ซึ่งจะได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกกับเวลา และกราฟความสัมพันธ์ความเร็วของสารละลายตัวดูดซึมที่เป็นของเหลวกับเวลา
- 2) ดำเนินการไปจนถึงสถานะคงตัว
- 3) ปรับค่าเริ่มต้นของตัวแปรปรับซึ่งในที่นี้คือความเร็วของสารละลายตัวดูดซึมที่เป็นของเหลว
- 4) เก็บค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม ณ สถานะคงตัวใหม่หลังจากปรับตัวแปรปรับ ในที่นี้คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกโดยจะเป็นไปตามรูปที่ 7 เพื่อนำไปคำนวณ K_{gain} , τ และ t_d ในสมการ 24 25 และ 26 สำหรับข้อนี้

หมายเหตุ กรณีเมื่อทำการปรับค่าในข้อที่ 3) แล้วกราฟของสมการตัวแปรควบคุมไม่เข้าสู่สถานะคงตัวใหม่จะทำให้วิธีการประมาณค่าสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดออร์ที่ 1 แบบโอเพินลูปไม่สามารถใช้ได้



รูปที่ 7. ตัวแปรในวิธีการของ open loop สำหรับตัวแปร Process gain (K_{gain}), Time constant (τ) และ Time delay (t_d)

เกณฑ์ของกระบวนการ (K_{gain}) คำนวณได้จาก

$$K_{gain} = \frac{(C_{gSS,out} - C_{g0,out})/C_{g0,out}}{(V_{LSS} - V_{L0})/V_{L0}} \quad \text{สมการ 25}$$

โดย $C_{g0,out}$ คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออก ณ สภาวะคงตัวเริ่มต้น

V_{L0} คือค่าเริ่มต้นของความเร็วของสารละลายตัวดูดซึมที่เป็นของเหลว

$C_{gSS,out}$ คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออก ณ สภาวะคงใหม่

V_{LSS} คือความเร็วของสารละลายตัวดูดซึมที่เป็นของเหลวหลังปรับเป็นค่าใหม่

ค่าคงที่เวลาของกระบวนการ (τ) คือเวลาในสมการความสัมพันธ์ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกกับเวลาตามสมการ 25

$$C_{g,out}(\tau) = 0.63C_{g0,out} \quad \text{สมการ 26}$$

ค่าเวลาหน่วง (t_d) คำนวณได้ดังนี้

$$t_d = \frac{V_{LSS}}{I_{ventury}} \quad \text{สมการ 27}$$

3.2.1.1 ปรับตัวแปรปรับเพิ่มขึ้นโดยยังคงค่าของตัวแปรปรับเริ่มต้นไว้ซึ่งในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ความเร็วของสารละลายตัวดูดซึมที่เป็นของเหลวซึ่งเป็นตัวแปรปรับมีค่าเริ่มต้นที่ 40 เมตรต่อวินาที และปรับเพิ่มขึ้นทีละ 1 เมตรต่อวินาทีจนถึง 50 เมตรต่อวินาที จากนั้นปรับลงละ 1 เมตรต่อวินาทีจนถึง 30 เมตรต่อวินาที บันทึกผลการคำนวณ K_{gain} , τ และ t_d จากการปรับข้างต้น

3.2.1.2 ปรับค่าตัวแปรปรับเริ่มต้นจาก 40 เมตรต่อวินาทีเป็น 50 และ 30 เมตรต่อวินาที จากนั้นทำการปรับตัวแปรปรับขึ้นและลงโดยให้ผลต่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของค่าตัวแปรปรับเริ่มต้นเท่าเดิมบันทึกผลการคำนวณ K_{gain} , τ และ t_d จากการปรับข้างต้น

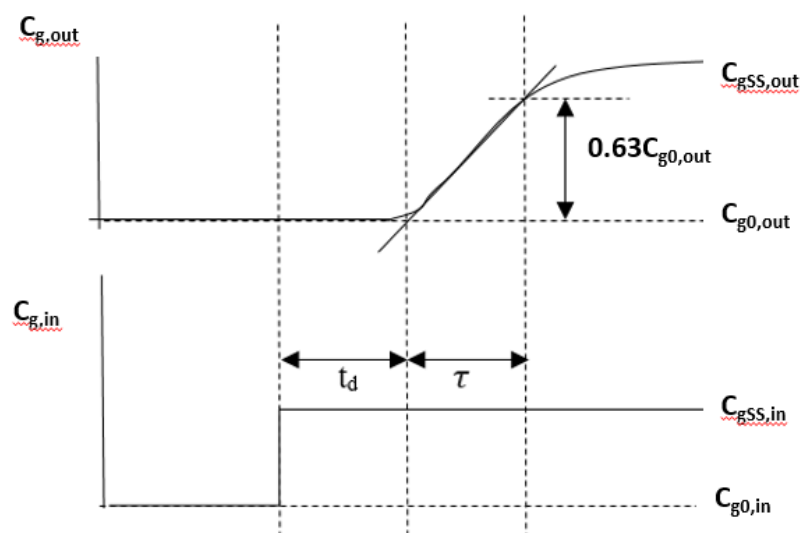
3.2.1.3 หาค่าเฉลี่ยของ K_{gain} , τ และ t_d แล้วนำไปเป็นตัวแปรสำหรับการออกแบบควบคุมต่อไป

3.2.2 การประมาณค่าเกณฑ์ของการรบกวน (Disturbance gain (K_D)) และค่าคงที่เวลาของการรบกวน (Disturbance time constant (τ_D)) จากพจน์ตัวแปรรบกวน $C_{g,in}(s)$

วิธีการที่ได้มาซึ่งตัวแปรเกณฑ์ของการรบกวน (K_D) และ ค่าคงที่เวลาของการรบกวน (τ_D) ในสมการ 24 ดังนี้

- 1) สร้างกราฟความสัมพันธ์จากสมการที่ 19 และ 20 ซึ่งจะได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกกับเวลา และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้ากับเวลา
- 2) ดำเนินการไปจนถึงสถานะคงตัว
- 3) ปรับค่าเริ่มต้นของตัวรบกวนซึ่งในที่นี้คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า
- 4) เก็บค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม ณ สถานะคงตัวใหม่หลังจากปรับตัวแปรปรับ ซึ่งในที่นี้คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกโดยจะเป็นไปตามรูปที่ 8 เพื่อนำไปคำนวณ K_D , τ_D ในสมการ 28 และ 29 สำหรับข้อนี้

หมายเหตุ กรณีเมื่อทำการปรับค่าในข้อที่ 3) แล้วกราฟของสมการตัวแปรควบคุมไม่เข้าสู่สถานะคงตัวใหม่จะทำให้วิธีการประมาณค่าสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันอันดับที่ 1 แบบโอเพ่นลูปไม่สามารถใช้ได้



รูปที่ 8. ตัวแปรในวิธีการของ open loop สำหรับตัวแปร Disturbance gain (K_D) และ Disturbance time constant (τ_D)

เกณฑ์ของการรบกวน (K_D) คำนวณได้จาก

$$K_D = \frac{(C_{gSS,out} - C_{g0,out})/C_{g0,out}}{(C_{gSS,in} - C_{g0,in})/C_{g0,in}} \quad \text{สมการ 28}$$

โดย $C_{g0,out}$ คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออก ณ สภาวะคงตัวเริ่มต้น

$C_{g0,in}$ คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าที่เป็นค่าเริ่มต้น

$C_{gSS,out}$ คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออก ณ สภาวะคงใหม่

$C_{gSS,in}$ คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าหลังปรับเป็นค่าใหม่

ค่าคงที่เวลาของการรบกวน (τ_D) คือเวลาในสมการความสัมพันธ์ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกกับเวลาตามสมการ 25

$$C_{g,out}(\tau_D) = 0.63C_{g0,out} \quad \text{สมการ 29}$$

3.2.2.1 ปรับตัวแปรรบกวนเพิ่มขึ้นโดยยังคงค่าของตัวแปรรบกวนเริ่มต้นไว้ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าซึ่งเป็นแปรรบกวนมีค่าเริ่มต้นที่ 0.03 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร และปรับเพิ่มขึ้นทีละ 0.001 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรจนถึง 0.04 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร จากนั้นปรับลงทีละ 0.001 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรจนถึง 0.02 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรโดยให้ความเร็วของของเหลวคงที่ที่ 20 เมตรต่อวินาทีบันทึกผลการคำนวณ K_D และ τ_D จากการปรับข้างต้น

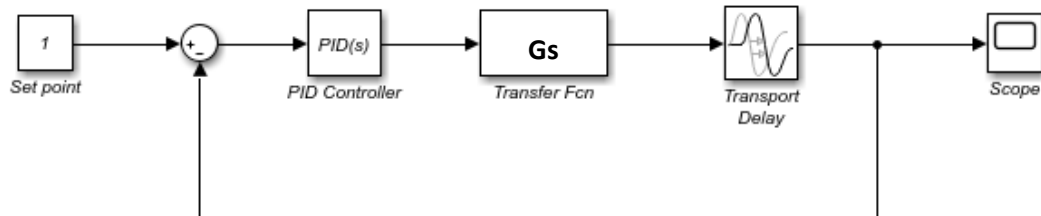
3.2.2.2 ปรับค่าตัวรบกวนเริ่มต้นจาก 0.03 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรเป็น 0.02 และ 0.04 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร จากนั้นทำการปรับตัวแปรปรับขึ้นและลงโดยให้ผลต่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของค่าตัวแปรปรับเริ่มต้นเท่าเดิมบันทึกผลการคำนวณ K_D และ τ_D ของจากการปรับข้างต้น

3.2.2.3 ปรับความเร็วของของเหลวเพิ่มขึ้นทีละ 1 เมตรต่อวินาที ทำซ้ำตามหัวข้อ 3.2.2.1 – 3.2.2.2 จนความเร็วของของเหลวอยู่ที่ 60 เมตรต่อวินาที

3.2.2.4 หาค่าเฉลี่ยของ K_D และ τ_D แล้วนำไปเป็นตัวแปรสำหรับการทดสอบคว้ควบคุมต่อไป

3.3 ออกแบบตัวควบคุม PID

ดำเนินการออกแบบตัวควบคุม PID โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink



รูปที่ 9. ผังหน่วยควบคุม PID ในโปรแกรม MATLAB Simulink

จากรูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยของ K_{gain} และ τ ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.4 จะถูกบรรจุค่าในกล่อง Transfer Fcn และ t_d บรรจุค่าในกล่อง Transport Delay สำหรับกล่อง Set point บรรจุค่าโดยให้สัมพันธ์กับสมการ 30 ดังนี้

$$Set\ point = \frac{C_{gSS,out,sp} - C_{g,out,sp}}{C_{g,out,sp}} \quad \text{สมการ 30}$$

โดย $C_{g,out,sp}$ คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกที่กำหนดค่าเริ่มต้น

$C_{gSS,out,sp}$ คือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกที่กำหนดค่าใหม่

Set point คือค่าที่ใส่ในกล่อง Set point

ทั้งนี้กำหนดค่าในกล่อง Set point คือ 1 เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงของระบบและสามารถให้โปรแกรมดำเนินการ Auto-tuning ได้

จากนั้นดำเนินการคำสั่ง Auto-tuning เพื่อให้โปรแกรมคำนวณตัวแปรการควบคุมแบบ PID ออกมาซึ่งตัวแปรการควบคุมนี้จะอ้างอิงตามสมการหน่วยควบคุม PID ในสมการ 31

$$K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \quad \text{สมการ 31}$$

โดย K_P คือ proportional parameter

K_I คือ integral parameter

K_D คือ derivative parameter

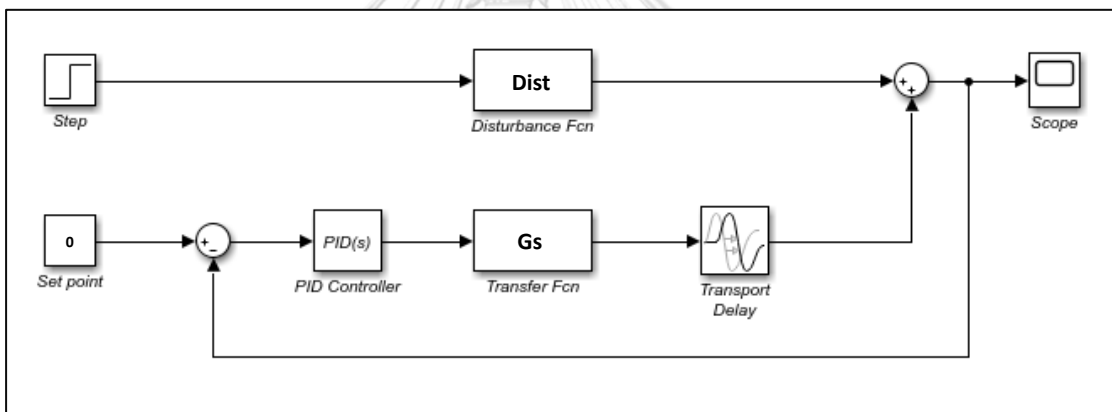
N คือ filter coefficient.

เมื่อได้ตัวแปรการควบคุมแบบ PID แล้วจำเป็นต้องนำไปตรวจสอบค่า K_{gain} , τ และ t_d ที่ได้ จากหัวข้อ 3.2.1 เพื่อทดสอบความสามารถในการควบคุมในแต่ละกรณีของแบบจำลองที่แตกต่างกัน

3.4 การทดสอบตัวควบคุม PID ด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวน

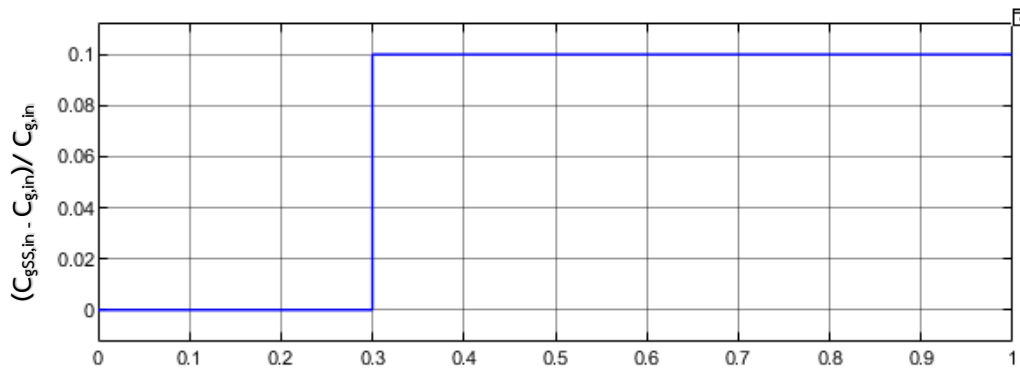
เป้าหมายของการออกแบบตัวควบคุมเพื่อจัดการกับระบบที่ถูกรบกวนจากภายนอกโดยการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวนดังนั้นในขั้นตอนนี้จะจำลองการควบคุมของตัวควบคุม PID ที่ได้จากหัวข้อ 3.3 โดยควบคุมระบบที่มีการรบกวนจากตัวแปรรบกวนและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระบบ

3.4.1 การทดสอบตัวควบคุม PID ด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบขั้น (step change)



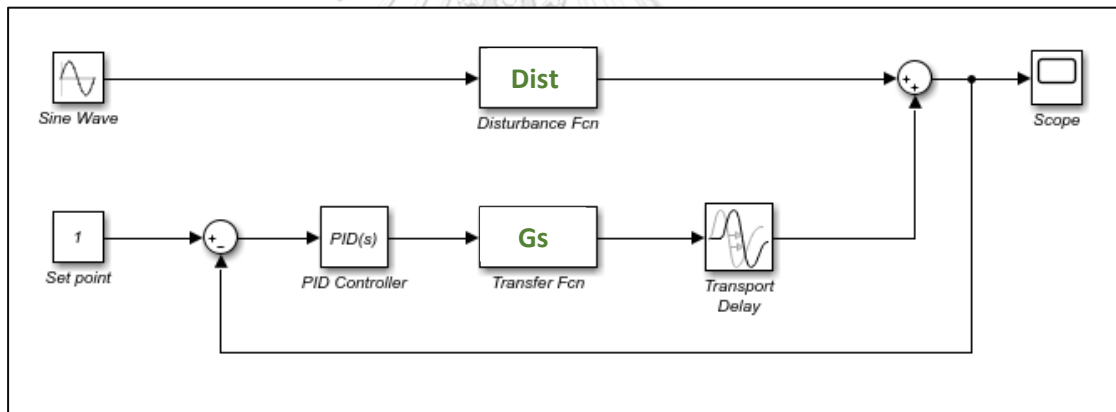
รูปที่ 10. ผังหน่วยควบคุม PID ที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบขั้นในโปรแกรม MATLAB Simulink

จากรูปที่ 10 มีการเพิ่มสัญญาณของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนซึ่งใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวนจากหัวข้อ 3.2.2 โดยบรรจุค่า Disturbance gain (K_D) และ Disturbance time constant (τ_D) เข้าไปในกล่อง Disturbance Fnc และใส่การเปลี่ยนแปลงนั้นคือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าจากเดิมที่ 0.030 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรเพิ่มขึ้นเป็น 0.033 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรหรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 จากของเดิม ณ เวลาที่ 0.3 วินาที โดยสอดคล้องตามรูปที่ 11



รูปที่ 11. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าโดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 จากของเดิม ณ เวลาที่ 0.3 วินาที

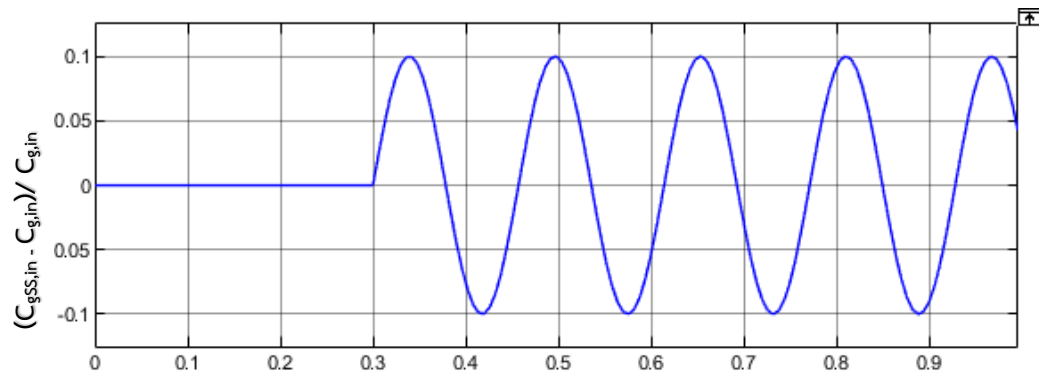
3.4.2 การทดสอบตัวควบคุม PID ด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบกราฟรูปไซน์



รูปที่ 12. ผังหน่วยควบคุม PID ที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบกราฟรูปไซน์ในโปรแกรม MATLAB Simulink

จากรูปที่ 12 มีการเพิ่มสัญญาณของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนซึ่งใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวนจากหัวข้อ 3.2.2 โดยบรรจุกค่า Disturbance gain (K_D) และ Disturbance time constant (τ_D) เข้าไปในกล่อง Disturbance Fcn และใส่การเปลี่ยนแปลงกราฟรูปไซน์โดยกำหนดความถี่ 40 เเรเดียนต่อวินาทีและมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าสูงสุดอยู่ที่ 0.033 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรและความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าสูงสุด

อยู่ที่ 0.027 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรหรือเพิ่มขึ้นสูงสุดและลดลงต่ำสุดร้อยละ 10 จากของเดิม(แอมพลิจูดสูงสุด = 0.1) ณ เวลาที่ 0.3 วินาที โดยสอดคล้องตามรูปที่ 13



รูปที่ 13. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าแบบกราฟรูปไซน์ ณ เวลาที่ 0.3 วินาที



บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การเทียบผลการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สภาวะคงตัวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พลวัต

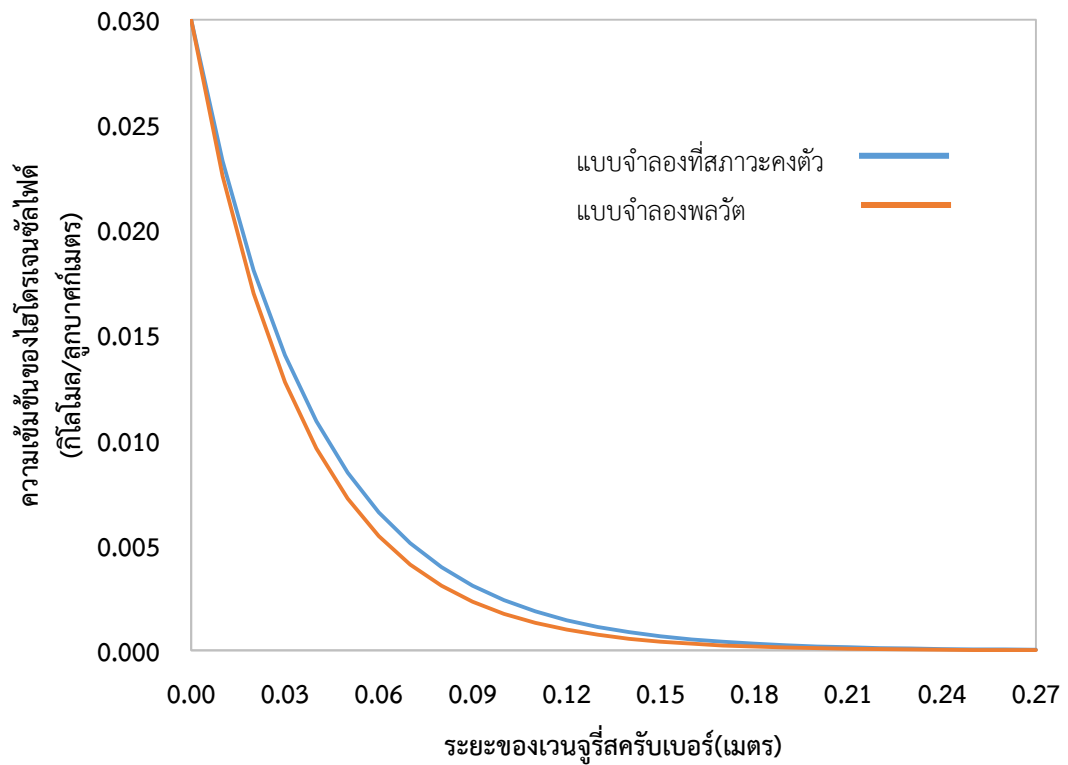
จากหัวข้อ 3.1 ทำการเทียบผลการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สภาวะคงตัวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พลวัตโดยกำหนดค่าความเร็วของของเหลว 40 เมตรต่อวินาทีและมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.03 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร

ทำการแปลงสมการที่ 3 และ 7 ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สภาวะคงตัวโดยแทนพจน์ที่เป็นอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปของการประมาณค่าได้ดังนี้

$$\frac{(V_L(i) - V_L(i-1))}{\Delta Z} = \frac{g}{V_L} + \frac{3C_D \rho_g}{4d_p \rho_L} \frac{(V_g(i) - V_L(i))(V_g(i) - V_L(i))}{V_L(i)} \quad \text{สมการ 32}$$

$$V_g \frac{(c_g(i) - c_g(i-1))}{\Delta z} + C_g \frac{(v_g(i) - v_g(i-1))}{\Delta z} = -N_A \pi d_p^2 C_d \quad \text{สมการ 33}$$

ทำการคำนวณและสร้างกราฟของด้วยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สภาวะคงตัวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พลวัตด้วยโปรแกรมเอ็กเซลซึ่งเทียบโดยใช้ผลการคำนวณที่เป็นความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์กับระยะทางตามรูปที่ 14.



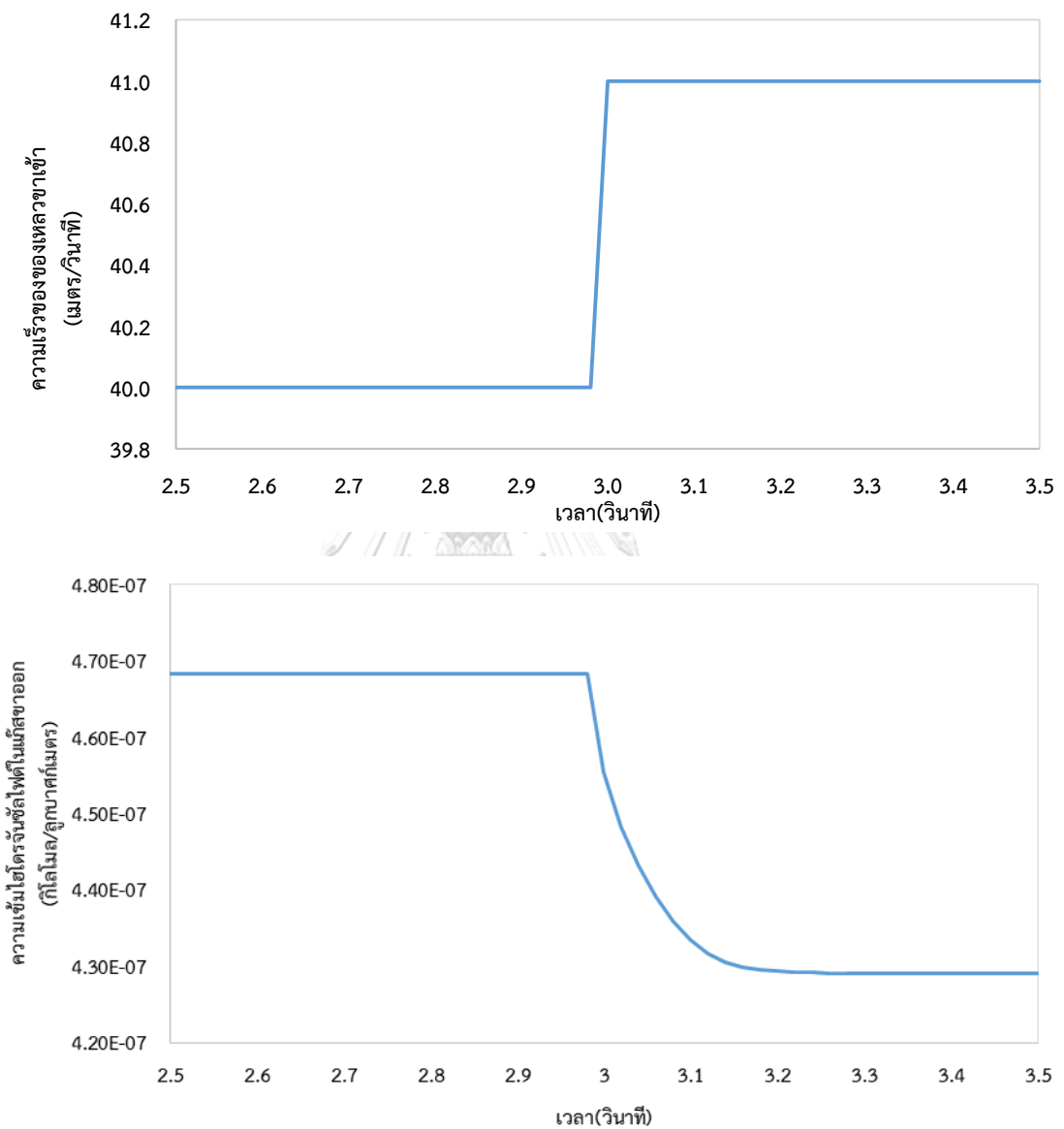
รูปที่ 14. กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สภาวะคงตัวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พลวัตโดยเทียบเชิงระยะทาง

จากรูปที่ 14. เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สภาวะคงตัวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภาวะพลวัตโดยเทียบเชิงระยะทางให้ผลที่ใกล้เคียงกันซึ่งในช่วงที่เกิดความแตกต่างนั้นเกิดจากการประมาณค่าของพจน์อนุพันธ์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภาวะพลวัตนั้นสามารถใช้ได้

4.2 การแปลงแบบจำลองพลวัตจากให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ทที่ 1

4.2.1 การประมาณค่าเกินของกระบวนการ (Process gain (K_{gain})), ค่าคงที่เวลาของกระบวนการ (Time constant (τ)) และค่าเวลาหน่วง (Time delay (t_d)) จากพจน์ตัวแปรปรับ $V_L(s)$

จากหัวข้อ 3.2.1 การแปลงสมการที่โดเมนให้อยู่ในรูปเอสโดเมนโดยวิธีการประมาณค่าสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ที่ 1 แบบโอเพินลูปเมื่อมีการปรับตัวแปรปรับแล้วค่าของตัวแปรควบคุมจะต้องเข้าสู่สภาวะคงตัวใหม่



รูปที่ 15. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรับตัวแปรปรับโดยการปรับความเร็วของของเหลวขึ้นขึ้นจาก 40 เมตรต่อวินาทีไปที่ 41 เมตรต่อวินาที(บน) และกราฟการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นขาออก(ล่าง)

จากรูปที่ 15 เมื่อปรับความเร็วของของเหลวขึ้นจาก 40 เมตรต่อวินาที ไปที่ 41 เมตรต่อวินาที ณ วินาทีที่ 3 ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ตำแหน่งขาออกจากเวนจูรีส ครีบเบอร์ซึ่งจากเดิมอยู่ที่ 4.68×10^{-7} กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร ลดลงและคงที่ที่ค่าความเข้มข้น 4.29×10^{-7} กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแปลงแบบจำลองพลวัตให้อยู่ในรูปสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันโดยวิธีการประมาณค่าสมการเอสโตเมนออเดอร์ที่ 1 แบบโอเพินลูปนั้นสามารถดำเนินการได้

ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงที่เวลา 3 วินาทีของกราฟทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงในด้านตรงข้ามกัน กล่าวคือเมื่อมีการปรับความเร็วของสารละลายตัวดูดซึมหรือตัวแปรปรับให้เพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกหรือตัวแปรควบคุมลดลง จากการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบดังกล่าว ส่งผลให้ค่าเกนของกระบวนการ (K_{gain}) ที่คำนวณได้เป็นค่าลบ

เมื่อทำการคำนวณค่า K_{gain} , τ และ t_d ตามหัวข้อ 3.2.1.1 – 3.2.1.3 พบว่าค่า K_{gain} , τ และ t_d มีหลายค่าแสดงตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ K_{gain} , τ และ t_d ณ ช่วงการดำเนินการต่างๆตามหัวข้อ 3.2.1.1 – 3.2.1.2

$V_{Lo}(m/s)$	$V_{Lss}(m/s)$	K_g		$\tau (s)$		$t_d(s)$	
		ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
30	31 - 40	-3.427	-2.016	0.03	0.04	0.00675	0.00871
	20 - 29	-8.949	-3.953	0.04	0.07	0.00931	0.01350
40	41 - 50	-3.848	-2.447	0.03	0.04	0.00540	0.00659
	30 - 39	-8.193	-4.328	0.04	0.07	0.00692	0.00900
50	51 - 60	-4.189	-2.815	0.03	0.04	0.00450	0.00529
	40 - 49	-7.875	-4.634	0.04	0.07	0.00551	0.00675

จากตารางที่ 4 แสดงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ K_{gain} , τ และ t_d ณ ช่วงการดำเนินการต่างๆพบว่าค่า K_{gain} มีค่าเป็นลบเพราะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับจะทำให้ค่าของตัวแปรควบคุม

มีผลสวนทางกันกล่าวคือถ้าเพิ่มความเร็วของของเหลวจะทำให้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกลดลงและถ้าลดความเร็วของของเหลวจะทำให้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกเพิ่มขึ้น

สำหรับค่า K_{gain} , τ และ t_d ที่ได้จากช่วงการเพิ่มลดของตัวแปรปรับมีหลายค่าแสดงให้เห็นว่าสมการแบบจำลองในทีโดเมนมีความไม่เชิงเส้นดังนั้นในการหาค่า K_{gain} , τ และ t_d ที่เป็นตัวแทนของระบบนี้จึงใช้เป็นค่าเฉลี่ยของค่า K_{gain} , τ และ t_d ทั้งหมดในขั้นตอนที่ 3.2.1.1 - 3.2.1.2

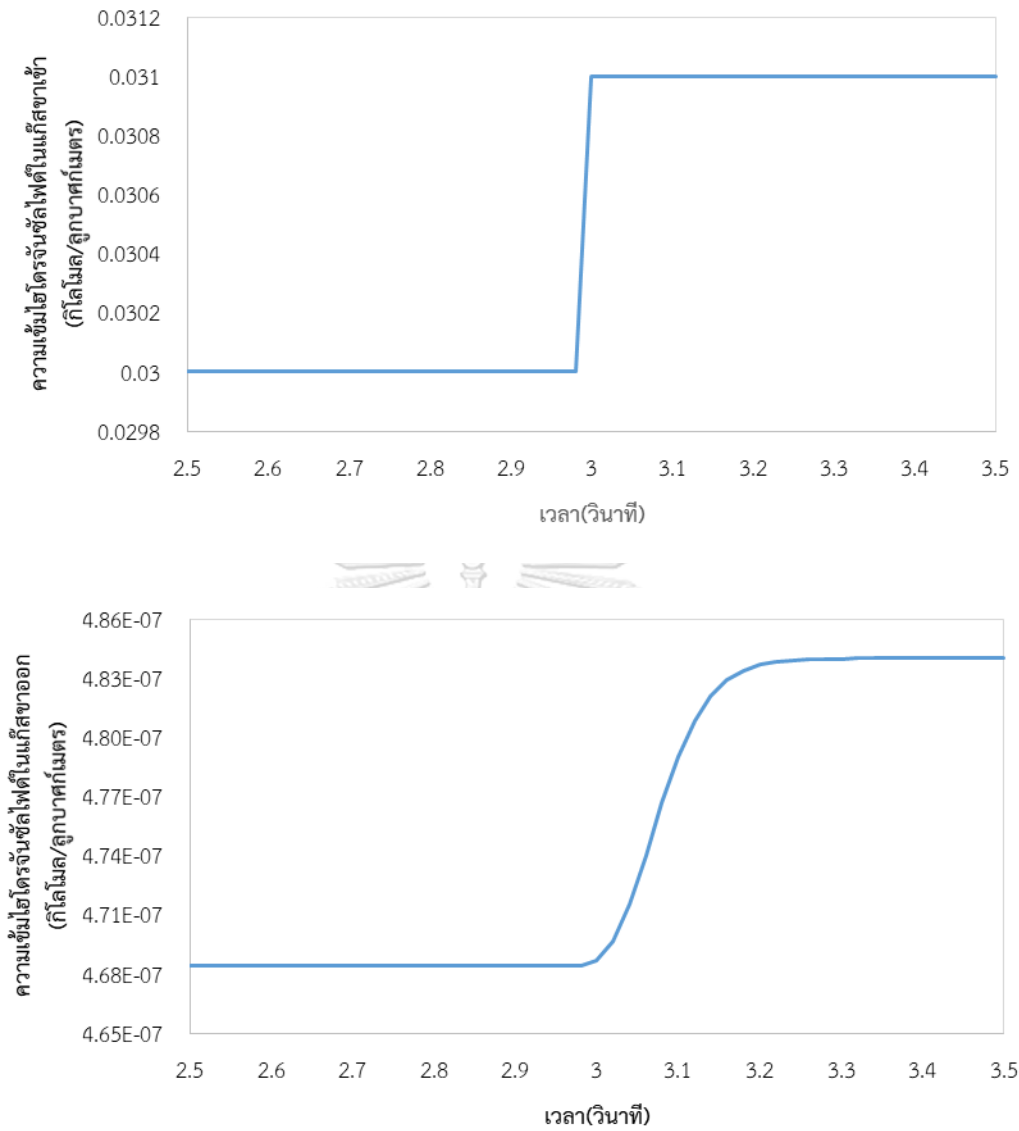
ค่าเฉลี่ยของ K_{gain} , τ และ t_d ที่ได้ คือ -4.537, 0.044 วินาที และ 0.0727 วินาที ตามลำดับ

4.2.2 การประมาณค่า Disturbance gain (K_D) และ Disturbance time constant (τ_D) จากพจน์ตัวแปรรบกวน $C_{g,in}(s)$

จากหัวข้อ 3.2.1 เมื่อมีการปรับตัวแปรรบกวนแล้วค่าของตัวแปรควบคุมจะเข้าสู่สภาวะคงตัวใหม่ตามรูปที่ 16

จากรูปที่ 16 เมื่อปรับความเข้มข้นขาเข้าขึ้นจาก 0.030 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรไปที่ 0.031 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร ณ วินาทีที่ 3 ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ตำแหน่งขาออกจากเวนจูรีสแคร็บเบอร์ซึ่งจากเดิมอยู่ที่ 4.68×10^{-7} กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรเพิ่มขึ้นและคงที่ที่ค่าความเข้มข้น 4.83×10^{-7} กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแปลงแบบจำลองพลวัตให้อยู่ในรูปสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันโดยวิธีการประมาณค่าสมการเอสโดเมนออเดอร์ที่ 1 แบบโอเพินลูปนั้นสามารถดำเนินการได้

ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงที่เวลา 3 วินาทีของกราฟทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อมีการปรับค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าหรือตัวแปรรบกวนให้เพิ่มขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกหรือตัวแปรควบคุมเพิ่มขึ้นตาม จากการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบดังกล่าวส่งผลให้ค่าเกนของการรบกวน (K_D) ที่คำนวณได้เป็นค่าบวก



รูปที่ 16. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรับตัวแปรปรับโดยการปรับความเข้มข้นขาเข้าขึ้น
 ขึ้นจาก 0.030 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรไปที่ 0.031 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร(บน) และกราฟการ
 เปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นขาออก(ล่าง)

เมื่อทำการคำนวณ K_D และ τ_D ตามหัวข้อ 3.2.2.1 – 3.2.1.4 พบว่า K_D และ τ_D มีหลายค่า แสดงตามตารางที่ 5 และ 6

ตารางที่ 5 แสดงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ K_D ณ ช่วงการดำเนินการต่างๆตามหัวข้อ 3.2.2.1 – 3.2.2.3

V_L (m/s)	K_D	
	ต่ำสุด	สูงสุด
20 - 29	0.9953	1.0045
30 - 39	0.9975	1.0023
40 - 49	0.9983	1.0015
50 - 60	0.9989	1.0011

ตารางที่ 6 แสดงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ τ_D ณ ช่วงการดำเนินการต่างๆตามหัวข้อ 3.2.2.1 – 3.2.2.3

V_L (m/s)	τ_D (s)	
	ต่ำสุด	สูงสุด
20 - 29	0.1015	0.1073
30 - 39	0.0970	0.1015
40 - 49	0.0938	0.0970
50 - 60	0.0907	0.0938

จากตารางที่ 5 และ 6 แสดงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ K_D และ τ_D ณ ช่วงการดำเนินการต่างๆพบว่าค่า K_D มีค่าเป็นบวกเพราะการเปลี่ยนแปลงของตัวรบกวนจะทำให้ค่าของตัวแปรควบคุมมีผลไปในทางเดียวกันกล่าวคือถ้าเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าจะทำให้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกเพิ่มขึ้นและถ้าลดความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าจะทำให้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกลดลง

ค่าเฉลี่ยของ K_D และ τ_D ที่ได้ คือ 0.9999 และ 0.0980 วินาที ตามลำดับ

4.3 ออกแบบตัวควบคุม PID

จากหัวข้อ 3.3 นำค่าเฉลี่ยของ K_{gain} , τ และ t_d ไปคำนวณในโปรแกรม MATLAB Simulink ผลที่ได้จากการดำเนินการคำสั่ง Auto-tuning จะเป็นไปตามตารางที่ 7

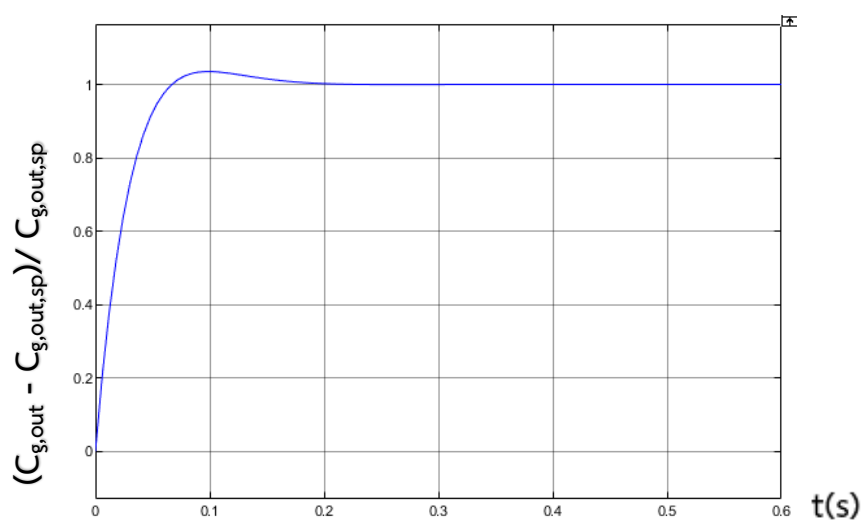
ตารางที่ 7 แสดงค่า K_p , K_i , K_D และ N จากการดำเนินการคำสั่ง Auto-tuning ในโปรแกรม MATLAB Simulink

	K_p	K_i	K_D	N
PID	-0.34403	-11.8335	-0.00038	57.57

จากตารางที่ 7 ค่า K_p , K_i และ K_D มีค่าเป็นลบสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมซึ่งมีความสัมพันธ์แบบตรงกันข้าม

สำหรับการแสดงค่าในการจำลองผลการควบคุมของตัวแปรควบคุมในแนวแกนตั้งแสดงในหน่วยของผลต่างของความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออก ($C_{g,out}$) กับความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกที่กำหนด ($C_{g,out,sp}$) ต่อความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกที่กำหนด ($C_{g,out,sp}$) และแนวแกนนอนคือเวลา (t)

เมื่อนำค่าจากตารางที่ 7 บรรจุเข้าไปในกล่องตัวควบคุม PID ในรูปที่ 9 ผลที่ได้จากการดำเนินโปรแกรม MATLAB Simulink ตามรูปที่ 17.



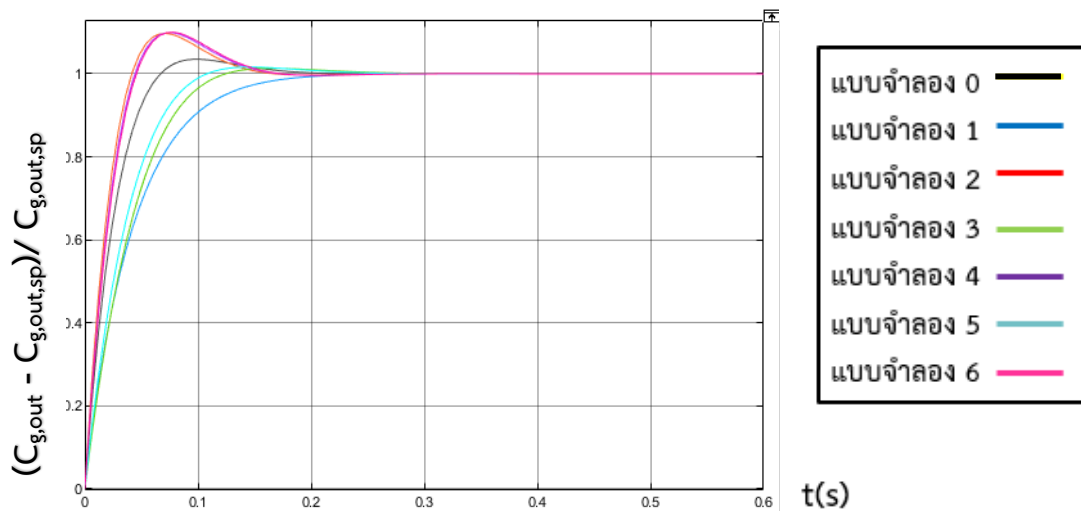
รูปที่ 17. กราฟแสดงการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดออร์ที่ 1 โดยใช้ K_{gain} , τ และ t_d ที่มาจากค่าเฉลี่ยและไม่มีการรบกวนด้วยตัวแปรรบกวน

จากรูปที่ 17 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม PID สามารถควบคุมให้ระบบเข้าสู่สภาวะที่กำหนดหรือตำแหน่งเซตพอยต์ไว้ได้โดยจะเข้าสู่สภาวะที่กำหนดไว้ที่เวลา 0.28 วินาที

จากนั้นทำการทดสอบตัวควบคุม PID กับแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ที่ 1 โดยใช้ K_{gain} , τ และ t_d อื่นจากผลการทดลองตามตารางที่ 4 ซึ่งเลือกแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ที่ 1 มาทดสอบโดยมีหลักการคือสุ่มเลือกแบบจำลองที่มีค่า K_{gain} มากที่สุดกับน้อยที่สุดในแต่ละช่วงของการทดลองความเร็วเริ่มต้นของของเหลวได้เป็นทั้งหมด 6 แบบจำลองแล้วมาเทียบกับแบบจำลองที่ได้มาจาก K_{gain} , τ และ t_d ที่เป็นค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงแบบจำลองที่นำมาทดสอบกับตัวควบคุม PID โดยแบบจำลองที่ 0 เป็นแบบจำลองจาก K_{gain} , τ และ t_d ที่เป็นค่าเฉลี่ย และแบบจำลองที่ 1 – 6 เป็นแบบจำลองที่สุ่มเลือกขึ้นมา

แบบจำลอง	K_{gain}	τ (s)	t_d (s)
0	-4.573	0.044	0.00727
1	-2.016	0.030	0.00675
2	-8.950	0.070	0.01350
3	-2.447	0.030	0.00540
4	-8.193	0.070	0.00900
5	-2.815	0.03	0.00450
6	-7.875	0.07	0.00549



รูปที่ 18. กราฟเปรียบเทียบการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดออร์ที่ 1 โดยใช้แบบจำลอง จากตารางที่ 8 และไม่มีกรรบบกวนด้วยตัวแปรรบกวน

จากรูปที่ 18 พบว่าในช่วงแรกของกราฟแบบจำลองแต่ละแบบจะให้เส้นกราฟที่ไม่เหมือนกัน โดยแบบจำลองที่มี K_{gain} ที่ต่ำตัวกราฟจะทะยานขึ้นเหนือตำแหน่งเซตพอยต์ก่อนแล้วค่อยตกลงมา กลับสู่ตำแหน่งเซตพอยต์ ส่วนแบบจำลองที่มี K_{gain} ที่สูงตัวกราฟจะโค้งเข้าสู่ตำแหน่งเซตพอยต์ทั้งนี้ กราฟของแบบจำลองทั้งหมดจะเข้าสู่ตำแหน่งเซตพอยต์ที่เวลาประมาณ 0.28 วินาที

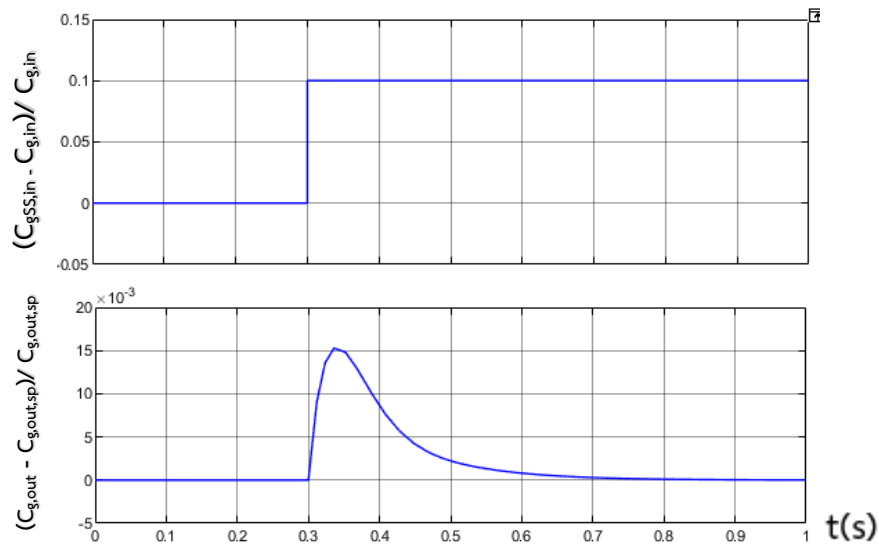
ดังนั้นตัวควบคุม PID สามารถใช้ควบคุมกับแบบจำลองต่างๆในตารางที่ 4 และใช้ควบคุมระบบนี้ได้เพราะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่จุดเสถียรภาวะคงตัว ณ ตำแหน่งเซตพอยต์ใกล้เคียงกัน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4 การทดสอบตัวควบคุม PID ด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวน

4.4.1 การทดสอบตัวควบคุม PID ด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบขั้น (step change)

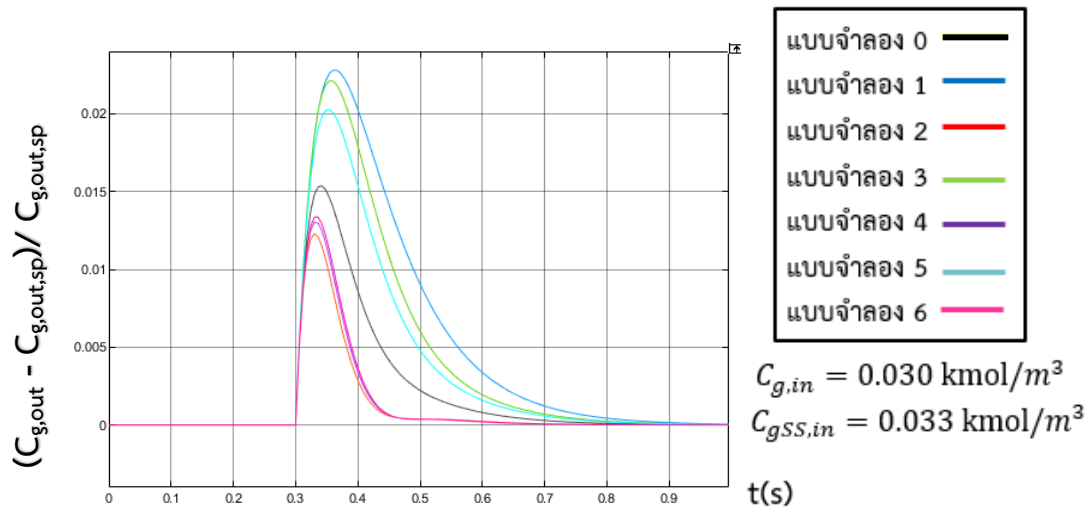
จากหัวข้อ 3.4.1 ได้ทำการเพิ่มสัญญาณของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวนแบบขั้นเข้ามาเพื่อทดสอบการทำงานของตัวควบคุม PID โดยใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนเป็น ค่าเฉลี่ยของ K_D และ τ_D จากการจำลองก็ได้กราฟตามรูปที่ 19



รูปที่ 19. กราฟแสดงการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ที่ 1 โดยใช้ K_{gain} , τ และ t_d ที่มาจากค่าเฉลี่ย แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวน K_D และ τ_D เป็นค่าเฉลี่ยโดยมีการรบกวนด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนแบบขั้นที่เวลา 0.3 วินาที

จากรูปที่ 19 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวนแบบขั้นที่เวลา 0.3 วินาทีหรือเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าจะส่งผลให้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกเปลี่ยนไปแต่จะกลับเข้าสู่ตำแหน่งเซตพอยต์ที่กำหนดไว้ในเวลาต่อมาหรือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจะเพิ่มขึ้นแต่ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจะกลับเข้าสู่ค่าของความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกที่กำหนดไว้

เมื่อลองเปลี่ยนแบบจำลองตามตารางที่ 8 โดยให้ค่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนเท่าเดิม และแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวน K_D และ τ_D เป็นค่าเฉลี่ยจะได้ผลการจำลองตามรูปที่



รูปที่ 20. กราฟเปรียบเทียบการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบขั้นโดยใช้แบบจำลองจากตารางที่ 8

จากรูปที่ 20 หลังจากการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 0.3 วินาทีพบว่าการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมากทั้งนี้ส่วนที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงต่างกันเพราะ τ ที่ต่างกันของแต่ละแบบจำลอง กรณี τ ในแบบจำลองนั้นมีค่ามากทำให้การเข้าสู่ตำแหน่งเซตพอยต์ใช้เวลาน้อย กรณี τ ในแบบจำลองนั้นมีค่าน้อยทำให้การเข้าสู่ตำแหน่งเซตพอยต์ใช้เวลายาว สำหรับ K_{gain} กรณี K_{gain} ที่มีค่าน้อยจะให้การแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสูงสุดหลังจากเวลา 0.3 วินาทีที่น้อยและกรณี K_{gain} ที่มีค่ามากจะให้การแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสูงสุดหลังจากเวลา 0.3 วินาทีที่มาก ดังนั้น K_{gain} จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสูงสุดหลังจากเวลา 0.3 วินาทีและค่า τ แสดงถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่ตำแหน่งเซตพอยต์

ลำดับถัดไปทำการคงแบบจำลองที่ค่าเฉลี่ยและเปลี่ยนแปลงเฉพาะแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนโดยเลือกแบบจำลองการรบกวนดังนี้ตามตารางที่ 9

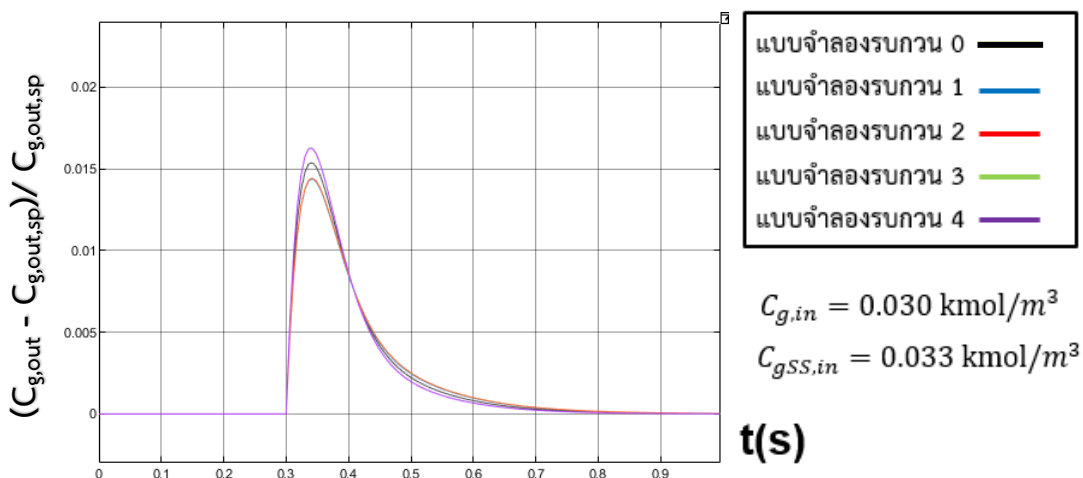
ตารางที่ 9 แสดงแบบจำลองเปลี่ยนแปลงตัวแปรระบบที่นำมาทดสอบกับตัวควบคุม PID โดยแบบจำลองที่ 0 เป็นแบบจำลองจาก K_D และ τ_D ที่เป็นค่าเฉลี่ย และแบบจำลองการรบกวนที่ 1 – 4 เป็นแบบจำลองที่เลือกขึ้นมา

แบบจำลองการรบกวน	K_D	τ_D
0	0.9999	0.0980
1	0.9955	0.1065
2	1.0045	0.1073
3	1.0008	0.0908
4	0.9992	0.0907

จากตารางที่ 9 หลักการเลือกแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรระบบที่ 1 – 4 คือแบบจำลองเปลี่ยนแปลงตัวแปรระบบที่ 1 และ 3 เป็นค่า K_D ที่มากที่สุด แบบจำลองเปลี่ยนแปลงตัวแปรระบบที่ 2 และ 4 เป็นค่า K_D ที่น้อยที่สุด แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรระบบที่ 1 และ 2 เป็นค่า τ_D ที่มากที่สุดและแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรระบบที่ 3 และ 4 เป็นค่า τ_D ที่น้อยที่สุด

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองการรบกวนตามตารางที่ 9 โดยให้ค่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรระบบเท่าเดิมจะได้ผลการจำลองตามรูปที่ 21

จากรูปที่ 21 หลังจากการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 0.3 วินาทีพบว่าการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมาก ส่วนที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงต่างกันเพราะค่า τ_D ที่ต่างกันของแต่ละแบบจำลองกรณี τ ในแบบจำลองนั้นมากเวลาที่จะทำให้เข้าสู่ตำแหน่งเซตพอยต์น้อย กรณี τ_D ในแบบจำลองนั้นน้อยเวลาที่จะทำให้เวลาเข้าสู่ตำแหน่งเซตพอยต์มาก ทั้งนี้เส้นกราฟแต่ละเส้นในแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรระบบ (รูปที่ 21) ให้ผลที่ใกล้เคียงกันเพราะค่า τ_D ในแต่ละแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรระบบมีค่าใกล้เคียงกัน

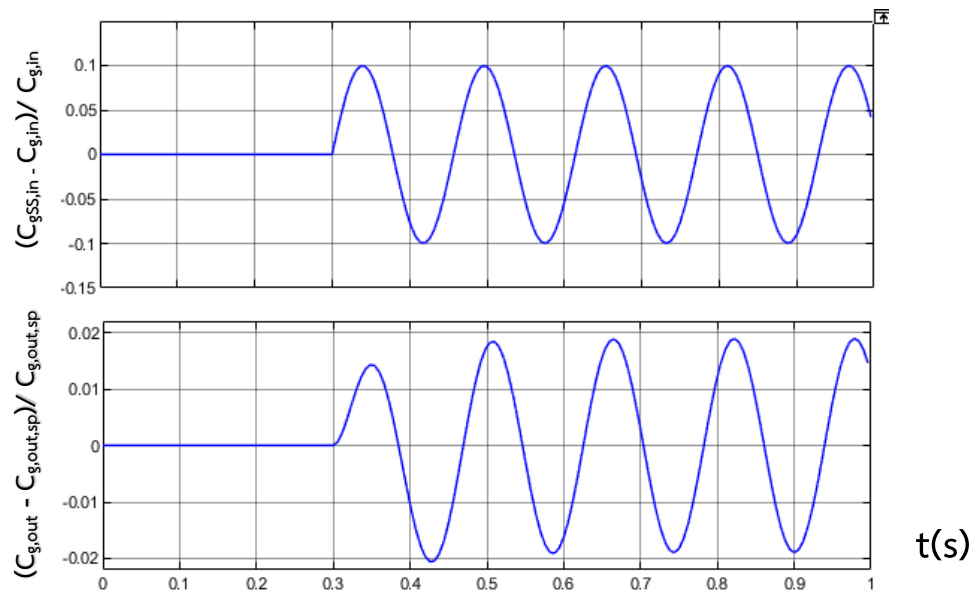


รูปที่ 21. กราฟเปรียบเทียบการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดออร์ที่ 1 สำหรับแบบจำลองเปลี่ยนแปลงตัวแปรกระบวนการ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรกระบวนการแบบขั้นโดยใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรกระบวนการจากตารางที่ 9

4.4.2 การทดสอบตัวควบคุม PID ด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรกระบวนการแบบกราฟรูปไซน์

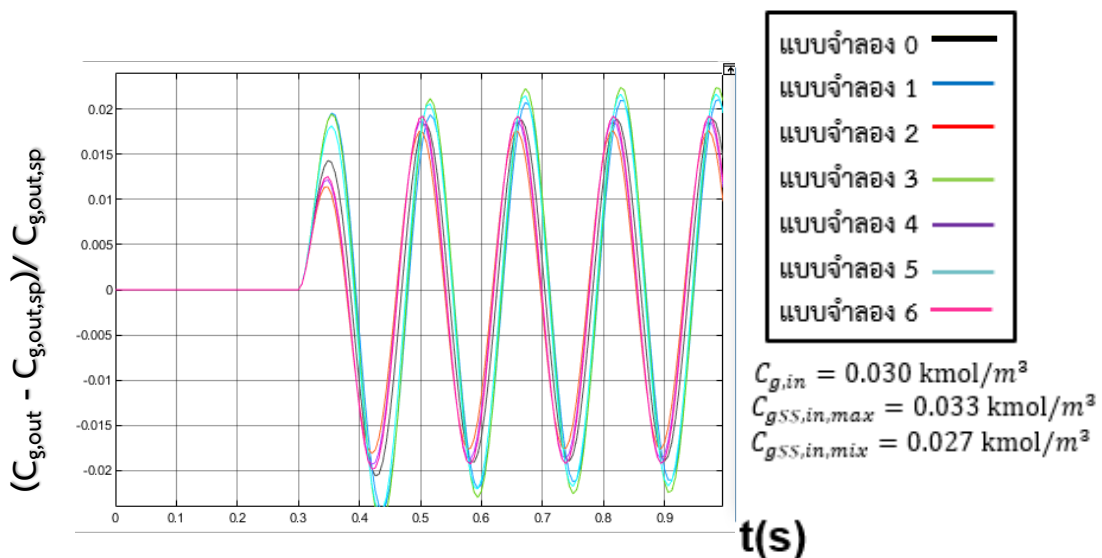
จากหัวข้อ 3.4.2 ได้ทำการเพิ่มสัญญาณของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการแบบกราฟรูปไซน์เข้ามาเพื่อทดสอบการทำงานของตัวควบคุม PID โดยใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรกระบวนการเป็นค่าเฉลี่ยของ K_D และ τ_D จากการจำลองก็ได้กราฟตามรูปที่ 22

จากรูปที่ 22 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการที่เวลา 0.3 วินาทีหรือมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าจะส่งผลให้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกเปลี่ยนไปโดยความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจะมีลักษณะเป็นกราฟรูปไซน์รอบตำแหน่งเซตพอยต์และมีค่าการเปลี่ยนแปลงของคลื่นสูงสุดหรือค่าแอมพลิจูดสูงสุดอยู่ที่ 0.019 หรือความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1.019 เท่าของตำแหน่งเซตพอยต์กับค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.981 เท่าของตำแหน่งเซตพอยต์ ทั้งนี้ค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกนั้นถือว่ายอมรับได้เพราะความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกหลังจากการควบคุมนั้นน้อยอยู่แล้วทำให้ค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งเซตพอยต์ที่กำหนดไว้



รูปที่ 22. กราฟแสดงการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ที่ 1 โดยใช้ K_{gain} , τ และ t_d ที่มาจากค่าเฉลี่ย แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรอบวน K_D และ τ_D เป็นค่าเฉลี่ยโดยมีการรอบวนด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรอบวนแบบกราฟรูปไซน์ที่เวลา 0.3 วินาที

เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองตามตารางที่ 8 โดยให้ค่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรอบวนเท่าเดิมและแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรอบวน K_D และ τ_D เป็นค่าเฉลี่ยจะได้ผลการจำลองตามรูปที่ 23



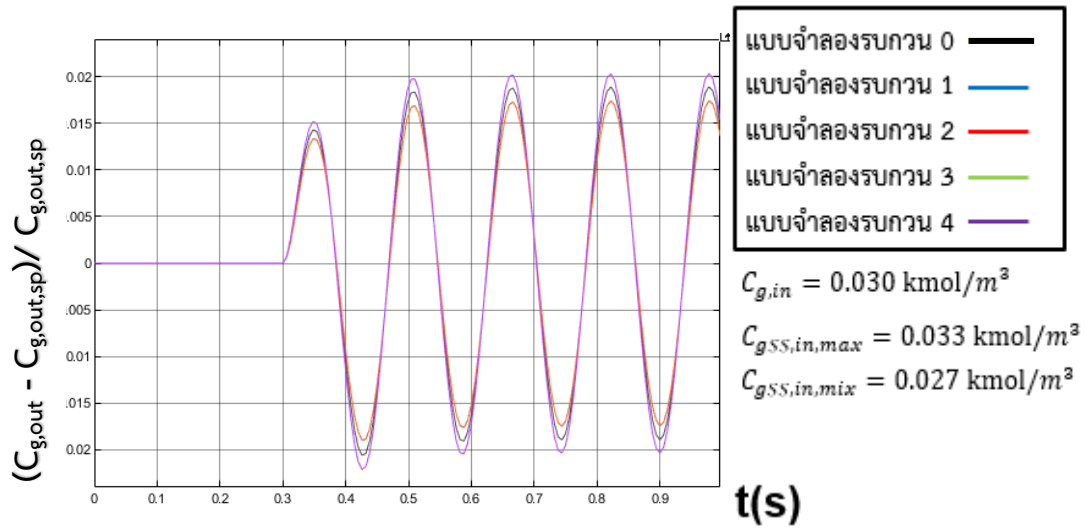
รูปที่ 23 กราฟเปรียบเทียบการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรอบวนแบบกราฟรูปไซน์โดยใช้แบบจำลองจากตารางที่ 8

จากรูปที่ 23 หลังจากการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 0.3 วินาทีพบว่าการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมากทั้งนี้ส่วนที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงต่างกันเพราะ τ ที่ต่างกันของแต่ละแบบจำลอง กรณี τ ในแบบจำลองนั้นมากเวลาที่จะทำให้เวลาเข้าสู่ตำแหน่งเซตพอยต์น้อย กรณี τ ในแบบจำลองนั้นน้อยเวลาที่จะทำให้เวลาเข้าสู่ตำแหน่งเซตพอยต์มาก สำหรับ K_{gain} กรณี K_{gain} ที่มีค่าน้อยทำให้แอมพลิจูดสูงสุดหลังการเปลี่ยนแปลงเวลา 0.3 วินาทีที่น้อยและกรณี K_{gain} ที่มีค่ามากจะให้แอมพลิจูดสูงสุดหลังการเปลี่ยนแปลงเวลาเวลา 0.3 วินาทีที่มาก ดังนั้นค่า K_{gain} จะแสดงถึงแอมพลิจูดสูงสุดหลังจากเวลา 0.3 วินาทีและค่า τ แสดงถึงเวลาที่ระบบจะเข้าสู่ตำแหน่งเซตพอยต์

ลำดับถัดไปทำการคงแบบจำลองที่ค่าเฉลี่ยและเปลี่ยนแปลงเฉพาะแบบจำลองการรบกวน โดยเลือกแบบจำลองการรบกวนดังนี้ตามตารางที่ 9 โดยให้ค่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนเท่าเดิม จะได้ผลการจำลองตามรูปที่ 24

จากรูปที่ 24 หลังจากการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 0.3 วินาทีพบว่าการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมากทั้งนี้ส่วนที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงต่างกันเพราะค่า τ_D ที่ต่างกันของแต่ละแบบจำลอง กรณี τ_D ในแบบจำลองนั้นมากเวลาที่จะทำให้เข้าสู่ตำแหน่งเซตพอยต์น้อยและมีแอมพลิจูดสูงสุดที่น้อย กรณี τ_D ในแบบจำลองนั้นน้อยเวลาที่จะทำให้เวลาเข้าสู่ตำแหน่งเซตพอยต์มากและมีแอมพลิจูดสูงสุดที่มาก ทั้งนี้เส้นกราฟแต่ละเส้นในแบบจำลองรบกวนเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวน (รูปที่ 24) ให้ผลที่ใกล้เคียงกันเพราะค่า τ_D ในแต่ละแบบจำลองเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนใกล้เคียงกันมาก

ผลจากการควบคุมผ่านตัวควบคุมให้ผลขอตัวแปรควบคุมเป็นกราฟรูปคลื่นรอบตำแหน่งเซตพอยต์และมีแอมพลิจูดที่น้อยแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมนี้สามารถควบคุมได้ในกรณีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบกราฟรูปไซน์



รูปที่ 24. กราฟเปรียบเทียบการควบคุมจากแบบจำลองทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอร์ที่ 1 สำหรับแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนแบบกราฟรูปไซน์โดยใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนจากตารางที่ 9

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

แบบจำลองกระบวนการควบคุมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เวเนจูรีสครับเบอร์จากเดิมที่เป็นแบบจำลองในภาวะคงตัวได้ถูกพัฒนาให้อยู่ในเป็นแบบจำลองพลวัตโดยอยู่ในรูปแบบสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอ์ที่ 1 โดยให้อยู่ในรูปตัวแปรของเกณฑ์ของกระบวนการ (Process gain (K_{gain})), ค่าคงที่เวลาของกระบวนการ (Time constant (τ)), ค่าเวลาหน่วง (Time delay (t_d)) เกณฑ์ของการรบกวน (Disturbance gain (K_D)) และค่าคงที่เวลาของการรบกวน (Disturbance time constant (τ_D)) ตามสมการ 24 เนื่องจากระบบของกระบวนการควบคุมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นระบบที่ไม่เชิงเส้นทำให้แบบจำลองพลวัตในรูปแบบสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอ์ที่ 1 ให้ผลที่มีหลายค่าตามตารางที่ 4, 5 และ 6 ต่อจากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยจากค่าดังกล่าวซึ่งแบบจำลองพลวัตโดยอยู่ในรูปแบบสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันออเดอ์ที่ 1 เป็นไปตามสมการ 34

$$C_{g,out}(s) = \frac{-4.537e^{-0.00727s}}{0.044s+1} V_L(s) + \frac{0.9999}{0.0980s+1} C_{g,in}(s) \quad \text{สมการ 34}$$

ตัวควบคุมที่ใช้ในการทดลองคือหน่วยควบคุม PID โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink การคำนวณค่าคงที่ของควบคุมแบบ PID ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 7 และเมื่อทำการทดสอบหน่วยควบคุม PID ตามหัวข้อ 3.4 แสดงให้เห็นว่าหน่วยควบคุม PID ที่คำนวณได้จากการทดลองนี้สามารถควบคุมกระบวนการการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เวเนจูรีสครับเบอร์ได้

บรรณานุกรม

1. Malone Rubright, S. L.; Pearce, L. L.; Peterson, J., Environmental toxicology of hydrogen sulfide. *Nitric Oxide* **2017**, *71*, 1-13.
2. Chiodo, V.; Maisano, S.; Zafarana, G.; Urbani, F., Effect of pollutants on biogas steam reforming. *International Journal of Hydrogen Energy* **2017**, *42* (3), 1622-1628.
3. Piché, S.; Ribeiro, N.; Bacaoui, A.; Larachi, F. I., Assessment of a redox alkaline/iron-chelate absorption process for the removal of dilute hydrogen sulfide in air emissions. *Chemical Engineering Science* **2005**, *60* (22), 6452-6461.
4. Karimi, A.; Tavassoli, A.; Nassernejad, B., Kinetic studies and reactor modeling of single step H₂S removal using chelated iron solution. *Chemical Engineering Research and Design* **2010**, *88* (5-6), 748-756.
5. Prabhansu; Karmakar, M. K.; Chandra, P.; Chatterjee, P. K., A review on the fuel gas cleaning technologies in gasification process. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2015**, *3* (2), 689-702.
6. Schiavon Maia, D. C.; Niklevicz, R. R.; Arioli, R.; Frare, L. M.; Arroyo, P. A.; Gimenes, M. L.; Pereira, N. C., Removal of H₂S and CO₂ from biogas in bench scale and the pilot scale using a regenerable Fe-EDTA solution. *Renewable Energy* **2017**, *109*, 188-194.
7. Ahari, J. S.; Forsat, K.; Djenab, M. H.; Mohammadbegy, K.; Vahidi, M.; Shafiei, Z., Predictive Model of Hydrogen Sulfide Absorption by Chelate Solution in a Venturi Scrubber. *Chemical Engineering & Technology* **2008**, *31* (10), 1481-1486.
8. https://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html.
9. Ullah Khan, I.; Hafiz Dzarfan Othman, M.; Hashim, H.; Matsuura, T.; Ismail, A. F.; Rezaei-DashtArzhandi, M.; Wan Azelee, I., Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Conversion and Management* **2017**, *150*, 277-294.
10. คู่มือการปฏิบัติงาน เกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. 2010.
11. Asaoka, S.; Jadoom, W. A.; Ishidu, T.; Okamura, H.; Oikawa, T.; Nakamoto, K.,

Removal of hydrogen sulfide with granulated coal ash under aerobic and anaerobic conditions. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2018**, 6 (4), 4665-4670.

12. Magnone, E.; Kim, S. D.; Park, J. H., A systematic study of the iron hydroxide-based adsorbent for removal of hydrogen sulphide from biogas. *Microporous and Mesoporous Materials* **2018**, 270, 155-160.

13. Bal, M.; Meikap, B. C., Prediction of hydrodynamic characteristics of a venturi scrubber by using CFD simulation. *South African Journal of Chemical Engineering* **2017**, 24, 222-231.

14. Luan, Z.; Liu, X.; Zheng, M.; Zhu, L., Numerical Simulation of Square Section Venturi Scrubber with Horizontal Spray. *Procedia Computer Science* **2017**, 107, 117-121.

15. Ahmadvand, F.; Talaie, M. R., CFD modeling of droplet dispersion in a Venturi scrubber. *Chemical Engineering Journal* **2010**, 160 (2), 423-431.

16. Ali, M.; Changqi, Y. A. N.; Zhongning, S. U. N.; Haifeng, G. U.; Junlong, W.; Mehboob, K., Iodine Removal Efficiency in Non-Submerged and Submerged Self-Priming Venturi Scrubber. *Nuclear Engineering and Technology* **2013**, 45 (2), 203-210.

17. Bird, R. B.; Stewart, W. E.; Lightfoot, E. N., *Transport phenomena*. 2 ed.; Wiley: 2002.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวทัณญ ชมวิเชียร
วัน เดือน ปี เกิด	
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
ที่อยู่ปัจจุบัน	119/81 หมู่ 8 ถ.ศรีนครินทร์ ต.บางเมือง อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10270
ผลงานตีพิมพ์	Chomeichain, W., Controlling the absorption of Hydrogen Sulfide from biogases in venturi scrubber. pure and applied chemistry international conference 2019, IC56 - 61.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY