



รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์
ทุนอุดหนุนวิจัย มก.ปีงบประมาณ 2557

รหัสโครงการวิจัย ว-ท(ด)73.57

การออกแบบระบบควบคุมอิงแบบจำลองสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชที่ใช้สายไตเต
รทหลายความเข้มข้น

Model-based Controller Design of pH Process with Multiple Titrating Concentrations

หัวหน้าโครงการ ผศ.ชรินทร์ ปัญจพรผล

หน่วยงานต้นสังกัด ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ บางเขน

หน่วยงานหลัก ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ บางเขน

แหล่งทุน : ทุนอุดหนุนวิจัย มก.

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบบรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์
โครงการวิจัย (Project)
โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ 2557

ส่วนที่ 1 ข้อมูลโครงการวิจัย

- 1.1 รหัส ว-ท(ด)73.57 ชื่อโครงการวิจัย การออกแบบระบบควบคุมเชิงแบบจำลองสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชที่ใช้สายไตเตรทหลายความเข้มข้น
- 1.2 ลักษณะโครงการ เป็นโครงการวิจัยเดี่ยว
- 1.3 ชื่อหัวหน้าโครงการ ผศ.ชรินทร์ ปัญจพรผล
- 1.4 หน่วยงานต้นสังกัด ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ บางเขน
หน่วยงานหลัก ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ บางเขน
- 1.5 ประเภทโครงการ โครงการวิจัย 3 สาขา โครงการวิจัยสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- 1.6 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ 1 ปี ปีงบประมาณ 2557
- 1.7 สถานที่ดำเนินงานวิจัย/เก็บข้อมูล
 - ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- 1.8 งบประมาณรวมตลอดโครงการ 350,000.00 บาท ประกอบด้วย
ปีงบประมาณ 2557 ได้รับ 350,000.00 บาท
- 1.9 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย
 - 1 ออกแบบระบบควบคุมสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องที่มีจำนวนสายไตเตรทต่างความเข้มข้นหลายสาย โดยใช้เทคนิคการออกแบบระบบควบคุมเชิงแบบจำลอง
 - 2 ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมที่ออกแบบร่วมกับกระบวนการปรับค่าพีเอชต้นแบบ

โดยขอบเขตของโครงการวิจัยมีดังนี้

 - a) ตัวควบคุมจะถูกพัฒนาขึ้นโดยการนำเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมเชิงแบบจำลองชนิด Input/output linearization ร่วมกับ Online constrained optimization ซึ่งสามารถควบคุมค่าพีเอชและระดับความสูงในถังปฏิกรณ์ที่มีจำนวนสายไตเตรทกรด/ด่างต่างความเข้มข้นหลายสาย และคำนึงถึงการแกว่งของค่าพีเอชและอัตราการไหลของสายป้อนเข้า
 - b) ระบบควบคุมพัฒนาขึ้นประกอบด้วย ตัวควบคุมป้อนกลับตัวแปรสถานะ ตัวสังเกตการณ์ค่าสถานะ (State observer) ตัวชดเชยค่าความผิดพลาด (Compensator) และ ตรรกะในการเลือกใช้กรด-ด่างที่เหมาะสมกับค่าพีเอชที่ต้องการควบคุม
 - c) ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมในข้อ 2 โดยทำการจำลองกระบวนการและทดลองจริง

กับอุปกรณ์ต้นแบบของกระบวนการปรับค่าพีเอช ซึ่งชุดอุปกรณ์ต้นแบบนั้นประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ต่อเนื่องจำนวน 1 ถัง ที่มีสายป้อนเข้า 1 สาย มีสายไตเตรตกรด HCl จำนวน 1 สาย และสายไตเตรตด่าง NaOH ที่มีความเข้มข้นต่างกันจำนวน 2 สาย โดยระบบมีเป้าหมายเพื่อควบคุมค่าพีเอชและความสูงของของเหลวในถังปฏิกรณ์ โดยการปรับปริมาณอัตราการไหลขาออกเครื่องปฏิกรณ์และอัตราการไหลสายไตเตรตกรด/ด่าง

1.10 เป้าหมายผลงานวิจัยตลอดโครงการ

ปีงบประมาณ	เดือนที่	ผลงานวิจัยที่คาดว่าจะได้
2557	1-6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพลวัตของของกระบวนการ, อนุกรมการควบคุมและทดสอบประสิทธิภาพด้วยการจำลองแบบปิด, เติร์ปฏิกรณ์ต้นแบบกระบวนการปรับค่าพีเอช
	7-12	ชุดปฏิกรณ์ต้นแบบกระบวนการปรับค่าพีเอช และ interface ควบคุม, ทดสอบประสิทธิภาพระบบควบคุมในเวลาจริง, สรุปผลการทดลองและทำรายงานฉบับสมบูรณ์

1.11 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ

- วัตถุประสงค์ (ตามแผน)

1. ศึกษาตัวแปรควบคุม/ปรับ และปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช และ ระดับความสูงในถังปฏิกรณ์ของกระบวนการ
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพลวัตของของกระบวนการ
3. ออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบของกระบวนการปรับค่าพีเอช
4. ออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอช ที่ใช้ควบคุมค่าพีเอช และ ระดับความสูงในถังปฏิกรณ์ให้ได้ค่าตามเป้าหมาย และเขียนรายงานความก้าวหน้า
5. ออกแบบตัวสังเกตการณ์ค่าสถานะ และตรวจกระในการเลือกใช้กรด -ด่าง
6. ออกแบบตัวชดเชยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการควบคุมอันเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างกระบวนการกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือค่ารบกวนของระบบที่เกิดขึ้นในสายป้อนเข้า
7. ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้นด้วยการจำลองกระบวนการและกับอุปกรณ์ต้นแบบ ทั้งแบบการเปลี่ยนค่าเป้าหมายและการปรับตัวเมื่อมีค่ารบกวนของระบบที่เกิดขึ้นในสายป้อนเข้า
8. วิเคราะห์ประมวผล สรุปผลการทดลองเขียนบทความและรายงานการวิจัย

- เป้าหมาย/ผลที่คาด (ตามแผน)

1. ข้อมูลที่นำมาใช้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการปรับค่าพีเอชที่ใช้ความเข้มข้นสายไตเตรตต่างกันหลายสาย
3. ชุดอุปกรณ์ต้นแบบของกระบวนการปรับค่าพีเอชที่มีสายไตเตรตกรด HCl จำนวน 1 สาย และสายสายไตเตรตด่าง NaOH ที่มีความเข้มข้นสายไตเตรตต่างกันจำนวน 2 สาย

4. ตัวควบคุมสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชที่ใช้ควบคุมค่าพีเอชและระดับความสูงในถังปฏิกรณ์ และ รายงานความก้าวหน้า

5. ตัวสังเกตการณ์ค่าสถานะ และตรรกะในการเลือกใช้กรด-ด่าง

6. ตัวชดเชยค่าความผิดพลาด

7. ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบควบคุมที่พัฒนา

8. รายงานการวิจัย และบทความวิจัย

- ผลการดำเนินงาน (ปฏิบัติได้จริง)

1. ข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองพลวัตของค่าพีเอชและระดับความสูงในถังปฏิกรณ์

2. แบบจำลองพลวัตของค่าพีเอชและระดับความสูงในถังปฏิกรณ์

3. ชุดอุปกรณ์ต้นแบบของกระบวนการปรับค่าพีเอชที่มีสายไต่เตรตหลายสาย

4. ตัวควบคุมสำหรับปรับค่าพีเอชและระดับความสูงในถังปฏิกรณ์และรายงานความก้าวหน้า

5. ตัวสังเกตการณ์ค่าสถานะและตรรกะในการเลือกใช้กรด-ด่าง

6. ตัวชดเชยค่าความผิดพลาดและระบบควบคุมที่พัฒนา

7. ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบควบคุมที่พัฒนา

8. รายงานการวิจัย บทความนำเสนอในที่ประชุมระดับนานาชาติ และกำลังดำเนินการจัดทำบทความวิจัย เพื่อส่งตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

1.12 ผลการดำเนินงานวิจัยเป็นไปตามแผนหรือไม่ อย่างไร

- เป็นไปตามแผน

1.13 ปัญหา อุปสรรคในการดำเนินงาน และแนวทางแก้ไข

- ไม่มีปัญหาและอุปสรรค

1.14 สรุปผลการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์

- บรรลุ

1.15 ผลผลิต/สิ่งที่ได้จากการวิจัย (Outputs)

- สร้างนักวิจัย/สนับสนุนนิสิตปริญญาเอก (ระบุจำนวนคน)

1

1.16 จุดเด่นของผลงานวิจัย / ผลผลิต / สิ่งที่ได้จากการวิจัย (outputs)

- สร้างองค์ความรู้ใหม่/นวัตกรรมที่ทันสมัย

ได้เทคนิคใหม่การออกแบบระบบควบคุมอิงแบบจำลองซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการควบคุมของกระบวนการปรับค่าพีเอชที่มีจำนวนสายไต่เตรตต่างความเข้มข้นหลายสาย

- สร้างนักวิจัยหน้าใหม่/พัฒนานักวิจัย

สร้างนักวิจัยระดับปริญญาเอกด้านการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการ

1.17 การนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ (Outcomes)

1. การนำผลการวิจัยไปเผยแพร่/ถ่ายทอด

1.1 วารสารวิชาการระดับชาติ/วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

-

1.2 นำเสนอในการประชุม/สัมมนาระดับชาติและนานาชาติ 1 เรื่อง

นำเสนอในการประชุม/สัมมนาระดับนานาชาติ

- ลักษณะเอกสาร/รูปแบบการนำเสนอ : บทความเต็มรูปแบบ/ภาคบรรยาย

- ชื่อผู้เสนอผลงาน : Thana Srihawan, Chanin Panjapornpon

- ชื่อเรื่อง : Coupled Control between pH and Level of a Process with Multititrated Concentrations by Input/State Linearization

- ชื่อการประชุมสัมมนา : the 11th IEEE International Conference on Control and Automation

- วัน/เดือน/ปี : จาก 18 มิ.ย. 2557 ถึง 20 มิ.ย. 2557

- สถานที่/เมือง/ประเทศ : Evergreen Laurel Hotel/Taichung/Taiwan

- หน้า : 1031 ถึง 1036

1.3 เผยแพร่ผลงานในรูปแบบการจัดนิทรรศการ 1 เรื่อง

- ชื่อเรื่อง : การออกแบบระบบควบคุมเชิงแบบจำลองสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชที่ใช้สายไตเตรทหลายความเข้มข้น

- ชื่อนิทรรศการ : งานการนำเสนอผลงานวิจัย โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2557

- วันที่ 14 ก.ค. 2558 ถึง 15 ก.ค. 2558

- สถานที่/จังหวัด : โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชั่น กรุงเทพฯ

1.4 บทความ

-

1.5 จัดอบรมถ่ายทอด

-

1.6 นำเสนอทางสื่อผสม

-

1.7 ภาครัฐนำไปใช้กำหนดแผน/นโยบาย

-

1.9 อื่นๆ

-

2. เป้าหมายการนำผลลัพธ์ / ผลสำเร็จที่ได้ / หรือคาดว่าจะได้จากการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. ด้านอุตสาหกรรม

- ผลจากการวิจัยนี้จะเริ่มที่จะผลักดันการนำเทคโนโลยีการควบคุมขั้นสูงให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้จริง เพื่อแก้ปัญหาการควบคุมค่าพีเอช ในกระบวนการที่มีการแกว่งตัวของค่าพีเอช สายขาเข้าในช่วงกว้างซึ่งเป็นสถานะที่พบบ่อยในอุตสาหกรรม ซึ่งทั้งนี้กระบวนการควบคุมค่าพีเอช เป็นกระบวนการพื้นฐานที่สำคัญในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การที่กระบวนการสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ทำให้สามารถลดต้นทุนในการดำเนินการผลิต เนื่องจากสามารถทำการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพใน

2. นำความรู้ไปวิจัย/พัฒนาขั้นต่อไป

- สามารถที่จะต่อยอดไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์ประเภทอื่นๆ ในกระบวนการอุตสาหกรรม เป็นการสร้างความก้าวหน้าทางองค์ความรู้ในด้านการออกแบบระบบควบคุมของไทยให้ทัดเทียมกับนานาชาติ และเพิ่มขีดความสามารถในการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับอุตสาหกรรมของไทย

3. อื่นๆ (ระบุ)

- เทคโนโลยีระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นมานี้จะช่วยทำให้ภาคอุตสาหกรรมเห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

1.18 ผลกระทบ (Impact) ที่เกิดจากการนำผลการวิจัยไปใช้ สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ด้านใด

- ยุทธศาสตร์การบริหารราชการแผ่นดิน (พ.ศ.2548 - 2551)

1. ยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจสู่การเติบโตอย่างมีคุณภาพและยั่งยืน

เป้าประสงค์ การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจสู่การพัฒนาที่มีคุณภาพและยั่งยืน

- นโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ(พ.ศ.2551 - 2553)

ยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 4 การสร้างศักยภาพและความสามารถในการพัฒนานวัตกรรมและบุคลากรทางการวิจัย

กลยุทธ์การวิจัยที่ 1 พัฒนา วิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และนวัตกรรมสู่เชิงพาณิชย์ รวมทั้งองค์ความรู้ใหม่ทางวิทยาศาสตร์ สังคมศาสตร์ และการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ในวิทยาการต่าง ๆ

แผนงานวิจัยที่ 7 การวิจัยเกี่ยวกับการสร้างนวัตกรรมและองค์ความรู้ใหม่ด้านเทคโนโลยีสะอาด (Clean Technology) และเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Environmentally Friendly Technology / Green Technology)

1.19 การรับความคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญา

-

1.20 การได้รับรางวัล

-

1.21 งานที่จะทำต่อไป

--

1.22 คำชี้แจงเพิ่มเติม

--

1.23 ได้แนบรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ของโครงการ (Project) ตามหัวข้อในตอนที่ 2 มาด้วยแล้ว

ลงชื่อ.....หัวหน้าโครงการ

(ผศ.ชนินทร์ ปัญจพรผล)

8 ก.พ. 2559

ส่วนที่ 2

รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ 2557

โครงการวิจัยรหัส ว -ท(ด)73.57

การออกแบบระบบควบคุมอิงแบบจำลองสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชที่ใช้สายไตเตรทหลายความเข้มข้น

Model-based Controller Design of pH Process with Multiple Titrated Concentrations

(1) ผศ.ดร.ชนินทร์ ปัญจพรผล, (2) ธนา ศรีหาวรรณ

(1) Asst. Prof. Dr. Chanin Panjapornpon, (2) Thana Srihawan

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการควบคุมที่ใช้สำหรับกระบวนการปรับควบคุมระหว่างค่าพีเอชและระดับความสูงของของเหลวด้วยสายไตเตรทหลายความเข้มข้น ซึ่งใช้สายน้ำขาออกและสายไตเตรทเป็นตัวควบคุม โดยระบบควบคุมป้อนกลับกำหนดโดยเทคนิคอินพุต-สเตทลิเนียร์ไรเซชัน ร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข ซึ่งใช้ในการคำนวณหาค่าตัวแปรควบคุมและค่ารับกวนระบบที่ไม่สามารถวัดได้ โดยตรรกะการเลือกใช้กรด-ด่าง ถูกนำมาใช้ในการเลือกสายไตเตรทขาเข้าที่เหมาะสม ซึ่งงานวิจัยได้ดำเนินการออกแบบโครงสร้างระบบควบคุม และทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมกับชุดอุปกรณ์เครื่องปฏิกรณ์กระบวนการปรับค่าพีเอชต้นแบบเพื่อดูความสามารถในการควบคุมแบบเวลาจริง โดยการทดสอบแบบเซอร์โว และ เรกูลาทอรี ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมค่าพีเอชและระดับความสูงของของเหลวให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ และสามารถรักษาระบบการควบคุมให้คงที่ แม้จะมีการรบกวนที่เกิดขึ้นในสายป้อนเข้าและความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

คำสำคัญ: การควบคุมกระบวนการปรับค่าพีเอช, สายไตเตรทหลายความเข้มข้น, การควบคุมควบคุม, การควบคุมอิงแบบจำลอง, การทดลองควบคุมค่าพีเอช

ABSTRACT

This research presents a control method for handling a coupling effect between the pH and liquid level of the process with multi-titrated concentrations, which an outflow and titrating streams are manipulated inputs. A feedback controller formulated by input/state (I/S) linearization and constrained optimization technique is used to calculate control actions and estimate process disturbances. Logic of acid/base selection is applied to select suitable titrant feeds. This research has designed a control system and tested it with a bench-scale pH process in a real-time operation. The performance of the designed control system is examined through servo and regulatory problems. The experimental results showed that the developed controller can regulate both pH and liquid level in order to achieve the desired setpoints and stabilize the process condition when a feedflow disturbance and model mismatch are presence.

Keywords: Control of pH process, Multiple titrating concentrations, Coupling control, Model-based control, Experiment of pH control

(1) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(1) Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

(2) นิสิตปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(2) PhD Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

คำนำ

รายงานฉบับนี้เป็นการนำเสนอผลวิจัยของโครงการวิจัย “การออกแบบระบบควบคุมอิงแบบจำลอง สำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชที่ใช้สายไตเตรทหลายความเข้มข้น ซึ่งเนื้อหาภายในรายงานฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบระบบควบคุมสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชที่ใช้สายไตเตรทหลายความเข้มข้น ที่มีเป้าหมายเพื่อควบคุมค่าพีเอชและระดับความสูงของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ โดยการปรับอัตราการไหลของสายไตเตรทและสายน้ำขาออก ระบบควบคุมสร้างขึ้นโดยอาศัยเทคนิคอินพุต-สเตทลิเนียร์โรเซชันและมีการประยุกต์ร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม โดยมีการใช้ตัวทำนายค่าแบบลูปปิดเพื่อใช้เป็นตัวชดเชยค่าความผิดพลาดพลาตาระหว่างแบบจำลองระบบและระบบจริงอันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ระบบที่ไม่สามารถวัดได้ในการควบคุมในสภาวะจริง โดยการศึกษาครั้งนี้ได้มีการทดสอบเทคนิคดังกล่าวกับชุดอุปกรณ์เครื่องปฏิกรณ์กระบวนการปรับค่าพีเอชต้นแบบในเวลาจริง ซึ่งมีผลการทดสอบและประสิทธิภาพเป็นที่น่าพึงพอใจ

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อให้นิสิต นักศึกษา ครู อาจารย์ นักวิชาการ นักวิจัย และผู้สนใจทั่วไป ไม่มากก็น้อย

ผศ.ดร.ชรินทร์ ปัญจพรผล และคณะ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยการสนับสนุนทางด้านทุนวิจัยจาก สถาบันพัฒนาและวิจัย แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI), บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นอกจากนั้น ข้าพเจ้า ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการของภาควิชาเคมีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่ช่วย ติดตามประสานงานและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วง

ผศ.ดร.ชรินทร์ ปัญจพรผล และคณะ

สารบัญ

บทคัดย่อ	8
ABSTRACT	9
คำนำ	10
กิตติกรรมประกาศ	11
สารบัญรูป	14
สารบัญตาราง	15
1. บทนำ	16
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา	16
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	18
1.3 ขอบเขตงานงานวิจัย	18
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	18
2. การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	20
2.1 การเกิดปฏิกิริยากรด - เบส	20
2.2 การควบคุมชนิดอิงแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Model-based control)	21
2.3 การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่อง	22
2.4 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	24
3. วิธีวิจัย	27
3.1 กรอบแนวคิดในการวิจัย/ สมมุติฐานทฤษฎีการวิจัย	27
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่อง	27
3.2 การออกแบบระบบควบคุมอินพุต-สเตทลิเนียร์ไรเซชันสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่อง	30
3.4 การสร้างชุดอุปกรณ์ควบคุมต้นแบบสำหรับเครื่องปฏิกรณ์กระบวนการปรับค่าพีเอชแบบเวลาจริง	34
4. ผลการวิจัย	39

4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่นำเสนอในเวลาจริง	39
5. สรุปผลการทดลอง	46
เอกสารอ้างอิง	47
ภาคผนวก	49

สารบัญรูป

รูปที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์การปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องที่ใช้สายไต่เตรทหลายความเข้มข้น	27
รูปที่ 2 ตรรกะการเลือกสายไต่เตรทที่เหมาะสม	31
รูปที่ 3 แผนภาพระบบควบคุมสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่อง	33
รูปที่ 4 เครื่องปฏิกรณ์กระบวนการปรับค่าพีเอชที่ใช้สายไต่เตรทหลายความเข้มข้น (a) เครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบ (b) แผนภาพของเครื่องปฏิกรณ์	34
รูปที่ 5 Ultrasonic sensor	35
รูปที่ 6 อุปกรณ์วัดค่าพีเอช: a) pH probe b) pH meter	35
รูปที่ 7 ปัมป์บีรูด	36
รูปที่ 8 ชุดอุปกรณ์ NI-cDAQ ซึ่งประกอบด้วย NI-cDAQ chassis และ I/O modules จาก National Instruments	37
รูปที่ 9 โปรแกรม LabView ที่พัฒนาสำหรับใช้ในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบเวลาจริง: (a) แผนภาพแสดงหน้าจอการควบคุม (b) อัลกอริทึมการควบคุม	38
รูปที่ 10 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมแบบเซอร์โว: a) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของเหลวในถังปฏิกรณ์ b) การเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์ c) อัตราการไหลของต่างความเข้มข้น 2.5 % wt d) อัตราการไหลของต่างความเข้มข้น 16 % wt e) อัตราการไหลของเหลวขาออกของถังปฏิกรณ์	41
รูปที่ 11 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมแบบเรกูลาทอรีที่คลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์ตรวจวัด: a) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของเหลวในถังปฏิกรณ์ b) การเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์ c) อัตราการไหลของต่างความเข้มข้น 2.5 % wt d) อัตราการไหลของต่างความเข้มข้น 16 % wt e) อัตราการไหลของเหลวขาออกของถังปฏิกรณ์ f) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของเหลวสายขาเข้า	43
รูปที่ 12 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมแบบเรกูลาทอรีที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้า: a) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของเหลวในถังปฏิกรณ์ b) การเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์ c) อัตราการไหลของต่างความเข้มข้น 2.5 % wt d) อัตราการไหลของต่างความเข้มข้น 16 % wt e) อัตราการไหลของเหลวขาออกของถังปฏิกรณ์ f) การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำขาเข้า	45

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องปฏิบัติการปรับค่าพีเอช	29
ตารางที่ 2	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้น และ ค่าปรับแต่ง	39
ตารางที่ 3	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแบบเซอร์โว	40
ตารางที่ 4	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1	42
ตารางที่ 5	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2	44

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

กระบวนการปรับค่าพีเอช (pH) เป็นกระบวนการพื้นฐานที่สำคัญในอุตสาหกรรมเนื่องจากถูกใช้ในการปรับค่าพีเอชของสารในกระบวนการให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้หรือผ่านขั้นตอนอื่นต่อไป ตัวอย่างของอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการปรับค่าพีเอช เช่น การผลิตไบโอดีเซล การผลิตผงชูรส การผลิตเยื่อกระดาษ การฟอกหนัง การบำบัดก๊าซพิษและน้ำเสียในอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งการควบคุมค่าพีเอชในกระบวนการให้ได้ค่าตามเป้าหมายอย่างแม่นยำโดยเฉพาะอย่างยิ่ง กระบวนการปรับค่าพีเอชที่มีการป้อนของสลายเข้าอย่างต่อเนื่องที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมนั้นเป็นปัญหาที่สำคัญและมีความท้าทายต่อวิศวกรควบคุมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องนั้นมีการตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีความอ่อนไหวสูงเมื่อเข้าใกล้จุดสะเทิน รวมถึงข้อจำกัดของเวลาในการทำปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์ และแกว่งของค่าพีเอชและอัตราการไหลในสายป้อนเข้า ปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้ตัวควบคุมพื้นฐานแบบ Proportional-Integral (PI) ที่ใช้กันมากในกระบวนการทางเคมีไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากข้อจำกัดของตัวควบคุมแบบ PI ที่จะตอบสนองได้ดีเฉพาะในช่วงที่กำหนดไว้ หากสายป้อนเข้ามีการแกว่งของค่าพีเอชในช่วงกว้าง ทำให้ตัวควบคุมแบบ PI จะสูญเสียประสิทธิภาพในการควบคุมค่าพีเอช เป็นผลให้ค่าพีเอชไม่เป็นตามเป้าหมาย ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ต้นทุนการผลิต และสิ่งแวดล้อม

ได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษารอบการออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิคการควบคุมชนิดอิงแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Model-based control, MBC) ที่นำแบบจำลองพลวัตของกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม เช่น งานวิจัยของ Wright และ Kravaris [1,2,3] การใช้แบบจำลองกระบวนการที่อิงจาก Titration curve ซึ่งประมาณค่าเทียบเท่าของโปรตอนรวมทั้งระบบเพื่อใช้ในการคำนวณร่วมกับตัวควบคุมชนิด Proportional-integral-derivative (PID) Pishvaie และ Shahroki [4] ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการสลับการใช้จำลองหลายแบบเพื่อทำนายการตอบสนองของค่าพีเอชร่วมกับการทำ optimization เพื่อในระบบกรดอะซิติก-โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดบัฟเฟอร์ Yu และคณะ [5] นำเสนอเทคนิค Nonlinear model predictive control ที่ใช้เทคนิค Global optimization แบบ Differential Evolution Gomez และคณะ [6] ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองที่ได้จากการทดลองในรูปแบบของ Wiener model ประยุกต์ใช้ร่วมกับโครงสร้างระบบควบคุมแบบ Model Predictive Control ที่ใช้ในการควบคุมค่าพีเอช Gu และ Gupta [7]

และ Shobana และคณะ [8] ได้ศึกษาการควบคุมค่าพีเอชของกระบวนการที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ถึงกวน ต่อเนื่องซึ่งมีปริมาตรเปลี่ยนแปลง

ในผลงานวิจัยที่ศึกษากระบวนการที่ต้องการควบคุมทั้งค่าพีเอชและระดับความสูงในถังปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นโครงสร้างการควบคุมของกระบวนการปรับค่าพีเอชในระดับอุตสาหกรรมแบบหนึ่งนั้นยังไม่มีกรกล่าวถึงมากนัก ซึ่งการควบคุมตัวแปรทั้งสองพร้อมกันนั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากระดับความสูงมีผลต่อการปริมาณสายไตเตรทที่ใช้โดยตรง โดยมีงานวิจัยไม่มากนักที่ได้ศึกษาการควบคุมแบบควบคู่ของทั้งสองตัวแปรนี้ เช่น งานวิจัยของ Bagheri และคณะ [9], Novák และคณะ [10] และ Xie และคณะ [11] ที่ได้ออกแบบตัวควบคุมค่าพีเอชและระดับความสูงในถังปฏิกรณ์พร้อมกันโดยการศึกษาวิจัยดังกล่าวอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่อัตราการไหลและค่าพีเอชของสายป้อนเข้าคงที่ โดยคณะผู้วิจัย [12] ได้มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้ทำการศึกษาการควบคุมกระบวนการปรับค่าพีเอชของตัวแปรทั้งสองภายใต้เงื่อนไขที่อัตราการไหลและค่าพีเอชของสายป้อนเข้าไม่คงที่ โดยอาศัยเทคนิคสมระหว่าง อินพุต-เอาต์พุตลิเนียร์ไรเซชัน (Input/output linearization) และการหาค่าที่เหมาะสม

งานวิจัยออกแบบระบบควบคุมสำหรับทั้งค่าพีเอชและระดับความสูงในถังปฏิกรณ์ที่กล่าวมาทั้งหมดนั้น จะศึกษาการออกแบบการควบคุมภายใต้เงื่อนไขของจำนวนสายไตเตรทที่อาจจะเป็นกรดหรือด่างเพียงสายเดียวเท่านั้น ซึ่งความเป็นจริงในอุตสาหกรรมแล้ว ยังมีรูปแบบกระบวนการปรับค่าพีเอชที่มีการใช้สายไตเตรททั้งที่มีความเข้มข้นสูงและต่ำป้อนเข้ากระบวนการพร้อมกันเพื่อเพิ่มความสามารถในการปรับค่าพีเอช เมื่อเข้ามีการแกว่งตัวสูง เช่น กรณีของกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่อง ที่สายป้อนเข้ามีการแกว่งตัวของค่าความเป็นกรดที่มีการแกว่งตัวของค่าพีเอช ในช่วง พีเอช 1-5 ภายใต้ข้อจำกัดของปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ กระบวนการจึงมีการเลือกใช้ทั้งสายไตเตรท NaOH ความเข้มข้นต่ำและสูง เพื่อปรับค่าพีเอช ซึ่งจากการที่กระบวนการจำเป็นต้องมีจำนวนสายไตเตรทที่มากขึ้น ทำให้เกิดความยากในการเลือกปรับความเข้มข้นของทั้งสายให้เหมาะสม ตามการแกว่งตัวของค่าพีเอช ของสายขาเข้า ซึ่งการออกแบบระบบควบคุมของกระบวนการที่กล่าวมานั้นเป็นสิ่งที่ท้าทายเนื่องจากจำนวนตัวแปรขาเข้านั้นมากกว่าจำนวนตัวแปรขาออก

เพื่อการแก้ไขปัญหาค่าการควบคุมกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องที่มีจำนวนสายไตเตรทกรด/เบสหลายความเข้มข้นดังที่กล่าวมาข้างต้น และเป็นการต่อยอดองค์ความรู้ด้านการออกแบบระบบควบคุมพีเอช ที่ได้ทำงานวิจัยมาก่อนหน้านี้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมค่าพีเอชและระดับความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์ ในกระบวนการดังกล่าวเพื่อให้สามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แม้ว่ามีการแกว่งตัวของค่าพีเอชและอัตราการไหลในสายป้อนเข้า โดยใช้เทคนิคอิงแบบจำลองชนิด อินพุต-สเตทิลิเนียร์โรเซชัน (Input/state linearization) และร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขเพื่อใช้แก้ปัญหา โดยตัวควบคุมที่สร้างขึ้นจะถูกทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมร่วมกับชุดอุปกรณ์ต้นแบบของกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องที่มีสายไตเตรทกรด/ด่างความเข้มข้นต่างกันหลายสาย โดยระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นนี้จะทำให้กระบวนการปรับค่าพีเอช สามารถดำเนินการควบคุมที่สภาวะต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รองรับสภาวะของสายป้อนเข้าได้กว้างขึ้น ทำให้ได้รับผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ ลดปัญหาการเกิดของเสียจากกระบวนการและผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ออกแบบระบบควบคุมสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องที่มีจำนวนสายไตเตรทต่างความเข้มข้นหลายสาย โดยใช้เทคนิคการออกแบบระบบควบคุมอิงแบบจำลอง
2. ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมที่ออกแบบร่วมกับกระบวนการปรับค่าพีเอชต้นแบบ

1.3 ขอบเขตงานงานวิจัย

1. ตัวควบคุมจะถูกพัฒนาขึ้นโดยการใช้เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมอิงแบบจำลองชนิด อินพุต-สเตทิลิเนียร์โรเซชันร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข ซึ่งสามารถควบคุมค่าพีเอชและระดับความสูงในถังปฏิกรณ์ที่มีจำนวนสายไตเตรทกรด/ด่างต่างความเข้มข้นหลายสาย และคำนึงถึงการแกว่งของค่าพีเอชและอัตราการไหลของสายป้อนเข้า
2. ระบบควบคุมพัฒนาขึ้นประกอบด้วย ตัวควบคุมป้อนกลับตัวแปรสถานะ ตัวทำนายค่า (Predictor) ตัวชดเชยค่าความผิดพลาด (Compensator) และ ตรรกะในการเลือกใช้กรด-ด่างที่เหมาะสมกับค่าพีเอชที่ต้องการควบคุม
3. ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมในข้อ 2 โดยทำการจำลองกระบวนการ และทดลองจริงกับอุปกรณ์ต้นแบบของกระบวนการปรับค่าพีเอช

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

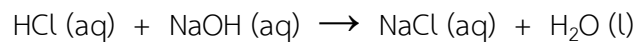
ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ ระบบควบคุมสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องที่มีจำนวนสายไตเตรทต่างความเข้มข้นหลายสาย ที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมกระบวนการให้ได้ตามค่า

เป้าหมาย สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้เชิงอุตสาหกรรมซึ่งจะเป็นจุดริเริ่มที่จะผลักดันการนำเทคโนโลยีการควบคุมขั้นสูงให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้จริง เพื่อแก้ปัญหาการควบคุมค่าพีเอช ในกระบวนการที่มีการแกว่งตัวของค่าพีเอช สายขาเข้าในช่วงกว้างซึ่งเป็นสภาวะที่พบบ่อยในอุตสาหกรรม ซึ่งทั้งนี้กระบวนการควบคุมค่าพีเอช เป็นกระบวนการพื้นฐานที่สำคัญในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การที่กระบวนการสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ทำให้สามารถลดต้นทุนในการดำเนินการผลิต เนื่องจากสามารถทำการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพในปริมาณที่มากขึ้น และลดความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อกระบวนการผลิตและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้เทคโนโลยีระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นมาจะช่วยทำให้ภาคอุตสาหกรรมเห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และเพิ่มขีดความสามารถในการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับอุตสาหกรรมของไทย และงานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะเผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ เช่น Industrial & Engineering Chemistry Research หรือ Journal of Process Control ได้อย่างน้อยหนึ่งฉบับ

2. การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดปฏิกิริยากรด - เบส

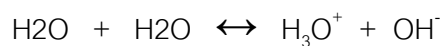
จากทฤษฎีของ Arrhenius กรด คือ สารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวให้โปรตอน (H^+) หรือไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ส่วนเบส คือ สารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ (OH^-) เบส การทำให้สารละลายมีสภาพความเป็นกลางหรือการสะเทิน (Neutralization) นั้นทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและเกลือ ตัวอย่างของปฏิกิริยา Neutralization ที่พบบ่อยในอุตสาหกรรม คือ ปฏิกิริยาสะเทิน ระหว่างกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กับเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)



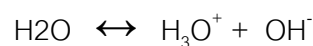
ในการทำปฏิกิริยาสะเทินกรดและเบสจะต้องทำปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยจำนวนที่สมมูลกัน ทั้งนี้คิดปริมาณของกรดและเบสตามจำนวนที่กรดและเบสจะให้โปรตอนและไฮดรอกไซด์ได้

2.1.1 ไอออนไนเซชันของน้ำ

น้ำเป็นอิเล็กโทรไลต์อ่อนไอออนไนซ์ได้เพียงเล็กน้อย ตามสมการ



สามารถเขียนในรูปอย่างง่ายจะได้



ค่าคงที่ไอออนไนเซชัน

$$K_i = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]}$$

เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำเป็นค่าคงที่ ค่าคงที่นี้คูณกับ K_i ให้ค่าคงที่อีกค่าหนึ่งเรียกว่า Ion-product constant ของน้ำ โดยใช้ K_w แทน

$$K_i [H_2O] = K_w = [H^+][OH^-]$$

$$\text{ที่ } 25^\circ\text{C} \quad K_w = 1 \times 10^{-14}$$

K_w จะเหมือนกับค่าคงที่ของสมดุลทั้งหลายที่เป็นค่าคงที่เฉพาะอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนค่า K_w จะเปลี่ยนไปด้วย โดยผลคูณของความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนกับความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำบริสุทธิ์ หรือในสารละลายน้ำใดๆ ก็ตาม มีค่าเท่ากับ 1×10^{-14}

2.2 การควบคุมชนิดอิงแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Model-based control)

ระบบควบคุมสำหรับกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน โดยในช่วงเริ่มต้นการออกแบบระบบการควบคุมจะใช้ทฤษฎีการควบคุมเชิงเส้น (Linear control theory) อันได้แก่ การควบคุมแบบ PID ซึ่งได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีอย่างกว้างขวาง เมื่อกระบวนการผลิตได้ใช้เทคโนโลยีในการผลิตที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความซับซ้อนและมีความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการเพิ่มขึ้นตามการปรับค่าตัวแปรปรับแต่ง (Tuning parameters) ของการควบคุมแบบ PID เพื่อให้กระบวนการรักษาเสถียรภาพตลอดช่วงควบคุมนั้นทำได้ยากลำบาก จึงทำให้ทฤษฎีการควบคุมระบบขั้นสูง ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้และได้รับความสนใจเป็นอันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมชนิดอิงแบบจำลองคณิตศาสตร์ทั้งที่เป็นชนิดเชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้น โดยการควบคุมชนิดอิงแบบจำลองคณิตศาสตร์นั้น สามารถแบ่งวิธีการออกแบบระบบควบคุมได้เป็น 3 แนวทางหลัก คือ การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model predictive control), การควบคุมแบบดิฟเฟอเรนเชียลจีโอเมตริก (Differential geometric control) และ การควบคุมชนิดอิงไลปูนอฟ (Lyapunov-based control) การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟนั้น การหาค่าการควบคุม (Control action) ได้มาจากผลเฉลยของการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมภายใต้ขอบเขตจำกัด (Constrained optimization) ทุกๆ ช่วงเวลาขณะทำการควบคุม โดยค่าปัจจุบันของตัวแปรสถานะ (State variables) จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าควบคุมในช่วงเวลาถัดไป แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟนั้นยังมีข้อจำกัดในด้านของจำนวนของตัวแปรปรับค่าความเร็วของระบบที่มีจำนวนมากอีกทั้งยังไม่สามารถรับรองเสถียรภาพของระบบ การควบคุมชนิดอิงไลปูนอฟนั้นจะใช้ทฤษฎีไลปูนอฟในการออกแบบระบบควบคุม กล่าวคือ ระบบจะมีเสถียรภาพเมื่อเราสามารถหาค่าฟังก์ชันที่เป็นตัวแทนของระบบ ซึ่งเป็นฟังก์ชันขอบเขต (Bounded function) และมีค่าเป็นบวกเสมอ ทุกๆ ครั้งที่ตัวแปรสถานะมีการปรับค่าแล้วทำให้ฟังก์ชันนี้มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาดำเนินไป แสดงว่าระบบนี้มีคำตอบที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้ ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ แต่การหาฟังก์ชันไลปูนอฟที่เป็นตัวแทนของทั้งระบบนั้นทำได้ค่อนข้างยาก และยังมีข้อจำกัดในเรื่องของ Domain of attraction ของลูปปิด

2.3 การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่อง

รายละเอียดที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมอิงแบบจำลองของกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องที่ศึกษาโดยคณะผู้วิจัยในงานวิจัยก่อนหน้านี [12] ซึ่งได้ประยุกต์เทคนิคอินพุต-เอาต์พุตลิเนียไรเซชันร่วมกับการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบตัวควบคุม โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

เมื่อพิจารณากระบวนการหลายตัวแปรแบบเวลาต่อเนื่องที่มีการรบกวนเกิดขึ้นระบบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, d) \\ y &= h(x) \end{aligned} \tag{1}$$

โดยที่ $x = [x_1 \cdots x_n] \in X \subset \mathbb{R}^n$ เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ
 $u = [u_1 \cdots u_m] \in U \subset \mathbb{R}^m$ เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรขาเข้า
 $d = [d_1 \cdots d_n] \in D \subset \mathbb{R}^n$ เป็นเวกเตอร์ของตัวรบกวนระบบ
 $y = [y_1 \cdots y_m] \in Y \subset \mathbb{R}^m$ เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรขาออก
 $f(x, u, d) = [f_1(x, u, d) \cdots f_n(x, u, d)]^T$ และ $h(x) = [h_1(x) \cdots h_m(x)]^T$ เป็นเวกเตอร์ฟังก์ชันกำหนดให้การตอบสนองของตัวแปรขาออกภายใต้ตัวควบคุมชนิดลูปปิดอยู่ในความสัมพันธ์แสดงดังสมการ

$$\begin{aligned} (\beta_1 D + 1)^{r_1} y_1 &= y_{sp_1} \\ &\vdots \\ (\beta_m D + 1)^{r_m} y_m &= y_{sp_m} \end{aligned} \tag{2}$$

โดยที่ $D =$ ดิฟเฟอเรนเชียลโอเปอเรเตอร์ ซึ่งกำหนดให้ $D^{(r)} = d^r / dt^r$
 $\beta =$ ค่าตัวแปรปรับแต่งของตัวควบคุม
 $r =$ ค่า Relative order
 $y_{sp} =$ ค่าเป้าหมายของตัวแปรขาออก

ค่า Relative order เป็นจำนวนเต็มที่น้อยที่สุดเพื่อทำนายตัวแปรขาออกซึ่งมีความสัมพันธ์กับตัวแปรขาเข้าภายใต้สมมติฐาน

- 1) ค่า Relative orders r_1, \dots, r_m มีค่าขอบเขตจำกัด

- 2) Characteristic matrix ของกระบวนการ, $\frac{\partial}{\partial u} h_i^{r_i} [f(x,u)] \neq [0 \dots 0]$, ไม่มีค่าเท่ากับศูนย์
- 3) กระบวนการสามารถควบคุมได้ที่จุดสถานะคงที่
- 4) ค่าเมตริกของเทอม $\partial f / \partial x$ และ $[\partial h / \partial x][\partial f / \partial x]^{-1}[\partial f / \partial u]$ ณ สถานะคงที่, (x_{ss}, u_{ss}) , มีค่าไม่เท่ากับศูนย์

โดยกำหนดให้

$$y_i^{(0)} = h_i^0(x) \triangleq h_i(x)$$

$$y_i^{(l)} = h_i^l(x) \triangleq \frac{\partial h_i^{l-1}}{\partial x} f(x, d^{(0)}, \dots, d^{(l-\rho)}) \quad l=1, \dots, r_i-1 \quad i=1, \dots, n$$

$$y_i^{(r_i)} = h_i^{r_i}(x) \triangleq \frac{\partial h_i^{r_i-1}}{\partial x} f(x, d^{(0)}, \dots, d^{(l-\rho)}, u)$$

โดยที่ ρ จำนวนเต็มที่น้อยที่สุดเพื่อทำนายตัวแปรขาออกซึ่งมีความสัมพันธ์กับตัวรบกวนระบบ d หรือ Relative order ของตัวรบกวนนั่นเอง

ส่วนเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจะถูกใช้ร่วมกับการกำหนดการตอบสนองแบบเชิงเส้นดังสมการที่ (2) เพื่อคำนวณค่าตัวแปรปรับ (Control action) โดยกำหนดให้ค่าตัวแปรปรับเป็นค่าคงที่ ณ ช่วงเวลานั้นๆ และกำหนดให้ค่าตัวรบกวนระบบที่ประมาณได้ ฟังก์ชันเป้าหมายจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปดังนี้

$$j = \min_{u, d} \sum_{i=1}^m \left((\beta_i D + 1)^{r_i} y_i - y_{sp_i} \right)^2 \tag{3}$$

Subject to

$$u_{lb} \leq u \leq u_{ub}$$

$$d_{lb} \leq d \leq d_{ub}$$

โดยที่ u_b และ l_b แสดงถึงขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามลำดับ

จากการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมภายใต้ขอบเขตจำกัดของตัวแปรปรับในสมการที่ (3) การคำนวณค่าตัวแปรปรับและค่าระบบกวนระบบโดยประมาณ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันได้ดังนี้

$$u = \psi(y, y_{sp})$$

2.4 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบระบบควบคุมค่าพีเอชของกระบวนการปรับค่าพีเอช แบบต่อเนื่องนั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและว่องไวต่อการรบกวน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเข้าใกล้จุดสะเทิน ทำให้ตัวควบคุมพื้นฐานแบบ Proportional-Integral (PI) ที่ใช้มากในอุตสาหกรรมไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากข้อจำกัดของตัวควบคุมแบบ PI ที่จะตอบสนองได้ดีเฉพาะในช่วงที่กำหนดไว้ หากสายป้อนเข้ามีการแกว่งของค่าพีเอชในช่วงกว้าง ทำให้ตัวควบคุมแบบ PI จะสูญเสียประสิทธิภาพในการควบคุมค่าพีเอช เป็นผลให้ค่าพีเอชไม่เป็นตามเป้าหมาย

เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวได้มีความพยายามที่จะใช้เทคนิคการควบคุมขั้นสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมอิงแบบจำลองคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นการออกแบบระบบควบคุมที่อาศัยแบบจำลองกระบวนการจากการทำสมดุลมวลสารและพลังงานมาใช้อธิบายการดำเนินไปของระบบ ทำให้สามารถทำนายการดำเนินไปของระบบในช่วงที่กว้าง จากจุดเด่นดังกล่าวทำให้เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้แก้ปัญหาการควบคุมกระบวนการปรับค่าพีเอช แบบต่อเนื่อง ตัวอย่างของงานวิจัยเช่น งานวิจัยของ Henson และ Seborg [13] ได้พัฒนาเทคนิคการควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบปรับตัวได้ (Adaptive nonlinear control) สำหรับการทดลองควบคุมค่าพีเอชในกระบวนการด้วยระบบ $\text{HNO}_3\text{-NaOH}$ โดยใช้เทคนิค Exact I/O linearization ร่วมกับตัวสังเกตการณ์ (Observer) ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะ ที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง และค่าความเข้มข้นของสายไตเตรทที่แปรเปลี่ยนกับเวลา Wright และ Kravaris [1,2] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน และใช้เทคนิคออกแบบเทคนิคการควบคุมในกลุ่มของอินพุต-เอาต์พุตลิเนียร์เซชัน โดยควบคุมตัวแปรที่เป็นค่าฟังก์ชันของค่าสมดุลความเป็นกรดซึ่งประมาณค่าสมดุลความเป็นกรดจากค่าพีเอชที่วัดได้ของของเหลวขาออกในขณะนั้น เพื่อทำให้อยู่ในรูปของ Inverse titration curves ซึ่งวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับกรดหรือเบสหลายประเภทได้ โดยในงานวิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุม โดยทำการทดลองในระบบของ HCl-NaOH และ $\text{CH}_3\text{COOH-NaOH}$ แต่อย่างไรก็ตาม เทคนิคดังกล่าวนี้ยังมีข้อจำกัดทางด้านประสิทธิภาพในการควบคุมซึ่งจะมีความอ่อนไหวในการควบคุมช่วงค่าพีเอชเข้าใกล้ 7 และการใช้ Inverse titration curves ที่ไม่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในช่วงกว้างได้ ซึ่งต่อมา Wright และ Kravaris [3] ได้ทำการปรับปรุงตัวควบคุมที่เคยได้นำเสนอก่อนหน้านี้โดยมีการระบุการแตกตัวของกรด-ด่างรวมในระบบ ทำให้ระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถประยุกต์ใช้กับกระบวนการได้โดยไม่จำเป็นต้องทราบความเข้มข้นและชนิดของสารป้อนเข้าโดยการประมาณค่าการแตกตัว Pishvaie และ Shahroki [4] ได้ประยุกต์หลักการหลายแบบจำลอง ในการแก้ปัญหาโดยนำเอาแบบจำลองของ Wright และ Kravaris [3] มาประยุกต์ใช้ซึ่งการเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อกำหนดการเลือกแบบจำลอง และทำการทดสอบภายใต้ ระบบกรดอะซิติก-โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นระบบที่เกิดบัฟเฟอร์ แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารป้อนเข้าเฉพาะในช่วงความเป็นกรดเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่นๆเช่น Yu et al. [5] ศึกษาการควบคุมระบบ Neutralization

โดยอาศัยเทคนิคแบบโมเดลพรีดิกทีฟชนิดไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ Differential Evolution และ Radial Base Function neural network Gomez และคณะ [6] ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองที่ได้จากการทดลองในรูปแบบของ Wiener model ประยุกต์ใช้ร่วมกับโครงสร้างระบบควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่ใช้ในการควบคุมค่าพีเอช มีตัวสังเกตการณ์ชนิดไม่เป็นเชิงเส้น ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรบวกรวนจุดเด่นของเทคนิคนี้คือไม่ต้องสร้างแบบจำลอง Gu และ Gupta [7] ได้ทำการออกแบบและทดสอบระบบควบคุมสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชที่มีการเกิดบัฟเฟอร์โดยได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟเชิงเส้น เพื่อควบคุมค่าพีเอชของระบบภายใต้เงื่อนไขของอัตราการไหลและค่าพีเอชของสายป้อนเข้าคังที่ Shobana และคณะ [8] ได้ทดสอบระบบควบคุมค่าพีเอชที่ใช้เทคนิค Internal model control (IMC) ร่วมกับตัวควบคุมแบบ PID เพื่อใช้กับระบบบัฟเฟอร์ของกรดคาร์บอนิก ซึ่งมีการคำนึงถึงค่าสัญญาณล่าช้าในการตรวจวัดค่าพีเอช

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่าส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการควบคุมค่าพีเอชของกระบวนการอย่างเดียว แต่ในความเป็นจริงแล้วกระบวนการปรับค่าพีเอช ในอุตสาหกรรมบางระบบมีการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าพีเอชและค่าความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์ ซึ่งปัญหาการควบคุมทั้งพีเอช และความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์พร้อมกันนั้น ยังไม่ถูกกล่าวถึงมากนัก เช่น งานวิจัยของ Bagheri และคณะ [9] ทำการศึกษาการออกแบบระบบควบคุมทั้งสองตัวแปรที่กล่าวมาด้วยการจำลองระบบ โดยการปรับอัตราการไหลของสายเข้าและสายไต่ตรง โดยใช้เทคนิค Multi-model generalized predictive control ร่วมกับการใช้สมการโพลีโนเมียลกำลังสี่ที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของ Titration curve Novák และคณะ [10] ที่แบ่งช่วงการสร้างแบบจำลองของ Titration curve ออกเป็น 5 ช่วง โดยแต่ละช่วงได้ทำการออกแบบการควบคุมตัวควบคุมโดยใช้เทคนิค Linear model predictive control และมีการสร้างตรรกะโดยใช้ Radial based network ในการสับเปลี่ยนการใช้งานของตัวควบคุม Xie และคณะ [11] ได้เลือกใช้เทคนิค Multi-model predictive control ร่วมการ Fuzzy switching technique ซึ่งงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นศึกษาภายใต้เงื่อนไขปัจจัยที่อัตราการไหลและค่าพีเอชของสายป้อนเข้าคังที่ภายใต้การจำลองระบบเท่านั้น ซึ่งคณะผู้วิจัย [12] ได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบการควบคุมกระบวนการปรับค่าพีเอชของตัวแปรทั้งสองโดยอาศัยเทคนิคผสมระหว่างอินพุต-เอาต์พุตลิเนียร์เรซซันและการหาค่าที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขที่อัตราการไหลและค่าพีเอชของสายป้อนเข้าไม่คังที่ ซึ่งผลการทดสอบให้ประสิทธิภาพเป็นที่น่าพอใจ

ซึ่งจากการทำการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยออกแบบระบบควบคุมสำหรับทั้งค่าพีเอชและระดับความสูงในถังปฏิกรณ์ที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นจะศึกษาการออกแบบการควบคุมภายใต้เงื่อนไขของจำนวนสายไต่ตรงที่อาจจะเป็นกรดหรือด่างเพียงสายเดียวเท่านั้น ซึ่งความเป็นจริงในอุตสาหกรรมแล้วกระบวนการปรับค่าพีเอชส่วนใหญ่จะมีการใช้สายไต่ตรงทั้งที่มีความเข้มข้นสูงและต่ำป้อนเข้ากระบวนการพร้อมกันเพื่อเพิ่มความสามารถในการปรับค่าพีเอชเมื่อค่าพีเอชของสายเข้ามีการแกว่งตัวสูง ซึ่งปัญหานี้ยังเป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ท้าทายและยังไม่ได้มีการศึกษามากนัก การพัฒนาระบบควบคุมเพื่อตอบปัญหาประเด็นดังกล่าวนี้จะช่วยให้กระบวนการสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพได้ตลอดช่วงการ

ดำเนินงานรองรับสายป้อนเข้าที่มีการแกว่งตัวรบกวนระบบ โดยแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมนั้น จะทำ โดยการต่อยอดความรู้การออกแบบระบบควบคุมอิงแบบจำลองที่ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษามาก่อนหน้านี้

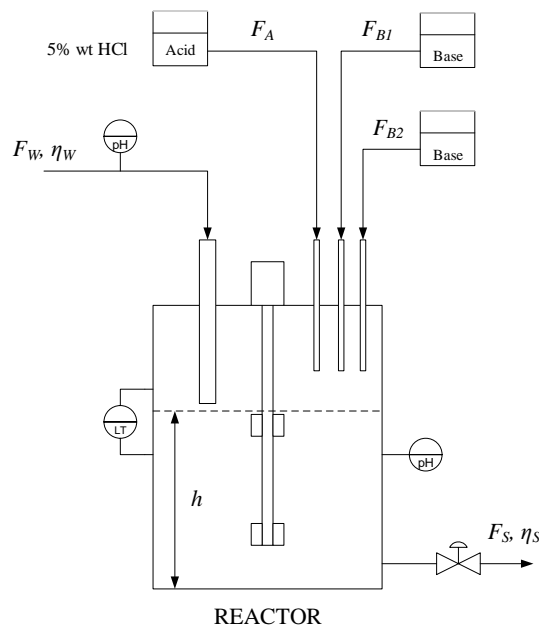
3. วิธีวิจัย

3.1 กรอบแนวคิดในการวิจัย/ สมมุติฐานทฤษฎีการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบระบบควบคุมอิงแบบจำลองในเวลาจริงเพื่อควบคุมระดับความสูงของสารละลายและค่าพีเอชในเครื่องปฏิกรณ์ของกระบวนการปรับค่าพีเอชที่ใช้สายไตเตรทหลายความเข้มข้น โดยมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์กระบวนการปรับค่าพีเอชและนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมอิงแบบจำลองแบบเวลาจริง ซึ่งระบบควบคุมนั้นถูกสร้างด้วยเทคนิคอินพุต-สเตทลิเนียร์โรเซชันร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม หลักการออกแบบของเทคนิคอินพุต-สเตทลิเนียร์โรเซชันคล้ายกับเทคนิคเทคนิคอินพุต-เอาต์พุตลิเนียร์โรเซชัน แต่ต่างกันที่ตัวแปรสถานะทุกตัวจะถูกใช้เป็นตัวแปรขาออกของการควบคุม โดยผลของการดำเนินงานมีดังนี้

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่อง

แบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์การปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องที่ใช้สายไตเตรทหลายความเข้มข้น แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์การปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องที่ใช้สายไตเตรทหลายความเข้มข้น

โดยสายขาเข้าจะถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์เพื่อนำมาปรับค่าพีเอชให้ได้ตามค่าเป้าหมาย สายไตเตรทกรดและเบสที่มีหลายความเข้มข้นใช้ถูกในการปรับค่าพีเอชของสายขาเข้าภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยระดับความสูงของ

สารละลายในเครื่องปฏิกรณ์นั้นถูกควบคุมโดยการปรับอัตราการไหลของสายขาออก โดยแบบจำลองสนใจการควบคุมระดับความสูงของสารละลายและค่าพีเอชในเครื่องปฏิกรณ์

สมมุติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองพลวัตกระบวนการดังนี้

- 1) พื้นที่หน้าตัดของเครื่องปฏิกรณ์คงที่
- 2) ความหนาแน่นของสารละลายขาเข้าและขาออกมีค่าโดยประมาณเท่ากัน
- 3) ความหนาแน่นของของสารละลายไต่อเตรทกรดและเบสมีค่าคงที่
- 4) พลวัตของความเข้มข้นของสารในของเครื่องปฏิกรณ์เป็นแบบกลุ่มก้อน (Lumped dynamic model)

จากการทำสมดุลมวลสาร แบบจำลองพลวัตระดับความสูงของสารละลายในเครื่องปฏิกรณ์สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\rho F_w + \rho_A F_A + \rho_{B1} F_{B1} + \rho_{B2} F_{B2} - \rho F_s}{\rho A} \quad (3.1)$$

โดย h คือ ระดับความสูงของสารละลายในเครื่องปฏิกรณ์ (m)
 F_w คือ อัตราการไหลของสารขาเข้า (L / min)
 F_A คือ อัตราการไหลของสายไต่อเตรทกรด (L / min)
 F_{B1}, F_{B2} คือ อัตราการไหลของสายไต่อเตรทเบส (L / min)
 F_s คือ อัตราการไหลของสารขาออก (L / min)

แบบจำลองพลวัตของค่าพีเอชในเครื่องปฏิกรณ์นั้นนำเสนอโดยเทอมของต่างความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของ โปรตอนไอออน กับ ไฮดรอกไซด์ไอออน ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\eta = \left(10^{-pH} - \frac{K_w}{10^{-pH}} \right) \quad (3.2)$$

โดย η คือ จำนวนสุทธิระหว่างโปรตอนและไฮดรอกไซด์ ไอออน
 K_w คือ ค่าคงที่การแตกไอออนของน้ำ

แบบจำลองพีเอชในเครื่องปฏิกรณ์แสดงในรูปของจำนวนสุทธิระหว่างโปรตอนและไฮดรอกไซด์ ไอออน

$$\frac{d\eta_s}{dt} = \frac{\eta_w F_w + \alpha_{A1} C_{A1} F_{A1} + \alpha_{B1} C_{B1} F_{B1} + \alpha_{B2} C_{B2} F_{B2} - \eta_s F_s}{Ah} - \frac{\eta_s (\rho F_w + \rho_{A1} F_{A1} + \rho_{B1} F_{B1} + \rho_{B2} F_{B2} - \rho F_s)}{\rho Ah} \quad (3.3)$$

โดย C_i คือ ความเข้มข้นของสารละลาย

α คือ ค่าคงสัมประสิทธิ์การแตกตัว

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองแสดงดัง ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์การปรับค่าพีเอช

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าของตัวแปร
อัตราการไหลของสารขาเข้า	F_w	3.323 L/min
ค่าความหนาแน่นของสารละลายขาเข้าและออก	ρ	1000 kg/m ³
ค่าความหนาแน่นของกรด 5% HCl	ρ_A	1087.8 kg/m ³
ค่าความหนาแน่นของด่าง 2.5% NaOH	ρ_{B1}	1055.4 kg/m ³
ค่าความหนาแน่นของด่าง 16% NaOH	ρ_{B2}	1051.7 kg/m ³
พื้นที่หน้าตัดของเครื่องปฏิกรณ์	A	0.0284 m ³
ค่าความเข้มข้นของกรด 5% HCl	C_A	1278.75 mol/m ³
ค่าความหนาแน่นของด่าง 2.5% NaOH	C_{B1}	1319.25 mol/m ³
ค่าความหนาแน่นของด่าง 16% NaOH	C_{B2}	10813.6 mol/m ³
ค่าสัมประสิทธิ์การแตกตัวของกรด HCl	α_A	1
ค่าสัมประสิทธิ์การแตกตัวของด่าง NaOH	α_{B1}, α_{B2}	-1
ค่าคงที่การแตกไอออนของน้ำ	K_w	1×10 ⁻¹⁴

3.2 การออกแบบระบบควบคุมอินพุต-สเตทิลิเนียร์โรเซชันสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่อง

1. ตัวควบคุมอินพุต-สเตทิลิเนียร์โรเซชัน (input/state linearization controller)

ตัวควบคุมที่นำเสนอเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการสร้างตัวควบคุมแบบอินพุต-สเตทิลิเนียร์โรเซชันร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งระบบที่ต้องการควบคุมนั้นจำเป็นต้องมีแบบจำลองเพื่อใช้ในการสร้างระบบควบคุม โดยแบบจำลองของระบบทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องนั้นถูกกล่าวไปแล้วในข้างต้น แต่ในที่นี้มีแบบจำลองจะมีการเพิ่มเทอมตัวรบกวนของตัวแปรสถานะ (d) ที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลาให้กับแบบจำลองพลวัตของระบบ โดยรูปแบบทั่วไปแสดงดังสมการ (3.4)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, d) \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (3.4)$$

เมื่อ x คือ ตัวแปรสถานะในระบบ, u คือ ตัวแปรขาเข้า, y คือ ตัวแปรขาออกของกระบวนการที่ต้องการควบคุม, d คือ ค่ารบกวนที่ไม่สามารถวัดได้

ซึ่งวัตถุประสงค์ในการควบคุมระบบนี้คือ ควบคุมตัวแปรสถานะความสูงและพีเอชของสารละลายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยทำการปรับค่าอัตราการไหลของสายไต่เตรทและอัตราการไหลของสายขาออกซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแปรควบคุมระบบ ในที่นี้ระบบที่นำเสนอเป็นระบบที่ไม่เสถียรเนื่องจากการควบคุมที่อัตราการไหลขาออก ดังนั้นจึงต้องควบคุมที่ตัวแปรสถานะแทนโดยอาศัยเทคนิคอินพุต-สเตทิลิเนียร์โรเซชัน ซึ่งกำหนดให้ระบบในสมการที่ (3.4) มีการตอบสนองแบบเชิงเส้นของลูปปิดด้วยความสัมพันธ์ดังสมการ (3.5)

$$(\beta_r D + 1)^r x_i = v_i \quad (3.5)$$

เมื่อ D คือ Differential operator ($D = \frac{d}{dt}$)

v_i คือ ค่าเป้าหมาย

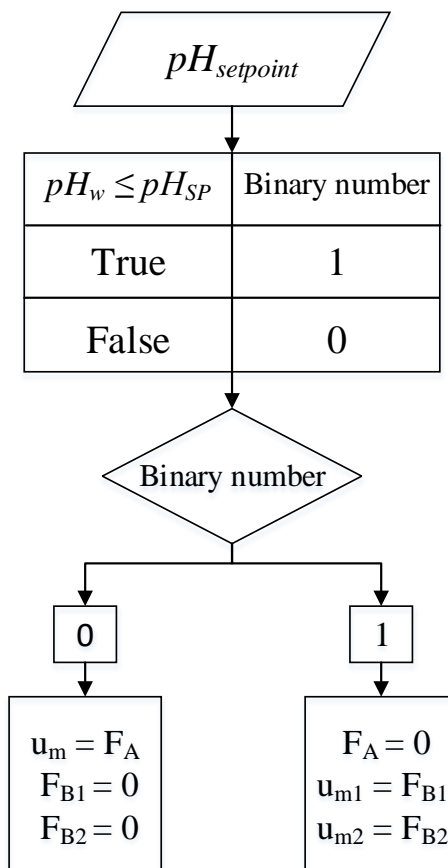
β คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับแต่ง

r คือ ลำดับสัมพัทธ์ของตัวแปรสถานะกับตัวแปรปรับ

สำหรับค่าลำดับสัมพัทธ์ของตัวแปรสถานะกับตัวแปรปรับ คือ จำนวนเต็มที่น้อยที่สุดที่ค่าของตัวแปรสถานะที่ต้องการควบคุมเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่าของตัวแปรปรับ โดย $\partial [d^r x_i / dt^r] / \partial u \neq 0$ ซึ่งกำหนดให้เป็นดังสมการ (3.6)

$$\begin{aligned}
 x_i &= h_i^0(x) \\
 \frac{dx_i}{dt} &= h_i^1(x) \\
 \frac{d^2x_i}{dt^2} &= h_i^2(x) \\
 &\vdots \\
 \frac{d^{r_i-1}x_i}{dt^{r_i-1}} &= h_i^{r_i-1}(x) \\
 \frac{d^{r_i}x_i}{dt^{r_i}} &= h_i^{r_i}(x, u_i)
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

เนื่องจากในการปฏิบัติจริงนั้น การเลือกตัวแปรที่ควบคุมที่เหมาะสมจำเป็นสำหรับกระบวนการนี้ กล่าวคือ สายไตรเทอร์ที่ใช้ในระบบนั้นจะเลือกเพียงกรดหรือด่างเท่านั้น จะไม่มีการเปิดกรดพร้อมกับด่างในการปรับค่า เป้าหมายหนึ่งครั้ง ดังนั้นตรรกะการเลือกสายไตรเทอร์ที่เหมาะสมถูกพิจารณาเพื่อเลือกจากพีเอชที่สายขาเข้า และพีเอชที่ค่าเป้าหมาย โดยตรรกะการเลือกถูกแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตรรกะการเลือกสายไตรเทอร์ที่เหมาะสม

แต่เนื่องจากตัวแปรควบคุมและตัวแปรสถานะมีจำนวนไม่เท่ากัน ทำให้ไม่สามารถแก้สมการ (3.5) ได้โดยตรง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวทางผู้วิจัยจึงได้นำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมมาใช้ในการหาค่าตัวแปรควบคุม โดยพยายามทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างค่าเป้าหมายของระบบและการตอบสนองของตัวแปรสถานะที่มีค่าน้อยที่สุด โดยวัตถุประสงค์ของการหาค่าที่เหมาะสม แสดงได้ดังนี้

$$j_1 = \min_u \{w_1[(\beta_1 D+1)^n x_1 - v_1]^2 + w_2[(\beta_2 D+1)^n x_2 - v_2]^2\} \quad (3.7)$$

st. $u_{lb} \leq u \leq u_{ub}$

เมื่อ แทนค่าจากสมการ (3.6) ลงในสมการ (3.7) แล้วแก้สมการให้อยู่ในรูปของตัวแปรขาเข้า ซึ่งความสัมพันธ์อย่างย่อของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถแสดงได้ดังนี้

$$u = \psi(x, v, d) \quad (3.8)$$

2. ตัวทำนายค่าของกระบวนการแบบลูปปิด (Closed-loop predictor)

ในกระบวนการจริงหลายกระบวนการไม่สามารถวัดค่าตัวแปรกระบวนการได้โดยตรง ดังนั้นในระบบควบคุมจะมีตัวทำนายเพื่อหาค่าตัวแปรกระบวนการของระบบเพื่อใช้ในการคำนวณค่าของตัวควบคุม ดังนั้นในระบบควบคุมจะมีตัวทำนายค่าตัวแปรสถานะของระบบเพื่อใช้ในการคำนวณค่าตัวแปรกระบวนการแสดงดังสมการ (3.9)

$$\dot{\tilde{x}} = f(\tilde{x}, u, \tilde{d}) \quad (3.9)$$

เมื่อ \tilde{x} เป็นค่าประมาณการของตัวแปรสถานะที่ได้จากตัวทำนายค่า และ \tilde{d} คือค่าประมาณการของตัวแปรขาออกที่ได้จากตัวทำนายค่า

การหาค่าตัวแปรกระบวนการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม โดยกำหนดวัตถุประสงค์ของการหาค่าที่เหมาะสมของค่าตัวแปรกระบวนการให้ความแตกต่างระหว่าง ค่าเป้าหมายของระบบ และ ตัวแปรสถานะที่ได้จากตัวทำนายค่ามีค่าน้อยที่สุด

$$j_2 = \min_{\tilde{d}} \{w_1[(\beta_1 D+1)^n \tilde{x}_1 - v_1]^2 + w_2[(\beta_2 D+1)^n \tilde{x}_2 - v_2]^2\} \quad (3.10)$$

s.t. $d_{lb} \leq \tilde{d} \leq d_{ub}$

เมื่อ แทนค่าจากสมการ (3.9) ลงในสมการ (3.10) แล้วแก้สมการให้อยู่ในรูปของตัวแปรที่หาได้ ซึ่งความสัมพันธ์อย่างย่อสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\tilde{d} = \psi(\tilde{x}, u) \tag{3.11}$$

3. ตัวชดเชย (Compensator)

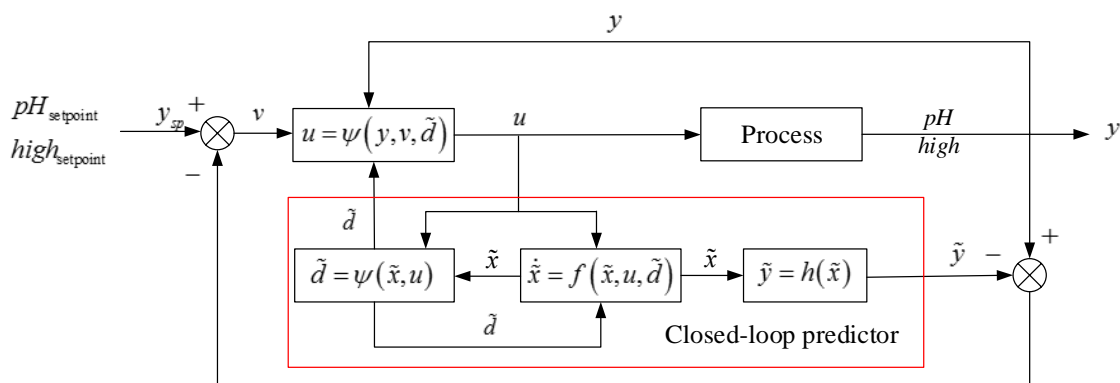
ในกระบวนการจริงมักจะมีค่าที่ไม่แน่นอนเกิดขึ้นอยู่เสมอซึ่งส่งผลให้ผลตอบสนองที่ได้จากระบบควบคุมไม่ได้ตามค่าเป้าหมายคือมีออฟเซตเกิดขึ้น โดยค่าที่ไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นมาจากหลายสาเหตุเช่น แบบจำลองของกระบวนการมีความผิดพลาดเมื่อเทียบกับกระบวนการจริง มีค่ารบกวนเกิดขึ้นในระบบจากตัวแปรขาเข้าของกระบวนการ หรือมีค่ารบกวนเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ในกระบวนการ ดังนั้น ตัวชดเชยในระบบควบคุมจะถูกนำมาใช้เพื่อกำจัดค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแปรขาออกของกระบวนการ โดยตัวชดเชยจะทำการปรับค่าเป้าหมายเมื่อมีค่ารบกวนเกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งแสดงดังสมการ (3.12)

$$v = x_{sp} - (x - \tilde{x}) \tag{3.12}$$

โดย v คือค่าเป้าหมายที่มีการชดเชย โดยสมการของระบบควบคุมที่นำเสนอแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= f(\tilde{x}, u, \tilde{d}) \\ v &= x_{sp} - (x - \tilde{x}) \\ \tilde{d} &= \psi(\tilde{x}, u) \\ u &= \psi(x, v, \tilde{d}) \end{aligned} \tag{3.13}$$

โดยแผนภาพระบบควบคุมอินพุต-สเตทลิเนียร์ไรเซชันสำหรับสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องที่ใช้สายไต่ตรงหลายความเข้มข้น แสดงดังรูปที่ 3

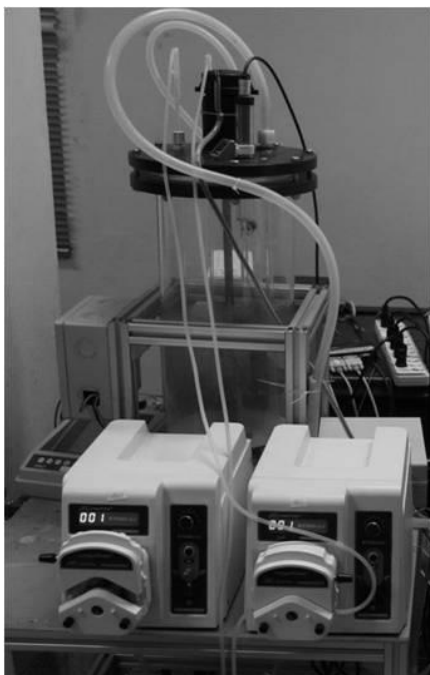


รูปที่ 3 แผนภาพระบบควบคุมสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่อง

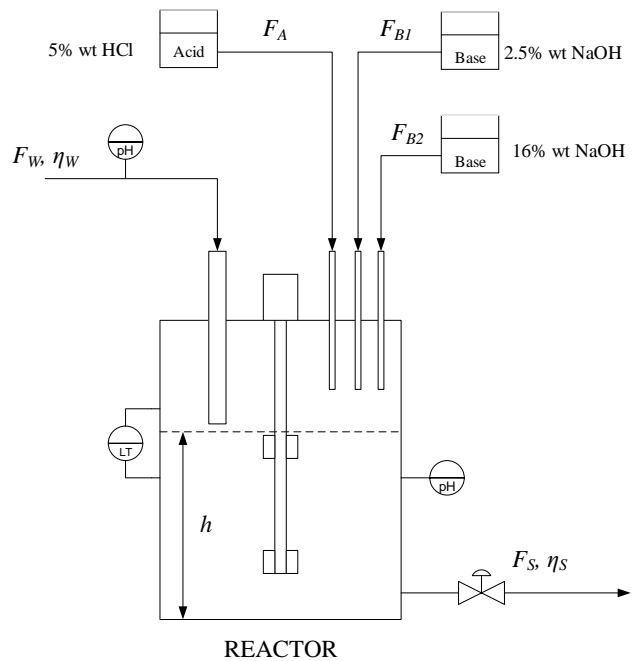
3.4 การสร้างชุดอุปกรณ์ควบคุมต้นแบบสำหรับเครื่องปฏิกรณ์กระบวนการปรับค่าพีเอชแบบเวลาจริง

3.4.1 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการปรับพีเอช

การสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอช ส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของชุดอุปกรณ์นี้คือ เครื่องปฏิกรณ์ซึ่งทำหน้าที่ผสมสารต่างๆเพื่อเกิดปฏิกิริยาทำให้ได้สารที่ต้องการ สำหรับตัวเครื่องปฏิกรณ์ทำจากแก้วเพื่อไม่ให้อาหารละลายกรดหรือด่างทำปฏิกิริยากัดกร่อน ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะมีใบกวนหมุนด้วยอัตราความเร็วคงที่โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าให้อาหารละลายผสมกันอย่างทั่วถึง การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์เริ่มจากน้ำเสียขาเข้าจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของถังปฏิกรณ์จากนั้นทำการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียขาเข้าโดยการใส่กรดหรือด่าง ในงานวิจัยนี้กรดและด่างที่ใช้ในการปรับพีเอชนั้นจะมีค่าความเข้มข้น 2 ค่า นั่นคือ 2.5% wt. และ 16 %wt. น้ำเสียหลังการทำปฏิกิริยาจะถูกปล่อยออกทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ และจะถูกเก็บในถังก่อนจะนำไปกำจัดทิ้งหรือนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการปรับพีเอชที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูป 4



a)



b)

รูปที่ 4 เครื่องปฏิกรณ์กระบวนการปรับค่าพีเอชที่ใช้สายไตเตรทหลายความเข้มข้น

(a) เครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบ (b) แผนภาพของเครื่องปฏิกรณ์

โดยในงานวิจัยนี้ตัวแทนของกรดและด่างที่ใช้ในการปรับค่าพีเอช คือ กรดไฮโดรคลอริก และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นกรดแก่และด่างแก่

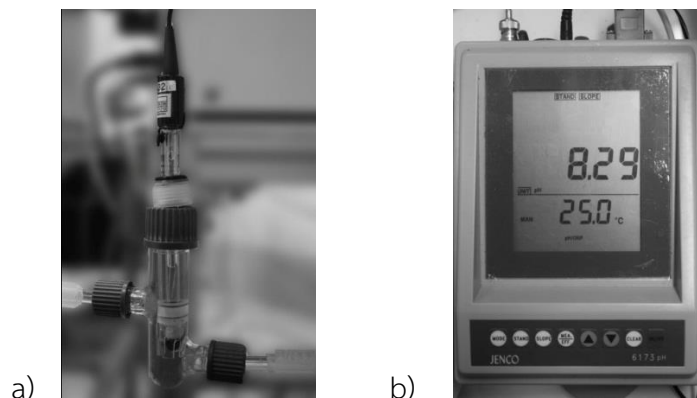
3.4.2 อุปกรณ์ตรวจวัดและควบคุม

ในงานวิจัยนี้สนใจทำการควบคุมตัวแปรสองตัว คือ ระดับความสูงของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ และ ค่าพีเอชของสารละลาย การใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าที่แม่นยำ ซึ่งความสูงของของเหลวในถังปฏิกรณ์จะถูกวัดค่าด้วย Ultrasonic sensor โดยใช้หลักการสะท้อนเมื่อสารมีความหนาแน่นต่างกัน อุปกรณ์ Ultrasonic sensor แสดงดังรูป 5



รูปที่ 5 Ultrasonic sensor

ส่วนค่าพีเอชของสารละลายในระบบมีการวัดค่าพีเอชทั้งหมด 2 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งน้ำเสียขาเข้า และตำแหน่งน้ำเสียขาออก ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดคือ pH probe ซึ่งจะวัดค่าพีเอชออกมาเป็นค่าทางไฟฟ้า และอุปกรณ์ที่ใช้คู่กันคือ pH meter เพื่อแปลงค่าทางไฟฟ้าเป็นแบบ digital ซึ่งแสดงได้ดังรูป 6



รูปที่ 6 อุปกรณ์วัดค่าพีเอช: a) pH probe b) pH meter

สัญญาณที่ออกจาก Ultrasonic sensor และ pH meter จะถูกส่งไปรวมที่ RS-232 hub ก่อนที่จะส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลและคำนวณค่าตัวแปรควบคุม

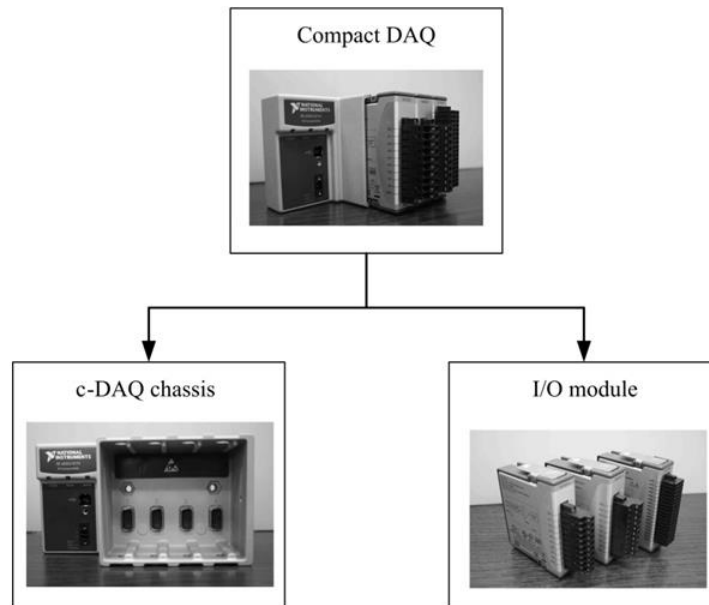
อุปกรณ์ที่มีความสำคัญอีกอย่างในงานนี้คือ ปั๊มบีบรัด (Peristaltic pump) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของกรดและด่างในการปรับค่าพีเอชในเครื่องปฏิกรณ์ และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ดูดน้ำเสียที่ทำการปรับค่าพีเอชแล้วออกจากเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อรักษาระดับความสูงของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์อีกด้วย ซึ่งแสดงได้ดังรูป 7



รูปที่ 7 ปั๊มบีบรัด

3.4.3 ชุดอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณควบคุมและคอมพิวเตอร์

เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชจะถูกเชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณควบคุมและคอมพิวเตอร์เพื่อรับส่งสัญญาณการควบคุมและคำนวณค่าการควบคุม ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ NI-cDAQ ของ National instruments (NI) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับ-ส่งสัญญาณและข้อมูลระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ NI-cDAQ นั้นประกอบด้วย NI-cDAQ chassis และ อินพุต/เอาต์พุตโมดูล (I/O modules) โดย NI-cDAQ chassis ใช้สำหรับควบคุมการประสานงานและการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับ อินพุต/เอาต์พุตโมดูล ส่วนอินพุต/เอาต์พุตโมดูลเป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่เชื่อมต่อกับสัญญาณอนาล็อก/ดิจิตอล ของเครื่องมือตรวจวัด ในงานวิจัยนี้โมดูลที่ใช้รับ-ส่งข้อมูลในรูปแบบของความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งชุดอุปกรณ์ NI-cDAQ แสดงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ชุดอุปกรณ์ NI-cDAQ ซึ่งประกอบด้วย NI-cDAQ chassis และ I/O modules จาก National Instruments

3.4.4 การทำงานของชุดอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชและขั้นตอนการควบคุม

การทำงานจริงของชุดอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอช ค่าพีเอชจะถูกวัดจาก pH probe และแปลงสัญญาณโดย pH meter ส่วนค่าความสูงของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ถูกวัดโดย Ultrasonic sensor สัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดจะถูกส่งไปยังอนาล็อกอินพุตโมดูล (NI-9201) ที่ NI-cDAQ แล้ว NI-cDAQ จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดไปยังคอมพิวเตอร์ โดยคอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่ประมวลผลและคำนวณค่าควบคุม ซึ่งการควบคุมและการคำนวณค่าควบคุมในงานวิจัยนี้ถูกพัฒนาด้วยโปรแกรม LabVIEW และ MATLAB เมื่อคอมพิวเตอร์คำนวณค่าควบคุมได้แล้วจะส่งสัญญาณการควบคุมซึ่งเป็นสัญญาณไปยังอนาล็อกเอาต์พุตโมดูล (NI-9263) เพื่อส่งสัญญาณไปยังปั๊มปิปรูด ให้ปรับอัตราการไหลของสารไตเตรทและน้ำขาออกตามค่าควบคุมที่คอมพิวเตอร์คำนวณ ซึ่งทำให้ค่าพีเอชและค่าความสูงของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์นั้นเป็นไปตามค่าเป้าหมาย สำหรับแผนภาพแสดงหน้าจอการควบคุม และอัลกอริทึมการควบคุมในโปรแกรม LabVIEW แสดงดังรูปที่ 9

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่นำเสนอในเวลาจริง

ระบบควบคุมของกระบวนการปรับควบคุมระหว่างค่าพีเอชและระดับความสูงของของเหลวด้วยสายไต่เตรทหลายความเข้มข้นที่สร้างขึ้นได้ถูกทดสอบประสิทธิภาพกับชุดอุปกรณ์ โดยถังปฏิกรณ์มีความจุ 8 ลิตร ของเหลวขาเข้าถูกป้อนเข้าทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ถัง ของเหลวในถังปฏิกรณ์ผ่านการไทเทรตด้วยกรด-ด่าง แล้วถูกสูบออกจากถังปฏิกรณ์ด้วยปั๊มบีบรัด การวัดค่าพีเอชของของเหลวจะทำการวัดทั้งหมด 2 จุดคือ ของเหลวขาเข้า ของเหลวออกจากถังปฏิกรณ์ ส่วนการวัดค่าระดับความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์นั้นจะอาศัยตัวตรวจวัดความสูงชนิดอัลตราโซนิก ซึ่งติดตั้งอยู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ โดยอัตราการไหลของเหลวขาออกจากถังปฏิกรณ์ที่จะอยู่ระหว่าง $1.5 \leq u_s \leq 5.5$ (L/min) ส่วนอัตราการไหลของสายไทเทรตกรด-ด่างของถังปฏิกรณ์ อยู่ระหว่าง $0 \leq u_{mi} \leq 150$ (mL/min) ไซค์ ซึ่งชุดอุปกรณ์ต้นแบบนั้นจะถูกควบคุมผ่านโปรแกรม LabVIEW

ประสิทธิภาพของระบบควบคุมจะถูกทดสอบโดยการทดสอบแบบเซอร์โวซึ่งเป็นการทดสอบระบบควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมาย และการทดสอบแบบเรกูลาทอรีซึ่งเป็นการทดสอบระบบควบคุมเมื่อมีตัวแปรบกวนเกิดขึ้นในระบบ สำหรับการทดสอบทั้ง 2 กรณี ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น และ ค่าปรับแต่ง แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้น และ ค่าปรับแต่ง

	ค่าปรับแต่ง	ค่าเริ่มต้น
ค่าพารามิเตอร์	$\beta_1 = 1 \text{ s}, \beta_2 = 0.333 \text{ s}$	$pH_s(0) = 3, h_1(0) = 20 \text{ cm}$

โดยทุกการทดสอบประสิทธิภาพระบบควบคุมในงานวิจัยนี้ จะใช้ค่าเริ่มต้นที่พีเอชของน้ำขาเข้าเท่ากับ 3 และ ความสูงของระดับของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 20 cm และค่าปรับแต่ง $\beta_1 = 1 \text{ s}$ และ $\beta_2 = 0.333 \text{ s}$ เท่ากันตลอดงานวิจัย

4.1.1 ผลการทดสอบแบบเซอร์โว

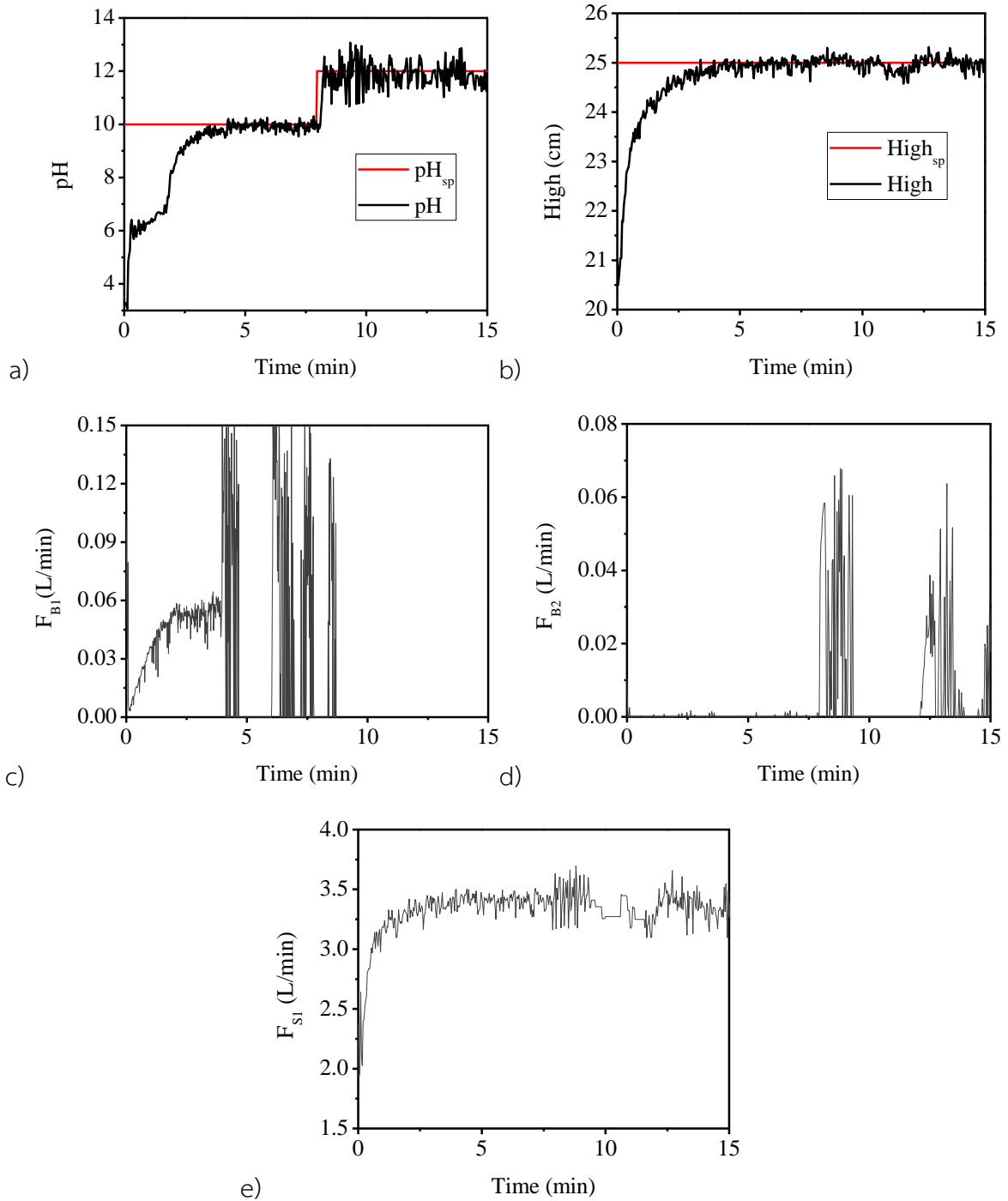
การทดสอบแบบเซอร์โวจะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพระบบควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและระดับความสูงของเหลวเป้าหมายของถังปฏิกรณ์ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแบบเซอร์โว

	ค่าเป้าหมาย	ค่าเริ่มต้น
ค่าพารามิเตอร์	เป้าหมายที่ 1 $pH_{S,sp1} = 10, h_{sp1} = 25 \text{ cm}$ เป้าหมายที่ 2 $pH_{S,sp2} = 12, h_{sp2} = 25 \text{ cm}$	$pH_{s1}(0) = 3, h_1(0) = 20$

จากตารางที่ 3 จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและระดับความสูงของเหลวเป้าหมายของถังปฏิกรณ์ โดยค่าเป้าหมายที่ 1 เป็นการทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและระดับความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์โดยเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้น เมื่อระบบควบคุมสามารถควบคุมค่าพีเอชและระดับความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์ให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ 1 ได้แล้วนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจากค่าเป้าหมายที่ 1 ไปสู่ค่าเป้าหมายที่ 2 แต่ให้ระดับความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์นั้นยังคงให้รักษาระดับไว้ที่เท่าเดิม ผลการทดสอบประสิทธิภาพแสดงดังรูปที่ 10

ผลการทดสอบประสิทธิภาพพร้อมกับชุดอุปกรณ์ต้นแบบ แสดงให้เห็นว่าวาระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถผลักดันให้ระดับความสูงและค่าพีเอชของน้ำเสียออกของระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมายใหม่ได้โดยมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาผลการทดลองช่วงการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าเริ่มต้นและค่าเป้าหมายที่ 1 พบว่าระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถทำให้ระดับความสูงและค่าพีเอชเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ 1 ภายในเวลา 5 นาที จะสังเกตได้ว่าตัวแปรควบคุมที่ใช้การปรับค่าพีเอชช่วงนี้ ส่วนใหญ่ใช้ค่าที่มีความเข้มข้น 2.5% wt เนื่องจากการเปลี่ยนค่าพีเอชยังอยู่ในช่วงที่ต่างความเข้มข้น 2.5% wt ยังสามารถทำได้ และเมื่อเวลาหลังจาก 8 นาทีทำการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายจากค่าเป้าหมายที่ 1 เป็นค่าเป้าหมายที่ 2 ทดลองพบว่า ระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถทำให้ระดับความสูงและค่าพีเอชเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ 2 อย่างรวดเร็ว จะสังเกตได้ว่าตัวแปรควบคุมที่ใช้การปรับค่าพีเอชช่วงนี้ จะมีการใช้ค่าที่มีความเข้มข้น 2.5% wt และ 16% wt ซึ่งเป็นจุดเด่นของงานวิจัยนี้คือมีการทำงานร่วมกันระหว่างต่างความเข้มข้นทั้งสองตัว



รูปที่ 10 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมแบบเซอร์โว: a) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของเหลวในถังปฏิกรณ์ b) การเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์ c) อัตราการไหลของต่างความเข้มข้น 2.5 % wt d) อัตราการไหลของต่างความเข้มข้น 16 % wt e) อัตราการไหลของเหลวขาออกของถังปฏิกรณ์

4.1.2 ผลการทดสอบแบบเรกูลาทอรี

การทดสอบแบบเรกูลาทอรีการเป็นการทดสอบระบบควบคุมเมื่อมีตัวแปรรบกวนเกิดขึ้นในระบบแล้ว ระบบยังคงสามารถตอบสนองต่อค่าเป้าหมายเดิมที่ต้องการได้ สำหรับงานวิจัยนี้สนใจการรบกวน 2 กรณี คือ การรบกวนเนื่องจากเกิดความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ตรวจวัด และ การรบกวนเนื่องจากเกิดอัตราการไหลของน้ำขาเข้า โดยทั้งสองกรณี กระบวนการจะเริ่มต้นจากสภาวะเริ่มต้นเพื่อเข้าสู่ ค่าเป้าหมายที่ค่าพีเอชขาออกเท่ากับ 10 ค่าความสูงของระดับของเหลวเท่ากับ 25 cm ก่อนที่จะทำการทดสอบแบบเรกูลาทอรี ที่เวลาตั้งแต่ 7.5 นาทีเป็นต้นไป

กรณีศึกษาที่ 1 การรบกวนเนื่องจากเกิดความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ตรวจวัด

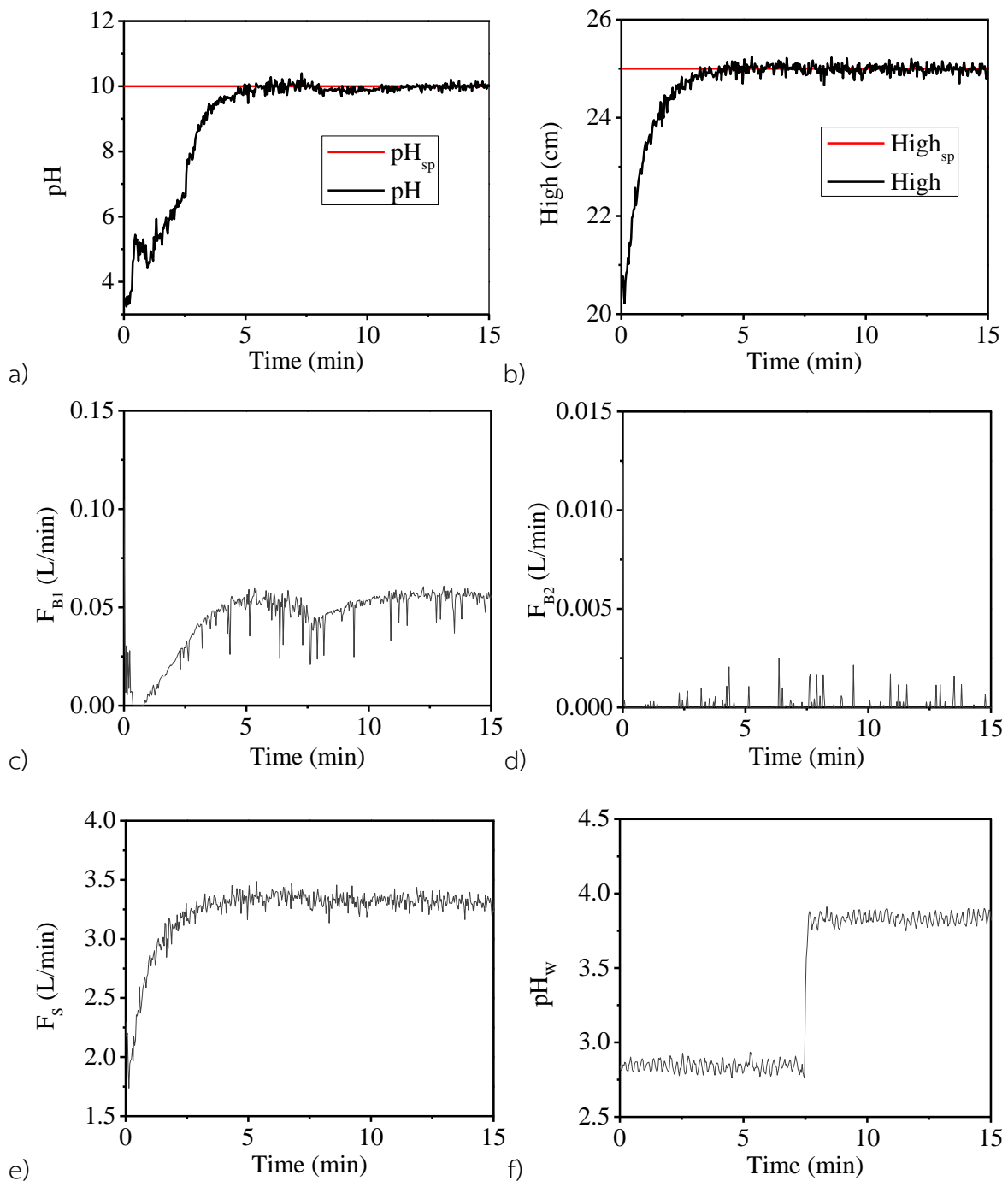
ในกรณีนี้ให้ตัว pH probe วัดค่าพีเอชของน้ำเสียขาเข้าคลาดเคลื่อน โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

	การรบกวน	ค่าเป้าหมาย
ค่าพารามิเตอร์	pH_W (ค่าที่วัดได้จริง) \downarrow $pH_W + 1$	$pH_{S,sp1} = 10, h_{sp1} = 25 \text{ cm}$

เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ตรวจวัดเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งส่งผลโดยตรงกับค่าพีเอชขาออกที่ต้องการควบคุม เพื่อเป็นการทดสอบความคลาดเคลื่อนในประเด็นดังกล่าวในกรณีศึกษานี้ได้กำหนดให้ตัว pH probe วัดค่าพีเอชของน้ำเสียขาเข้าได้มากกว่าความเป็นจริง 1 หน่วยพีเอช ซึ่งผลการทดสอบประสิทธิภาพแบบเรกูลาทอรีที่คลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์ตรวจวัด แสดงดังรูปที่ 11 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำให้ตัว pH probe วัดค่าพีเอชของน้ำเสียขาเข้าได้มากกว่าความเป็นจริง 1 หน่วยพีเอชตั้งแต่เวลาหลัง 7.5 นาที เป็นต้นไปดังแสดงในรูปที่ 11 (f) ส่งผลให้พีเอชขาออกลดลงจากค่าเป้าหมาย เนื่องจากตัวแปรค่าพีเอชขาเข้านั้นอยู่ในสมการการคำนวณหาตัวแปรควบคุมอยู่ ทำให้คำนวณค่าอัตราการไหลของด่างความเข้มข้น 2.5 % wt ลดลงที่เวลา 7.5 นาที ตามรูปที่ 11(c) แต่ระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถตอบสนองและผลักดันให้ค่าพีเอชสามารถกลับสู่ค่าเป้าหมายเดิมในเวลา 3 นาที ซึ่งจากการผลการทดสอบประสิทธิภาพแบบเรกูลาทอรีที่คลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์ตรวจวัด ระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถ

ชุดเซนเซอร์ที่พลของค่ารบกวนจากการถูกรบกวนโดยความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ตรวจวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 11 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมแบบเรกูลาทอรีที่คลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์ตรวจวัด: a) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของเหลวในถังปฏิกรณ์ b) การเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์ c) อัตราการไหลของต่างความเข้มข้น 2.5 % wt d) อัตราการไหลของต่างความเข้มข้น 16 % wt e) อัตราการไหลของเหลวขาออกของถังปฏิกรณ์ f) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของเหลวสายขาเข้า

กรณีศึกษาที่ 2 การรบกวนเนื่องจากเกิดอัตราการไหลของน้ำขาเข้า

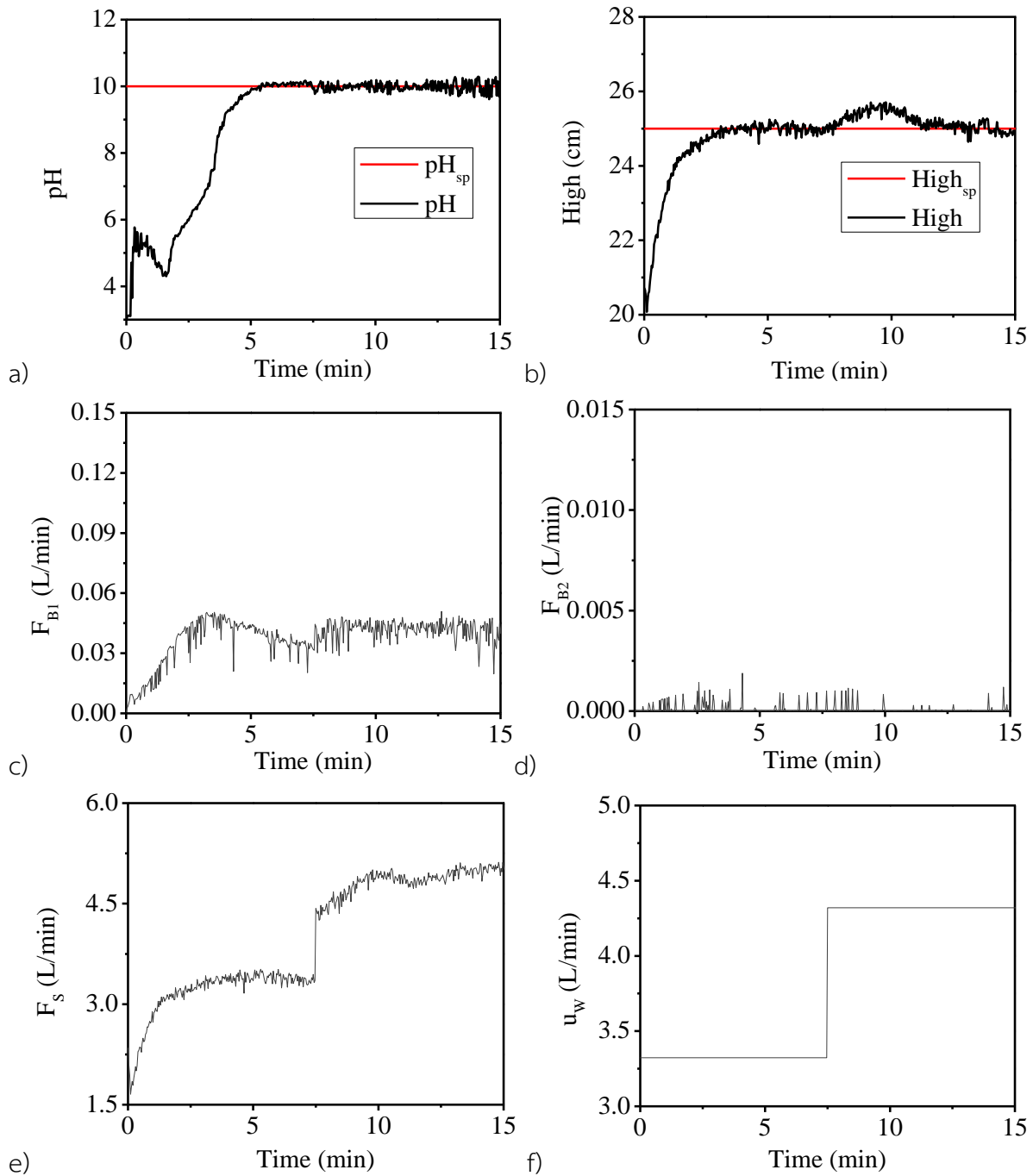
โดยการรบกวนนี้เป็นรบกวนที่เกิดจากการเพิ่มอัตราการไหลน้ำขาเข้า ซึ่งเกิดจากการเพิ่มการผลิตที่มากขึ้น ซึ่งการเพิ่มอัตราการไหลขาเข้านั้นส่งผลต่อการรักษาระดับความสูงของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์และค่าพีเอช ถ้าระบบควบคุมไม่สามารถรับการรบกวนนี้ได้ อาจทำให้เกิดการสูญเสียของอุปกรณ์และการปรับค่าพีเอชที่ไม่ได้ตามค่าเป้าหมาย โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

	การรบกวน	ค่าเป้าหมาย
ค่าพารามิเตอร์	$F_S = 3.323 \text{ L/min}$ \downarrow $F_S + 30\%$	$pH_{S,sp1} = 10, h_{sp1} = 25 \text{ cm}$

ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการทดสอบโดยเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขาเข้าให้เพิ่มขึ้น 30% จากอัตราการไหลเดิม เมื่อเวลาผ่านไป 7.5 นาที ผลการทดสอบประสิทธิภาพแบบเรกูลาทอรีที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้า แสดงดังรูปที่ 12

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขาเข้า 30% จากอัตราการไหลเดิม ที่เวลานาทีที่ 7.5 ตามรูปที่ 12(f) ส่งผลให้ระดับความสูงของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์และค่าพีเอช โดยเมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของเหลวในถังปฏิกรณ์ จากรูปที่ 11(a) พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของน้ำขาเข้ามากขึ้น ทำให้ค่าพีเอชมีการลดลงเล็กน้อยเนื่องจากมีสารที่ต้องผสมมากขึ้น ดังนั้นระบบควบคุมตอบสนองด้วยการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขาเข้าความเข้มข้น 2.5 % wt ให้เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 12(c) เพื่อให้รักษาค่าพีเอชให้อยู่ตามค่าเป้าหมายได้ และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์แสดงในรูปที่ 12(b) พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำขาเข้ามากขึ้น ทำให้ระดับของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์สูงขึ้นเนื่องจากมีน้ำเข้ามาปริมาณมากขึ้น จากนั้นระบบควบคุมตอบสนองด้วยการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขาออก ตามรูปที่ 12(e) ซึ่งใช้เวลาไม่ถึง 5 นาทีในการผลักดันให้ระดับความสูงของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์กลับสู่ค่าเป้าหมาย ซึ่งจากการผลการทดสอบประสิทธิภาพแบบเรกูลาทอรีที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้า ระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถชดเชยอิทธิพลของการรบกวนจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขาเข้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 12 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมแบบเรกูลาทอรีที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้า: a) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของเหลวในถังปฏิกรณ์ b) การเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์ c) อัตราการไหลของต่างความเข้มข้น 2.5 % wt d) อัตราการไหลของต่างความเข้มข้น 16 % wt e) อัตราการไหลของเหลวขาออกของถังปฏิกรณ์ f) การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำขาเข้า

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบระบบควบคุมสำหรับกระบวนการปรับค่าพีเอชแบบต่อเนื่องที่มีจำนวนสายไตเตรทต่างความเข้มข้นหลายสาย โดยใช้เทคนิคการออกแบบระบบควบคุมอิงแบบจำลอง อินพุต-สเตทลิเนียร์ไรเซชัน, เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข และตรรกะการเลือกค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม ซึ่งระบบควบคุมที่สร้างขึ้นจะถูกทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมร่วมกับชุดอุปกรณ์ต้นแบบในสภาวะจริง โดยเครื่องปฏิกรณ์ถูกควบคุมโดยใช้โปรแกรม LabVIEW และ MATLAB ในการคำนวณค่าควบคุมระบบ ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบควบคุมในสภาวะจริง พบว่าระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถผลักดันให้ค่าพีเอชและระดับความสูงของเหลวในถังปฏิกรณ์เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งกรณีศึกษาแม้ว่ามีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายระหว่างดำเนินการ การรบกวนจากค่าความผิดพลาดที่เกิดจากอุปกรณ์วัดค่าพีเอชของของเหลวในถังปฏิกรณ์ และการรบกวนจากการเพิ่มปริมาณของน้ำเสียเข้า

ซึ่งผลของงานวิจัยนี้ได้ถูกนำเสนอแบบปากเปล่าใน the 11th IEEE International Conference on Control & Automation (IEEE ICCA 2014) ที่ประเทศไต้หวัน ในช่วงระหว่างวันที่ 18 – 20 มิถุนายน 2557 (เอกสารแนบตามภาคผนวก) และปัจจุบันกำลังดำเนินการเพื่อส่งเสนอตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสาร Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers ซึ่งเป็นวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล SCImago

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wright, R.A., Kravaris, C. Nonlinear control of pH processes using the strong acid equivalent. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1991; 30(7): 1561-1572.
- [2] Wright, R.A., Kravaris, C. Strong acid equivalent control of pH processes: an experiment study. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1991; 30(11): 2437-2444.
- [3] Wright, R.A., Kravaris, C. On-line Identification and nonlinear control of an industrial pH processes. *Proceedings of American Control Conference.* 1995; 2657-2661.
- [4] Pishvaie, M.R., Shahroki, M. pH control using the nonlinear multiple models, switching, and tuning approach. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2000; 39(5): 1311-1319.
- [5] Yu, X., Huang, D., Wang, X., Jin, Y., 2008. DE-based neural network nonlinear model predictive control and its application for the pH neutralization reactor control, in: *Control and Decision Conference*, 2008; pp. 1597 –1602.
- [6] Gomez, J.C., Jutan, A., Baeyens, E. Wiener model identification and predictive control of a pH neutralisation process. *IEEE Proc.-Control Theory Appl.* 2004; 151(3): 329-338.
- [7] Gu, B., Gupta, Y.P. Control of nonlinear processes by using linear model predictive control algorithms. *ISA Transactions.* 2008; 47: 211–216.
- [8] Shobana, S., Panda, R. Control of pH process using double-control scheme. *Nonlinear Dynamics* 2012; 67: 2267–2277.
- [9] Bagheri, P., Mardanlou, V., Fatehi, A. Multiple Model Predictive Control of Multivariable pH Process Using Adaptive Weighting Matrices, in: *World Congress.* 2011; pp. 12366–12371.
- [10] Novák, J., Chalupa, P., Bobál, V. MIMO model predictive control with local linear models, in: *Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling & Simulation.* 2011; pp. 189–194.
- [11] Xie, S., Zhou, L., Ma, A., Zhou, L. A New Switching Scheme for Multi-model Predictive Control Using Clustering Modeling, in: *Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2008; pp. 484 –488.

- [12] ทรงพล จงชนพิมาน, ชรินทร์ ปัญจพรผล, “การออกแบบระบบควบคุมค่าพีเอชในเครื่องปฏิกรณ์แบบถัง กวนต่อเนื่องด้วยตัวควบคุมอิงแบบจำลอง”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 20 กรุงเทพฯ, 2553.
- [13] Henson, M. A., and Seborg, D. E. Adaptive nonlinear control of a pH neutralization process, IEEE Transactions on Control Systems Technology. 1994; 2: pp. 169-182.

ภาคผนวก

1. บทความที่นำเสนอใน the 11th IEEE International Conference on Control & Automation (IEEE ICCA 2014)

Coupled Control between pH and Level of a Process with Multi-titrated Concentrations by Input/State Linearization

Thana Srihawan and Chanin Panjapornpon

Abstract—This paper presents a control method for handling a coupling effect between the liquid level and pH of the process with multi-titrated concentrations, which an outflow and titrating streams are manipulated inputs. A feedback controller formulated by using input/state (I/S) linearization and optimization technique is used to calculate control actions and estimate process disturbances. A logic of acid/base selection is applied to select suitable titrant feeds. Performance of the proposed method is evaluated and compared with a split-range control through servo and regulatory tests under closed-loop simulation. The results show that the developed controller can force the process to desired setpoints and reject disturbance occurred from pH and flow fluctuation in the influent stream efficiently.

I. INTRODUCTION

A task of pH neutralization or pH adjustment, particularly for continuous process, is quite difficult due to the inherent nonlinearity and large disturbances in a waste stream. In past decades, there are many control strategies based on a mathematical model have been proposed to handle this control problem. Wright et al. [1] developed the predictive PI controller that parameters of a strong acid equivalent model are estimated in real time. Fuente et al [2] developed the fuzzy logic controller in which pH characteristic is divided into several fuzzy regions. Wang and Zhang [3] used the wiener model predictive control with Laguerre filters and least squares support vector machines (LSSVM). Duarte-Mermoud et al. [4] used the combined model reference adaptive controller. These mentioned methods focused on a single-input single-output system. For a multi-input multi-output case such as coupled control of pH and liquid level, there has not been much reported in the literature [5]. A fluctuation in pH of the reactor may lead to large undesired overshoot in the volume reactor.

Thus, this paper focuses on a coupled control of pH and level in a pH process that has multiple titrated concentrations. The mentioned process is primarily used in many industries that have a large fluctuation of pH or feed rate. Selection of appropriate titrant concentrations is required to maintain a reactor volume within an operating constraint. An example of such process is a neutralization reactor in an acid gas treating unit that needs to treat a high load of acid liquid waste when the upstream process is shut down. Fluctuation of load to the reactor will lead to degradation of control performance. A robustness of the controller is needed for this situation. In this work, the proposed control system

consists of a feedback controller and a closed-loop disturbance predictor. The feedback controller is formulated by using input-state linearization combined with optimization technique, which process disturbances are estimated from a closed-loop predictor. Logic of acid/base selection is implemented to reduce the number of manipulated inputs. The advantage of the proposed control scheme is flexibility to handle both stable and unstable process.

This paper is organized as follows. In section II presents the mathematical details of the pH process with multi-titrated concentrations. The development of the proposed control system is described in section III. The simulation results of control performance under setpoint change and disturbance rejection are shown in section IV.

II. A CONTINUOUS PH PROCESS WITH MULTI-TITRATED CONCENTRATIONS

A. Process description

Consider a continuous pH process with multi-titrated concentrations. Schematic diagram of the process is illustrated in Fig. 1. An influent stream (F_W) has fed to a varying-volume, continuous stirred-tank reactor (CSTR). Acid (HCl) and base (NaOH) streams (F_{A_1} , F_{B_1} and F_{B_2}) are used to adjust the pH of the reactor. The liquid level is controlled by adjusting the outgoing flow (F_S). A reactor model can be derived based on mass balance and component balance. Following assumptions are applied in modeling the system:

- Cross-sectional area of the mixing tank is constant.
- Densities of the influent and outflow are approximately equal ($\rho_W = \rho_S = \rho$).
- Well-mixed condition is applied.

Dynamics of the tank level can be described as follows:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\rho F_W + \rho_{A_1} F_{A_1} + \rho_{B_1} F_{B_1} + \rho_{B_2} F_{B_2} - \rho F_S}{\rho A} \quad (1)$$

where h is the liquid level in the reactor, F_W is the influent stream, F_{A_1} , F_{B_1} and F_{B_2} are titrating streams of acid, low concentration base and high concentration base, and A is the cross-sectional area of the reactor.

In this work, we describe the pH in a form of net proton-hydroxide ions (η). A function presented in (2) is used for pH mapping

$$\eta = \left(10^{-pH} - \frac{K_w}{10^{-pH}} \right) \quad (2)$$

where K_w is the equilibrium constant for the ionization of water ($K_w = 10^{-14}$)

Thana Srihawan and Chanin Panjapornpon (corresponding author: 662-797-0999 ext. 1230; e-mail: fengcnp@ku.ac.th) are with Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

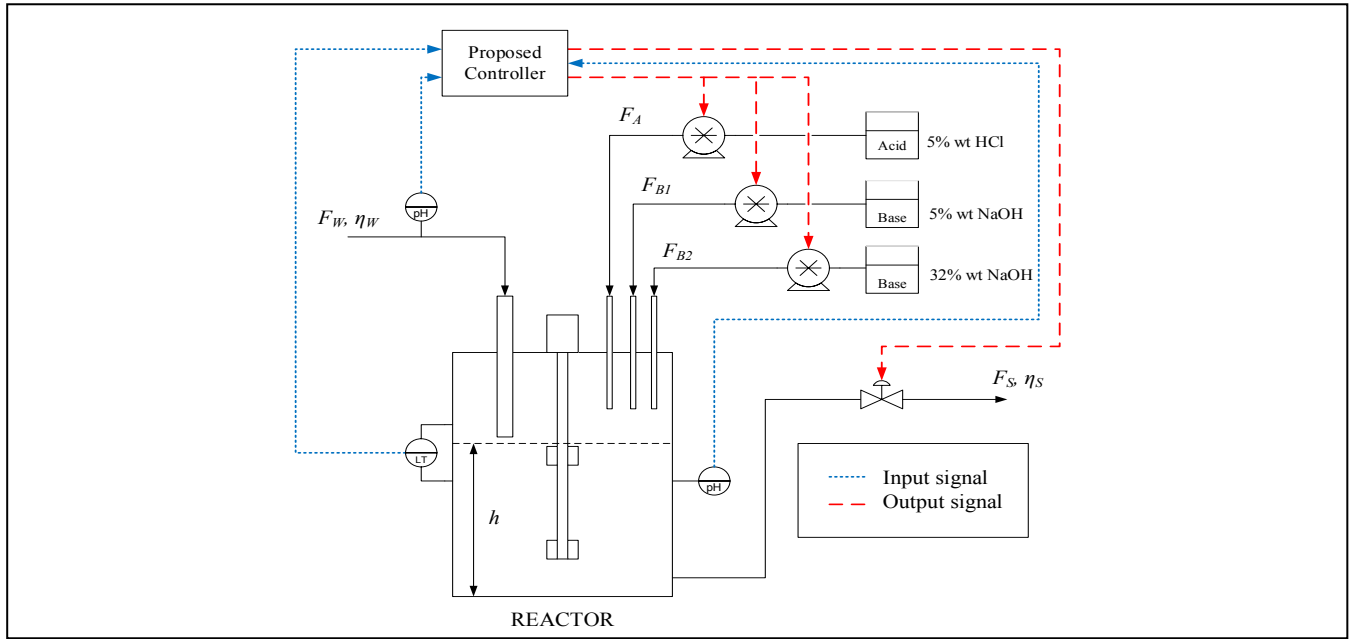


Figure 1. Schematic of a continuous pH process with multiple titrated concentrations.

Thus, dynamics of net proton–hydroxide ions in tank can be described as follows:

$$\frac{d\eta_S}{dt} = \frac{\eta_W F_W + \alpha_{A1} C_{A1} F_{A1} + \alpha_{B1} C_{B1} F_{B1} + \alpha_{B2} C_{B2} F_{B2} - \eta_S F_S}{Ah} - \frac{\eta_S (\rho F_W + \rho_{A1} F_{A1} + \rho_{B1} F_{B1} + \rho_{B2} F_{B2} - \rho F_S)}{\rho Ah} \quad (3)$$

where η_w and η_s are net proton–hydroxide ions of the influent stream and liquid in the reactor. α and C are the coefficient of total ion concentration and concentration of the titrating steam. The parameters of the pH process with multiple titrated concentrations using in this paper are given in Table I. A control system that can compensate effects of process uncertainties (i.e., fluctuations in the feed flow / pH of the influent and error in measurements) occurred in process operations is the aim of development.

Table I. Parameter values for the system

Parameter	Value	Units
A	0.0284	m^2
ρ	1000	kg/m^3
ρ_{A1} (5% wt. HCl)	1087.8	kg/m^3
ρ_{B1} (5% wt. NaOH)	1055.4	kg/m^3
ρ_{B2} (32% wt. NaOH)	1351.7	kg/m^3
C_{A1}	1278.75	mol/m^3
C_{B1}	1319.25	mol/m^3
C_{B2}	10813.6	mol/m^3
α_{A1}	1	
α_{B1}, α_{B2}	-1	

III. CONTROL SYSTEM DESIGN

Consider a process described by a mathematical model of a form

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, d) \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (4)$$

where x is a vector of state variables, y is a vector of output variables, u is a vector of input variables, d is a vector of unmeasured state disturbances.

A. Feedback controller

The control objective is to handle the liquid level and the reactor pH that is mapped to the net proton-hydroxide ions ($x_1 = \eta$, $x_2 = h$) by adjusting the rates of outflow (F_S) and titrating streams (F_{B1} , F_{B2}). The characteristic of studied process configuration is unstable due to the outflow variable (F_S) considered as the input. The setpoint tracking controller is formulated by using I/S linearization. A concept of I/S linearization is to find a relation between the state x and the input u . This is achieved by repeatedly differentiating the state x with respect to time, until it is explicitly related to the input u which is called relative order. A review of I/S linearization and definition of its relative order can be found in [6]. Thus, the following close-loop state responses are requested, having a form:

$$(\beta_i D + 1)^{r_i} x_i = v_i \quad (5)$$

where D is a differential operator $D=d/dt$, r_i is the relative order of state i , x_i is the closed-loop response of state i , v_i is the state setpoints and β are the tuning parameters.

We practically use either acid or base stream to adjust pH. A logic selection is applied to select a suitable acid/base

Note that the values of tuning parameters (β) and the weight factors (w) are obtained from trial-and-error method. In the studies, a PI controller applying to handle the reactor level and a PI controller with split-range scheme applying to manipulate the control valves of base titrants are used for comparison proposed. A split range control is basically implemented when the process is a multi-input single-output system. The split-range controller is designed such that when pH difference is less than 1.5, the high concentration (32% NaOH) is turned off and the low concentration (5% NaOH) is used to control pH, and vice versa. The control action of the split range is shown in Fig. 4.

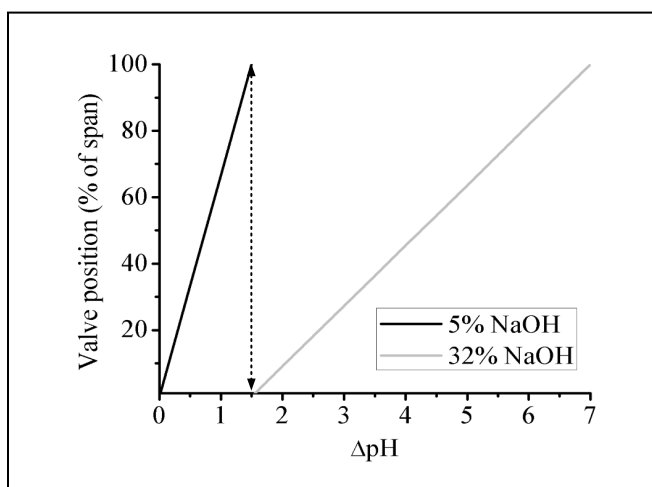


Figure 4. The split range controller action.

The tuning parameters of the PI controller for the level control [$K_I = 8.33 \times 10^{-3}$, $\tau_{I1} = 9.1$ s] and the PI controller with split-range scheme for the pH control [$K_{2,B1} = 1 \times 10^{-3}$, $K_{2,B2} = 1 \times 10^{-6}$, $\tau_{I2} = 4.2$ s] are applied. These parameters are calculated by using Internal Model Control tuning rule.

A. Setpoint tracking performance

The proposed control system is tested for a servo performance by tracking with four sets of action. The process starts with an initial condition [pH, h] = [6, 20 cm] and forces to a setpoint [pH_{sp1}, h_{sp2}] = [8, 30 cm]. When the process approaches to steady state, three sets of the setpoints, [pH_{sp2}, h_{sp2}] = [10, 30 cm], [pH_{sp3}, h_{sp3}] = [8, 30 cm], and [pH_{sp4}, h_{sp4}] = [13, 30 cm], are applied at t = 10, 20 and 40 minutes, consequently. Simulation results of the setpoint tracking are shown in Fig. 5. It is clear that the proposed method successfully forces the outputs to the desired setpoints with a shorter settling time than those of PI controllers. From the setpoints of pH 6 to pH 8 and pH 8 to 10, the proposed method takes a shorter time with less fluctuation in the level compared with the split range controller to reach the desired setpoint. However, the proposed method has a higher overshoot in the level response compared with the split range controller when a large change in the pH setpoint (i.e. pH 8 to pH 13) is applied.

B. Regulatory performance.

1) Disturbance at inlet pH

The disturbance rejection performance is tested by introducing a periodic disturbance of the influent pH at

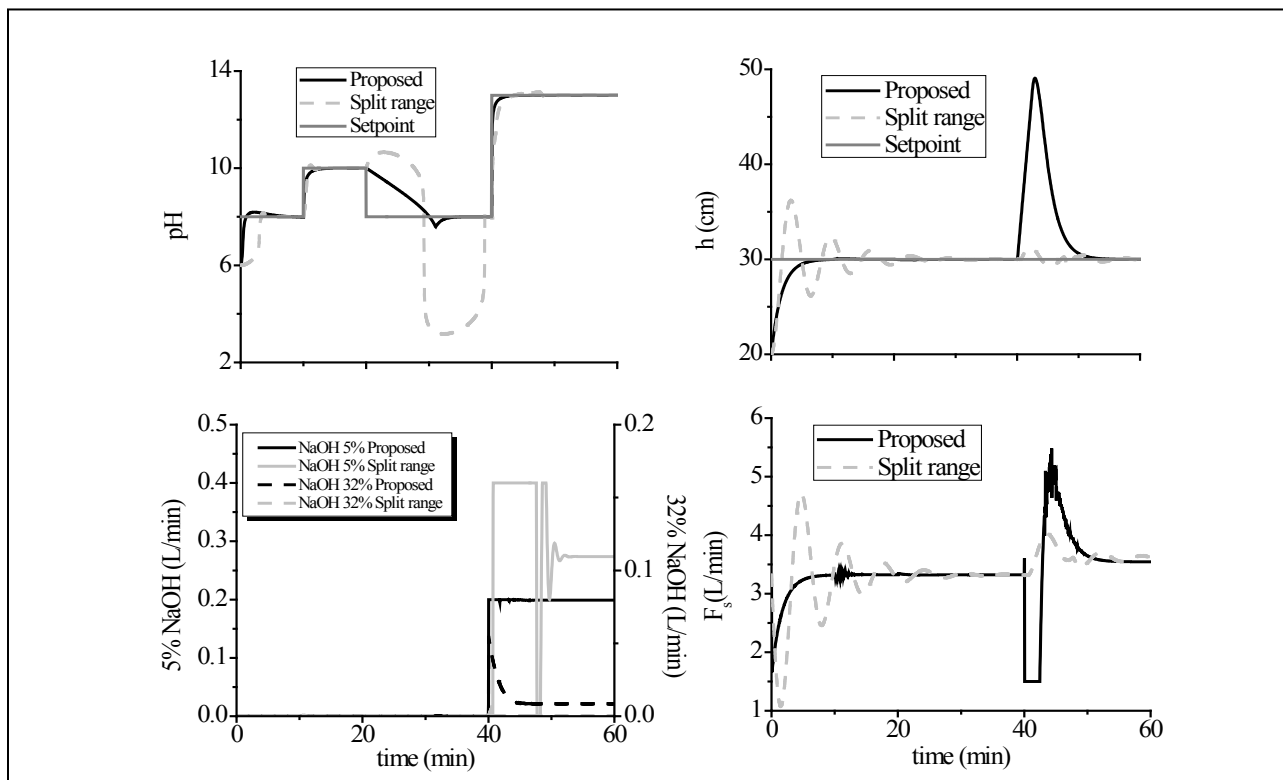


Figure 5. Process responses of the setpoint tracking test.

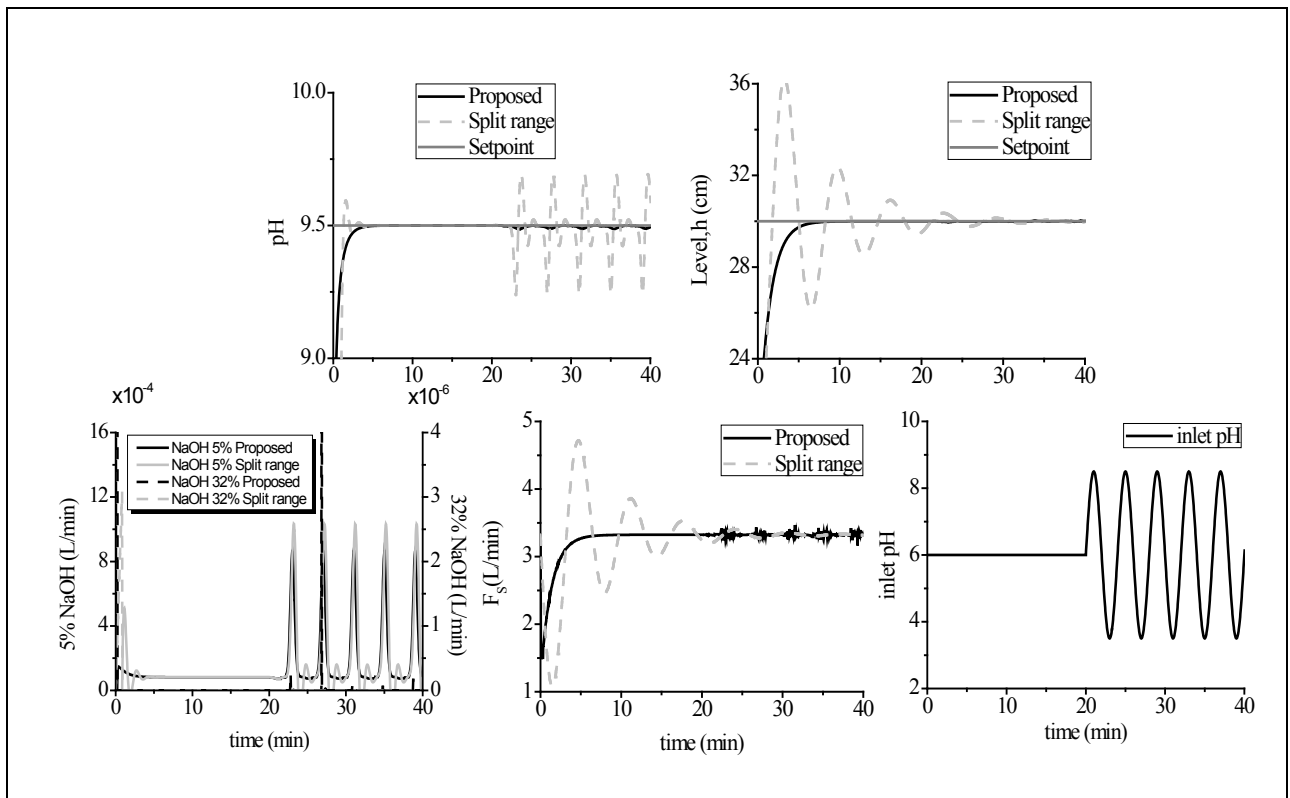


Figure 6. Process responses of regulatory test with oscillation in the inlet pH.

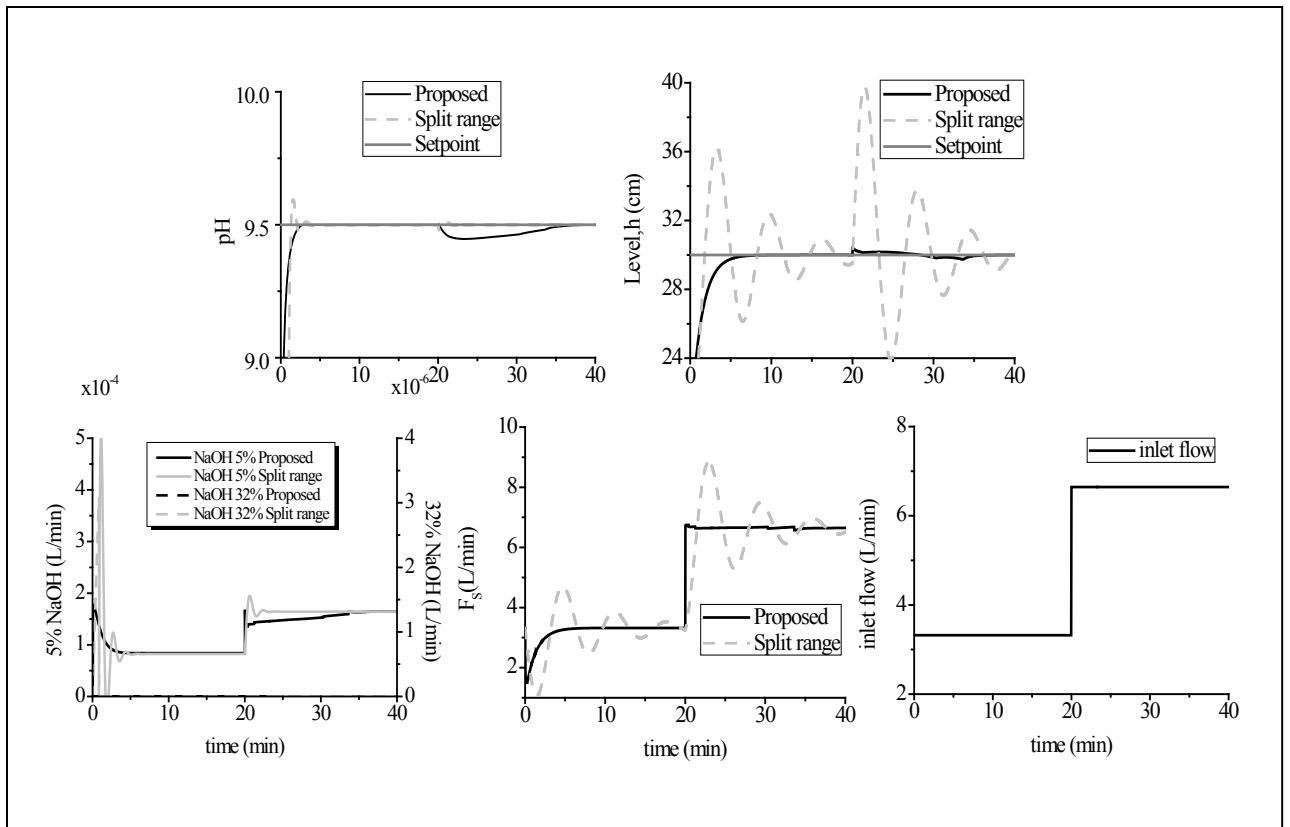


Figure 7. Process responses of regulatory test with unmeasured disturbance in the influent feed flow.

$t = 20$ minutes, which a function of $d = 2\sin(0.5\pi t)$ is applied. The process are initially at pH 6 and 20 cm and controlled at the setpoint $[\text{pH}_{\text{sp}}, h_{\text{sp}}] = [9.5, 30 \text{ cm}]$. The process response under the proposed control system and the *PI* controllers are illustrated in Fig. 6. The results show that the proposed controller can maintain a stable at pH = 9.5 despite a fluctuation in pH inlet while the split range controller shows high oscillation around pH setpoint and take a longer time to return to level setpoint.

2) Disturbance at influent feed flow

In this case, the influent flow rate becomes double after the outputs stable at pH = 9.5 and $h = 30$ cm. The process responses are shown in Fig. 7. The results show that when the process is disturbed by doubled influent stream, it affects to pH and level of liquid. So the controller active by increase outgoing flow for maintaining the level of liquid. From the results, the proposed controller can eliminate the output offsets. The proposed controller can return to level setpoint faster and better than the split range controller. However, it trades with a slow response of pH compared with the split range controller.

V. CONCLUSION

This research develops the nonlinear model-based controller for pH process with multi-titrated concentrations. The I/S linearizing controller in the form of the optimization is proposed to handle the process outputs and compensate the disturbances occurred. The proposed control system was evaluated through a simulation of a setpoint change and disturbance rejection. The results show that the proposed method provides effective performance to force the pH and level of the reactor to the given setpoints. The proposed control system gives faster responses and lower oscillation compared to the split range controller.

ACKNOWLEDGMENT

This work was financially supported by the Thailand Research Fund through the Royal Golden Jubilee Ph.D. Program (Grant No. PHD/0008/2555), the Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI), and the Center of Excellence on Petrochemicals and Materials Technology. These supports are gratefully acknowledged.

REFERENCES

- [1] R.A.Wright, B.E. Smith, C. Kravaris, "On-Line Identification and Nonlinear Control of pH Processes," *Ind. Eng. Chem. Res.* 37, 2446–2461. 1998.
- [2] M.J. Fuente, C. Robles, O. Casado, S. Syafie, F. Tadeo, "Fuzzy control of a neutralization process," *Eng. Appl. Artif. Intel.* 19, 905–914. 2006.
- [3] Q. Wang, J. Zhang, "Wiener model identification and nonlinear model predictive control of a pH neutralization process based on Laguerre filters and least squares support vector machines," *J. Zhejiang Univ. - Sci. C* 12, 25–35. 2011.
- [4] M.A. Duarte-Mermoud, F.A. Rojo, and R. Pérez, "Experimental evaluation of combined model reference adaptive controller in a pH regulation process," *Int. J. Adapt Control.* 16, 85–106. 2002.
- [5] A. P. Loh, D.S. De, Krishnaswamy, P.R., "pH and Level Controller for a pH Neutralization Process," *Ind. Eng. Chem. Res.* 40, 3579–3584. 2001.
- [6] C. Panjapornpon, M. Soroush, W.D. Seider, "Model-Based Controller Design for Unstable, Non-Minimum-Phase, Nonlinear Processes," *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, 2758–2768. 2006.