บทที่ 6

วิเคราะห์ และสรุปผลที่ได้จากการทดลอง

บทนี้เป็นการสรุปผลที่ได้จากการเปรียบเทียบสมรรถนะและความทนทานของตัวควบคุมที่ได้จากการทดลองในบทที่ 5. นอกจากนั้นยังกล่าวถึงข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาตัวควบคุม สำหรับกระบวนการควบคุมพีเอชต่อไปในอนาคต

6.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบสมรรถนะและความทนทานของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะต่าง ๆ สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

1. สำหรับการควบคุมระดับความสูงของสารละลายในถัง

เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตกับตัวควบคุมแบบพีไอดี (กรณีนี้ใช้เป็นพีไอ) พบว่าตัวควบคุมทั้งสองแบบมีสมรรถนะเท่าเทียมกัน พิจารณาจากค่าอินทีกรัลของค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ใกล้เคียงกันในทุกกรณีศึกษา ทั้งนี้เนื่องจากตัวควบคุมทั้งคู่เป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับ แต่แตกต่างที่ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตอาศัยแบบจำลอง เลียนแบบกระบวนการจริงไว้ในตัวควบคุม ส่วนตัวควบคุมแบบพีไอดีไม่ได้ใช้แบบจำลองของกระบวนการในตัวควบคุม เพียงใช้การเปรียบเทียบกับเซ็ทพอยท์แล้วคำนวณกลับหาค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมเท่านั้น นอกจากนั้นกระบวนการควบคุมความสูงของระดับสารละลายในถัง นั้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้นง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน เพราะอัตราการเปลี่ยนแปลงของความสูงของระดับน้ำ มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับอัตราการไหลขาออกเนื่องจากขนาดของบ่อใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดของท่อ (เมื่ออัตราการไหลขาเข้าคงที่) ในการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตกับการควบคุมระดับความสูงจึงมีลักษณะเป็นการควบคุมแบบป้อนกลับเหมือนกัน ผลการควบคุมที่ได้จึงให้ผลใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบพีไอดี

2. สำหรับการควบคุมค่าพีเอชของสารละลายในถัง

สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมได้ชัดเจนกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่เชิงเส้นสูง ซึ่งสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบได้ดังนี้

- ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต จะมีสมรรถนะสูงกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีในกรณีที่มีตัวรบกวน เนื่องจากตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตมีการใช้แบบจำลอง จึงสามารถทำนายพลวัตของกระบวนการได้ล่วงหน้า ถึงแม้แบบจำลองจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นแต่นำการทำให้เป็นเชิงเส้นเฉพาะจุด (local linearization) มาใช้ทำให้เลียนแบบความไม่เชิงเส้นของระบบมากขึ้น เห็นได้จากค่าอัตราขยายการควบคุมแบบป้อนกลับสเตตไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ จนมีค่าคงที่ ณ เวลาที่ระบบเข้าสู่เซ็ทพอยท์เรียบร้อยแล้ว การคำนวณตัวแปรปรับที่ได้จึงมีแม่นยำกว่า จึงทำให้มีสมรรถนะดีกว่าตัวควบคุมแบบเชิงเส้นธรรมดา ซึ่งค่าเกนในการจูนพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีค่าคงที่ตลอด ซึ่งการจะทำให้สมรรถนะของตัวควบคุมดีขึ้น ก็ต้องหาค่าเกนในการจูนใหม่นั่นเอง
- คาลมานฟิลเตอร์ สามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตให้สูงขึ้น เห็นได้ชัดในกรณีเมื่อมีสัญญาณรบกวนที่ตัวแปรวัด คาลมานฟิลเตอร์สามารถช่วยกรองสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เสียนได้ดี เนื่องจากคาลมานฟิลเตอร์เป็นการประมาณค่าที่มีลักษณะ minimum variance จะสามารถลดค่าความไม่แน่นอนของค่าประมาณพีเอช ($p\hat{H}$) ลงได้ โดยคาลมานฟิลเตอร์จะเชื่อแบบจำลองมากกว่าค่าที่วัด ทำให้ค่าที่ได้จากการประมาณมีความราบเรียบมากกว่าค่าที่ได้จากการวัด ทำให้ตัวควบคุมสามารถคำนวณค่าตัวแปรปรับที่ถูกต้องและเหมาะสม ในการควบคุมให้ตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่เซ็ทพอยท์ ดังนั้นการควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับการใช้คาลมานฟิลเตอร์ จึงมีสมรรถนะสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการประมาณค่าสเตต หรือเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอดี
- ในกรณีเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองในกระบวนการหรือมีตัวรบกวนที่ไม่ทราบค่า คาลมานฟิลเตอร์สามารถประมาณค่าระดับความสูงของสารละลายในถังและพีเอชได้เหมือนค่าที่วัดได้จริง แต่ค่าอินทีกรัลของค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ของการควบคุมพีเอชที่ได้จากการใช้คาลมานฟิลเตอร์ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับสเตต มีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่มีตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ธรรมดา แสดงว่าคาลมานฟิลเตอร์ไม่สามารถช่วยทำให้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตมีสมรรถนะดีขึ้นเมื่อแบบจำลองผิดพลาดไป ทั้งนี้เนื่อง

จากคาลมานฟิลเตอร์ไม่ได้ประมาณค่าตัวรบกวนที่ไม่ทราบค่าเหล่านั้น ทำให้ผลที่ได้จากการควบคุมเมื่อใช้ตัวควบคุมที่มีคาลมานฟิลเตอร์มีค่าเปลี่ยนไปตามระบบจริง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีคาลมานฟิลเตอร์ แต่ทั้งนี้ก็ยังสามารถทำการควบคุมเข้าสู่เซ็ทพอยท์ได้ รวมทั้งมีสมรรถนะดีกว่าตัวควบคุมพีไอดี ดังนั้นสำหรับกรณีที่มีแบบจำลองผิดพลาด +20% ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตสามารถควบคุมค่าพีเอชได้ดีและมีสมรรถนะสูงกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยไม่จำเป็นต้องใช้คาลมานฟิลเตอร์

6.2 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองที่มีกรณีศึกษาต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในบทที่ 5 สามารถสรุปผลได้ดังนี้คือ

1. การควบคุมค่าพีเอชสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสีย มีลักษณะเป็นกระบวนการที่มีตัวแปรเข้า-ออกหลายตัว (MIMO) ทั้งนี้เนื่องจากมีตัวแปรปรับสองตัวและตัวแปรควบคุมสองตัว และมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกัน ระหว่างตัวแปรควบคุมทั้งสองตัวดังนี้คือ ความสูงของระดับน้ำในถังแปรผกผันต่อความเข้มข้น แต่ความเข้มข้นไม่มีผลต่อความสูงของระดับน้ำในถัง
2. การควบคุมแบบป้อนกลับสเตตสามารถควบคุมค่าพีเอชและความสูงของระดับน้ำในถัง ได้ในเวลาเดียวกัน นั่นคือใช้ตัวควบคุมเพียงตัวเดียวแล้วทำการควบคุมตัวแปรสเตตสองตัวพร้อมกัน
3. ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมและการจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตทำได้ง่าย โดยการกำหนดค่า Closed-loop poles ($\lambda = -1.5, -24$) ให้มีค่าติดลบมากกว่า Open-loop poles ($\lambda = 0, -0.017$) และลดการเกิดออฟเซ็ทโดยใช้การควบคุมแบบพีไอ-ป้อนกลับสเตต ที่มีค่า $K_i = K_p / 3$
4. ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต จะมีสมรรถนะสูงกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีในกรณีที่มีตัวรบกวนที่ทราบค่าและไม่ทราบค่าเข้ามารบกวนระบบ ซึ่งได้แก่อัตราการไหลและความเข้มข้นของน้ำเสียและกรดเสียที่เพิ่มขึ้นจากเดิม 20 %
5. คาลมานฟิลเตอร์ สามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตให้สูงขึ้น ในกรณีเมื่อมีสัญญาณรบกวนที่ตัวแปรวัดแบบเกาส์เสียน คาลมานฟิลเตอร์สามารถช่วยกรองสัญญาณรบกวนที่มีค่าพีเอชที่วัดได้ในช่วง $\pm 0.03\ pH$

6.3 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นเลียนแบบจากกระบวนการจริง เพื่อสะดวกในการใช้งานต้องมีข้อสมมติฐานมากมาย ทำให้มีขีดจำกัดในการประยุกต์ใช้กับกระบวนการควบคุมค่าพีเอชที่ไม่ใช่กรดแก่ทำปฏิกิริยาสะเทินกับด่างแก่ ผลงานวิจัยในอนาคตจึงควรสร้างแบบจำลองใหม่ที่สามารถใช้ได้กับกรดและด่าง ทั่ว ๆ ไป
2. ทำการควบคุมค่าพีเอชที่ค่าเซ็ทพอยท์อื่น ๆ เพื่อเพิ่มการตกตะกอนของโลหะหนักให้มากขึ้น
3. ในกระบวนการมีความไม่เชิงเส้นสูง การนำตัวควบคุมที่เป็นแบบฐานจำลองไม่เชิงเส้นมาประยุกต์ใช้ อย่างเช่น ตัวควบคุมแบบเจเนอริกโมเดล ฯลฯ น่าจะมีสมรรถนะดีกว่า ซึ่งต้องขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ใช้นั้นต้องน่าเชื่อถือ และมีความถูกต้องในระดับหนึ่ง เพราะตัวควบคุมเหล่านี้ขึ้นกับแบบจำลองนั่นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย