บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตลอดเวลาที่ผ่านมา การควบคุมค่าพีเอชได้มีผู้สนใจทำการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องจากเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมเคมีเป็นส่วนใหญ่ อาทิเช่น เป็นเงื่อนไขหลักของการเกิดปฏิกิริยาบางปฏิกิริยา หรือป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ โดยปรับค่าพีเอชให้เหมาะสม การทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนของโลหะหนัก การทำให้เชื้อจุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดีในกระบวนการหมัก ฯลฯ ผลงานของผู้ทำการวิจัยเกี่ยวข้องกับการควบคุมค่าพีเอชจึงเกิดขึ้นอย่างมากมาย สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้จึงรวบรวมและสรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมค่าพีเอช รวมทั้งรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมที่สนใจนั่นคือตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต และการประยุกต์ใช้การประมาณค่าที่มักใช้ควบคู่กับตัวควบคุมแบบสมัยใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุม ซึ่งรายละเอียดของตัวควบคุมและตัวประมาณค่าจะกล่าวในบทที่ 3 ต่อไป

โดยรวมแล้ว บทนี้จะกล่าวถึงผลงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับ การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต สำหรับการควบคุมค่าพีเอชในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยแบ่งออกสามส่วน คือ ส่วนของผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมค่าพีเอช, การควบคุมแบบป้อนกลับสเตต และการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์โดยใช้คาลมานฟิลเตอร์

2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมค่าพีเอช

การควบคุมค่าพีเอช ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียนั้น ทำได้ยาก เนื่องจากมีความไม่เชิงเส้นสูงและมีความไวต่อการปรับเปลี่ยนของค่าตัวแปรปรับมาก (Shinskey,1988) และการควบคุมค่าพีเอชมีปัญหามากมาย ความยุ่งยากที่เกิดจากความไม่เข้าใจและขาดรายละเอียดทางเคมี อาทิเช่น การตกตะกอน การเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นในระบบ ความสามารถของสารละลายบัฟเฟอร์ จุดสมดุลของการทำปฏิกิริยากันของกรด-ด่าง (Gustafsson,1995) นอกจากนั้นเมื่อพิจารณากราฟไตเตรชั่น

ระหว่างกรด-ด่างจะมีการกระโดด ณ จุดสมดุล ความชันของกราฟจะมากยิ่งขึ้นถ้าเป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่าง กรดแก่กับด่างแก่ โดยเฉพาะกรดแก่กับด่างแก่จะมีจุดสมดุลเท่ากับค่าพีเอช 7 เมื่อมีการเติมกรดหรือด่างเพียงปริมาณเล็กน้อยลงไปในระบบ จะทำให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเป็นอันมาก ทำให้การควบคุมค่าพีเอช ณ จุดสมดุลทำได้ยากมาก และ จากการที่ค่าพีเอช เท่ากับ ผลลบของค่าล็อกการิธึมของความเข้มข้นของไฮโดรเจน ไอออน ดังนั้นการที่ค่าพีเอช มีค่าแตกต่างกันเท่ากับหนึ่ง แสดงว่าค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจน ไอออนแตกต่างกัน 10 เท่า ถ้าค่าพีเอชต่างกัน สองหน่วย แสดงว่าค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจน ไอออนต่างกันถึง 100 เท่า ดังนั้นการปรับค่าพีเอชที่ถูกต้องจึงทำได้ยากและต้องระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง

ในสมัยเริ่มแรกของการศึกษาการควบคุมค่าพีเอชนั้น ยังไม่มีการสร้างตัวควบคุมขึ้นมา แต่มีการพัฒนาแบบจำลองของกระบวนการขึ้นมาก่อน McAvoy et al. (1972) มีการเลือกใช้แบบจำลองมาเป็นพื้นฐานการออกแบบ และสร้างสมการพลวัตของกระบวนการพีเอชขึ้น รวมทั้งทำการทดลองแบบจำลองที่สร้างขึ้นในห้องทดลอง ตัวอย่างที่ศึกษาเป็นปฏิกิริยาสะเทิน ระหว่างด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับกรดอะซีติก ในถังปฏิกรณ์เคมีอย่างต่อเนื่อง พบว่าให้ผลการทดลองถูกต้องและเป็นไปตามแบบจำลองที่สร้างขึ้นตามทฤษฎี ต่อมาได้มีการประยุกต์ สร้างแบบจำลองกระบวนการพีเอชขึ้นมานอกจากการสร้างสมการดุลมวลสารแล้ว โดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพ, คุณสมบัติทางเคมี, การดุลประจุให้เป็นกลาง, การแตกตัวของกรดอ่อน, การแตกตัวของด่างอ่อน และการละลายได้ในน้ำ ซึ่งจะมีค่าคงที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเหล่านี้เช่น ค่าคงที่ของการแตกตัวของกรดอ่อน (K_a) , ค่าคงที่ของการแตกตัวของด่างอ่อน (K_b) , ค่าคงที่ของผลคูณการละลายในน้ำ (K_w), โดย Jutila et al.(1981), Jutila and Orava (1981) และ Gustafsson and Waller (1983)

นอกจากการอาศัยแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากค่าสมดุลทางกายภาพและค่าสมดุลทางเคมีแล้ว Wright and Kravaris (1986) ได้แสดงการสร้างกราฟไตเตรชันจาก "สมการพีเอช" ซึ่งเกิดจากการยุบสมการค่าคงที่ของการแตกตัวของกรดอ่อน, นิยามของค่าพีเอช และนิยามการละลายได้ในน้ำ ทั้งสามสมการรวมกันได้เป็นสมการเดียวเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและความเข้มข้น

ต่อจากนั้นมีการพัฒนาสร้างตัวควบคุมอื่น ๆ ขึ้นมา เพื่อควบคุมค่าพีเอช และขณะเดียวกันก็มีการพัฒนาแบบจำลองของกระบวนพีเอชควบคู่เรื่อยมา สำหรับตัวควบคุมนั้นมีอยู่หลายประเภทด้วยกัน เนื่องจากกระบวนการพีเอชนี้มีความไม่เชิงเส้นสูง จึงมีผู้สนใจประยุกต์ใช้ตัวควบคุมไม่เชิงเส้นมาทำการควบคุมกับกระบวนการนี้เป็นจำนวนมาก แต่ทั้งนี้ยังคงมีผู้สนใจใช้ตัวควบคุมแบบเชิงเส้นอยู่

โดยมีการปรับปรุงอัลกอริทึมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพตัวควบคุม เพื่อสามารถทำการควบคุมค่าพีเอชให้ได้ผลตามที่ต้องการ นอกจากนั้นผลงานที่ผู้วิจัยได้ทำวิจัยผ่านมานั้น กระบวนการพีเอชที่ศึกษาจะมีความแตกต่างกัน ในแง่ ชนิดของกรด-ด่างที่ทำปฏิริยา เช่น อาจเป็นกรดอ่อนทำปฏิกิริยากับด่างแก่, ด่างอ่อนทำปฏิกิริยากับกรดแก่ หรือด่างแก่กับกรดแก่ทำปฏิกิริยากัน สภาวะที่สนใจแตกต่างกัน เช่น ต้องการควบคุมที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 (neutralization) หรือควบคุมที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4.2 (ในการตกตะกอนโลหะนิกเกิล) และ ถังปฏิกรณ์ที่ใช้มีทั้งชนิดเป็น CSTR และเป็นแบบ PFR รวมทั้งไม่ใช้ถังปฏิกรณ์เลย แต่ใช้ท่อต่อเป็นสาย (in-line) นอกจากนั้นบางระบบอาจมีสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer solution) รวมอยู่ด้วย ซึ่งอาจจะสรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมาแบ่งตามชนิดของตัวควบคุมได้ดังนี้

- ตัวควบคุมแบบป้อนหน้า/ป้อนกลับ

Jayadeva et al.(1990) สร้างตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นแบบป้อนหน้า/ป้อนกลับ (Feedback/Feedforward Controller) ซึ่งมีสมการไม่เชิงเส้นอยู่ในตัวแปรปรับโดยตรง แบบจำลองที่สร้างขึ้นยึดตามแบบจำลองของ Wright and Kravaris (1986) นั่นคือเป็นระบบที่ประกอบด้วยกรดแก่ไฮโดรคลอริกและด่างแก่โซเดียมไฮดรอกไซด์ ปัญหาที่ได้ทำการทดลองมีทั้งแบบ regulatory และ servo problem การออกแบบตัวควบคุมจะง่ายและทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมแล้วพบว่าระบบควบคุมสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์และตัวรบกวนที่วัดค่าไม่ได้ต่าง ๆ ได้ดี

Jutila et al. (1981) นอกจากได้เสนอการสร้างแบบจำลอง โดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี แล้วมีการสมมุติความเข้มข้นที่ไม่ทราบค่าเป็น "ความเข้มข้นโดยสมมุติ (hypothetical concentration)" ซึ่งจะรวมเทอมความเข้มข้นของอนุภาคต่าง ๆ ที่ไม่สามารถวัดค่าได้ อาศัยข้อมูลที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์ และอัลกอริธึมของคาลมานฟิลเตอร์สามารถประมาณค่าความเข้มข้นสมมุติได้ ลักษณะของกระบวนการพีเอชประกอบด้วยด่างแก่ โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยาละเทินกับกรดอ่อนคือกรดอะซิติก ในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง 3 ถัง ที่ต่ออนุกรมกัน

- ตัวควบคุมแบบเชิงเส้น

ตัวควบคุมแบบเชิงเส้น (Linear controller) เช่นตัวควบคุมแบบพีไอ และพีไอดี ได้นำมาใช้ในการควบคุมค่าพีเอชของกระบวนการตกตะกอนของโลหะหนักเช่น นิกเกิล ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการทำ

สารละลายให้บริสุทธิ์ Støle-Hanson and Foss (1996) จะสนใจเฉพาะช่วงค่าพีเอชเท่ากับ 4.1-4.5 เพราะค่าพีเอชแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของนิกเกิลคาร์บอเนตที่เติมลงไป ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีจะมีสรรถนะดีขึ้นเมื่อมีการปรับปรุงใส่ feedforward compensation นอกจากนั้นยังทำให้ความทนทานของตัวควบคุมดีขึ้นด้วย

และ Wright and Kravaris (1991) ได้แสดงแบบจำลองของการควบคุมค่าพีเอช ซึ่งสามารถลดระบบให้เป็นกระบวนการอันดับหนึ่ง ซึ่งในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการนี้ ได้อาศัยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ ประกอบด้วย สมดุลสสาร สมการค่าคงที่ทางเคมีและนิยามค่าสมดุลอันใหม่ ซึ่งเป็นค่าแปรผันโดยตรงกับตัวแปรสเตต จึงประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเชิงเส้นได้ค่าสมดุลอันใหม่นี้เรียกว่าค่าสมดุลกรดแก่ (Strong acid-equivalent Control) สามารถประมาณค่าสมดุลนี้จากค่าพีเอชที่วัดค่าได้โดยตรงจากพีเอชมิเตอร์ ตัวควบคุมที่ใช้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอที่ใช้การทำให้เป็นเชิงเส้นแบบ global linearization ที่อัลกอริธึมของค่าสมดุลกรดแก่อยู่ในสมการของตัวแปรปรับ ผลการทดลองแสดงสมรรถนะและความทนทานของตัวควบคุม จากการถูกรบกวนจากตัวรบกวนและความไม่แน่นอนของแบบจำลองที่สร้างขึ้น

- ตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้น

ได้มีการพัฒนาตัวควบคุมที่เป็นแบบจำลองขึ้นโดยมีลักษณะไม่เชิงเส้น เพื่อใช้ในกระบวนการพีเอชที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง ตัวควบคุมแบบเอ็นเอลไอซี (Nonlinear Inferential Controller : NLIC) เป็นหนึ่งการควบคุมที่ถูกพัฒนาขึ้น โดย Parrish and Brosilow (1988) ซึ่งเสนอผลการควบคุมค่าพีเอชที่ได้ เปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอ (Proportional Integral : PI) ถังปฏิกรณ์เป็นแบบต่อเนื่องและสมมติฐานให้เป็นถังกวนสมบูรณ์แบบ รวมทั้งสมดุลของกรด-ด่าง เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว สารเข้ามีสามสายคือสายของกรดอ่อนที่มีการแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนหนึ่งตัว (monoprotic acid : HA) สายของเกลือของกรดอ่อน (A^-) และสายของตัวแปรปรับคือด่างแก่ เมื่อทดสอบกรณีมีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง และมีตัวรบกวนเกิดขึ้น ตัวควบคุมแบบเอ็นเอลไอซีให้ผลดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ

นอกจากนั้น Shukla et al. (1993) ได้เสนอการใช้ตัวควบคุมที่เป็นแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นมาใช้ในการควบคุมกระบวนการพีเอชคือ ตัวควบคุมแบบอาร์เอ็นซีแอล (Robust Nonlinear Control Law : RNCL) ซึ่งเกิดจากการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบเอ็นไอเอ็มซี (Nonlinear Internal Model Controller : NIMC) ร่วมกับตัวควบคุมแบบอะแดพทีฟ (Adaptive Controller) ส่งผลให้ตัวควบคุม

ใหม่สามารถควบคุมค่าพีเอชให้เข้าสู่เซ็ทพอยท์ได้เร็วขึ้น จะมีค่า setting time น้อยกว่า และมีความทนทานมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบไอเอ็มซีเดิม ซึ่งทดสอบได้จากกรณีที่มีภาระจากตัวรบกวน (load disturbance) และมีความผิดพลาดของแบบจำลอง (modeling error)

ส่วน Wong et al.(1994) ได้สร้างแบบจำลองการควบคุมพีเอชในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวควบคุมแบบอาร์เอ็นซีแอล เปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบเอ็นไอเอ็มซี และตัวควบคุมแบบพีไอ กระบวนการที่สนใจประกอบด้วยถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่มีกรดแก่และด่างแก่ทำปฏิกิริยากัน ซึ่งจุดประสงค์การควบคุมเพื่อควบคุมค่าพีเอช ณ จุดสะเทิน พบว่าตัวควบคุมแบบอาร์เอ็นซีแอล จะมีสมรรถนะดีกว่าตัวควบคุมแบบอื่น ๆ เมื่อมีตัวรบกวนคือ อัตราการไหลของกรดมีการเปลี่ยนแปลงไป สมรรถนะของตัวควบคุมดูจาก ความคลาดเคลื่อนของพีก (peak error) , เวลาเข้าสู่สมดุล และค่าอินทีกรัลของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) ทั้งนี้เนื่องจากตัวควบคุมแบบอาร์เอ็นซีแอล มีการใช้ตัวกรองเพื่อเพิ่มความทนทานให้แก่ตัวควบคุมและมีการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของตัวกรอง (filter gain) ทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์

Klatt and Engell (1998) ใช้ตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้น ควบคุมกระบวนการสะเทิน สำหรับแบบจำลองของกระบวนการที่ใช้ ยึดถือตาม Wright and Kravaris (1991) ตัวควบคุมที่ออกแบบขึ้นมาเป็นการรวมอัลกอริธึมของการทำให้เป็นเชิงเส้นแบบ input/output linearization และเทคนิคของการควบคุมแบบจีเอสทีซี (Gain-Scheduling Trajectory Control : GSTC) ผลดีของการใช้ตัวควบคุมนี้จะดีกว่าการใช้แนวคิดสองแนวคิดแยกจากกัน เมื่อทดสอบการควบคุมในกระบวนการที่มีกรดอะซิติกทำปฏิกิริยาสะเทินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับตัวควบคุมแบบพีไอ ในแง่ของการมีตัวรบกวนเป็นอัตราไหลขาเข้าของกรด แล้วมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์เป็นแบบสะเต็พ (step change) การควบคุมแบบจีเอสทีซีจะมีสมรรถนะดีกว่าการควบคุมพีไอ

Mahuli et al.(1992) ได้จำลองกระบวนการควบคุมค่าพีเอชขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยจำลองปฏิกิริยาสะเทินระหว่างสารละลายผสมของกรดอะซีติก, กรดฟอสฟอริกและกรดซัลฟุริก มีด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำสะเทิน และทำการศึกษาทั้งที่มีสารละลายบัพเฟอร์และไม่มีสารละลายบัพเฟอร์ ซึ่งประกอบด้วยเกลือโซเดียมคาร์บอเนต ลักษณะการทดลองจะเป็นท่อที่มีสารละลายกรดไหลอยู่ในท่อ และมีจุดที่สามารถฉีดสารละลายด่างเข้าไปทำปฏิกิริยาสะเทิน ตัวควบคุมจะมีแบบจำลองเป็นพื้นฐานและไม่เชิงเส้น คือตัวควบคุมแบบ เจเนอริกโมเดล (Generic model controlier : GMC) ทำการควบคุมค่าพีเอชที่จุดสะเทินของกรดผสมกับด่าง ตัวควบคุมประกอบด้วยพารามิเตอร์สามตัว โดยจำลองช่วงไตเตรชั่นที่กว้างของกรดแก่ในสารละลายบัพเฟอร์ด้วย พบว่าผลการควบคุมที่ได้มีสมรรถนะดีมาก ทั้งที่มี

การเปลี่ยนแปลงแบบแร็มพ์และสเต็พของชนิดของกรด, ความเข้มข้นของกรด และอัตราการไหลของกรด

นอกจากนั้น Williams et al.(1990) ได้นำตัวควบคุมแบบเจเนอริกโมเดล มาใช้ในกระบวนการควบคุมค่าพีเอชภายในท่อ แต่แบบจำลองของกระบวนการจะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับ ค่า Gibb 's free energy (ΔG) ระบบจะมีความล่าช้าของการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์วัด และมีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์วัด มีการใช้ตัวประมาณค่าแบบ least-squares method ในการประมาณค่าความเข้มข้น และ ค่า Gibb's free energy

นอกจากตัวควบคุมไม่เชิงเส้นที่มีแบบจำลองแล้ว ยังมีตัวควบคุมชนิดอื่นที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่อาศัยแบบจำลอง ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมค่าพีเอช อาทิเช่น

การใช้ตัวควบคุม Relay feedback with hystersis ควบคุมค่าพีเอช โดย Lee et al.(1993) ตัวควบคุมชนิดนี้เป็นการจูนพารามิเตอร์แบบออนไลน์ จะลดปัญหาการสร้างกราฟไตเตรชั่นขณะออฟไลน์ลงได้ และใช้ตัวกรองสมการอันดับหนึ่ง (first order filter) ที่มีค่าคงที่ของเวลา เท่ากับ1 วินาทีแล้วเมื่อมีการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมด้วยการรบกวนระบบ ด้วยสัญญาณรบกวน ตัวกรองนี้สามารถช่วยทำให้สัญญาณการวัดมีค่าราบเรียบขึ้น

และ Sung and Lee (1995) ได้เสนออัลกอริธึมใหม่เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์อย่างง่าย (simple set point change) สมการของการควบคุมอยู่ในรูปค่าคงที่ (steady state) เงื่อนไขการใช้อัลกอริธึมนี้คือ ต้องไม่มีสารใดแปลกปลอมเข้ามาในระบบ หรือเกิดการสูญเสียไปจนหมด ซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสสารต่างๆ ในขาเข้า วิธีนี้จะทำ identification method โดยใช้การเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์อย่างง่าย และใช้ตัวประมาณค่า least-square method เพื่อประมาณค่าค่าคงที่ของการแตกตัวของกรดอ่อนและความเข้มข้นทั้งหมด ทำให้เพิ่มความทนทานให้แก่ตัวควบคุมแบบพีไอดี เมื่อมีสัญญาณรบกวนต่อระบบ

สรุปผลงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมค่าพีเอชไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมค่าพีเอช (pH Controller)

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
1. ป้อนหน้า /ป้อนกลับ	◊ ป้อนหน้า/ป้อนกลับ	◊ Jayadeva,B. et al /1990 ◊ Jutila,P.et al. /1981	◊ กรดแก่-ด่างแก่ ◊ กรดอ่อน-ด่างแก่ , CSTR 3 ถังต่ออนุกรมกัน
2. เชิงเส้น	◊ PID ◊ Strong acid equivalent control	◊ Støle-Hanson,K. /1996 ◊ Wright & Kravaris /1991	◊ ตกตะกอนของโลหะหนัก นิเกิล, ควบคุมค่าพีเอช ที่ 4.2 ◊ กรดแก่-ด่างแก่, CSTR,

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมค่าพีเอช (pH Controller) (ต่อ)

ลักษณะของกระบวนการ	ชื่อตัวควบคุม	ผู้วิจัย ปี	กรดและสารละลายบัฟเฟอร์
3.ไม่เชิงเส้น ที่มีแบบจำลอง	◊ NIMC	◊ Parrish & Brosilow. /1988	◊ กรดอ่อนชนิด monoprotic acid ,ด่างแก่,สารละลายบัฟเฟอร์, CSTR
	◊ RNCL	◊ Shukla et al. / 1993	◊ กรดแก่-ด่างแก่ ,CSTR
		◊ Wong,Y.H. et al. /1994	◊ กรดแก่-ด่างแก่ ,CSTR
	◊ GSTC	◊ Klatt & Engell. /1998	◊ กรดอ่อน-ด่างแก่, CSTR
	◊ GMC	◊ Mahuli et al. /1992	◊ สารละลายผสมของกรดอะซีติก,กรดฟอสฟอริกและกรดซัลฟุริก-ด่างแก่, มี/ไม่มีสารละลายบัฟเฟอร์, In-line
		◊ Williams et al. /1990	◊ กรดอ่อน-ด่างแก่, In-line, dual base injection
4.ไม่เชิงเส้น ที่ไม่มีแบบจำลอง	◊ Relay feedback with hystersis	◊ Lee,J., et al. /1993	◊ กรดอ่อน-ด่างแก่, CSTR
	◊ PID with simple set point change	◊ Sung & Lee, /1995	◊ กรดอ่อน-ด่างแก่, CSTR

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแบบป้อนกลับสเตต

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา มีเทคนิคการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองเพิ่มขึ้นอย่างมาก หนึ่งในนั้นคือการใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ซึ่งการควบคุมนี้อยู่บนหลักการของ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้นที่น่าเชื่อถือได้ ข้อดีของการควบคุมแบบนี้คือ การออกแบบมีความง่ายและแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาสามารถแสดง พลวัตของกระบวนการ (process dynamics) ปฏิกิริยาในระบบและความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการ ในรูปแบบของแบบจำลองเชิงเส้น ทำให้สามารถลดความยุ่งยากของสมการการควบคุม การแก้สมการและพิสูจน์หาคำตอบจะใช้เวลาสั้นและง่าย (Bequtte, 1991)

ได้มีการศึกษาการควบคุมแบบป้อนกลับสเตตและตีพิมพ์ในหนังสือมากมาย อาทิเช่น Fisher and Newell (1972) เสนอวิธีขจัดความยุ่งยากของการออกแบบตัวควบคุมหลายตัวแปร ที่มีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ โดยใช้รูปแบบดิสครีต, ออพติมัลและการควบคุมเชิงเส้น ด้วย quardratic - performance index ซึ่งจะถูกนำมาใช้หาคำตอบสำหรับการควบคุมแบบพี-ป้อนกลับสเตต รวมทั้งนำเอาเทอมอินทิกรัล มาใช้ร่วมเพื่อขจัดออฟเซ็ทเมื่อมีตัวรบกวนเข้ามารบกวน ส่วนค่าอัตราขยายของการควบคุม (K) ได้จากการแก้สมการริกคาติ (Riccati 's equation)

ส่วน Kravaris and Chung (1987) ได้ประยุกต์ใช้กฎของการควบคุมแบบป้อนกลับสเตต และสร้างวิธีการทำระบบไม่เชิงเส้นให้อยู่ในรูปเชิงเส้นของระบบ SISO โดยวิธี input/output linearization ผลการควบคุมสามารถใช้ได้ในระบบแทรคกิ้ง (tracking system) และมีตัวควบคุมมีความทนทาน (robustness) ในช่วงการเปลี่ยนแปลงแคบ ๆ ตราบใดช่วงนั้นไม่มีความคลาดเคลื่อนไปจากสภาวะคงตัวมากนัก ตัวอย่างที่ใช้ศึกษาเป็นถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะ

ต่อมาได้มีผู้วิจัยทำการประยุกต์ใช้กฎการควบคุมแบบป้อนกลับสเตตในการปรับปรุงตัวควบคุมแบบพีไอเชิงเส้นธรรมดา ให้เป็น พีไอไม่เชิงเส้น คือ Alvarez,J. (1989) ซึ่งจะจำลองความไม่เชิงเส้นของถังปฏิกรณ์เคมีแบบ CSTR ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนและไม่ผันกลับ ให้เป็นเชิงเส้น โดยใช้วิธี global linearization การจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะใช้เทคนิคการวางตำแหน่งโพล ผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบพีไอไม่เชิงเส้น จะแสดงสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอธรรมดาในแง่ การมีโอเวอร์ชูทของกราฟการตอบสนอง และเวลาเข้าสู่สมดุล (setting time)

นอกจากการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบพี-ป้อนกลับสเตตและพีไอ-ป้อนกลับสเตตแล้ว ยังมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนหน้า โดย Daoutidis and Kravaris (1989) ได้ออกแบบตัว

ควบคุมแบบป้อนหน้า/ป้อนกลับสเตต (Feedforward/State feedback controller) สำหรับระบบ SISO ที่ไม่เชิงเส้นสูง เช่น ถังปฏิกรณ์เคมีแบบ CSTR จำนวน 3 ถังต่ออนุกรมกัน และสามารถวัดค่าตัวรบกวนได้

Kravaris and Soroush (1990) ได้ออกแบบตัวควบคุมไม่เชิงเส้นสำหรับกระบวนการไม่เชิงเส้น MIMO โดยทำระบบลูพปิด (closed-loop system) เป็นเชิงเส้น โดยใช้ input/output linearization เงื่อนไขที่จำเป็นและพอเพียงสำหรับตัวควบคุมนี้ จะอาศัยกฎการควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ซึ่งจะใช้เทอมอินทีกรัลเพื่อลดออฟเซ็ทของตัวแปรควบคุมที่สภาวะคงที่ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการควบคุมความเข้มข้น และน้ำหนักโมเลกุลของโพลิเมอร์ในปฏิกิริยาโคโพลิเมอร์ไรเซชั่น ของ methyl methacrylate และ vinyl acetate ในถังปฏิกรณ์เซมิแบทช์ การควบคุมให้ผลดีในกรณีมีความคลาดเคลื่อนของตัวแปรสเตตเริ่มต้น และมีการเปลี่ยนแปลงของเร็ทพอยท์

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ โดยใช้คาลมานฟิลเตอร์

เนื่องจากปัญหาในการควบคุมกระบวนต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ มักมีอยู่ 3 กรณี คือ

- ไม่สามารถวัดค่าสเตตได้ทั้งหมด
- ความถูกต้องของสเตตที่วัดได้มีค่าต่ำ
- มีความล่าช้าของวิธีการวัด ทำให้เกิดความล่าช้าของเวลาในลูพการควบคุม

ซึ่งเงื่อนไขที่สำคัญในการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตก็คือ ตัวแปรสเตตทุกตัวต้องทราบค่า จึงจำเป็นต้องอาศัยการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ ซึ่งคาลมานฟิลเตอร์ เป็นหนึ่งในตัวประมาณค่าที่ได้รับความนิยมและมีผู้สนใจนำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมขั้นสูงเรื่อยมา

Well,C.H.(1971) จึงเสนออัลกอริธึมของคาลมานฟิลเตอร์ในรูปเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (Linear Kalman filter และ Extended -Kalman filter) ซึ่งประยุกต์ใช้ Extended - Kalman ในถังกวนที่มีความไม่เชิงเส้นสูง โดยเป็นแบบ adiabatic และมีปฏิกิริยา $A \rightarrow 2B$ สมการสมดุลพลังงานมี 3 สมการ และสมการสมดุลมวล มี 1 สมการ โดยจะคำนวณค่าสเตตของกระบวนการ หรือพารามิเตอร์ของระบบที่ไม่สามารถวัดค่าได้ถึง 6 ตัว ผลการศึกษาบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้ในคอมพิวเตอร์ออนไลน์ได้ต่อไป

Hamilton et al. (1973) ได้แสดงประสิทธิภาพของคาลมานฟิลเตอร์ในการประมาณค่าสเตต ของระบบที่มีสัญญาณรบกวน (noise) โดยทำการจำลองและทดลองกับเครื่องระเหย ผลการควบคุมอยู่ในระดับดี เมื่อกระบวนการหรือสัญญาณรบกวนที่วัดได้มีค่าผิดพลาดไป 10 % และให้ผลการประมาณที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกรองแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล นอกจากนั้น คาลมานฟิลเตอร์สามารถประยุกต์ใช้ได้ในระบบที่มีค่าประมาณเริ่มต้นผิดพลาด หรือค่าพารามิเตอร์ในโมเดลผิดพลาดไป ตัวกรองคาลมานนี้ มีความไวต่อกระบวนการที่มีตัวรบกวนที่ไม่สามารถวัดค่าได้ อย่างไรก็ตาม ความไวนี้สามารถลดลงได้โดยการปรับค่า Q และ R

Myer and Luecke (1991) เสนออัลกอริธึมใหม่ที่ใช้ในการแก้สมการคาลมานแบบเดิม โดยใช้วิธีแก้ปัญหาเชิงตัวเลข ของระบบพลวัตที่มีลักษณะต่อเนื่อง และใช้สมการวัดแบบดิสครีต พบว่าแมทริกซ์ความแปรปรวนของค่าผิดพลาดจะมีลักษณะลมมาตรตลอด ตัวอย่างที่ได้ศึกษามีสามตัวอย่าง คือ

- ถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง ที่มีอุณหภูมิคงที่ มีปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับของ สาร $A \longrightarrow B \longrightarrow C$ ซึ่งวัดความเข้มข้นของสาร B และ ประมาณความเข้มข้นของ สาร A และ B
- ถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง ที่เป็นอะไดอะบาติก (adiabatic) ของปฏิกิริยา $A \longrightarrow B$ ซึ่งวัดได้เฉพาะอุณหภูมิในถัง แล้วประมาณค่าคอนเวอร์ชันของปฏิกิริยา
- ถังหมัก (fermentor) ซึ่งวัดน้ำหนักของมวลชีวภาพ (biomass) และวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (D.O.) เพื่อนำไปประมาณ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) รวมทั้งน้ำหนักของมวลชีวภาพ และ ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ

ผลการควบคุมทั้งสามตัวอย่างพบว่า ค่าประมาณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับของจริง ส่งผลให้ผลการควบคุมกระบวนการเหล่านี้มีค่าดียิ่งขึ้น

นอกจากนั้นยังมีการประยุกต์ใช้คาลมานฟิลเตอร์ สำหรับกระบวนการสังเคราะห์โพลิเมอร์ โดย Jo and Nankoff (1976) ได้ทดลองและศึกษาถึงขั้นตอนการเกิดโพลิเมอร์ต่าง ๆ ได้แก่ initiation, termination, propagation และ inhibition สารที่ใช้ในการทดลองคือ ไวนิลอะซีเตต บรรจุในถังแก้วที่มีการติดตั้งรีแฟรคโตมิเตอร์ (refractometer) เพื่อบันทึกค่าดัชนีการหักเหของแสง และมีเครื่องวัดความหนืด (viscometer) ติดตั้งในถังปฏิกรณ์ด้วย นั่นคือตัวแปรวัดคือค่าดัชนีการหักเหของแสงและความหนืด คาลมานฟิลเตอร์จะมีสมรรถนะที่ดี สามารถประมาณค่าคอนเวอร์ชัน และค่าโมเลกุลแบบเฉลี่ยของโพลิเมอร์ได้

นอกจากทำการซิมมูเลทปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์แล้ว มีการทดสอบอัลกอริธึมของคาลมานฟิลเตอร์ และตัวควบคุมโดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน (Kittisupakorn and Kershenbaum,1994) ตัวแปรวัดที่ใช้ได้แก่ อัตราการไหล ระดับน้ำในถัง และอุณหภูมิ เพื่อใช้ประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา ตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น ตัวควบคุมแบบเจเนอริกโมเดล (Generic model controller) เพื่อควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์แบบกะ ผลการควบคุมพบว่า ตัวประมาณค่าสามารถให้ค่าการประมาณได้ถูกต้องใกล้เคียงกับของจริง และเมื่อทำงานร่วมกับตัวควบคุมแบบเจอเนริกโมเดล ทำให้ตัวควบคุมมีความทนทานมากขึ้น ผลที่ได้จากการทดลองจริงในถังปฏิกรณ์จะมีความไวต่อ plant/model mismatch เล็กน้อย ทั้งนี้เป็นผลมาจากสมรรถนะของตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลอง ที่มีสมมติฐานต่าง ๆ แตกต่างไปจากของจริง

2.4 บทสรุป

จากผลงานวิจัยในช่วงที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาตัวควบคุมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมค่าพีเอชขึ้นมาหลากหลายรูปแบบ ซึ่งสภาวะและชนิดของกรด-ด่างที่ทำปฏิกิริยาในแต่ละงานวิจัยก็แตกต่างกัน แต่ตัวควบคุมส่วนใหญ่จะเป็นตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งการนำไปประยุกต์ใช้จริง จะมีความยุ่งยากและซับซ้อน งานวิจัยนี้จึงนำการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ซึ่งมีรูปแบบและอัลกอริธึมที่ง่าย สามารถเข้าใจได้รวดเร็ว มาใช้ในการควบคุมค่าพีเอช แต่ตัวควบคุมแบบนี้จำเป็นต้องทราบค่าของสเตตทุกตัว ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในการปฏิบัติงานจริง ทั้งนี้เนื่องจากมีขีดจำกัดทางเศรษฐศาสตร์ และทางกายภาพต่าง ๆ ดังนั้นการใช้ตัวประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์จึงมีความจำเป็น ในที่นี้เลือกใช้คาลมานฟิลเตอร์ซึ่งผลงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือในระดับสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย