บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ย (Averaging Liquid Level Control) เป็นการควบคุมระดับของเหลวชนิดหนึ่งที่มีวัตถุประสงค์ในการควบคุมแตกต่างจากการควบคุมระดับแบบแน่นอน (Tight Level Control) แต่ตัวควบคุมพื้นฐานที่ใช้เช่นเดียวกันกับการควบคุมระดับแบบแน่นอน ได้แก่ ตัวควบคุมแบบพีและพีไอ ซึ่งได้มีการค้นพบมาเป็นเวลานาน การนำเอาตัวควบคุมดังกล่าวมาใช้ในการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยสามารถทำได้โดยทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวควบคุมให้เหมาะสม เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการควบคุม ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ซึ่งจากการศึกษาพบว่านอกจากได้มีผู้เสนอการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีและพีไอในรูปแบบที่แตกต่างกันแล้ว ยังได้มีการพัฒนาสมการของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยขึ้นในหลายรูปแบบ ซึ่งในบทนี้จะได้กล่าวถึงการพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยที่ผ่านมา ส่วนรายละเอียดเกี่ยวกับตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยชนิดต่าง ๆ ที่สนใจศึกษาได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

จากการนำเอาตัวควบคุมแบบพีและพีไอซึ่งจัดเป็นตัวควบคุมแบบเชิงเส้นมาใช้ในการควบคุมระดับแบบเฉลี่ย พบว่าตัวควบคุมแบบเชิงเส้นดังกล่าวไม่สามารถบรรลุวัตถุประสงค์

ในการควบคุมได้ดีเท่าที่ควร จึงได้มีผู้เสนอตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยแบบไม่เชิงเส้นขึ้น (Shunda และ Fehervari, 1976) โดยพบว่าการควบคุมระดับของเหลวในถังพักโดยให้อัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกจากถังพักราบเรียบเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนของอุปกรณ์ที่อยู่ถัดมา และให้ระดับในถังพักไม่เกินค่าระดับสูงสุดและต่ำสุดที่กำหนดไว้ สามารถทำได้โดยใช้การควบคุมแบบพีไอมาตรฐานเมื่อการรบกวนมีค่าน้อย และใช้ตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นเมื่อการรบกวนมีค่ามาก โดย Shunda และ Fehervari พบว่าตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นในเชิงพาณิชย์ที่สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว คือ

- ตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear PI Controller)
- ตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง (Wide-Range Controller)
- ตัวควบคุมแบบใช้ลมที่มีการทำงานแบบอัตโนมัติ (Pneumatic Controller with auto-overrides)

ซึ่งตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นดังกล่าวสามารถตอบสนองจุดประสงค์ในการควบคุม คือ จะให้ผลการตอบสนองที่ช้าเมื่อการรบกวนมีค่าน้อย และให้ผลการตอบสนองที่เร็วเมื่อการรบกวนมีค่ามากขึ้น

นอกจากตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นที่ได้เสนอขึ้นแล้ว ได้มีการเสนอตัวควบคุมแบบพีแอล (Propotional-lag controller) ขึ้น (Luyben และ Buckley, 1977) เพื่อลดข้อเสียที่เกิดจากตัวควบคุมแบบพีและพีไอ โดยตัวควบคุมดังกล่าวมีลักษณะเป็นการควบคุมแบบป้อนหน้า/ป้อนกลับ (Feedforward/feedback scheme) ที่ได้นำเอาการควบคุมระดับแบบป้อนกลับที่ใช้ตัว

ควบคุมแบบพีมารวมกับการควบคุมแบบป้อนหน้าจากการวัดอัตราการไหลขาเข้า พบว่าตัวควบคุมแบบพีแอลให้การไหลขาออกที่ราบเรียบ และช่วยลดอ็อพเซ็ทของระดับของเหลวที่เกิดจากการควบคุมแบบพี ต่อมาได้มีการตรวจสอบคุณลักษณ์ในเชิงปริมาณ (Characteristic quantitatively) ของตัวควบคุมแบบพีแอล และพัฒนาวิธีการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีแอลในรูปแผนภาพการปรับจูนขึ้นเพื่อให้สะดวกในการใช้งาน (Cheung และ Luyben, 1979) โดยไดนามิกและการตอบสนองของระบบถูกตรวจสอบในรูปของลาปลาสและโดเมนของเวลา (Laplace and time domain) จากการตรวจสอบพบว่าตัวควบคุมแบบพีแอลมีคุณลักษณ์ระหว่างตัวควบคุมแบบพีและตัวควบคุมแบบพีไอ เมื่อทำการปรับจูนอย่างถูกต้องการไหลขาออกจะเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ และระดับของเหลวสามารถเข้าสู่เซ็ทพอยน์ได้ อย่างไรก็ตามตัวควบคุมแบบพีแอลสามารถใช้งานได้ในช่วงแคบ จากแผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีแอลจะเห็นได้ว่าพื้นที่ที่ต่ำกว่าด้านซ้ายของเส้นโค้งการตอบสนองไม่สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนได้ การตอบสนองที่สามารถใช้งานได้จะถูกจำกัดโดยเวลาต่ำสุดที่ต้องใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวใหม่ของการไหลขาออก ส่วนพื้นที่ด้านขวาของเส้นโค้งการตอบสนองจะถูกจำกัดโดยเส้นโค้งการตอบสนองแบบพี เพราะฉะนั้นถึงแม้ว่าการควบคุมแบบพีแอลจะให้อิสระในการเลือกใช้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) และค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) แต่ยังคงไม่สามารถใช้งานได้อย่างแพร่หลายเท่าที่ควร ประโยชน์ของตัวควบคุมแบบพีแอล คือ ประสบความสำเร็จในการรวมกันระหว่างตัวควบคุมแบบพีและพีไอได้อย่างเหมาะสม โดยตัวควบคุมดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในกรณีที่ตัวควบคุมแบบพีและ

พีไอไม่สามารถให้ผลการตอบสนองเป็นไปตามต้องการ

นอกจากได้มีการเสนอแผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีแอลขึ้นแล้ว ในเวลาใกล้เคียงกันได้มีการเสนอแผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมพีและพีไอแบบเชิงเส้น (Conventional linear P and PI Controller) สำหรับการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยขึ้น (Cheung และ Luyben, 1979) เพื่อให้วิศวกรสามารถทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีและพีไอแบบเชิงเส้นได้อย่างมีเหตุผล โดยการพิจารณาจากค่าที่กำหนดไว้ คือ

- ค่าระดับของเหลวสูงสุด (Maximum peak level height)
- อัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (Maximum rate of change in outlet flow: MRCO) ที่ต้องการ

พบว่าแผนภาพการปรับจูนดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการปรับจูนตัวควบคุมพีและพีไอสำหรับการควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ยแทนการใช้สมการที่ยุ่งยากซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ทำให้การปรับจูนสามารถทำได้ง่ายขึ้นและช่วยประหยัดเวลาในการปรับจูน

หลังจากนั้นได้มีการตรวจสอบให้เห็นจริงถึงการใช้งานของตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง (Wide-range controller) ที่เสนอขึ้นโดย Shunta และ Fehervari (1976) (Cheung และ Luyben, 1980) โดยใช้การเลียนแบบกระบวนการแบบดิจิตัล (Digital simulation) พบว่าตัวควบคุมดังกล่าวให้ผลการตอบสนองที่ช้าเมื่อการรบกวนมีค่าน้อยและให้ผลการตอบสนองที่เร็วเมื่อการรบกวนมีค่ามากขึ้น และยังพบว่าตัวควบคุมดังกล่าวมีความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบพี, พีไอและพีแอล นอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติในการกรอง

สัญญาณรบกวนที่มีความถี่ต่ำและแอมปลิจูดต่ำได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามตัวควบคุมดังกล่าวจะเกิดปัญหาเมื่อเกิดการรบกวนที่มีขนาดใหญ่หรือแอมบ่ลิจูดของสัญญาณรบกวนมีค่าสูง นอกจากนั้นตัวควบคุมแบบช่วงกว้างยังมีข้อเสียที่สำคัญ คือ การปรับจูนและการทำนายผลการตอบสนองทำได้ยาก หลังจากทำการตรวจสอบการใช้งานของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างแล้วได้มีการเสนอตัวควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ยแบบไม่เชิงเส้นชนิดอื่น ๆ ขึ้น เพื่อเลียนแบบข้อดีและลดข้อเสียที่เกิดขึ้นจากตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง (Cheung และ Luyben, 1980) โดยนำตัวควบคุมแบบพีและพีไอที่ใช้กันทั่วไปมาประยุกต์ใช้งานในลักษณะแบ่งช่วงการควบคุม (Split-range control) ได้แก่

- ตัวควบคุมแบบพีไอพี (Proportional-integral/proportional controller)
- ตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพี (Dual range integral/proportional controller)

นอกจากนั้นได้มีการนำเอาคุณสมบัติการจำกัดการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออก(Limited output change) (Cheung และ Luyben, 1980) มาใช้เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานตัวควบคุมชนิดต่าง ๆ โดยคุณสมบัติดังกล่าวช่วยให้สามารถใช้ประโยชน์จากตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยหลีกเลี่ยงอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้

ต่อมาได้มีนำตัวควบคุมแบบไดนามิกแมทริกซ์ (Dynamic matrix controller: DMC) (Cutler, 1982) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาของการควบคุมระดับแบบเฉลี่ย ซึ่งเป็นสมการการควบคุมแบบเดียวที่พิจารณาถึงความสำคัญของไดนามิก (Dynamic) ของระบบการควบคุมระดับ ในผลงานชิ้นอื่นข้างต้นจะทำการสมมุติว่าค่าคงที่ของเวลา (Time constant) ของกระบวน

การได้ถูกละเอาไว้ เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ไปในถัง (Tank hold up time) เมื่ออัตราการไหลสูงสุดผ่านวาล์วควบคุม อย่างไรก็ตามสำหรับอัตราการไหลขณะใช้งานซึ่งถือว่ามีสัดส่วนที่น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการไหลสูงสุด ค่าคงที่ของเวลาสามารถมีผลกระทบต่อสมรรถนะของลูพปิดได้ ซึ่งผลกระทบดังกล่าวจะขึ้นกับขนาดของภาชนะและความปลอดภัยที่ต้องการ

หลังจากนั้นได้มีการออกแบบการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการทำงานแบบอัตโนมัติ (PI controller with auto overrides) รวมทั้งเสนอการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการทำงานแบบอัตโนมัติขึ้น (Buckley, 1983) เพื่อให้การไหลขาออกราบเรียบมากที่สุดโดยระดับของเหลวอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ โดยในช่วงแรกได้ทำการตั้งค่าตัวควบคุมแบบอุดมคติ (Ideal controller settings) หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์แผนผังตรรกวิทยา (Logic scheme) เพื่อหาการออกแบบการเซ็ทค่าตัวควบคุมที่ต้องการ พบว่าค่าที่เหมาะสมของเวลารีเซ็ทที่ต้องการมีค่าอยู่ในช่วงกว้างกว่าค่าสูงสุดที่สามารถใช้งานได้ในตัวควบคุมทั่วไปมาก และการเซ็ทค่าตัวควบคุมที่ดีที่สุดประสบความสำเร็จในการใช้เป็นตัวควบคุมในเชิงพาณิชย์ได้

ต่อมาได้มีการเสนอทฤษฎีและสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยในรูปแบบตัวควบคุมแบบดิจิตัลที่มีค่าเกนไม่เชิงเส้น 2 ชนิด (Buckley, 1986) ได้แก่ ตัวควบคุมที่มีค่าเกนเป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาด (Gain proportional to error) และตัวควบคุมที่มีค่าเกนเป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาดยกกำลังสอง (Gain proportional to error squared) โดยในการวิเคราะห์ Buckley ให้ค่าเกนของตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นเท่ากับตัวควบคุมแบบเชิงเส้นที่ค่าความผิดพลาดบางค่า แนวคิดดังกล่าวเกิดเนื่องจากพบว่าเมื่อค่าความผิดพลาดต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้การ

ตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นจะเป็นแบบแดมพ์ขาดมากกว่าเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอแบบเชิงเส้น ส่วนในกรณีที่ค่าความผิดพลาดสูงกว่าที่กำหนดไว้การตอบสนองของระบบโดยใช้ตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นจะเกิดลักษณะแบบแดมพ์เกินมากกว่า จากการศึกษาพบว่าตัวควบคุมที่มีค่าเกนไม่เชิงเส้น 2 ชนิดดังกล่าวสามารถพัฒนาความราบเรียบในการไหล (Flow smoothing) ได้ดีกว่าการควบคุมแบบอะนาล็อกนอกจากตัวควบคุมแบบดิจิตัลที่มีค่าเกนไม่เชิงเส้น 2 ชนิดแล้วได้มีการนำตัวควบคุมแบบพีไอที่ประกอบด้วยน็อทเกน (PI controller with "notch" gain) (Buckley, 1986) มาใช้ในการควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ยซึ่งพบว่าให้ผลการตอบสนองดีกว่าตัวควบคุมที่มีค่าเกนไม่เชิงเส้นทั้ง 2 ชนิดที่ได้กล่าวมาข้างต้น

หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยขึ้นอีก 2 ชนิด โดยอาศัยกฎของการควบคุมระดับเฉลี่ยแบบออพติมัล (Optimal averaging level control) (McDonald, McAvoy และ Andretis, 1986) วัตถุประสงค์ของการควบคุมระดับเฉลี่ยแบบออพติมัล คือ เพื่อให้อัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุดมีค่าน้อยที่สุด (Minimum MRCO) เมื่อทำการกำหนดค่าระดับของเหลวสูงสุดและทราบค่าสเต็พของการไหลขาเข้า ตัวควบคุมชนิดแรกที่กล่าวถึงคือ ตัวควบคุมแบบแรมพ์ (Ramp controller) เป็นการทำงานแบบป้อนกลับที่มีรูปแบบเป็นสัดส่วนแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear proportional form) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับของเหลวในถังกับอัตราการไหลขาออก และได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบแรมพ์กับตัวควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ยทั้ง 7 แบบ ซึ่งได้ทำการอภิปรายโดย Cheung และ Luyben (1980) พบว่าตัวควบคุมแบบแรมพ์สามารถกรองสัญญาณการไหลได้ดีกว่า โดยไม่เกิดค่า

โอเวอร์ชูทของการไหลที่ไม่ต้องการและการจูนก็ทำได้ง่ายกว่า ตัวควบคุมชนิดที่ 2 ที่ได้เสนอขึ้น คือ ตัวควบคุมแบบออพติมัลพรีดิคทีพ (Optimal predictive controller: OPC) ซึ่งมีลักษณะการทำงานแบบป้อนหน้า/ป้อนกลับ (Feedforward/feedback controller) ที่เพิ่มเข้าไปในกฎการควบคุมแบบออพติมัล (Optimal control law)

นอกจากได้มีการพัฒนาตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยขึ้นในหลายรูปแบบดังได้กล่าวมาแล้วพบว่าได้มีการศึกษาถึงผลของขนาดถังพักที่มีต่อการเลือกใช้ตัวควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ยชนิดต่าง ๆ (Kornchunski, 1995) และได้เสนอวิธีการพิจารณาเลือกใช้ตัวควบคุมแบบเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นเพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของถังพักที่ใช้ โดยสามารถสรุปได้ว่าในกรณีถังพักที่ใช้มีขนาดเล็กควรเลือกใช้ตัวควบคุมพีไอแบบธรรมดา เนื่องจากถังขนาดเล็กไม่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงการไหลขาเข้าที่มากเกินไป การใช้ตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นจะทำให้ผลการตอบสนองที่ได้แย่ลง ส่วนในกรณีที่ถังพักที่ใช้มีขนาดใหญ่พอที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบขึ้นลงในการไหลขาเข้าได้อย่างเต็มที่ สามารถเลือกใช้ตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นชนิดใดก็ได้ตามต้องการ

และผลงานล่าสุดจากตัวควบคุมที่มีค่าเกนเป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาดที่เสนอขึ้นโดย Buckley (1986) ได้มีการเสนอความสัมพันธ์ในการปรับจูนอย่างง่ายเพื่อสะดวกในการใช้งานตัวควบคุมดังกล่าวขึ้น (Roy และ Smith, 1995) โดยตัวควบคุมที่ได้เสนอสมการการปรับจูนขึ้นได้แก่

- ตัวควบคุมพีและพีไอแบบเชิงเส้น (Linear P and PI Controllers)

- ตัวควบคุมพีและพีไอแบบไม่เชิงเส้นที่มีค่าเกนเป็นสัดส่วนกับความผิดพลาด (Nonlinear P and PI Controllers with gain proportional to error)
- ตัวควบคุมพีและพีไอแบบไม่เชิงเส้นที่มีเกนเป็นสัดส่วนกับความผิดพลาดยกกำลังสอง (Nonlinear P and PI Controllers with gain proportional to error squared)

โดยพิจารณาให้อัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุดมีค่าต่ำสุด (Min MRCO) เมื่อกำหนดค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) และได้ทำการพิจารณากระบวนการใน 2 รูปแบบ คือ

- พิจารณาถึงค่าแล็กของเวลา (Time-lag) ในกระบวนการ
- เมื่อค่าแล็กของเวลา (Time-lag) ในกระบวนการถูกละไว้

เพื่อช่วยในการตัดสินใจจึงได้มีการเสนอวิธีของการระบุหาระบบ (System Identification) หรับระบบการควบคุมระดับเพื่อใช้หาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองและได้พัฒนาเทอมไร้หน่วย (ΔT_m / $A\Delta H_{peak}$) ขึ้นซึ่งเทอมดังกล่าวแสดงถึงอัตราส่วนของค่าคงที่เวลาในระบบ (T_m) ต่อเวลาที่ต้องใช้ในลูพเปิดเมื่อเกิดการรบกวนแบบสเต็พในอัตราการไหลขาเข้า จะสังเกตได้ว่าค่าของเทอมไร้หน่วยที่สูงกว่า จะมีอิทธิพลต่อค่าคงที่ของเวลาในระบบควบคุมระดับมากกว่าและขนาดของถังควรจะนำมาพิจารณาในการหาค่าเกนของตัวควบคุม โดยเมื่อเทอมดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 0.4 สามารถละค่าคงที่ของเวลาได้ พบว่าวิธีการปรับจูนตัวควบคุมที่ได้เสนอขึ้นสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

จะเห็นได้ว่างานวิจัยในช่วงที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยที่แตกต่างกันไปในหลายรูปแบบ โดยตัวควบคุมแต่ละประเภทก็ย่อมมีความเหมาะสมและมีสมรรถนะในการใช้งานแตกต่างกันออกไป ซึ่งในทางปฏิบัติจริงแล้วตัวควบคุมบางชนิดอาจไม่สะดวกในการพัฒนาขึ้นมาใช้งาน เนื่องจากมีความซับซ้อนเกินไป สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งไปในด้านการเลือกเอาตัวควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ยชนิดต่าง ๆ ที่ได้เลือกไว้จากผลงานที่ได้เสนอขึ้นมาทำการเปรียบเทียบและทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมดังกล่าว โดยเขียนโปรแกรมการควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ยเมื่อมีตัวควบคุมชนิดต่าง ๆ จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์แม็ทแลบ (MATLAB) เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้ตัวควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ยชนิดต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิตทางเคมีต่อไป