การสร้างแบบจำลองกระบวนการจากข้อมูลการทดลอง เพื่อใช้สำหรับออกแบบระบบควบคุมกระบวนการ

ฉัตรชัย กันยาวุธ[1]

บทนำ

โดยทั่วไปแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการที่อยู่ในรูปของชุดสมการเชิงอนุพันธ์นั้นได้ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการอนุรักษ์มวลและพลังงานรอบกระบวนการโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเข้าของกระบวนการ (Process input variable) กับตัวแปรออกของกระบวนการ (Process output variable) และพฤติกรรมของการตอบสนองของกระบวนการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าหรือภาระรบกวนภายนอก (External Disturbance) อย่างไรก็ตามการสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการโดยใช้เพียงแค่หลักการอนุรักษ์มวลและพลังงานของกระบวนการนั้นมีข้อจำกัดเนื่องจากแบบจำลองกระบวนการที่ได้นั้นมักจะถูกแสดงโดยสมการคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนทั้งนี้เป็นผลมาจากคุณลักษณะโดยธรรมชาติของกระบวนการ เช่น การอธิบายพฤติกรรมการตอบสนองของหอกลั่นลำดับส่วนแบบต่อเนื่องที่มีชั้นรองรับของเหลว (Tray) ภายในหอกลั่นจำนวน 50 ชั้นเพื่อใช้ในการแยกของเหลวผสมที่มีองค์ประกอบย่อยจำนวน 10 องค์ประกอบนั้นจำเป็นจะต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบด้วยชุดสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งมีจำนวนสมการไม่น้อยกว่า 500 สมการ นอกจากนี้แล้วยังมีพารามิเตอร์ของแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการที่แสดงความสัมพันธ์เชิงอุณพลศาสตร์ ตัวอย่างเช่น ค่าการระเหยสัมพัทธ์ อัตราการถ่ายเทของกระบวนการ (หรือสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน) และประสิทธิภาพของชั้นแยกของเหลว-ไอ (ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีรูปสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมของชั้นรองรับของเหลวของหอกลั่น) ดังนั้นสำหรับกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีส่วนใหญ่แล้วเราจะพบว่ามีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงในขั้นตอนการประเมินหาค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการ (นอกเหนือไปจากการใช้เวลาค่อนข้างมากในการสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตกระบวนการและการแก้สมการของแบบจำลองกระบวนการเหล่านี้เพื่อหาผลเฉลยที่สามารถนำไปใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการตอบสนองของกระบวนการ) ซึ่งเราจะพบว่าค่าใช้จ่ายและเวลาที่ต้องใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการจะมากยิ่งขึ้นในกรณีที่ต้องการทำนายพฤติกรรมของการตอบสนองของกระบวนการให้มีความถูกต้องมาก ๆ และแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการที่เราสร้างขึ้นมานั้นก็จะต้องสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับหลายเงื่อนไขของการปฏิบัติการของกระบวนการผลิตจริง ๆ

บทความนี้จะได้อธิบายเกี่ยวกับหลักการและวิธีสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการจากข้อมูลการทดลองเพื่อหาผลการตอบสนองของกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมเคมีโดยใช้วิธีที่นิยมใช้ในการประเมินหาข้อมูลพื้นฐานของการตอบสนองของกระบวนการเพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับ แบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการที่ได้จะอยู่ในรูปของสมการที่เรียกว่าทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรออก (หรือตัวแปรกระบวนการที่

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

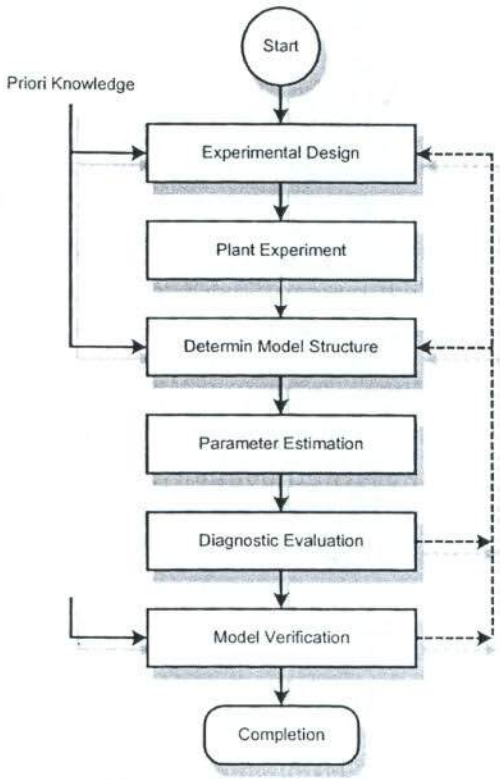
ต้องการควบคุม) กับตัวแปรเข้า (หรือตัวแปรกระบวนการที่เป็นภาระรบกวน) ที่ถูกเลือกมาหรือถูกกำหนดขึ้นโดยเฉพาะสำหรับกระบวนการที่กำลังถูกพิจารณาอยู่ ตัวอย่างเช่น การพิจารณาแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการที่ได้จากการทดลองหาผลการตอบสนองของกระบวนการในหอกลั่นลำดับส่วนแบบต่อเนื่องที่ได้อธิบายในข้างต้นนั้นเราจะสามารถวิเคราะห์หาได้เฉพาะลักษณะหรือแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของกระแสป้อนกลับ (Reflux rate) กับความเข้มข้นขององค์ประกอบย่อยใด ๆ ในของเหลวผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่น ในขณะที่แบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการที่สร้างขึ้นจากข้อมูลการทดลองของกระบวนการร่วมกับแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักเกณฑ์พื้นฐานของการอนุรักษ์มวลและพลังงานของกระบวนการนั้นจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบย่อยและอุณหภูมิของของเหลวผสมที่อยู่บนชั้นรองรับของเหลวในหอกลั่นกับอัตราการไหลของกระแสป้อนกลับ ดังนั้นแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการที่สร้างขึ้นโดยการใช้ข้อมูลการทดลองซึ่งจะได้อธิบายในที่นี้จะให้ข้อมูลของกระบวนการเท่าที่จำเป็นสำหรับใช้สำหรับการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการเท่านั้นไม่ได้ให้ข้อมูลมากเพียงพอที่จะสามารถนำไปใช้เพื่อการออกแบบกระบวนการทั้งหมดหรือเพื่อการวิเคราะห์หาความต้องการเฉพาะของกระบวนการ ด้วยเหตุผลนี้แบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการที่สร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลจากการทดลองจึง "ไม่สามารถ" นำมาใช้ทดแทนแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการพื้นฐานของการอนุรักษ์มวลและพลังงานของกระบวนการโดยเฉพาะในแง่ของการประยุกต์ใช้เกี่ยวกับงานทางด้านการออกแบบทางวิศวกรรมเคมีทุกประเภทได้อย่างสมบูรณ์ (ตัวอย่างเช่น การออกแบบกระบวนการ การออกแบบขนาดของอุปกรณ์กระบวนการ หรือการกำหนดเงื่อนไขหรือสภาวะที่เหมาะในการปฏิบัติการของกระบวนการ ฯลฯ)

โดยทั่วไปแล้วข้อมูลการตอบสนองเชิงพลวัตของกระบวนการที่จำเป็นสำหรับการสร้างแบบจำลองกระบวนการนั้นจะถูกประเมินหาได้จากการทำให้ตัวแปรเข้าของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงด้วยขนาดเพียงเล็กน้อยจากเงื่อนไขของการปฏิบัติการปกติของกระบวนการ ซึ่งวิธีทดสอบกระบวนการนี้จะต้องมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะสามารถทำให้ได้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้นของกระบวนการที่มีเงื่อนไขของการปฏิบัติการในย่านซึ่งอยู่รอบ ๆ เงื่อนไขของการปฏิบัติการปกติของกระบวนการซึ่งจะเห็นได้ในตอนหลังของบทความนี้ว่าทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่มีคุณลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นของกระบวนการหรือระบบเหล่านี้ซึ่งถูกสร้างจากข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการนั้นมีความถูกต้องมาเพียงพอที่จะนำไปใช้สำหรับการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการและการตรวจสอบประสิทธิภาพในการควบคุมกระบวนการของระบบควบคุมที่ถูกออกแบบไปแล้ว

สำหรับการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการที่มีคุณลักษณะเป็นแบบหนึ่งตัวแปรเข้าหนึ่งตัวแปรออกนั้นค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการที่หาได้จากข้อมูลของการตอบสนองของกระบวนการนั้นควรจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ภายในช่วงระหว่าง $\pm 20\%$ ของค่าจริง ในขณะที่การออกแบบระบบควบคุมกระบวนการที่มีคุณลักษณะเป็นแบบหลายตัวแปรเข้าและหลายตัวแปรออกนั้นมีระดับของความต้องการในประเด็นของความถูกต้องในการคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการค่อนข้างมาก

การสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการจากผลการตอบสนองของกระบวนการนั้นจะเกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองเพื่อให้ทำกระบวนการที่ถูกทดสอบนั้นมีการตอบสนองเชิงพลวัตในระหว่างที่มีการรบกวนกระบวนการ ดังนั้นความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกระบวนการจะขึ้นอยู่กับหลักการที่ใช้ในการออกแบบการทดลองและการสร้

สมการให้สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้ (Model fitting) การวิเคราะห์หาคุณลักษณะของกระบวนการโดยใช้วิธีเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการ (Process reaction curve method, PRC) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและนิยมใช้ทั่วไป โดยอาศัยการวิเคราะห์กราฟเส้นโค้งซึ่งมีลักษณะที่สอดคล้องหรือใกล้เคียงกับการตอบสนองของกระบวนการ เพื่อความสะดวกในการอธิบายในบทความนี้ "แบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการ" จะถูกเรียกสั้น ๆ ว่า "แบบจำลองกระบวนการ"

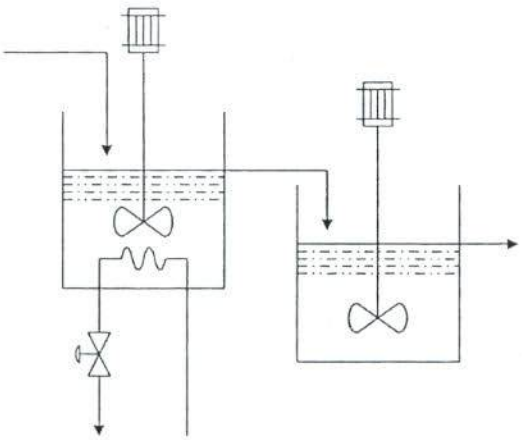


รูปที่ 1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองกระบวนการจากข้อมูลการทดลอง

1. การสร้างแบบจำลองกระบวนการจากข้อมูลการทดลอง

การทดลองเพื่อหาพฤติกรรมของการตอบสนองเชิงพลวัตของกระบวนการนั้นจะประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 1 เราจะพบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นจะถูกนำมาประเมินความน่าเชื่อถือและถูกนำมาทดสอบว่ามีความสอดคล้องกับแบบจำลองกระบวนการที่กำหนดขึ้นไว้ล่วงหน้าหรือไม่ และจะเห็นได้ว่าการทราบข้อมูลบางส่วนของกระบวนการก่อนนั้นเป็นเรื่องที่มีความจำเป็นทั้งนี้เพื่อใช้ในการวางแผนการทดลอง ดังนั้นจะมีหลายกรณีที่มีความจำเป็นต้องทำการทดลองแบบวนซ้ำซึ่งแสดงโดยเส้นประในรูปที่ 1 เมื่อการทดลองบรรลุขั้นตอนสุดท้ายของแผนการทดลองที่ได้ถูกกำหนดขึ้นแล้วเราก็จะได้แบบจำลองกระบวนการที่มีความถูกต้องเพียงพอหรืออย่างน้อยที่สุดควรจะทราบว่าแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นมานั้นไม่สามารถนำใช้สำหรับทำนายพฤติกรรมของการตอบสนองของกระบวนการได้ในระดับที่น่าพอใจ และถ้าเป็นเช่นนั้นก็มีความจำเป็นที่จะต้องกลับไปเริ่มต้นทำการทดลองใหม่

เพื่อความง่ายในการทำความเข้าใจในที่นี้จะได้อธิบายวิธีสร้างแบบจำลองกระบวนการจากข้อมูลการทดลองโดยการพิจารณาจากกระบวนการตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งกระบวนการตัวอย่างนี้ประกอบด้วยถังที่มีใบกวนเชิงกลจำนวน 2 ถังเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมชนิดไม่มีปฏิกิริยาภายในโดยที่ถังกวนลำดับที่ 1 มีระบบให้ความร้อนโดยใช้น้ำมันร้อนไหลอยู่ภายในท่อ แบบจำลองกระบวนการที่จะสร้างขึ้นนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหรือขนาดของการเปิดวาล์วควบคุมกระแสการไหลของน้ำมันร้อน (ถังกวนลำดับที่ 1) กับอุณหภูมิของของเหลวในกระแสที่ไหลออกจากถังกวนลำดับที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการตัวอย่างสำหรับการสร้างแบบจำลองกระบวนการจากข้อมูลการทดลอง

1.1 การออกแบบการทดลอง (Experimental design)

สิ่งที่มีความสำคัญที่มักจะถูกมองข้ามบ่อย ๆในการสร้างแบบจำลองกระบวนการ คือ การออกแบบการทดลองที่เหมาะสม ประเด็นที่สำคัญที่เราจะต้องเข้าใจ คือ ไม่ว่าจะเลือกใช้วิธีการใดก็ตามที่สามารถวิเคราะห์หาการตอบสนองของกระบวนการเรามีความจำเป็นต้องทราบเกี่ยวกับรูปแบบหรือลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่มีรูปแบบเฉพาะบางลักษณะของตัวแปรเข้าของกระบวนการ ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดลอง เงื่อนไขหรือสภาวะที่ใช้เป็นฐานในการปฏิบัติการของกระบวนการ (ซึ่งมีความจำเป็นต้องทราบข้อมูลนี้เพื่อนำไปใช้ในการหาเงื่อนไขรอบ ๆ จุดหรือสภาวะที่แบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นมานั้นจะสามารถทำนายการตอบสนองของกระบวนการจริงได้อย่างถูกต้อง) และขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าของกระบวนการจะต้องถูกกำหนดขึ้นให้เหมาะสมและจะต้องเป็นขนาดที่ไม่มากเพื่อที่จะไม่ก่อให้เกิดเงื่อนไขในการปฏิบัติการที่ไม่ปลอดภัยและไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงมีความสำคัญที่จะต้องเริ่มต้นทำการทดลองโดยกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าของกระบวนการนั้นมีขนาดที่ไม่มากเพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อความปลอดภัย (แทนที่จะกำหนดให้ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าที่จะทำให้การตอบสนองของกระบวนการนั้นเกิดขึ้นค่อนข้างรุนแรง)

ในการออกแบบการทดลองนั้นจำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการและแนวโน้มของการตอบสนองของกระบวนการ โดยทั่วไปแล้วข้อมูลกระบวนการเหล่านี้สามารถประเมินหาได้จากเงื่อนไขของการทดลองที่เคยใช้ในการปฏิบัติการผลิตจริงก่อนหน้าที่จะมีการออกแบบการทดสอบกระบวนการในกรณีที่ไม่มีข้อมูลกระบวนการเหล่านี้ก็อาจจะต้องทำการทดลองขั้นต้นก่อน สำหรับกระบวนการตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2 นั้นเวลาคงที่ของกระบวนการ (Process time constant[2]) ของแต่ละถังนั้นสามารถที่จะนำมาใช้ในการประเมินการตอบสนองของกระบวนการโดยรวมได้ ดังนั้นการออกแบบการทดลองจะทำให้มีแผนในการดำเนินการทดสอบกระบวนการซึ่งจะรวมไปถึง

1. รายละเอียดที่เป็นพื้นฐานของเงื่อนไขในการปฏิบัติการ
2. ลักษณะของการรบกวนกระบวนการหรือรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้า
3. รายละเอียดเกี่ยวกับตัวแปรออกของกระบวนการที่ต้องการจะวัด และความถี่ของการวัด
4. การประเมินช่วงของระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดลอง

เมื่อพิจารณาจากธรรมชาติการปฏิบัติการของกระบวนการในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีทั่วไปนั้น แผนการทดลองเพื่อใช้ในการหาข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการควรจะต้องถูกกำหนดขึ้นโดยการพิจารณาร่วมกันระหว่างวิศวกรและพนักงานทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระบวนการผลิตทั้งนี้เพื่อทำให้มั่นใจได้ว่าการทดลองนี้จะไม่รบกวนกิจกรรมอื่น ๆ ของกระบวนการผลิตภายในโรงงาน

1.2 การทดลองในโรงงาน (Plant experimental)

ในการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการนั้นควรจะทำภายใต้สภาวะที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกับแผนการทดลองที่ได้กำหนดขึ้นล่วงหน้าให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และต้องตระหนักอยู่เสมอว่าในขณะที่ทำการทดลองนั้นไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงสภาวะของการปฏิบัติการได้ ในกรณีที่การรบกวนกระบวนการนั้นมีขนาดมาก ๆ จะทำให้ผลการทดลองบันทึกที่ได้นั้นไม่น่าเชื่อถือ ดังนั้นสภาวะของการปฏิบัติการในโรงงานจึงควรจะต้องถูกตรวจสอบอยู่ตลอดเวลาในระหว่างที่ทำการทดลองหาพฤติกรรมของการตอบสนองของกระบวนการ เนื่องจากการทดลองนั้นถูกกำหนดขึ้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเข้ากับตัวแปรออกของกระบวนการ และถ้าหากว่ามีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าอื่น ๆ เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองจะทำให้ข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการที่ได้นั้นไม่มีเสถียรภาพสำหรับการวิเคราะห์หาแบบจำลองกระบวนการ ถ้าเป็นไปได้แล้วควรจะทำการตรวจสอบ

[2] เวลาที่กระบวนการตอบสนองต่อการกระตุ้นหรือการทดสอบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวแปรเข้า

เงื่อนไขหรือสภาวะของการปฏิบัติการของกระบวนการในระหว่างที่ทำการทดลองโดยใช้อุปกรณ์วัดและส่งสัญญาณที่ถูกติดตั้งอยู่ในกระบวนการร่วมกับแหล่งข้อมูลอื่นๆ เช่น เครื่องมือหรืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของสารเคมีในห้องปฏิบัติการในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์วัดและส่งสัญญาณสำหรับกระบวนการตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2 นั้นจะพบว่าตัวแปรกระบวนการ เช่น อุณหภูมิของของเหลวในกระแสป้อนเข้าของถังใบที่ 1 นั้นจะมีผลกระทบต่ออุณหภูมิของของเหลวในกระแสไหลออกของถังใบที่ 2 ดังนั้นอุณหภูมิของของเหลวในกระแสทั้งสองควรจะต้องถูกตรวจสอบเพื่อให้มั่นใจว่ามีค่าคงที่และอยู่ในช่วงของค่าที่ถูกกำหนดขึ้นสำหรับใช้เพื่อทำการทดลองหาผลการตอบสนองของกระบวนการ

1.3 การหาโครงสร้างของแบบจำลองกระบวนการ (Determining model structure)

ปัจจุบันนี้การประเมินหาค่าของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการที่ถูกกำหนดขึ้นนั้นสามารถทำได้หลายวิธี อย่างไรก็ตามมีเพียงไม่กี่วิธีเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้ในการหาโครงสร้างของแบบจำลองกระบวนการได้ง่ายๆ โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองเพียงอย่างเดียว โดยทั่วไปแล้วเราจะต้องกำหนดโครงสร้างของแบบจำลองกระบวนการขึ้นมาก่อนจากนั้นจึงทำการประเมินข้อสมมติฐานนั้น

โครงสร้างของแบบจำลองกระบวนการที่ถูกกำหนดขึ้นในขั้นต้นนั้นจะทำได้โดยอาศัยความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับหน่วยปฏิบัติการ (Unit operations) หรืออาจจะถูกกำหนดขึ้นโดยอาศัยแบบจำลองกระบวนการพื้นฐานทั่วไป (Basic process) และอาจจะถูกกำหนดขึ้นโดยอาศัยข้อมูลการตอบสนองที่เพิ่งได้จากการทดลอง ข้อสมมติฐานเกี่ยวกับโครงสร้างของกระบวนการนั้นจะถูกตรวจสอบในขั้นตอนของการวิเคราะห์เพื่อหาความสอดคล้องระหว่างข้อมูลของการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองกระบวนการที่กำหนดขึ้น จุดมุ่งหมายในการกำหนดโครงสร้างของแบบจำลองกระบวนการในขั้นตอนนี้ไม่ได้มุ่งไปที่การได้มาซึ่งแบบจำลองกระบวนการที่มีไว้สามารถนำมาใช้เพื่อการทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการได้ถูกต้องหรือแม่นยำมากที่สุด (ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการทดลอง) แต่จุดประสงค์หลักที่ต้องการ คือ แบบจำลองกระบวนการที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเข้ากับตัวแปรออกของกระบวนการได้ถูกต้องเพียงพอสำหรับการนำไปใช้เพื่อการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการ

โครงสร้างของแบบจำลองกระบวนการนั้นนิยมกำหนดให้มีรูปที่เป็นแบบจำลองของระบบที่มีอันดับต่ำๆ ที่มีเวลาเฉื่อย โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองกระบวนการของระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเฉื่อย (First order plus dead time system) นั้นสามารถอธิบายพฤติกรรมของการตอบสนองของกระบวนการเคมีหลายประเภทได้ในระดับซึ่งเป็นที่น่าพอใจและถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการแบบป้อนกลับ ในกรณีที่มีความจำเป็นต้องกำหนดให้โครงสร้างของแบบจำลองกระบวนการนั้นเป็นแบบระบบอันดับสูงนั้นการทดลองหาผลการตอบสนองของกระบวนการให้มีความสอดคล้องกับแบบจำลองกระบวนการนั้นทำได้โดยใช้วิธีของ Box และ Jenkin[3]

1.4 การประเมินหาค่าของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ (Parameter estimation)

เมื่อถึงขั้นตอนนี้แสดงว่าเรามีโครงสร้างของแบบจำลองกระบวนการที่เหมาะสมและมีการเก็บข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการจากการทดลองเรียบร้อยแล้ว ในที่นี้จะได้อธิบายเฉพาะวิธีการประเมินหาค่าของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ (ซึ่งถูกเขียนอยู่ในรูปของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการโดยรวม) โดยใช้วิธีเส้นโค้งการตอบสนอง ซึ่งค่าของพารามิเตอร์ที่ประเมินได้นี้เมื่อนำมาแทนลงในแบบจำลองกระบวนการที่แสดงอยู่ในรูปของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันนั้นจะทำให้สามารถทำนายพฤติกรรมของการตอบสนองของกระบวนการที่มีผลลัพธ์ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการตอบสนองของ

[3] Box, G. and Jenkins, K., "*Time Series Analysis: Forecasting and Control*", Holden Day, Oakland, CA, 1976.

กระบวนการ สำหรับกรณีที่กำหนดให้โครงสร้างของแบบจำลองกระบวนการอยู่ในรูปของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเฉื่อยนั้นค่าของพารามิเตอร์ของกระบวนการที่จะต้องประเมินหามีจำนวน 3 เทอม คือ อัตราขยายเชิงสถิตของกระบวนการ (K) เวลาคงที่ของกระบวนการ ($t_{process}$) และเวลาเฉื่อยของการตอบสนองของกระบวนการ (t_d)

1.5 การประเมินคุณค่าของแบบจำลองกระบวนการ (Diagnostic evaluation)

ก่อนที่จะนำแบบจำลองกระบวนการที่ได้ไปใช้เพื่อการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการนั้นจะต้องทำการประเมินคุณค่าของระดับความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการหลังจากที่แทนค่าของพารามิเตอร์ที่ประเมินหาได้จากขั้นตอนที่แล้ว โดยทั่วไปแล้วการประเมินคุณค่าของระดับความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการนั้นจะทำได้ 2 วิธี คือ

1. เปรียบเทียบการตอบสนองของกระบวนการที่คำนวณได้จากแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นกับการตอบสนองของกระบวนการที่วัดได้จากการทดลอง
2. เปรียบเทียบการตอบสนองของกระบวนการที่คำนวณได้จากแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นกับข้อสมมติฐานใด ๆ ที่ใช้ในการประเมินแบบจำลองกระบวนการ

1.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการ (Model verification)

ขั้นตอนสุดท้ายของการสร้างแบบจำลองกระบวนการจากข้อมูลการตอบสนองของการทดลอง คือ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการโดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลเพิ่มเติม ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินหาค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ ถึงแม้ว่าขั้นตอนนี้จะไม่มีความจำเป็นที่จะต้องทำเสมอไปแต่ก็มีประโยชน์ที่จะเปรียบเทียบผลการทำนายที่คำนวณได้จากแบบจำลองกระบวนการกับข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการที่วัดได้ที่เวลาอื่น ๆ ทั้งนี้เพื่อที่จะสร้างความมั่นใจว่าการแปรเปลี่ยนที่มีลักษณะทั่ว ๆ ไปของเงื่อนไขในการปฏิบัติการของกระบวนการจริง ๆ นั้นผลกระทบไม่มากต่อการลดลงของความแม่นยำของแบบจำลองกระบวนการที่เราสร้างขึ้นมา ซึ่งแบบจำลองกระบวนการที่ถูกนำมาวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้จะเป็นแบบจำลองกระบวนการที่ถูกใช้ในขั้นตอนการประเมินคุณค่าของแบบจำลองกระบวนการ กล่าวโดยสรุปแล้วแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นจากข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการทดลองนั้นจะแสดงความสัมพันธ์เฉพาะตัวแปรที่รบกวนกระบวนการกับการตอบสนองของตัวแปรออกของกระบวนการที่ถูกสนใจหรือกำลังพิจารณาอยู่เท่านั้น ซึ่งประเด็นที่สำคัญคือ จะต้องเข้าใจอยู่เสมอว่ากระบวนการโดยรวมที่ถูกทดสอบนั้นได้มีการพิจารณารวมเอาอุปกรณ์กระบวนการต่าง ๆ (เช่น วาล์วควบคุม เครื่องมือและอุปกรณ์กระบวนการ เซ็นเซอร์/ทรานสมิตเตอร์ ฯลฯ) ที่อยู่ระหว่างตัวแปรเข้ากับตัวแปรออกของกระบวนการเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นข้อมูลการตอบสนองโดยรวมของกระบวนการที่ได้จากการทดสอบนั้นจะสามารถนำมาใช้เพื่อการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการเนื่องจากข้อมูลที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการนั้นได้รวมเอาข้อมูลของอุปกรณ์หลัก ๆ ของวงควบคุมกระบวนการเข้าไว้ด้วยกันแล้ว อย่างไรก็ตามเราจะต้องเข้าใจและไม่ลืมว่าการดำเนินการทดลองเพื่อหาข้อมูลของผลการตอบสนองของกระบวนการโดยทั่ว ๆ ไปนั้นมักจะมีข้อขัดแย้งเกิดขึ้นเสมอระหว่างความต้องการที่จะทำให้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ทั้ง 2 ประการ ดังนี้

1. รักษาสภาวะการปฏิบัติการให้มีความปลอดภัยและมีผลกำไร (ถึงแม้ว่าจะมีการรบกวนกระบวนการเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าที่มีขนาดไม่มาก)
2. กำหนดลักษณะของการรบกวนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการที่มีความถูกต้องมาก ๆ สำหรับการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการ (ซึ่งมักจะได้จากการที่กำหนดให้การรบกวนกระบวนการนั้นเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าซึ่งมีขนาดค่อนข้างมาก)

ดังนั้นวิธีการทดลองที่เหมาะสมควรจะต้องสามารถรักษาสมดุลระหว่างวัตถุประสงค์ทั้ง 2 ประการ

ไว้ให้ได้ที่ระดับหนึ่ง ๆ กล่าวคือ กำหนดให้มีการรบกวนกระบวนการภายในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ เพื่อที่เงื่อนไขของการปฏิบัติการของกระบวนการในช่วงเวลาถัดมาสามารถจะถูกปรับให้เข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตได้ (เนื่องจากกระบวนการมีระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพ)

2. วิธีเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการ

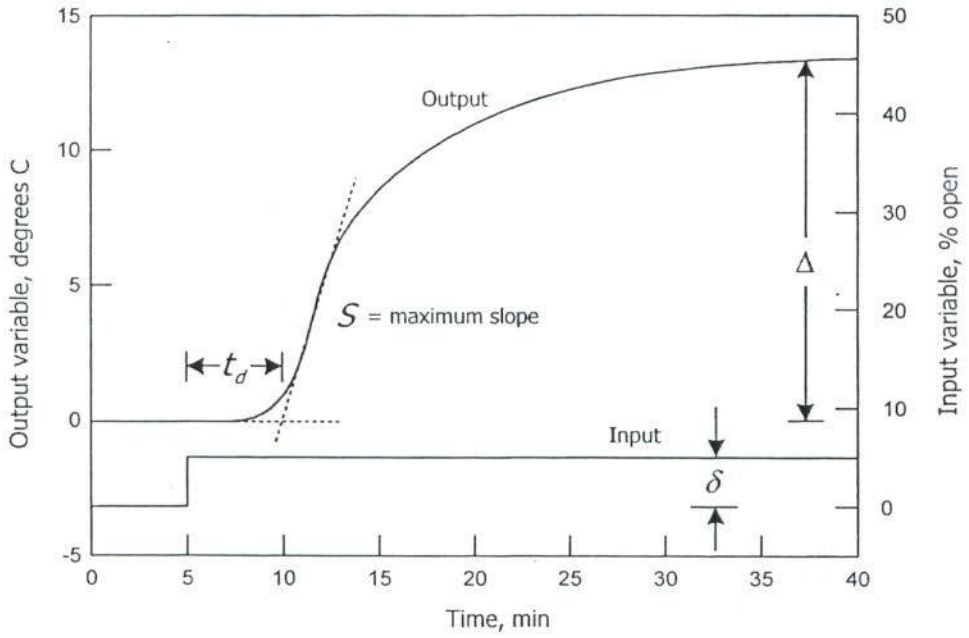
จากที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้นวิธีเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการเป็นวิธีที่ค่อนข้างง่ายและเป็นวิธีที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์หาแบบจำลองกระบวนการเคมี เนื่องจากแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นโดยวิธีนี้มีความแม่นยำเพียงพอในการประยุกต์ใช้สำหรับการอธิบายพฤติกรรมของการตอบสนองของหลาย ๆ กระบวนการเคมี สำหรับวิธีเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการนั้นจะสมมติให้กระบวนการที่กำลังถูกพิจารณาอยู่นั้นมีลักษณะเป็นแบบระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเฉื่อยโดยทั่วไปแล้วการประเมินหาค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. รอจนกระทั่งกระบวนการเข้าสู่สภาวะเชิงสถิต
2. ทำให้ตัวแปรเข้าของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับ(อย่างสมบูรณ์)
3. บันทึกข้อมูลของการตอบสนองของตัวแปรเข้าและตัวแปรออกของกระบวนการและรอจนกระทั่งกระบวนการเข้าสู่สภาวะเชิงสถิตใหม่จึงยุติการบันทึกข้อมูล
4. ดำเนินการคำนวณหาข้อมูลกระบวนการจากเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากขั้นตอนที่ 3

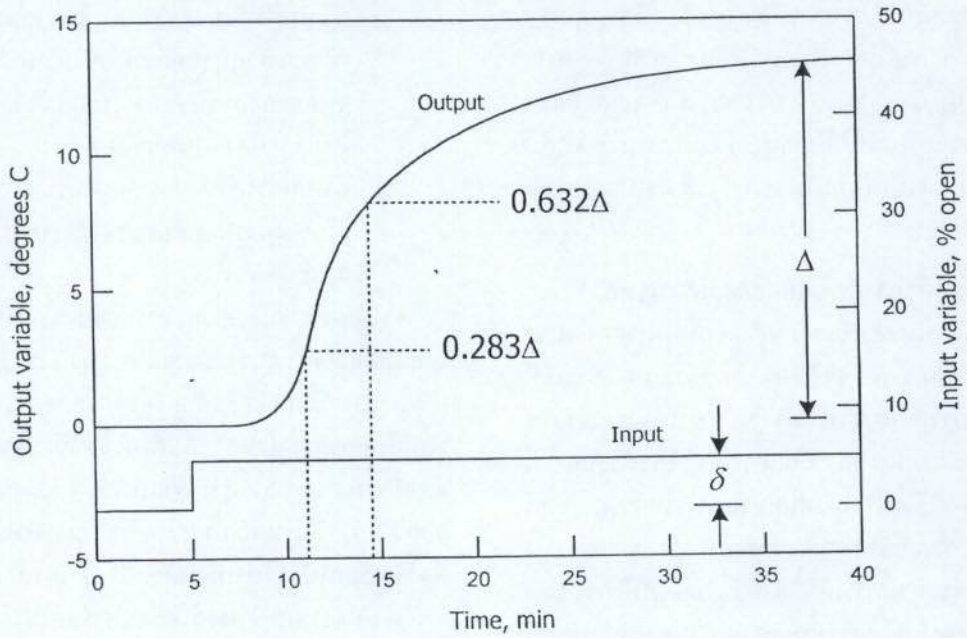
ค่าของพารามิเตอร์ของกระบวนการที่คำนวณได้โดยวิธีเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการนั้นจะเป็นค่าของพารามิเตอร์ (ซึ่งมี 3 เทอม) ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเวลาเฉื่อยซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเข้า $X'(s)$ กับตัวแปรออก $Y'(s)$ ซึ่งตัวแปรทั้ง 2 เทอมของกระบวนการนี้จะต้องถูกเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรเบี่ยงเบน (Derivative variable) ดังแสดงได้โดยสมการต่อไปนี้

$$G(s) = \frac{Y'(s)}{X'(s)} = \frac{Ke^{-t_d s}}{\tau s + 1} \qquad (1)$$

การคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการที่แสดงในสมการที่ (1) โดยวิธีเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการนั้นสามารถทำได้ 2 วิธีซึ่งมีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย



รูปที่ 3 เส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการสำหรับการคำนวณโดยใช้วิธีที่ 1



รูปที่ 4 เส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการสำหรับการคำนวณโดยใช้วิธีที่ 2

วิธีที่ 1

เป็นวิธีที่ประยุกต์มาจากวิธีของ Ziegler & Nichols[4] ซึ่งเป็นการคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการโดยใช้เส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการที่รูปร่างโดยทั่วไปดังเช่นแสดงในรูปที่ 3 (ซึ่งเป็นผลการตอบสนองของกระบวนการของถังกวนที่มีระบบให้ความร้อนที่แสดงในรูปที่ 2) ข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการ คือ

1. ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้า δ
2. ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรออก Δ (จากสภาวะเชิงสถิตเดิมเข้าสู่สภาวะเชิงสถิตใหม่)
3. ความชันของเส้นโค้งการตอบสนอง S ที่มีค่าที่มากที่สุด

ซึ่งค่าของพารามิเตอร์ขั้นต้นทั้ง 3 เทอม (δ, Δ และ S) ที่ประเมินหาได้จากข้อมูลเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการนี้จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการที่กำลังถูกพิจารณาโดยทั่วไปแล้วสำหรับการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันระดับของตัวแปรเข้าในกรณีที่ $t \geq t_d$ นั้น แบบจำลองกระบวนการประเภทนี้จะมีรูปสมการดังต่อไปนี้

$$Y''(t) = K\delta[1 - e^{-(t-t_d)/\tau}] \qquad (2)$$

ความชันของเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการที่เวลาใดๆ ที่เวลา $t \geq t_d$ นั้นสามารถคำนวณหาได้จากการหาอนุพันธ์ของ $y'(t)$ เทียบกับเวลา t

$$\frac{dY'(t)}{dt} = \frac{d}{dt}\left(K\delta[1 - e^{-(t-t_d)/\tau}]\right) = \frac{\Delta}{\tau}e^{-(t-t_d)/\tau} \qquad (3)$$

ความชันที่มีค่ามากที่สุดของเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการจะเกิดขึ้นที่เวลา $t = t_d$ ดังนั้นจากสมการที่ (3) จะได้ $S = \Delta/\tau$ และพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

[4] Ziegler, J. and Nichols, N., "*Optimum Settings for Automatic Controllers*", *Trans. ASME*, 64, pp.759-768, 1942.

$$K = \frac{\Delta}{\delta} \quad (4ก)$$

$$\tau = \frac{\Delta}{S} \quad (4ข)$$

และเวลาเฉื่อยของการตอบสนองของกระบวนการ t_d คือ เวลาที่วัดจากเวลาที่เริ่มต้นมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าของกระบวนการแบบฟังก์ชันระดับถึงเวลาที่ความชันที่มีค่ามากที่สุดของเส้นโค้งการตอบสนองนั้นตัดแนวเส้นที่แสดงค่าของตัวแปรออกของกระบวนการที่สภาวะเชิงสถิตเริ่มต้น (ดังแสดงในรูปที่ 3)

วิธีที่ 2

เป็นการคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการโดยใช้เส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งข้อมูลขั้นต้นที่ได้จากเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการ คือ

1. ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้า δ
2. ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรออก Δ (จากสภาวะเชิงสถิตเดิมเข้าสู่สภาวะเชิงสถิตใหม่
3. เวลาที่ตัวแปรออกมีค่าเท่ากับ 28.3% และ 63.2% ของค่าสุดท้าย (ที่สภาวะเชิงสถิตใหม่)

ที่เวลาต่าง ๆ ค่าของตัวแปรออกของกระบวนการที่แสดงในรูปที่ 4 นั้นจะสอดคล้องกับสมการที่ (2) โดยทั่วไปแล้วที่เวลาใด ๆ ของการตอบสนองของกระบวนการสามารถที่จะถูกเลือกมาใช้เพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ทั้ง 2 เทอม คือ t_d และ τ ก็ได้ อย่างไรก็ตามเวลาของการตอบสนองของกระบวนการที่นิยมเลือก คือ เวลาที่การตอบสนองแบบชั่วขณะของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้ได้ค่าของพารามิเตอร์ของ t_d และ τ ของกระบวนการที่มีความถูกต้องค่อนข้างมากถึงแม้ว่าจะมีสัญญาณรบกวนปรากฏรวมอยู่ในสัญญาณของตัวแปรออกที่วัดได้ (Smith[5], 1972) สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ทั้ง 2 เทอมสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$Y'(t_d + \tau) = \Delta(1 - e^{-1}) = 0.632\Delta \quad (5ก)$$

$$Y'(t_d + \tau/3) = \Delta(1 - e^{-1/3}) = 0.283\Delta \quad (5ข)$$

ดังนั้นเวลาที่ตัวแปรออกมีค่าเท่ากับ 28.3% และ 63.2% ของค่าสุดท้ายจะถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ t_d และ τ ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ

จากสมการที่ (5ก) และสมการที่ (5ข) จะได้

$$t_{28.3\%} = t_d + \frac{\tau}{3} \quad (6ก)$$

$$t_{63.2\%} = t_d + \tau \quad (6ข)$$

ดังนั้นโดยการแก้สมการทั้งสอง จะได้

$$\tau = 1.5(t_{63.2\%} - t_{28.3\%}) \quad (7ก)$$

$$t_d = t_{63.2\%} - \tau \quad (7ข)$$

ในทางทฤษฎีแล้วค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการที่คำนวณหาได้จากการใช้ทั้ง 2 วิธีนั้นควรจะมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามสำหรับวิธีแรกนั้นเราจะต้องคำนวณหาความชันที่มีค่ามากที่สุดของสัญญาณของตัวแปรออกที่วัดได้ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการ ซึ่งการหาความชันที่มีค่ามากที่สุดนั้นทำได้ค่อนข้างยากโดยเฉพาะในกรณีที่สัญญาณของตัวแปรออกที่วัดได้นั้นมีสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูง ๆ ปนมาด้วยซึ่งจะทำให้การคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก ดังนั้นการคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันกระบวนการโดยวิธีเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการจึงนิยมใช้วิธีที่ 2 มากกว่าวิธีแรก และอัตราขยายเชิงสถิตของกระบวนการ K ของวิธีที่ 2 นั้นสามารถคำนวณหาได้โดยใช้สมการที่ (4ก)

[5] Smith, C., "*Digital Computer Process Control*", Intext Education Publishers, Scranton, PA, 1972.

4. ตัวอย่างการประเมินหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการจากข้อมูลการทดลอง

สำหรับระบบกระบวนการที่แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งมีผลการการตอบสนองของอุณหภูมิของของเหลวในกระแสไหลออกต่อการเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับของขนาดของการเปิดวาล์วควบคุม (ซึ่งเป็นผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของกระแสน้ำมันร้อน) ดังแสดงในรูปที่ 3 (สำหรับการคำนวณโดยใช้วิธีที่ 1) และแสดงในรูปที่ 4 (สำหรับการคำนวณโดยใช้วิธีที่ 2) โดยการกำหนดให้กระบวนการนี้มีพฤติกรรมการตอบสนองแบบระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเฉื่อย การประเมินหาค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการตัวอย่างสามารถทำได้ดังนี้

วิธีที่ 1 จากข้อมูลของการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3 ค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$\delta = 5.0\%$ open, $\Delta \approx 13.1^{o}\text{C}$,

$$K = \frac{\Delta}{\delta} = \frac{13.1^{o}\text{C}}{5.0\%\text{ open}} = 2.6\,\frac{^{o}\text{C}}{\%\text{ open}},$$

$$S \approx 2.25\,^{o}\text{C/min}, \quad \tau = \frac{\Delta}{S} = \frac{13.1^{o}\text{C}}{2.25\,^{o}\text{C/min}} = 5.82\ \text{min}$$

$t_d \approx 4.5$ min

เมื่อแทนค่าของพารามิเตอร์ทั้ง 3 เทอม (κ, τ และ t_d) ที่คำนวณได้ลงในของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการที่แสดงในสมการที่ (1) จะได้

$$G(s) = \frac{Y'(s)}{X'(s)} = \frac{2.6e^{-4.5s}}{5.82s+1} \qquad (8)$$

วิธีที่ 2 จากข้อมูลของการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4 ข้อมูลขั้นต้นของกระบวนการทั้ง 3 เทอม (δ, Δ และ κ) ที่ประเมินหาได้จากเส้นโค้งการตอบสนองนั้นจะมีค่าเช่นเดียวกับกรณีแรก ส่วนค่าของพารามิเตอร์ที่เหลือทั้ง 2 เทอม (τ และ t_d) ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการนั้นสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$0.632\Delta = 8.3^{o}\text{C} \quad \Rightarrow \quad t_{63.2\%} \approx 9.7$ min

$0.283\Delta = 3.7^{o}\text{C} \quad \Rightarrow \quad t_{28.3\%} \approx 6.5$ min

$\tau = 1.5(t_{63.2\%} - t_{28.3\%}) = 1.5(9.7 - 6.5) = 4.8$ min

$t_d = t_{63.2\%} - \tau = 9.7 - 4.8 = 4.9$ min

ดังนั้นเมื่อแทนค่าของพารามิเตอร์ทั้ง 3 เทอม (κ, τ และ t_d) ที่คำนวณได้ลงในทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการที่แสดงในสมการที่ (1) จะได้

$$G(s) = \frac{Y'(s)}{X'(s)} = \frac{2.6e^{-4.9s}}{4.8s+1} \qquad (9)$$

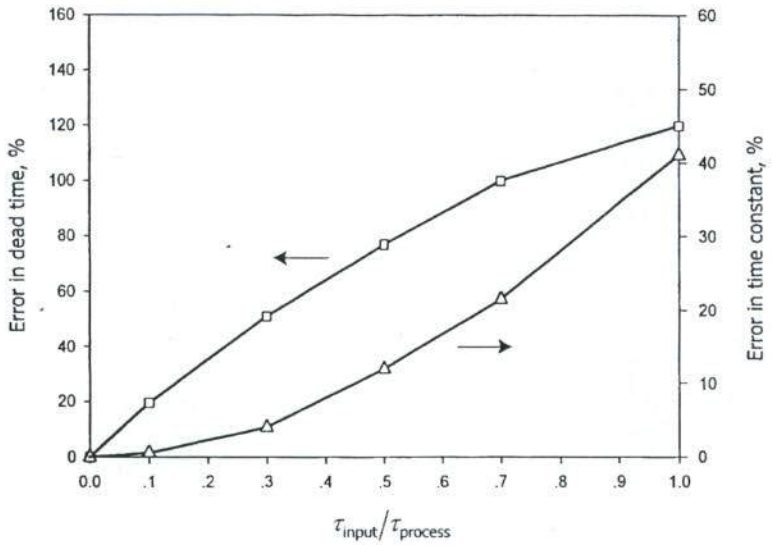
พิจารณาข้อมูลของกระบวนการที่ได้จากการวิเคราะห์เส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการที่ได้แสดงวิธีคำนวณหาในข้างต้นนั้นเมื่อเปรียบเทียบทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการที่คำนวณหาได้จากวิธีเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการทั้ง 2 วิธีดังแสดงในสมการที่ (8) และสมการที่ (9) จะพบว่ามีความแตกต่างกันของค่าของพารามิเตอร์ τ และ t_d ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันทั้ง 2 เทอม

หลังจากที่ได้แบบจำลองกระบวนการที่อยู่ในรูปทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเฉื่อยแล้วความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นจากผลการทดลองหาการตอบสนองของกระบวนการสำหรับกรณีของกระบวนการตัวอย่างที่ได้อธิบายในตัวอย่างนี้จะถูกวิเคราะห์โดยได้โดยการพิจารณาจากข้อกำหนดของหลักการสร้างแบบจำลองกระบวนการจากข้อมูลการทดลองทั้ง 6 ขั้นตอน

การออกแบบการทดลอง

สำหรับตัวอย่างนี้วิธีคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการนั้นถูกกำหนดจากพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับอย่างสมบูรณ์ (Perfect step change) ของตัวแปรเข้าและสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการตอบสนองของกระบวนการนั้นถูกกำหนดให้สอดคล้องกับสมการที่ (2) โดยทั่วไปแล้วตัวแปรเข้าสามารถถูกทำให้มีการ

เปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับได้เมื่อตัวแปรเทอมนี้ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ เช่น ร้อยละของการเปิดของวาล์วควบคุม อย่างไรก็ตามในการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการบางกรณีนั้นอาจจะมีความจำเป็นกำหนดให้สร้างแบบจำลองกระบวนการสำหรับกรณีที่ตัวแปรเข้าที่เป็นองค์ประกอบของของเหลวในกระแสป้อนเข้า ซึ่งในปฏิบัติแล้วไม่สามารถทำให้องค์ประกอบของของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับได้อย่างสมบูรณ์ไม่ว่ากรณีใด ๆ ดังนั้นระดับของความไวของการตอบสนองของกระบวนการที่ทำนายได้จากแบบจำลองกระบวนการนั้นจึงเป็นผลมาจากการเบี่ยงเบนออกไปจากเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงที่เป็นแบบฟังก์ชันระดับอย่างสมบูรณ์ของตัวแปรเข้าของกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นกรณีของกระบวนการจริงที่มีเวลาเฉื่อยเท่ากับ 0.5 และเวลาคงที่ของกระบวนการ ($t_{process}$) เท่ากับ 1.0 เมื่อกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับของของตัวแปรเข้าของระบบอันดับหนึ่งซึ่งเวลาคงที่ (t_{input}) ถูกทำให้แปรเปลี่ยนจาก 0.0 (สำหรับกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับอย่างสมบูรณ์) ถึง 1.0 กรณีศึกษานี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าถ้าขนาดของการเบี่ยงเบนออกจากเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงที่เป็นแบบฟังก์ชันระดับที่สมบูรณ์ของการเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับของตัวแปรเข้าด้วยขนาดที่ค่อนข้างมากนั้นจะมีผลทำให้แบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นจากข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการ (ที่ได้จากการทดลอง) นั้นมีขนาดของความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นค่อนข้างมาก โดยเฉพาะความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับเวลาเฉื่อยของกระบวนการที่คำนวณหาได้จากเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการ



รูปที่ 5 ความไวของเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับที่ไม่สมบูรณ์ของตัวแปรเข้าของกระบวนการจริงที่มี $t_d/(t_d+\tau) = 0.33$

ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าของกระบวนการก็มีความสำคัญค่อนข้างมากเช่นเดียวกันนอกเหนือไปจากการที่ลักษณะหรือรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าของกระบวนการจะมีผลกระทบต่อความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการจากที่กล่าวไปแล้วในข้างต้นการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้านั้นจะต้องมีขนาดเหมาะสมเพื่อที่จะทำให้ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรออกของกระบวนการมีค่าไม่น้อยจนเกินไป ถ้าขนาดของการเปลี่ยนของตัวแปรออกของกระบวนการมีค่าน้อย ๆ จะทำให้เราไม่สามารถระบุได้อย่างแน่นอนว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรออกของกระบวนการที่วัดได้นี้เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าหรือเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของหลาย ๆ ภาระรบกวนภายนอกของกระบวนการที่มีขนาดเล็ก ๆ หรือเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์วัดและส่งสัญญาณในวงควบคุมที่มีพฤติกรรมการตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (เช่น เซ็นเซอร์และทรานสมิตเตอร์ ฯลฯ) โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับของตัวแปรเข้าของกระบวนการที่มีขนาดมาก ๆ นั้นจะทำให้แบบจำลองกระบวนการมีความถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าของกระบวนการที่มีขนาดมาก ๆ นั้นก็จะมีผลกระทบที่ทำให้กระบวนการถูกรบกวนมากขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นหลักเกณฑ์คร่าว ๆ ที่นิยมใช้สำหรับการทดลองหาเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการคือ อัตราส่วนของสัญญาณของตัวแปรออกของกระบวนการที่ถูกวัดต่อสัญญาณรบกวนควรจะต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 5

ขนาดของสัญญาณรบกวนสามารถที่จะถูกประเมินหาได้จากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรออกเมื่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าที่วัดได้นั้นมีค่าคงที่ เช่น ถ้าอุณหภูมิของของเหลวในกระแสไหลออกมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ภายในช่วง $\pm 1^{\circ}C$ เนื่องจากสัญญาณรบกวน ดังนั้นขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าของกระบวนการควรจะมากเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรออก Δ มีค่าอย่างน้อยเท่ากับ $5^{\circ}C$

ช่วงของระยะเวลาสำหรับการทดลองหาการตอบสนองของกระบวนการนั้นควรจะถูกกำหนดขึ้นจากความต้องการที่ว่า "ตัวแปรออกของกระบวนการจะต้องเข้าสู่ค่าสุดท้ายที่สภาวะเชิงสถิตใหม่หลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับของตัวแปรเข้า" ดังนั้นระยะเวลาของการทดลองควรจะกำหนดให้มีค่าอย่างน้อยเท่ากับเวลาเฉลี่ยของกระบวนการบวกกับ 4 เท่าของเวลาคงที่ของกระบวนการ นั่นคือ $t_d + 4\tau$ สำหรับกรณีของกระบวนการของถังกวนที่แสดงในรูปที่ 2 นั้นช่วงของระยะเวลาที่ควรจะใช้ในการทดลองเพื่อหาผลการตอบสนองของกระบวนการนั้นอาจจะสามารถประเมินหาได้จากการนำเอาเวลาคงที่ของกระบวนการของถังทั้ง 2 ใบมาบวกเข้ากับเวลาของการตอบสนองของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนและเซ็นเซอร์ ถ้าข้อมูลของผลการตอบสนองของกระบวนการไม่ได้ถูกเก็บแบบต่อเนื่องความถี่หรือจำนวนครั้งในการเก็บข้อมูลก็ควรจะถูกกำหนดให้มากเพียงพอสำหรับการสร้างเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการโดยประมาณได้ เช่น จำนวนข้อมูลที่เก็บควรจะเป็น 40 จุด หรือมากกว่านั้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูง ๆ

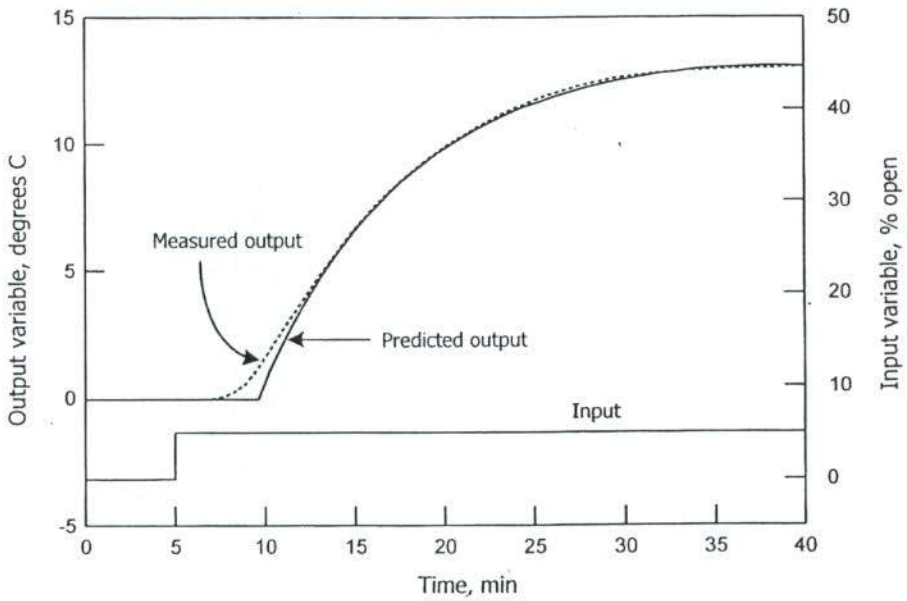
การทดลองในโรงงาน

ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกระบวนการนั้นอาจเพิ่มมากขึ้นได้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าของกระบวนการที่ไม่ได้ถูกวัดหรือถูกกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการทดลองควรจะถูกออกแบบให้มีเงื่อนไขที่เหมือนกันไม่ว่าจะมีการรบกวนกระบวนการเกิดขึ้นหรือไม่ วิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้ คือ การกำหนดให้เงื่อนไขของตัวแปรเข้าของกระบวนการที่ปรับเปลี่ยนนั้นมีค่าที่สภาวะสุดท้ายเท่ากับค่าที่สภาวะเริ่มต้น ซึ่งการทำเช่นนี้ในทางปฏิบัติแล้วอาจจะต้องกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับของตัวเข้าของกระบวนการมากกว่าหนึ่งครั้ง และต่อมาถ้าตัวแปรออกของกระบวนการสามารถกลับเข้าสู่ค่าเดิมที่สภาวะเริ่มต้นได้จะทำให้สามารถสมมติได้อย่างมีเหตุผลว่าการรบกวนที่มีลักษณะเป็นแบบระยะเวลานาน ๆ นั้นไม่เกิดขึ้นในกระบวนการที่กำลังถูกทดสอบ

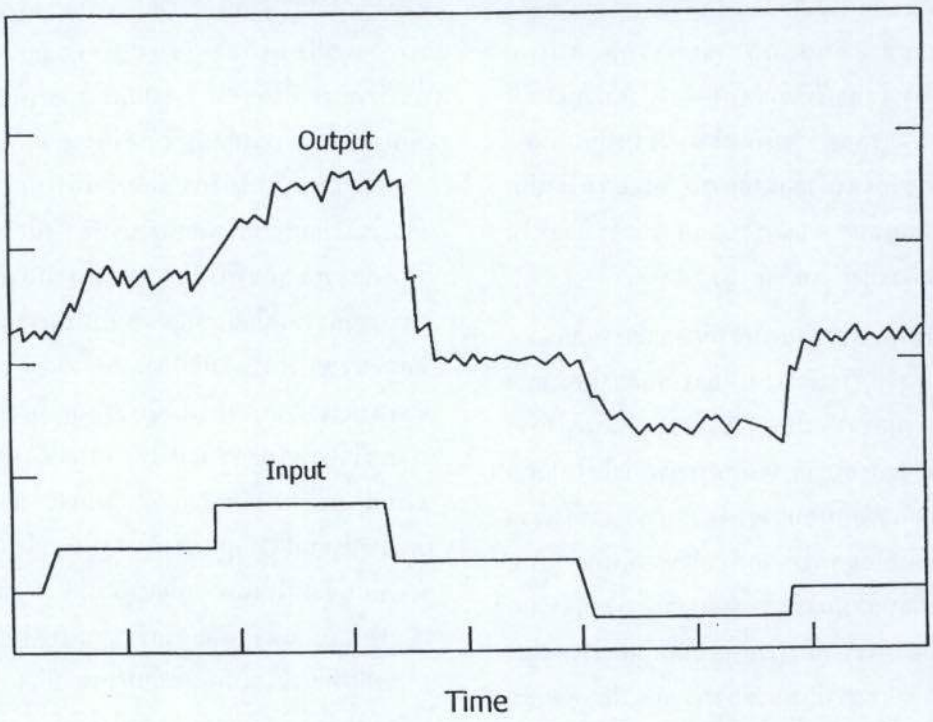
(ถึงแม้ว่าอาจจะมีการรบกวนแบบชั่วขณะเกิดขึ้นได้และไม่มีลักษณะที่เหมือนกันสำหรับการทดสอบโดยวิธีการเช่นนี้) ในกรณีที่ค่าสุดท้ายของตัวแปรออกนั้นมีความแตกต่างค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้น ก็ควรจะต้องตั้งข้อสงสัยว่าการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการน่าจะมีสิ่งที่ไม่ถูกต้องและควรทำการทดลองซ้ำ

การประเมินคุณค่าของแบบจำลองกระบวนการ

วิธีที่ง่ายที่สุดในการประเมินคุณค่าของแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นโดยการวิเคราะห์เส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการนั้นสามารถทำได้โดยการพล็อตข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลที่ได้จากการทำนายที่ได้จากแบบจำลองกระบวนการลงในกราฟเดียวกัน การพิจารณาว่าแบบจำลองกระบวนการที่ได้จากข้อมูลการทดลอง (เพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ) จะมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใดนั้นสามารถพิจารณาได้จากการเปรียบเทียบว่าเส้นโค้งการตอบสนองที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองกระบวนการนั้นซ้อนทับกับเส้นโค้งการตอบสนองที่ได้จากการทดลองได้อย่างสมบูรณ์หรือไม่ สำหรับกรณีของกระบวนการที่ได้อธิบายในตัวอย่างข้างต้นนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลการการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการทดลองกับการตอบสนองที่ทำนายได้โดยการใช้แบบจำลองกระบวนการที่ได้จากการวิเคราะห์เส้นโค้งการตอบสนองโดยใช้วิธีที่ 2 ผลการเปรียบเทียบนั้นแสดงในรูปที่ 6 เนื่องจากข้อมูลจากการทดลองกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกระบวนการนั้นมีความแตกต่างกันไม่มากกว่า 0.5°C ตลอดช่วงของการตอบสนองแบบชั่วขณะ ดังนั้นแบบจำลองกระบวนการที่ได้นี้มีความถูกต้องในระดับที่น่าพอใจสำหรับการนำไปใช้เพื่อการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมกระบวนการ ถึงแม้ว่าวิธีวิเคราะห์ระบบควบคุมกระบวนการโดยวิธีการที่นิยมใช้ทั่วไปนั้นจะใช้ได้เฉพาะกับแบบจำลองกระบวนการที่เป็นเชิงเส้น แต่ข้อมูลของกระบวนการที่มีระดับหรือขนาดของความไม่เป็นเชิงเส้นมาก ๆ นั้นจะเป็นข้อมูลที่มีคุณค่ามากสำหรับการนำมาใช้เพื่อการพิสูจน์ว่า แบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นมานั้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลของการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการทดลองมากน้อยเพียงใด



รูปที่ 6 เปรียบเทียบการตอบสนองของตัวแปรออกที่วัดได้กับการตอบสนองของตัวแปรออกที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองกระบวนการ



รูปที่ 7 ตัวอย่างการออกแบบการทดลองเพื่อประเมินความเป็นเชิงเส้นของกระบวนการ

คุณลักษณะของความเป็นเชิงเส้นของการตอบสนองของกระบวนการอาจจะสามารถประเมินได้ง่าย ๆ โดยการเปรียบเทียบค่าของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการที่หาได้จากการทดลองที่มีขนาดและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 7 ถ้าค่าของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการที่หาได้จากข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการที่สภาวะแตกต่างกันของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้านั้นมีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่ากระบวนการมีลักษณะที่เกือบจะเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงของการพิสูจน์ ในทางตรงกันข้ามถ้าค่าของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการที่คำนวณหาได้นั้นมีความแตกต่างกันอย่างมากแสดงว่ากระบวนการที่กำลังถูกพิจารณานั้นมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นค่อนข้างมาก

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการ

ถ้าข้อมูลที่เก็บเพิ่มเติมจากการทดลองหาการตอบสนองของกระบวนการนั้นไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการแล้ว แต่ข้อมูลเหล่านี้ของกระบวนการสามารถนำมาใช้เปรียบเทียบกับผลการทำนายการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้น ซึ่งวิธีเปรียบเทียบนี้ทำได้โดยวิธีเช่นเดียวกับขั้นตอนการประเมินคุณค่าของแบบจำลองกระบวนการ

ตารางที่ 1 สรุปวิธีเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการ

คุณลักษณะ	เส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการ
● ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้า	● จะต้องมากเพียงพอที่จะทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณที่วัดได้ต่อสัญญาณรบกวนมีค่ามากกว่า 5
● ระยะเวลาในการทดลอง	● กระบวนการควรจะต้องเข้าสู่สภาวะเชิงสถิตใหม่ ดังนั้นเวลาในการทดลองควรจะไม่น้อยกว่า $t_d + 4\tau$
● ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้า	● ควรจะทำให้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับอย่างสมบูรณ์มากที่สุดเท่าที่จะทำได้
● โครงสร้างของแบบจำลองกระบวนการ	● เป็นแบบระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเฉื่อย โครงสร้างแบบนี้มีความถูกต้องเพียงพอสำหรับกระบวนการที่มีการตอบสนองแบบความหน่วงมากและมีการตอบสนองแบบที่ค่าของตัวแปรออกเพิ่มขึ้นหรือลดลงเรื่อย ๆ
● ความแม่นยำเมื่อมีการรบกวนจากภาระรบกวนภายนอกที่ไม่ถูกวัด	● ความแม่นยำของแบบจำลองกระบวนการจะถูกกระทบค่อนข้างมาก (ลดลง) เมื่อมีการรบกวนจากปัจจัยประเภทนี้
● การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการ	● พล็อตข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการทดลองและข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองกระบวนการ ผลการทดลองหาการตอบสนองของกระบวนการควรจะต้องกระทำในลักษณะที่ค่าสุดท้ายของตัวแปรเข้าเท่ากับค่าเริ่มต้น
● การคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน	● ทำได้ค่อนข้างง่ายจากการหาข้อมูลขั้นต้นจากกราฟของเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการ

5. สรุป

แบบจำลองกระบวนการที่อยู่ในรูปของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการเคมีส่วนใหญ่แล้วสามารถสร้างขึ้นได้โดยวิธีทดลองหาข้อมูลการตอบสนองของกระบวนการจริงโดยทั่วไปแล้วไม่ว่าค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการจะถูกประเมินหาโดยวิธีเส้นโค้งการตอบสนอง (หรือวิธีทางสถิติก็ตาม) ข้อมูลของการตอบสนองของกระบวนการนั้นควรจะต้องได้มาจากการทดสอบกระบวนการที่ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน เนื่องจากรูปแบบหรือยุทธศาสตร์ของการควบคุมกระบวนการส่วนใหญ่นั้นถูกกำหนดขึ้นโดยใช้แบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นจากข้อมูลของการตอบสนองของกระบวนการดังนั้นวิธีสร้างแบบจำลองกระบวนการที่ได้อธิบายในบทความนี้จึงมีความสำคัญอย่างมากในทางปฏิบัติสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมกระบวนการโดยทั่วไปแล้วไม่มีกระบวนการเคมีใด ๆ ที่สามารถทราบหรือทำนายพฤติกรรมของการตอบสนองเชิงพลวัตของกระบวนการเหล่านั้นได้อย่างถูกต้องและแม่นยำไม่ว่าแบบจำลองกระบวนการจะถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการอนุรักษ์มวลและพลังงานหรือวิธีที่ใช้ข้อมูลการทดลองเพื่อหาผลการตอบสนองของกระบวนการจริง ดังนั้นการควบคุมกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงโดยใช้แบบจำลองกระบวนการที่มีความคลาดเคลื่อน (ที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้) เป็นฐานในการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการนั้นไม่ใช่เป็นเรื่องของความบังเอิญแต่อย่างใด แต่เป็นเพราะว่าวิธีควบคุมกระบวนการที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นและใช้มาเป็นเวลามากกว่า 20 ปีนั้นได้ถูกกำหนดให้สามารถทำงานภายใต้เงื่อนไขของการมีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกระบวนการ

เอกสารอ้างอิง

1. Marlin, T.E., "***Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance***", 2nd edition, McGraw-Hill Inc., Singapore, 2000.
2. Smith, C. and Corripio, A., "***Principles and Practice of Automatic Process Control***", 2nd edition, John Wiley and Sons Inc., Singapore, 1997.

ประวัติผู้เขียนบทความ

ดร.ฉัตรชัย กันยาวุธ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเคมี (วิชาเอกเคมีอุตสาหกรรม) จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2531 ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2536 ปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเคมี จาก Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London ในปี พ.ศ. 2544 ผ่านการฝึกอบรมหลักสูตร International certificate (Petrochemical Engineering Technology) จาก Northern Alberta Institute of Technology (NAIT), Canada (18 สิงหาคม พ.ศ. 2537 - 30 เมษายน พ.ศ. 2538) ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี