

การจำลองการปรับค่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง A Simulation Feedback Control with Design of Experiment

กิตติพงศ์ อางหาญ¹, อามิณท์ หล้าวงศ์²
ปิยณัฐ โตอ่อน³, สิทธิศักดิ์ เรืองฤทธิ์⁴
ภูมินทร์ สุวรรณธาดา⁵, สญชัย เส็งี่ยมวิบูล⁶

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการจำลองการปรับค่าระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) แบบป้อนกลับ โดยได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความผิดพลาดเทียบกับเป้าหมาย (ค่าเป้าหมาย – ค่าความผิดพลาด) ซึ่งได้ทำการกำหนดปัจจัยที่มีผลดังนี้ $1 < K_p < 5$, $1 < K_i < 5$ และ $1 < K_d < 5$ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองหาค่าที่เหมาะสม ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response surface methodology: RSM) ผลจากการทดลองพบว่า ค่าที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยป้อนค่าที่ทำให้ค่าของผลรวมของความผิดพลาดเทียบกับเป้าหมายมีค่าต่ำที่สุดคือ $K_p=5, K_i=1, K_d=1$ มีค่าความผิดพลาด 38.18 และค่า $R^2= 99.07$ ซึ่งสามารถยอมรับได้เป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ศึกษามา

คำสำคัญ : การจำลองการปรับค่าระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์, การออกแบบการทดลอง, วิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง

Abstract

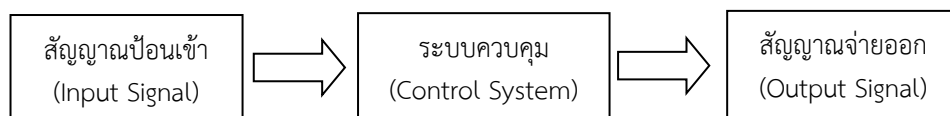
This research has been studied to simulate by PID Controller which has analyzed the factors affecting the error versus target (target value – error value), which defines the following factors: $1 < K_p < 5$, $1 < K_i < 5$ and $1 < K_d < 5$ By design, experiment, find the right value. With surface response Area (Response surface Methodology: RSM) Results of the trial found that the appropriate value for the input factor causes the value of the sum of errors against the target. The lowest value is $K_p = 5$, $K_i = 1$, $K_d = 1$, error 38.18, and $R^2 = 99.07$, which can be accepted according to the theoretical that has been studied.

Keywords: PID controller, Design experiments, Response surface methodology

บทนำ

ในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆทั้งในประเทศและต่างประเทศ ได้มีการนำเทคโนโลยีการควบคุมและระบบควบคุม (Instrumentation and control system) เข้ามาใช้ในการควบคุมกลไกของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีการรับค่าจากตัวตรวจจับ (Sensor) ให้มีค่าเข้าใกล้ค่าที่ปรับตั้งไว้ (Set point) เพื่อความเหมาะสมต่อการควบคุมในกระบวนการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหล

ความเร็ว ตำแหน่ง ความดัน ระดับ เป็นต้น มีโครงสร้างโดยทั่วไปของระบบควบคุมการทำงาน ค่าเป้าหมายของระบบหรือเงื่อนไขข้อกำหนดที่ทำการป้อนเข้าสู่ระบบควบคุมจะถูกเรียกว่า “อินพุต” (Input) ส่วนผลของการทำงานหรือสัญญาณที่ถูกจ่ายออกจากระบบควบคุมการทำงานจะถูกเรียกว่า “เอาต์พุต” (Output) แสดงดังรูปภาพที่ 1



รูปภาพที่ 1 โครงสร้างโดยทั่วไปของระบบควบคุมการทำงาน

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยบัณฑิตเอเชีย

²⁻⁶คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์



การควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) แบบป้อนกลับ เป็นระบบควบคุมที่นำไปใช้ในการคำนวณค่าผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ซึ่งตัวควบคุมจะพยายามลดค่าให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือ K_p : อัตราขยายสัดส่วน กำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน K_i : อัตราขยายปริพันธ์ กำหนดจากผลลบพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งผ่านพ้นไป และ K_d : อัตราขยายอนุพันธ์ กำหนดจากผลลบพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการ โดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะสมกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) การปรับค่าด้วยวิธี Trial and Error ไม่รับประกันได้ว่าจะเป็นการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอน

บทความนี้จึงได้นำเสนอการหาค่าที่สภาวะเหมาะสมจากการออกแบบจำลองระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) แบบป้อนกลับ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) แบบ Box Behnken design ในการใช้ปรับค่าควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ เช่น การควบคุมการทำงานของพัดลมระบายความร้อนในโรงเรือนทั้งที่เป็นสัตว์และพืช การควบคุมการทำงานของวาล์วเปิดปิดแก๊สในอุตสาหกรรม การขึ้นรูปขวดแก้ว การควบคุมอัตราการหมุนของมอเตอร์ เป็นต้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID

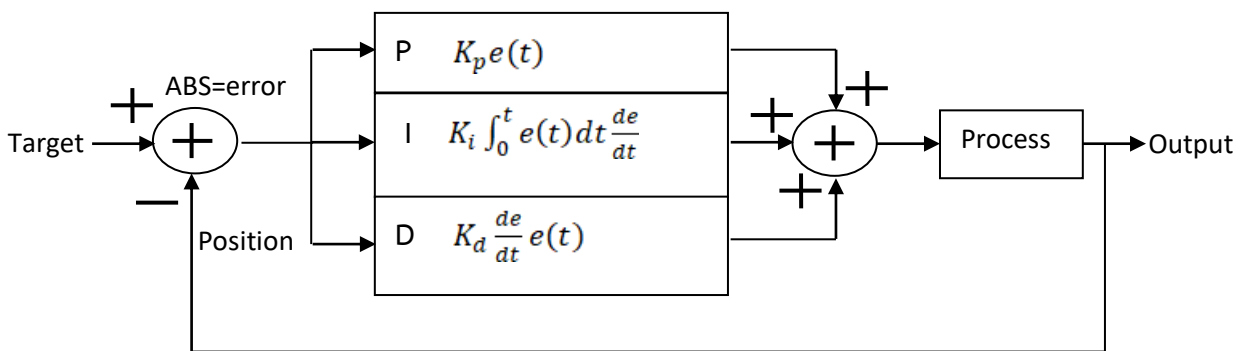
controller) แบบป้อนกลับ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) แบบ Box Behnken design

แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการหาปรับค่าของระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) แบบป้อนกลับ K_p , K_i และ K_d เป็นการปรับจูนค่าเพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุม (Trial and Error) ซึ่งเป็นวิธีการที่ต้องใช้ประสบการณ์ในการควบคุมและยังไม่สามารถเข้าถึงค่าที่เหมาะสมของกระบวนการได้ ดังนั้นการออกแบบการทดลองเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสม ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) แบบ Box Behnken design ในการทดลองในแบบจำลองระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller)

1. การควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) แบบป้อนกลับ หรือการควบคุมแบบพีไอดี เป็นการควบคุมแบบระบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed-loop control systems, feedback control systems) โดยค่าที่นำไปในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างระหว่าง ค่าที่ตั้ง (Target) กับค่าเอาต์พุต (Output) แล้วใช้สมการ (1) คำนวณเพื่อลดความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งการควบคุมแบบพีไอดี จะประกอบด้วยส่วนการควบคุมที่สำคัญ 3 ส่วน คือ เทอม Proportional term $K_p e(t)$ Integral term $K_i \int_0^t e(t) dt \frac{de}{dt}$ และ Derivative term $K_d \frac{de}{dt} e(t)$ ตามไดอะแกรมในรูปภาพที่ 2

$$Y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \frac{de}{dt} + K_d \frac{de}{dt} e(t) \quad (1)$$



รูปภาพที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของตัวแบบควบคุมแบบพีไอดี

ได้มีผู้ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับระบบการควบคุม พุทธานุ ลีกุลธร และ สมชาติ ศรีสกุลเตี้ย (2561) พบว่า ผลสอดคล้องกับทางทฤษฎีมีอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า ของระบบควบคุมแบบปิดเท่ากับ 0.998 มิลลิวัตต์ ที่ แหล่งจ่าย ± 1.5 โวลต์ กับ 0.132 วัตต์ ที่แหล่งจ่าย ± 5 โวลต์ ตามลำดับ และผลการทดลองด้วยอุปกรณ์จริงบนชุด ทดลอง NI ELVIS ทำงานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ก็ ให้ผลสอดคล้องกับทฤษฎีเช่นกัน

วิศวะ มะมา และธนา ราชภูร์ภักดี (2560) พบว่าตัวควบคุมแบบ Digital PID นั้นได้ค่าโอเวอร์ชูตต่ำสุด และค่าความผิดพลาด ณ สถานะอยู่ตัว น้อยที่สุด และมีช่วง ขึ้นที่ใกล้เคียงกับ ตัวแบบควบคุม On/Off และค่าเวลาเข้า ใกล้เคียงกับตัวควบคุม PID

สุพรพิศ ณ พิบูลย์ (2558) พบว่าการอบแห้ง ปลาเกลือแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 70 °C มีความสิ้นเปลือง พลังงานจำเพาะในการอบน้อยที่สุด เท่ากับ 300 MJ/kgH₂O evap โดยที่ยังคงได้ค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง ทั่วไปประมาณ 20 – 30%db และมีประสิทธิภาพในการ อบแห้ง 1.2% โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 4 ชั่วโมง ทั้งนี้ยังคงได้คุณภาพปลาเกลืออบแห้งที่เนื้อและสีของปลา ใกล้เคียงกับที่มีวางจำหน่ายตามท้องตลาด

กอบเดช วงศ์คณี และคณะ (2555) พบว่า ประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิที่เสนอโดยเฉพาะ อย่างยิ่งในสถานะที่เกิดการรบกวน สามารถนำระบบที่ นำเสนอมาประยุกต์ใช้ในพัฒนาเครื่องทำน้ำอุ่นให้มี ประสิทธิภาพในด้านการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในอนาคตได้ ทั้งนี้การใช้วิธี Trial and Error ในหาค่าที่เหมาะสมในการ ควบคุมยังไม่สามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้ ดังนั้นการออกแบบการ ทดลองแบบบล็อก-เบิร์ตเคนและวิธีพื้นผิวตอบสนอง จึงเป็น ทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

สมศักดิ์ แก้วพลอย และกุลยุท บัญเช่ง (2557) พบว่าปัจจัยอุณหภูมิและเวลาในการอบเป็นปัจจัยที่มีผลต่อ ค่าความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทำการออกแบบการ ทดลองเพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบไม้ ยางพาราโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบิร์ต เคน เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่าสามารถกำหนดสภาวะใน การอบไม้ยางพาราด้วยสมการถดถอยคือ เปอร์เซ็นต์ ความชื้น = 343.640 – 0.788A – 42.464B + 1.339B² + 0.053AB ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่มี ความเชื่อถือได้และกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นอยู่ในช่วง 8-12%

ชาตรี หอมเขียว และคณะ (2560) พบว่าการ ขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ 197°C ระยะเวลาการอัด 13 min และความหนาแน่น 1.0 g/cm³ เป็นพารามิเตอร์การขึ้นรูปที่

เหมาะสม และพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปด้วย พารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้ มีสมบัติแตกต่างจากค่าที่ได้จาก การทำนายไม่เกิน 3.78%

ธีรวัช สิงหศิริ (2557) พบว่าเวลาการทำ ปฏิกริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาไฮเดรอกไซด์ และ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน มีอิทธิพลต่อ ค่าร้อยละเมทิลเอสเทอร์อย่างมีนัยสำคัญ R² = 99.58% และ R²-adj = 98.82% สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลพบว่า เวลาการทำปฏิกริยามีค่าเริ่มต้น 81.82 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาไฮเดรอกไซด์เท่ากับ 1.40 ร้อย ละโดยน้ำหนัก และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับ น้ำมันเท่ากับ 7.48:1 โดยสภาวะดังกล่าวสามารถผลิตเมทิล เอสเทอร์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.80 น้ำมันไขไก่มีคุณสมบัติ เพียงพอที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ เนื่องจากมีค่าเมทิลเอสเทอร์สูงกว่า ร้อยละ 96.5 ตาม มาตรฐานของ ASTM 6751

ภูมินทร์ รักษากิจ และคณะ (2558) พบว่า สามารถลดกากตะกอนเหลือเพียงชั่วโมงละ 168.41 กิโลกรัม ซึ่งทำให้โรงงาน สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด กากตะกอนลงได้ประมาณเดือนละ 401,760 บาท และยัง สามารถลดอัตราการสูญเสีย สารอัลลิลคลอไรด์ที่ด้านล่าง ของหอกลับเหลือเพียง 0.0092% โดยยังคงได้ความบริสุทธิ์ ของสารอัลลิลคลอไรด์ไม่ต่ำกว่า 98% ตามที่โรงงานกำหนด

สุพรพิศ ณ พิบูลย์ (2558) พบว่าการอบแห้ง ปลาเกลือแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 70 °C มีความสิ้นเปลือง พลังงานจำเพาะในการอบน้อยที่สุด เท่ากับ 300 MJ/kgH₂O evap โดยที่ยังคงได้ค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง ทั่วไปประมาณ 20–30 % db และมีประสิทธิภาพในการ อบแห้ง 1.2% โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 4 ชั่วโมง ทั้งนี้ยังคงได้คุณภาพปลาเกลืออบแห้งที่เนื้อและสีของปลา ใกล้เคียงกับที่มีวางจำหน่ายตามท้องตลาด

อิทธิพล วรพันธ์ และคณะ (2556) พบว่าเวลา ในการเสียดทานความดันในการเสียดทานและความดันใน การอัด มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของรอย เชื่อม ในขณะที่เวลาในการอัดและความเร็วรอบในการหมุน ขึ้นงานไม่มีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดย ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) ของแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.8064 ได้สภาวะที่เหมาะสมใน กระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานคือเวลาในการเสียด ทานเท่ากับ 8.86 sec เวลาในการอัดเท่ากับ 2.22 sec ความดันในการเสียดทานเท่ากับ 29.36 bar ความดันในการ อัดเท่ากับ 59.25 bar และความเร็วรอบในการหมุนเท่ากับ 1259.58 rpm ให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงสุด เท่ากับ 1048 MPa ส่วนการทดลองภายใต้สภาวะที่



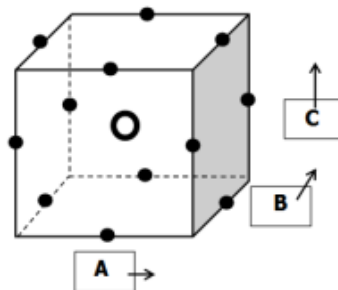
เหมาะสมได้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเท่ากับ 1007 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายพบว่ามีค่าอคติของค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเท่ากับ 3.91% ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจึงมีความเหมาะสมสำหรับอธิบายช่วงของตัวแปรในการทดลองที่ใช้ศึกษาและมีความน่าเชื่อถือทางสถิติในการใช้ทำนายค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม

3.2 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ได้ถูกพัฒนาโดย นายบ็อค และนายเบ็นท์เคน (1996) ใช้ศึกษาปัจจัยปริมาณ และ

อาจจะใช้ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพได้ในบางกรณีขึ้นกับปัจจัย ซึ่งได้พัฒนาประสิทธิภาพการออกแบบการทดลองแบบสามระดับสำหรับพิตพื้นผิวตอบสนองที่มีสมการอันดับสอง (second-order) ลักษณะของการออกแบบ วิธี Box-Behnken จะใช้หลักการของ 2² แฟคทดเรียลเต็มรูปแบบผนวกกับจุดกึ่งกลาง (central points) รวมเข้าไป โดยที่ K คือจำนวนปัจจัย Box และ Behnken ได้จัดทำตารางสำหรับแผนการทดลอง เพื่อใช้กับปัจจัยได้สูงสุดไม่เกิน 16 ปัจจัย (ไม่รวมกรณี k=80) ตัวอย่างของการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 และรูปภาพที่ 3

ตารางที่ 1 แสดงตัวการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design มีสามปัจจัย

Run	A	B	C
1	-	-	0
2	-	+	0
3	+	-	0
4	+	+	0
5	-	0	-
6	-	0	+
7	+	0	-
8	+	0	+
9	0	-	-
10	0	+	+
11	0	-	-
12	0	+	+
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



รูปภาพที่ 3 แสดงการออกแบบ แบบ Box-Behnken กรณีศึกษา 3 ปัจจัย

3.3 การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design) คือวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการ

สร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon (3)$$



โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ϵ คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(y) = \int(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = \int(x_1, x_2) \quad (4)$$

ซึ่งจะเรียกว่า พื้นผิวผลตอบ (Response Surface) โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวตอบในรูปของกราฟิก โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวตอบสนอง โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระอาจจะเป็น แบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์

แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้เป็นแบบจำลองกำลังหนึ่ง ดังสมการที่ 5

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \epsilon \quad (5)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องกับในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดังสมการที่ 6

$$y = \beta_0 + \dots + \beta_{ij}x_i x_j + \epsilon \quad (6)$$

วิธีดำเนินการ

1. ทำการทดสอบแบบจำลองการออกแบบระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) ที่กำหนดค่า Initial Position =1, Target Position =10, Time Step = 0.025, Mass 0.1, Gravity Acc = -25, Max Output= -1, Max Accel =-1, Initial Velocity =0, Initial Error =-9 และ Initial Error Int. = 0 ข้อมูล ดังรูปภาพที่ 4

Control Parameters	Time	Position	Target	Error	Int. Error	Der. Error	Output	Clipped Output	Target Velocity	Required Acc	Clipped	
1 Kp	1	0	1	10	-9	0	-0.225	0	9.225	9.225	2.30625	92.25
2 Ki	1	0.025	1.04203125	10	-8.9579688	8.95796875	-0.489492	1.68125	7.725667969	7.725667969	3.612666992	77.25667969
3 Kd	1	0.05	1.11672292	10	-8.8832771	8.88327708	-0.6710311	2.987666699	6.566641229	6.566641229	6.566641229	65.664
4 Initial Position	1	0.075	1.21668311	10	-8.7831689	8.78316889	-0.8906104	4.0043273	5.669451961	5.669451961	5.42169029	56.69451961
5 Target Position	10	0.1	1.33674836	10	-8.6632516	8.66325164	-1.1071917	4.79669029	4.973753005	4.973753005	6.040128541	49.73753005
6 Time Step	0.025	0.125	1.47212658	10	-8.5278734	8.52787342	-1.3203885	5.41512854	4.433133375	4.433133375	6.523418885	44.33133375
7 Mass	0.1	0.175	1.77649655	10	-8.3804131	8.38041312	-1.5298988	5.8984188	4.011900063	4.011900063	6.9013869	40.11900063
8 Gravity Acc	-25	0.2	1.94079749	10	-8.2235035	8.22350345	-1.7354864	6.2763869	3.682602961	3.682602961	7.197037641	36.82602961
9 Max Output	-1	0.225	2.11087425	10	-7.8891257	7.88912575	-2.1341946	6.80307048	3.220249889	3.220249889	7.608132948	32.20249889
10 Max Accel	-1	0.25	2.28545257	10	-7.7145474	7.71454743	-2.3270583	6.98313295	3.058472778	3.058472778	7.747751143	30.58472778
11 Initial Velocity	0	0.3	2.46352135	10	-7.5364786	7.53647865	-2.5154703	7.12275114	2.929197771	2.929197771	7.855050586	29.29197771
12 Initial Error	-9	0.325	2.64427262	10	-7.3557274	7.35572738	-2.6993635	7.23005059	2.825040248	2.825040248	7.936310648	28.25040248
13 Initial Error Int.	0	0.35	3.01134016	10	-6.9886598	6.98865984	-3.0534036	7.37139091	2.6706725	2.6706725	8.039059032	26.706725
14		0.375	3.19669163	10	-6.8033084	6.80330837	-3.2234863	7.41405903	2.612735608	2.612735608	8.067242934	26.12735608
15		0.4	3.38274771	10	-6.6172523	6.61725229	-3.3889176	7.44224293	2.56392694	2.56392694	8.083224669	25.6392694
16		0.425	3.56920332	10	-6.4307967	6.43079668	-3.5496875	7.45822467	2.522259505	2.522259505	8.088789545	25.22259505
17		0.45	3.75579806	10	-6.2442019	6.24420194	-3.7057925	7.46378955	2.486204939	2.486204939	8.08534078	24.86204939
18		0.475	3.94230658	10	-6.0576934	6.05769342	-3.8572349	7.46034078	2.45458752	2.45458752	8.07398766	24.5458752
19		0.5	4.12853127	10	-5.8714687	5.87146873	-4.0040216	7.44898766	2.426502667	2.426502667	8.055613327	24.26502667
20		0.525	4.31429661	10	-5.6857034	5.68570339	-4.161642	7.43061333	2.401254252	2.401254252	8.03092689	24.01254252
21		0.55	4.49944478	10	-5.5005552	5.50055522	-4.2836781	7.40592689	2.378306397	2.378306397	8.000503489	23.78306397
22		0.575	4.68383236	10	-5.3161676	5.31616764	-4.4165823	7.37550349	2.357246402	2.357246402	7.96481509	23.57246402
23		0.6	4.86732774	10	-5.1326723	5.13267266	-4.5448991	7.33981509	2.33775623	2.33775623	7.924254147	23.3775623
24		0.625	5.0498091	10	-4.9501909	4.9501909	-4.6686538	7.29925415	2.319590592	2.319590592	7.879151795	23.19590592
25		0.65	5.23116289	10	-4.7688731	4.76887311	-4.7878748	7.2541518	2.302560077	2.302560077	7.829791814	23.02560077
26		0.675	5.41128269	10	-4.5887173	4.58871731	-4.9025927	7.20479181	2.286518195	2.286518195	7.776421363	22.86518195
27		0.7	5.59006822	10	-4.4099318	4.40993178	-5.012841	7.15142136	2.271351407	2.271351407	7.71925215	22.71351407
28		0.725	5.7657017	10	-4.2337373	4.23373732	-5.1235554	7.10042031	2.256934457	2.256934457	7.656902820	22.56934457

รูปภาพที่ 4 การทดสอบแบบจำลองการออกแบบระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) ด้วยไมโครซอฟท์ เอกซ์เซล 2007

2. ออกแบบการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับวิธีการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม (Response surface methodology, RSM) แบบ Box Behnken design มีค่าปัจจัยดังตารางที่ 2 อนุพันธ์ (PID controller) แบบป้อนกลับ ด้วยวิธีพื้นผิว

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย –ค่าความผิดพลาด)

ปัจจัย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
Kp: อัตราขยายสัดส่วน	1	5
Ki: อัตราขยายปริพันธ์	1	5
Kd: อัตราขยายอนุพันธ์	1	5

3. ทดสอบค่าสภาวะที่เหมาะสมในแบบจำลองระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller)



ผลการศึกษา

ตารางที่ 3 ผลการจำลองต่อค่าความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย - ค่าความผิดพลาด)

StdOrder	Kp	Ki	Kd	Target - ERROR
6	5	3	1	109.408
12	3	5	5	534.415
11	3	1	5	442.163
10	3	5	1	180.924
2	5	1	3	222.732
3	1	5	3	636.903
13	3	3	3	399.587
4	5	5	3	273.947
15	3	3	3	399.587
5	1	3	1	469.426
9	3	1	1	136.653
7	1	3	5	692.076
1	1	1	3	569.899
8	5	3	5	367.210
14	3	3	3	399.587

จากนั้นการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของค่าความผิดพลาด ดังรูปภาพที่ 5

```

Box-Behnken Design
Factors:      3      Replicates:    1
Base runs:   15     Total runs:   15
Base blocks: 1     Total blocks: 1

Center points: 3

Response Surface Regression: Error versus Kp, Ki, Kd
The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Error

Term          Coef  SE Coef    T      P
Constant    399.587  16.55    24.150  0.000
Kp          -174.376  10.13   -17.210  0.000
Ki           31.843  10.13    3.143  0.026
Kd          142.432  10.13   14.057  0.000
Kp*Kp        56.137  14.91    3.764  0.013
Ki*Ki       -29.854  14.91   -2.002  0.102
Kd*Kd       -46.194  14.91   -3.097  0.027
Kp*Ki       -3.947  14.33   -0.275  0.794
Kp*Kd        8.788  14.33    0.613  0.567
Ki*Kd       11.995  14.33    0.837  0.441

S = 28.6582    PRESS = 65703.6
R-Sq = 99.07%  R-Sq(pred) = 85.18%  R-Sq(adj) = 97.41%
    
```


Estimated Regression Coefficients for Error using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	392.821
Kp	-175.024
Ki	54.6664
Kd	124.920
Kp*Kp	14.0343
Ki*Ki	-7.46350
Kd*Kd	-11.5486
Kp*Ki	-0.986813
Kp*Kd	2.19700
Ki*Kd	2.99881

รูปภาพที่ 5 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของค่าความผิดพลาด

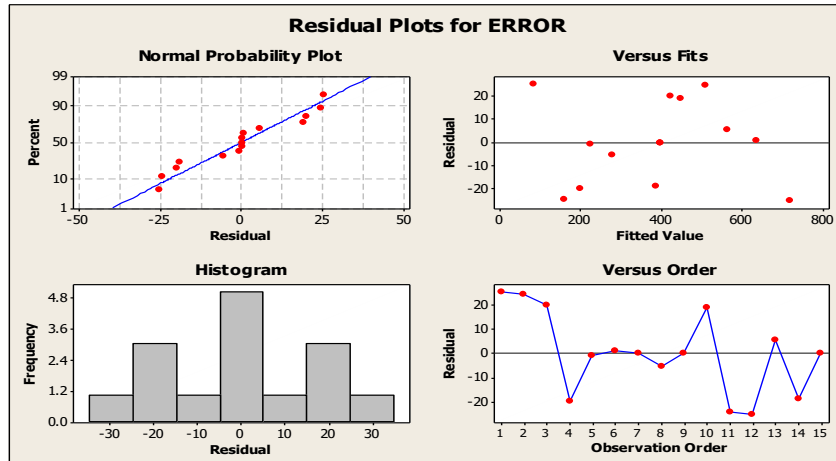
ตามรูปภาพที่ 5 ทำให้ทราบถึงค่าความสัมพันธ์ (R²) ของปัจจัยทั้ง 3 เท่ากับ 99.07% ซึ่งตีความหมายว่าค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) ของตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้นั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูล และสามารถเขียนเป็นสมการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) ดังสมการ $Y=392.821+Kp*(175.025)+Ki*(54.6664)+Kd*$

$(124.920)+(Kp*Kp)*(14.0343)+(Ki*Ki)*(-7.46354)+(Kd*Kd)*(-11.5485)+(Kp*Ki)*(-0.986790)+(Kp*Kd)*(2.19697)+(Ki*Kd)*(2.99888)$ (2) โดยที่ Y=ค่าความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย -ค่าความผิดพลาด)

Kp=อัตราขยายสัดส่วน

Ki=อัตราขยายปริพันธ์

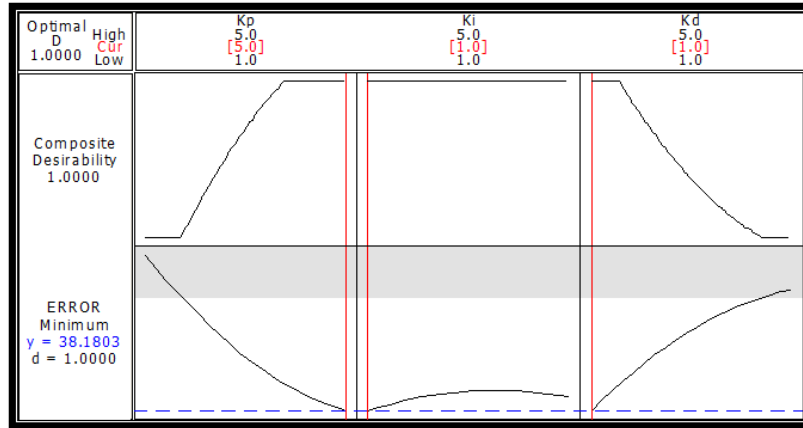
Kd=อัตราขยายอนุพันธ์



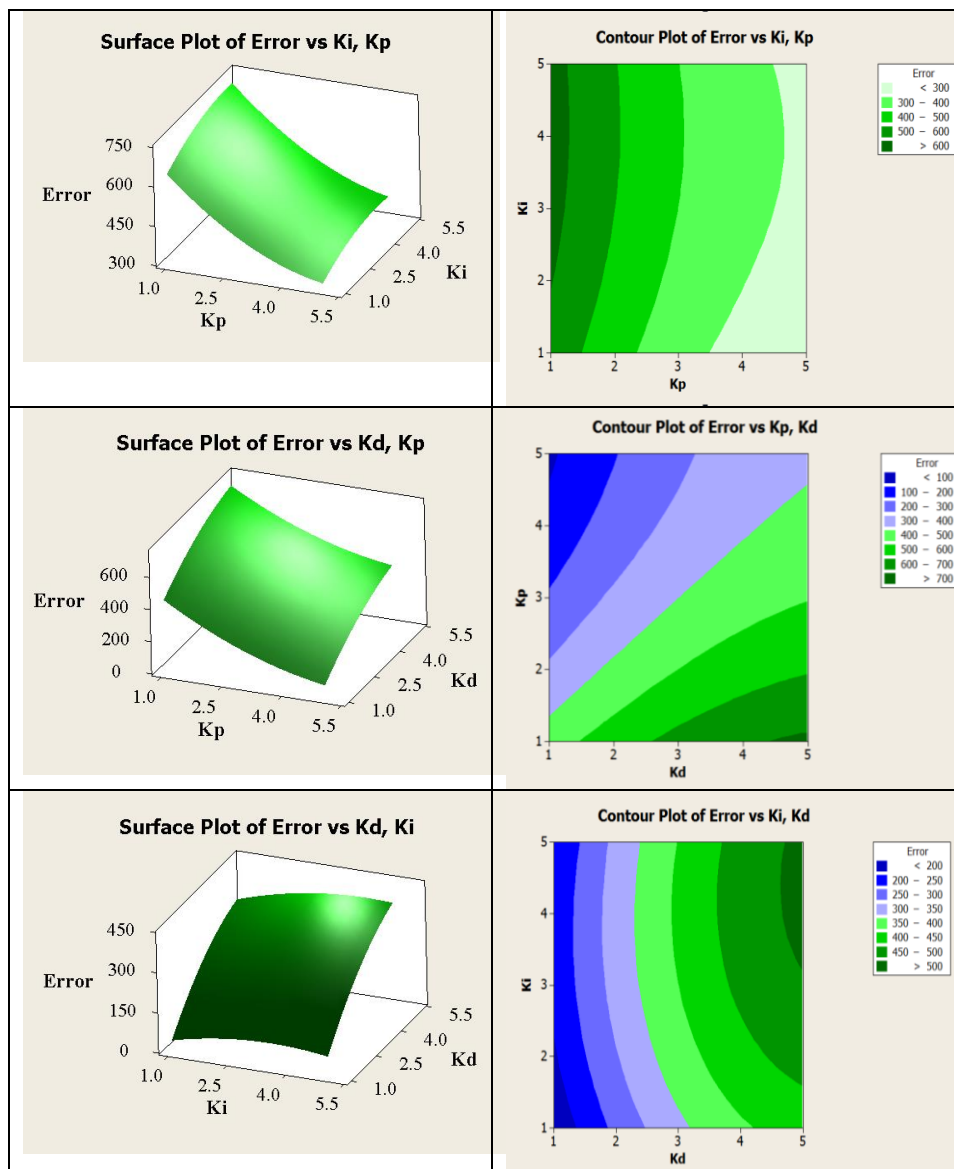
รูปภาพที่ 6 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลการทดลอง

จากรูปภาพที่ 6 ลักษณะของข้อมูลการออกแบบการทดลองมีการกระจายตัวไม่เป็นรูปแบบ ซึ่งพิจารณาแล้วว่ามีความเป็นอิสระของข้อมูลคือข้อมูลเก็บมาอย่างสุ่มและจากกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นถึงการแจกแจงข้อมูลเป็นแบบปกติ และความ

แปรปรวนมีความเสถียรภาพในการทดลอง แล้วได้ทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด (Minimum of Error) ของปัจจัยทั้ง 3 ตัว เป็นไปตามรูปภาพที่ 7



รูปภาพที่ 7 สถานะที่เหมาะสม (Optimization chart) ของค่า $K_p=5$, $K_i=1$ และ $K_d=1$ จากรูปภาพที่ 7 ทำให้ทราบว่าค่าความผิดพลาดของโปรแกรมที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 38.2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 100 % โดยที่ค่าของปัจจัยจะเท่ากับ $K_p=5$, $K_i=1$ และ $K_d=1$



รูปภาพที่ 8 Surface plot และ Control plot ของค่า K_p , K_i , K_d ที่มีอิทธิพลต่อค่าความผิดพลาด

การอภิปรายผล

จากผลการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน และพื้นผิวตอบสนองเป็นวิธีการหาค่าสถานะที่เหมาะสมโดยใช้หลักทางสถิติในการประมวลผลซึ่งจากข้อมูลแสดงว่าตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของสมการดังสมการที่ 2 มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลในระดับที่สูง และผลของค่าสถานะที่เหมาะสมเมื่อนำมาทดสอบแบบจำลองการออกแบบระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ด้วยไมโครซอฟท์ เอกซ์เซล 2007 มีค่าที่ต่ำที่สุด (ดีที่สุด) ต่อค่าความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย - ค่าความผิดพลาด)

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าสถานะที่เหมาะสมของระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) แบบป้อนกลับ มีปัจจัย 3 ค่า คือ K_p , K_i และ K_d โดยวิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย - ค่าความผิดพลาด) แบบบ็อก-เบห์นเคน และพื้นผิวตอบสนองเป็นวิธีการหาค่าสถานะที่เหมาะสม มีค่า $K_p=5, K_i=1, K_d=1$ นำค่าไปทดสอบในแบบจำลองมีความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย - ค่าความผิดพลาด) ที่น้อยที่สุด 38.2 และค่าของปัจจัย K_p , K_i และ K_d มีระดับนัยสำคัญ 0.05 ที่ความเชื่อมั่น R-Squared 99.07% จากผลของข้อมูลสามารถเป็นวิธีการที่เอื้อไปใช้ในการปรับค่าทั้ง 3 ค่า ในการควบคุมอุปกรณ์เพื่อให้ได้ความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย - ค่าความผิดพลาด) ที่น้อยที่สุด จากนั้นก็นำค่าสถานะที่เหมาะสมที่ได้นำไปทดลองควบคุมอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. กอบเดช วงศ์คินี, บัญชา ป้อมสุวรรณ และวันจักรี เล่นวาริ. (2555). การออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำอุ่น. วารสารวิจัย มช ปีที่ 17: 459 - 468.
2. ชาตรี หอมเขียว, วรพงศ์ บุญช่วยแทน และสุรสิทธิ์ ระวังวงศ์. (2560). พารามิเตอร์การผลิตที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพารา โดยใช้ การออกแบบ บ็อก-เบห์นเคน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 27: 315 - 328.

3. อีร์ธวัช สิงหศิริ. (2557). การหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไปโอดีเซลจากน้ำมันไขไก่ โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง. วารสารวิจัยพลังงาน ปีที่ 11: 54 - 65.
4. พุทธาวุฒิ ลีกุลธร และสมชาติ ศรีสกุลเดี่ยว. (2561). การสังเคราะห์ตัวควบคุมพีไอดีโหมดกระแส โดยใช้วงจรรขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 20: 213 - 223.
5. ภูมิินทร์ รักษากิจ, อีร์เดช วุฒิพรพันธ์ และกุลศัลพิมาพันธุ์ศรี. (2558). การลดปริมาณของเสียในกระบวนการกลั่นสารอัลลิลคลอไรด์ โดยใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนอง. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 25: 393 - 403.
6. วิศวะ มะมา และธนา ราชภักดิ์. (2560). การพัฒนาการควบคุมพีไอดีสำหรับอุปกรณ์ขับเร็วแบบ เปิด/ปิด. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ปีที่ 3: 19 - 24.
7. สุพรพิศ ณ พิบูลย์. (2558). กระบวนการอบแห้งปลาเกลือด้วยเครื่องอบพลังงานไฟฟ้า โดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ปีที่ 7: 1-11.
8. สมศักดิ์ แก้วพลอย และกุลยุทธ บุญแข่ง. (2557). การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในกระบวนการอบไม้ยางพารา. วารสารวิจัย มช ปีที่ 19: 261 - 221.
9. อธิพิล วรพันธ์, ชวงชัย ชูปวา และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. (2556). การหาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็ก AISI 1015 โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง. วารสารวิจัย มช ปีที่ 18: 909 - 924.