การจำลองการปรับค่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง
A Simulation Feedback Control with Design of Experiment

กิตติพงค์ อาจหาญ[1], อามิณฑ์ หล้าวงศ์[2]
ปิยณัฐ โตอ่อน[3], สิทธิศักดิ์ เริงฤทธิ์[4]
ภูมินทร์ สุวรรณธาดา[5], สญชัย เสงี่ยมวิบูล[6]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการจำลองการปรับค่าระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) แบบป้อนกลับ โดยได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความผิดพลาดเทียบกับเป้าหมาย (ค่าเป้าหมาย –ค่าความผิดพลาด) ซึ่งได้ทำการกำหนดปัจจัยที่มีผลดังนี้ 1<Kp<5, 1<Ki<5 และ1<Kd<5 ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองหาค่าที่เหมาะสม ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response surface methodology: RSM) ผลจากการทดลองพบว่า ค่าที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยป้อนค่าที่ทำให้ค่าของผลรวมของความผิดพลาดเทียบกับเป้าหมายมีค่าต่ำที่สุดคือ Kp=5,Ki=1,Kd=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 < Kp < 5, 1 < Ki < 5 and 1 < Kd < 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 Kp = 5, Ki = 1, Kd = 1, error 38.18, and R2 = 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

[1]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยบัณฑิตเอเชีย
[2-6]คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

การควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) แบบป้อนกลับ เป็นระบบควบคุมที่นำไปใช้ในการคำนวณค่าผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ซึ่งตัวควบคุมจะพยายามลดค่าให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือ Kp: อัตราขยายสัดส่วน กำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน Ki: อัตราขยายปริพันธุ์ กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งผ่านพ้นไป และ Kd: อัตราขยายอนุพันธุ์ กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการ โดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะสมกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และค่าแก่วงของระบบ (Oscillation) การปรับค่าด้วยวิธี Trial and Error ไม่รับประกันได้ว่าจะเป็นการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอน

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

วัตถุประสงค์

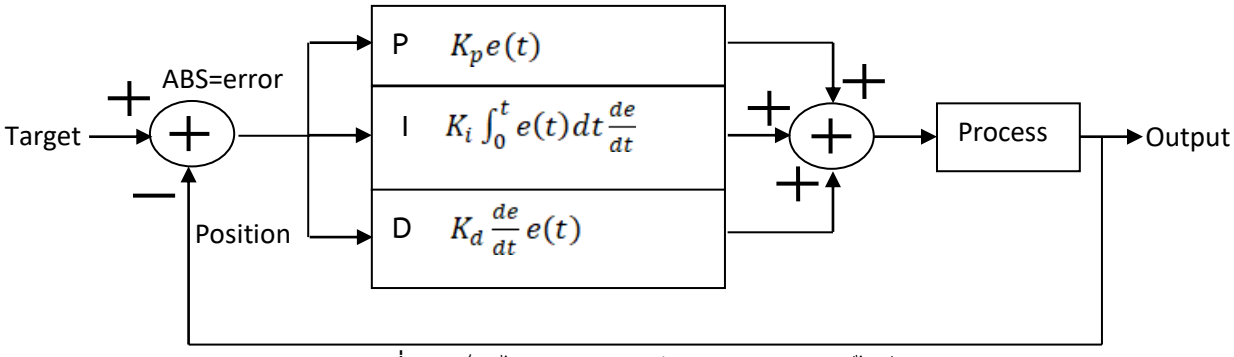
1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) แบบป้อนกลับ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) แบบ Box Behnken design

แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการหาปรับค่าของระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) แบบป้อนกลับ Kp, Ki และ Kd เป็นการปรับจูนค่าเพื่อสังเกตดูความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุม (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) โดยค่าที่นำไปในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หาจากความแตกต่างระหว่าง ค่าที่ตั้ง (Target) กับค่าเอาต์พุต (Output) แล้วใช้สมการ (1) คำนวณเพื่อลดความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งการควบคุมแบบพีไอดี จะประกอบด้วยส่วนการควบคุมที่สำคัญ 3 ส่วนคือเทอม 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 พุทธาวุฒิ ลีกุลธร และ สมชาติ ศรีสกุลเดีย (2561) พบว่าผลสอดคล้องกับทางทฤษฎีมีอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าของระบบควบคุมแบบปิดเท่ากับ 0.998 มิลลิวัตต์ ที่แหล่งจ่าย ±1.5 โวลต์ กับ0.132 วัตต์ ที่แหล่งจ่าย ±5 โวลต์ ตามลำดับ และผลลการทดลองด้วยอุปกรณ์จริงบนชุดทดลอง NI ELVIS ทำงานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ก็ให้ผลสอดคล้องกับทฤษฎีเช่นกัน

วิศวะ มะมา และธนา ราษฎร์ภักดี (2560) พบว่าตัวควบคุมแบบ Digital PID นั้นได้ค่าโอเวอร์ชูตต่ำสุดและค่าความผิดพลาด ณ สถานะอยู่ตัว น้อยที่สุด และมีช่วงขึ้นที่ใกล้เคียงกับ ตัวแบบควบคุม On/Off และค่าเวลาเข้าใกล้เคียงกับตัวควบคุม PID

สุพรพิศ ณ พิบูลย์ (2558) พบว่าการอบแห้งปลากุเลาแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 70 0C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบน้อยที่สุด เท่ากับ 300 MJ/kgH_2O evap โดยที่ยังคงได้ค่าความชื้นมาตรฐานแห้งทั่วไปประมาณ 20 – 30%db และมีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 1.2% โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 4 ชั่วโมง ทั้งนี้ยังคงได้คุณภาพปลากุเลาอบแห้งที่เนื้อและสีของปลาใกล้เคียงกับที่มีวางจำหน่ายตามท้องตลาด

กอบเดช วงค์คินี และคณะ (2555) พบว่าประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิที่เสนอโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่เกิดการรบกวน สามารถนำระบบที่นำเสนอมาประยุกต์ใช้ในพัฒนาเครื่องทำน้ำอุ่นให้มีประสิทธิภาพในด้านการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในอนาคตได้ ทั้งนี้การใช้วิธี Trial and Error ในหาค่าที่เหมาะสมในการควบคุมยังไม่สามารถหาค่าที่สุดได้ ดังนั้นการออกแบบการทดลองแบบบ๊อก-เบห์เคนและวิธีพื้นผิวตอบสนอง จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการค่าที่เหมาะสมที่สุด

สมศักดิ์ แก้วพลอย และกุลยุทธ บุญเซ่ง (2557) พบว่าปัจจัยอุณหภูมิและเวลาในการอบเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบไม้ยางพาราโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์เคน เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่าสามารถกำหนดสภาวะในการอบไม้ยางพาราด้วยสมการถดถอยคือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น = 343.640 – 0.788A – 42.464B + 1.339B2 + 0.053AB ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความเชื่อถือได้และกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นอยู่ในช่วง 8-12%

ชาตรี หอมเขียว และคณะ (2560) พบว่าการขึ้นรูปโดยที่ใช้อุณหภูมิ 197°C ระยะเวลาการอัด 13 min และความหนาแน่น 1.0 g/cm^3 เป็นพารามิเตอร์การขึ้นรูปที่เหมาะสม และพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้ มีสมบัติแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายไม่เกิน 3.78%

ธีร์ธวัช สิงหศิริ (2557) พบว่าเวลาการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน มีอิทธิผลต่อค่าร้อยละเมทิลเอสเทอร์อย่างมีนัยสาคัญ R^2= 99.58% และ R^2-adj = 98.82% สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลพบว่า เวลาการทำปฏิกิริยามีค่าเริ่มต้น 81.82 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ1.40 ร้อยละโดยน้ำหนัก และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมันเท่ากับ 7.48:1 โดยสภาวะดังกล่าวสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.80 น้ำมันไขไก่มีคุณสมบัติเพียงพอที่จะนามาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ เนื่องจากมีค่าเมทิลเอสเทอร์สูงกว่า ร้อยละ 96.5 ตามมาตรฐานของ ASTM 6751

ภูมินทร์ รักษากิจ และคณะ (2558) พบว่าสามารถลดกากตะกอนเหลือเพียงชั่วโมงละ 168.41 กิโลกรัม ซึ่งทำให้โรงงาน สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนลงได้ประมาณเดือนละ 401,760 บาท และยังสามารถลดอัตราการสูญเสีย สารอัลลิลคลอไรด์ที่ด้านล่างของหอกลั่นเหลือเพียง 0.0092% โดยยังคงได้ความบริสุทธิ์ของสารอัลลิลคลอไรด์ไม่ต่ำกว่า 98% ตามที่โรงงานกำหนด

สุพรพิศ ณ พิบูลย์ (2558) พบว่าการอบแห้งปลากุเลาแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 70 0C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบน้อยที่สุด เท่ากับ 300 MJ/kgH_2O evap โดยที่ยังคงได้ค่าความชื้นมาตรฐานแห้งทั่วไปประมาณ 20–30 % db และมีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 1.2% โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 4 ชั่วโมง ทั้งนี้ยังคงได้คุณภาพปลากุเลาอบแห้งที่เนื้อและสีของปลาใกล้เคียงกับที่มีวางจำหน่ายตามท้องตลาด

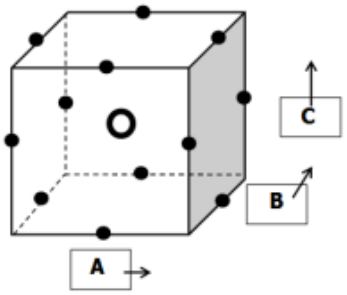
อิทธิพล วรพันธ์ และคณะ (2556) พบว่าเวลาในการเสียดทานความดันในการเสียดทานและความดันในการอัด มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม ในขณะที่เวลาในการอัดและความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงานไม่มีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.8064 ได้สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานคือเวลาในการเสียดทานเท่ากับ 8.86 sec เวลาในการอัดเท่ากับ 2.22 sec ความดันในการเสียดทานเท่ากับ 29.36 bar ความดันในการอัดเท่ากับ 59.25 bar และความเร็วรอบในการหมุนเท่ากับ 1259.58 rpm ให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงสุดเท่ากับ 1048 MPa ส่วนการทดลองภายใต้สภาวะที่

เหมาะสมได้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเท่ากับ 1007 MPa เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายพบว่ามีค่าอคติของค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเท่ากับ 3.91% ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจึงมีความเหมาะสมสำหรับอธิบายช่วงของตัวแปรในการทดลองที่ใช้ศึกษาและมีความน่าเชื่อถือทางสถิติในการใช้ทำนายค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม

3.2 การออกแบบการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Desing) ได้ถูกพัฒนาโดย นายบ๊อคและนายเบ็นห์เคน (1996) ใช้ศึกษาปัจจัยปริมาณ และอาจจะใช้ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพได้ในบางกรณีขึ้นกับปัจจัย ซึ่งได้พัฒนาประสิทธิภาพการออกแบบการทดลองแบบสามระดับสำหรับฟิตพื้นผิวตอบสนองที่มีสมการอันดับสอง (second-order) ลักษณะของการออกแบบ วิธี Box-Behenken จะใช้หลักการของ 2^2 แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบผนวกกับจุดกึ่งกลาง (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) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ

$$y = \int(x1, x2) + \varepsilon \quad (3)$$

โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(y) = \int(x1, x2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = \int(x1, x2) \quad (4)$$

ซึ่งจะเรียกว่า พื้นผิวผลตอบ (Response Surface) โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวตอบในรูปของกราฟิก โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ $x1$ และ $x2$ เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวตอบสนอง โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระอาจจะเป็น แบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้เป็นแบบจำลองกำลังหนึ่ง ดังสมการที่ 5

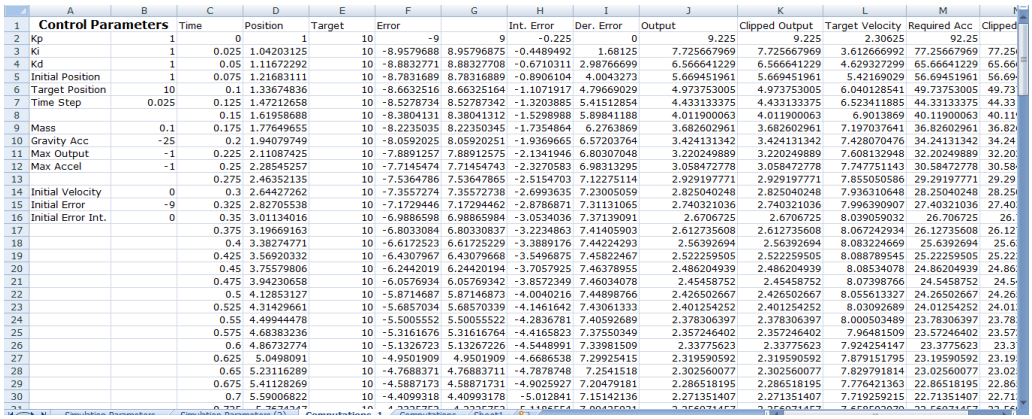
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (5)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดังสมการที่ 6

$$y = \beta_0 + + + i < j + \varepsilon \quad (6)$$

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 และInitial Error Int. = 0 ข้อมูล ดังรูปภาพที่ 4



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	**Control Parameters**		Time	Position	Target	Error		Int. Error	Der. Error	Output	Clipped Output	Target Velocity	Required Acc	Clipped
2	Kp	1	0	1	10	-9	9	-0.225	0	9.225	9.225	2.30625	92.25	
3	Ki	1	0.025	1.04203125	10	-8.9579688	8.95796875	-0.4489492	1.68125	7.725667969	7.725667969	3.612666992	77.25667969	77.25
4	Kd	1	0.05	1.11672292	10	-8.8832771	8.88327708	-0.6710311	2.98766699	6.566641229	6.566641229	4.629327299	65.66641229	65.66
5	Initial Position	1	0.075	1.21683111	10	-8.7831689	8.78316889	-0.8906104	4.0043273	5.669451961	5.669451961	5.42169029	56.69451961	56.69
6	Target Position	10	0.1	1.33674836	10	-8.6632516	8.66325164	-1.1071917	4.79669029	4.973753005	4.973753005	6.040128541	49.73753005	49.73
7	Time Step	0.025	0.125	1.47212658	10	-8.5278734	8.52787342	-1.3203885	5.41512854	4.433133375	4.433133375	6.523411885	44.33133375	44.33
8			0.15	1.61958688	10	-8.3804131	8.38041312	-1.5298988	5.89841188	4.011900063	4.011900063	6.9013869	40.11900063	40.11
9	Mass	0.1	0.175	1.77649655	10	-8.2235035	8.22350345	-1.7354864	6.2763869	3.682602961	3.682602961	7.197037641	36.82602961	36.82
10	Gravity Acc	-25	0.2	1.94079749	10	-8.0592025	8.05920251	-1.9369665	6.57203764	3.424131342	3.424131342	7.428070476	34.24131342	34.24
11	Max Output	-1	0.225	2.11087425	10	-7.8891257	7.88912575	-2.1341946	6.80307048	3.220249889	3.220249889	7.608132948	32.20249889	32.20
12	Max Accel	-1	0.25	2.28545257	10	-7.7145474	7.71454743	-2.3270583	6.98313295	3.058472778	3.058472778	7.747751143	30.58472778	30.58
13			0.275	2.46352135	10	-7.5364786	7.53647865	-2.5154703	7.12275114	2.929197771	2.929197771	7.855050586	29.29197771	29.29
14	Initial Velocity	0	0.3	2.64427262	10	-7.3557274	7.35572738	-2.6993635	7.23005059	2.825040248	2.825040248	7.936310648	28.25040248	28.25
15	Initial Error	-9	0.325	2.82705538	10	-7.1729446	7.17294462	-2.8786871	7.31131065	2.740321036	2.740321036	7.996390907	27.40321036	27.40
16	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	26.
17			0.375	3.19669163	10	-6.8033084	6.80330837	-3.2234863	7.41405903	2.612735608	2.612735608	8.067242934	26.12735608	26.12
18			0.4	3.38274771	10	-6.6172523	6.61725229	-3.3889176	7.44224293	2.56392694	2.56392694	8.083224669	25.6392694	25.6
19			0.425	3.56920332	10	-6.4307967	6.43079668	-3.5496875	7.45822467	2.522259505	2.522259505	8.088789545	25.22259505	25.22
20			0.45	3.75579806	10	-6.2442019	6.24420194	-3.7057925	7.46378955	2.486204939	2.486204939	8.08534078	24.86204939	24.86
21			0.475	3.94230658	10	-6.0576934	6.05769342	-3.8572349	7.46034078	2.45458752	2.45458752	8.07398766	24.5458752	24.5
22			0.5	4.12853127	10	-5.8714687	5.87146873	-4.0040216	7.44898766	2.426502667	2.426502667	8.055613327	24.26502667	24.26
23			0.525	4.31429661	10	-5.6857034	5.68570339	-4.1461642	7.43061333	2.401254252	2.401254252	8.03092689	24.01254252	24.01
24			0.55	4.49944478	10	-5.5005552	5.50055522	-4.2836781	7.40592689	2.378306397	2.378306397	8.000503489	23.78306397	23.78
25			0.575	4.68383236	10	-5.3161676	5.31616764	-4.4165823	7.37550349	2.357246402	2.357246402	7.96481509	23.57246402	23.57
26			0.6	4.86732774	10	-5.1326723	5.13267226	-4.5448991	7.33981509	2.33775623	2.33775623	7.924254147	23.3775623	23.3
27			0.625	5.0498091	10	-4.9501909	4.9501909	-4.6686538	7.29925415	2.319590592	2.319590592	7.879151795	23.19590592	23.19
28			0.65	5.23116289	10	-4.7688371	4.76883711	-4.7878748	7.2541518	2.302560077	2.302560077	7.829791814	23.02560077	23.02
29			0.675	5.41128269	10	-4.5887173	4.58871731	-4.9025927	7.20479181	2.286518195	2.286518195	7.776421363	22.86518195	22.86
30			0.7	5.59006822	10	-4.4099318	4.40993178	-5.012841	7.15142136	2.271351407	2.271351407	7.719259215	22.71351407	22.71

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

2. ออกแบบการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) แบบป้อนกลับ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) แบบ Box Behnken design มีค่าปัจจัยดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย –ค่าความผิดพลาด)

ปัจจัย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
Kp: อัตราขยายสัดส่วน	1	5
Ki: อัตราขยายปริพันธุ์	1	5
Kd: อัตราขยายอนุพันธุ์	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%
```

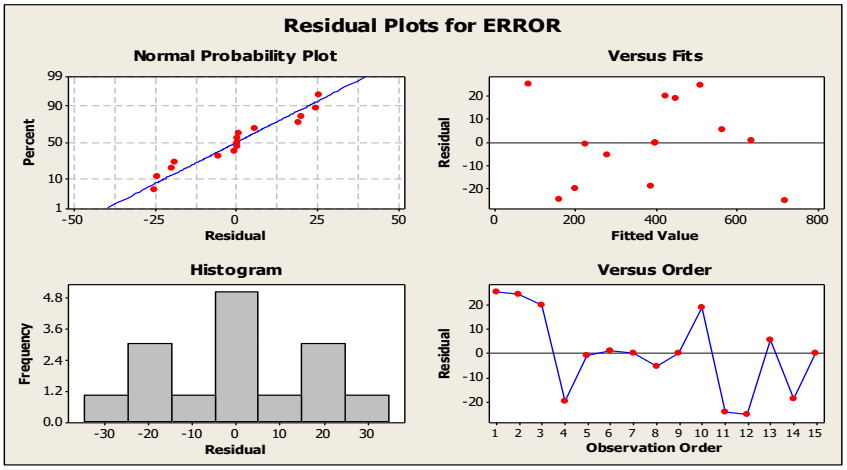
Estimated Regression Coefficients for Error using data in uncoded units

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

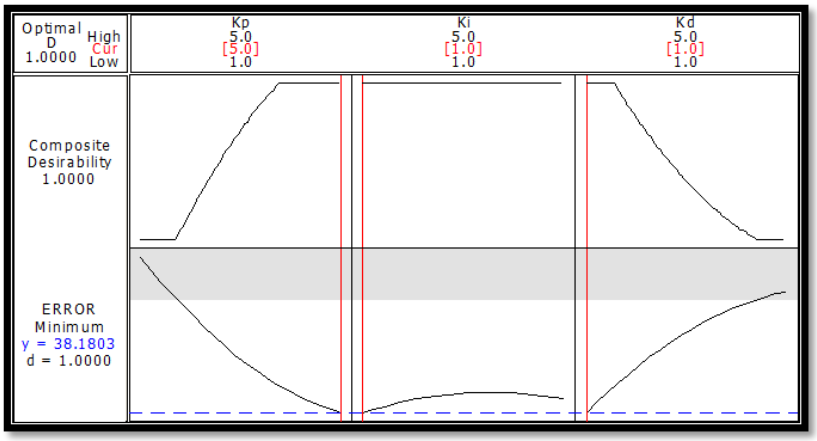
ตามรูปภาพที่ 5 ทำให้ทราบถึงค่าความสัมพันธ์ (R^2) ของปัจจัยทั้ง 3 เท่ากับ 99.07% ซึ่งตีความหมายว่าค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) ของตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้นั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูล และสามารถเขียนเป็นสมการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) ดังสมการ Y=392.821+Kp*(175.025)+Ki*(54.6664)+Kd*(124.920)+(Kp*Kp)*(14.0343)+(Ki*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=อัตราขยายปริพันธุ์
Kd=อัตราขยายอนุพันธุ์



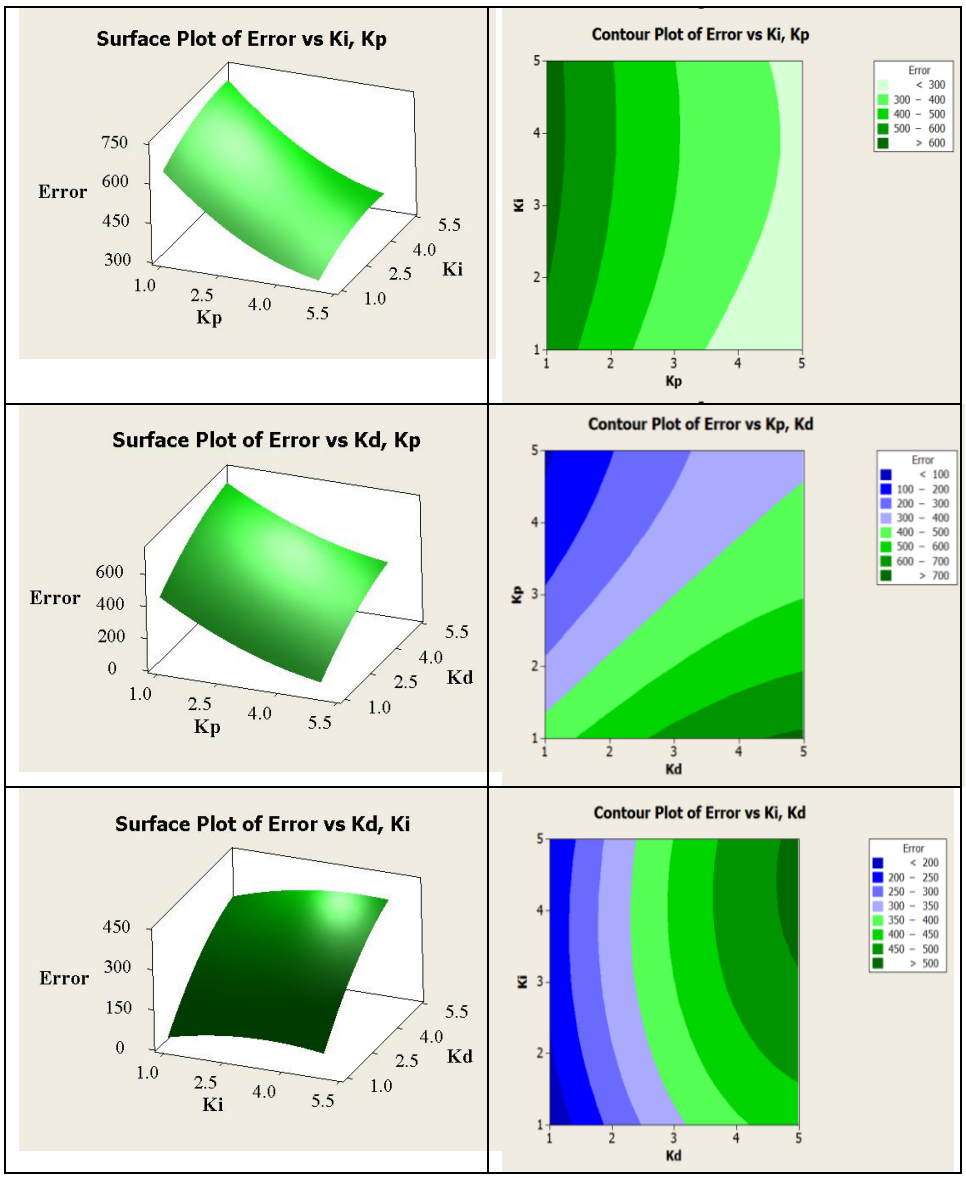
รูปภาพที่ 6 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลการทดลอง

จากรูปภาพที่ 6 ลักษณะของข้อมูลการออกแบบการทดลองมีการกระจายตัวไม่เป็นรูปแบบ ซึ่งพิจารณาแล้วว่ามีความเป็นอิสระของข้อมูลคือข้อมูลเก็บมาอย่างสุ่มและจากกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นถึงว่ามีการแจกแจงข้อมูลเป็นแบบปกติ และความแปรปรวนมีความเสถียรภาพในการทดลอง แล้วได้ทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด (Minimum of Error) ของปัจจัยทั้ง 3 ตัว เป็นไปตามรูปภาพที่ 7



รูปภาพที่ 7 สภาวะที่เหมาะสม (Optimization chart) ของค่า Kp =5, Ki=1 และ Kd=1

จากรูปภาพที่ 7 ทำให้ทราบว่าค่าความผิดพลาดของโปรแกรมที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 38.2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 100 % โดยที่ค่าของปัจจัยจะเท่ากับ Kp=5, Ki=1 และKd=1



รูปภาพที่ 8 Surface plot และ Control plot ของค่า Kp, Ki, Kd ที่มีอิทธิพลต่อค่าความผิดพลาด

การอภิปรายผล

จากผลการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน และพื้นผิวตอบสนองเป็นวิธีการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้หลักทางสถิติในการประมวลผลซึ่งจากข้อมูลแสดงว่าตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของสมการดังสมการที่ 2 มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลในระดับที่สูง และผลของค่าสภาวะที่เหมาะเมื่อนำมาทดสอบแบบจำลองการออกแบบระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ด้วยไมโครซอฟท์เอกซ์เซล 2007 มีค่าที่ต่ำที่สุด (ดีที่สุด) ต่อค่าความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย – ค่าความผิดพลาด)

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) แบบป้อนกลับ มีปัจจัย 3 ค่า คือ Kp, Ki และ Kd โดยวิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย – ค่าความผิดพลาด) แบบบ็อก-เบห์นเคนและพื้นผิวตอบสนองเป็นวิธีการหาค่าสภาวะที่เหมาะสม มีค่า Kp=5,Ki=1,Kd=1 นำค่าไปทดสอบในแบบจำลองมีค่าความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย – ค่าความผิดพลาด) ที่น้อยที่สุด 38.2 และค่าของปัจจัย Kp, Ki และ Kd มีระดับนัยสำคัญ 0.05 ที่ความเชื่อมั่น R-Squared 99.07% จากผลของข้อมูลสามารถเป็นวิธีการที่เอาไปใช้ในการปรับค่าทั้ง 3 ค่า ในการควบคุมอุปกรณ์เพื่อให้ได้ความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย – ค่าความผิดพลาด) ที่น้อยที่สุด จากนั้นก็นำค่าสภาวะที่เหมาะสมที่ได้นำไปทดลองควบคุมอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. กอบเดช วงค์คินี, บัญชา ป้อมสุวรรณ และวันจักรี เล่นวารี. (2555). **การออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำอุ่น**. วารสารวิจัย มข ปีที่ 17: 459 – 468.
2. ชาตรี หอมเขียว, วรพงศ์ บุญช่วยแทน และสุรสิทธิ์ ระวังวงศ์. (2560). **พารามิเตอร์การผลิตที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพาราโดยใช้การออกแบบบ็อก-เบห์นเคน.** วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 27: 315 – 328.
3. ธีร์ธวัช สิงหศิริ. (2557). **การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันไขไก่ โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง.** วารสารวิจัยพลังงาน ปีที่ 11: 54 – 65.
4. พุทธาวุฒิ ลีกุลธร และสมชาติ ศรีสกุลเดียว. (2561). **การสังเคราะห์ตัวควบคุมพีไอดีโหมดกระแส โดยใช้วงจรขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ.** วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 20: 213 – 223.
5. ภูมินทร์ รักษากิจ, ธีรเดช วุฒิพรพันธ์ และกุศล พิมาพันธุ์ศรี. (2558). **การลดปริมาณของเสียในกระบวนการกลั่นสารอัลลิลคลอไรด์ โดยใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนอง**. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 25: 393 – 403.
6. วิศวะ มะมา และธนา ราษฎร์ภักดี. (2560). **การพัฒนากฎการควบคุมพีไอดีสำหรับอุปกรณ์ขับเร้าแบบ เปิด/ปิด.** วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ปีที่ 3: 19 – 24.
7. สุพรพิศ ณ พิบูลย์. (2558). **กระบวนการอบแห้งปลากุเลาด้วยเครื่องอบพลังงานไฟฟ้าโดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี.** วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ปีที่ 7: 1–11.
8. สมศักดิ์ แก้วพลอย และกุลยุทธ บุญเซ่ง. (2557). **การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในกระบวนการอบไม้ยางพารา.** วารสารวิจัย มข ปีที่ 19: 261 – 221.
9. อิทธิพล วรพันธ์, ช่วงชัย ชุปวา และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. (2556). **การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็ก AISI 1015 โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง.** วารสารวิจัย มข ปีที่ 18: 909 – 924.