

การศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมจากแบบจำลองพีไอดี โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง  
A STUDY OF OPTIMAL VALUES WITH PID CONTROLLER  
USING RESPONSE SURFACE METHOD

อามินท์ หล้าวงศ์\* และ ศุภกิจ เสกศิริ

Amin Lawong\* and Supakit Sergsiri

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์  
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,  
Kalasin University

Received: 15 March 2020

Revised: 2 December 2020

Accepted: 4 December 2020

**บทคัดย่อ**

การหาค่าที่เหมาะสมของระบบควบคุมพีไอดีในโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้วิธีการลองผิดลองถูกในปรับค่าตัวแปรอัตราขยายสัดส่วน( $K_p$ ) อัตราขยายปริพันธ์ ( $K_i$ ) และ อัตราขยายอนุพันธ์ ( $K_d$ ) แล้วสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงการทำงานของอุปกรณ์ งานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง จากการทดลองในแบบจำลองพีไอดีในไมโครซอฟต์เอ็กเซลล์ จากผลการทดลองพบว่าค่าที่เหมาะสมของระบบควบคุมพีไอดีที่มีความผิดพลาดต่ำสุดเทียบกับเป้าหมาย คือ  $K_p=5, K_i=1, K_d=1$  มีค่าความผิดพลาด 38.18 และมีค่าสหสัมพันธ์  $R^2 = 99.07$  ซึ่งสามารถใช้เป็นวิธีที่หาค่าที่เหมาะสมในการควบคุม

**คำสำคัญ:** ระบบควบคุมพีไอดี, วิธีพื้นผิวตอบสนอง, ไมโครซอฟต์เอ็กเซลล์

\* ผู้ประสานงาน: อามินท์ หล้าวงศ์

อีเมล: aminlawong@hotmail.com

## Abstract

This study was to determine the optimum values of PID control systems in industrial plants using trial and error method to adjust the proportional gain variables ( $K_p$ ), the Integral extension ( $K_i$ ) and the derivative propagation ( $K_d$ ) parameters. Then changes in the operation of the equipment were observed. This study proposed the optimum value finding using the response surface method. From the experiment in the PID Model in Microsoft Excel, it was found that the optimum values of the PID control system with the lowest error relative to the target were  $K_p = 5$ ,  $K_i = 1$ ,  $K_d = 1$ . The error was at 38.18 and the correlation value of  $R^2 = 99.07$  which can be used as a method for determining the optimum control.

**Keywords:** PID Control System, Response Surface Methodology, Microsoft Excel

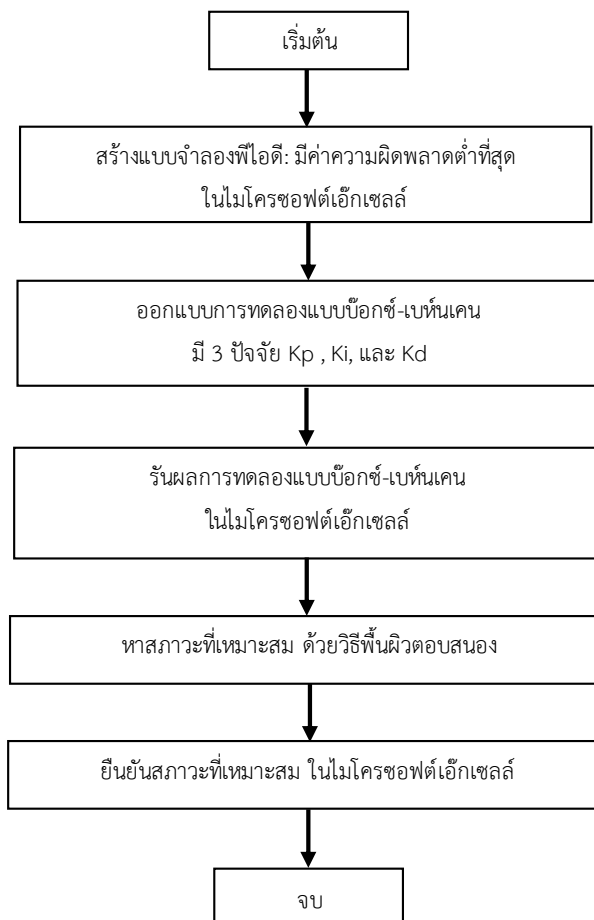
## บทนำ

ในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตที่ใช้ระบบอัตโนมัติในการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้มีการนำระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) เข้ามาประยุกต์ใช้ การควบคุมการหมักชีวภาพสำหรับการผลิตเอทานอล (Kumar et al., 2019) ในการควบคุมกลไกของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีการรับค่าสัญญาณจากตัวตรวจจับ (Sensor) ให้ส่งข้อมูลไปในระบบควบคุม แล้วส่งค่าสัญญาณออกให้เกิดการเปลี่ยนค่าเข้าใกล้ค่าที่ปรับตั้งไว้ (Set point) เพื่อให้มีค่าที่ความเหมาะสมต่อการควบคุมในระบบอัตโนมัติของกระบวนการผลิตเช่น การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ดีซี (Yadav & Tripathi, 2016) การควบคุมอุณหภูมิในแท่งค้ำน้ำ (Karade et al., 2018) เป็นต้น โดยมีโครงสร้างของระบบควบคุมการทำงาน ดังรูปที่ 1 ที่ส่งผลต่อค่าเป้าหมายของระบบหรือเงื่อนไขตามข้อกำหนดที่ทำการป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบควบคุมจะถูกเรียกว่า “อินพุต” (Input) ส่วนผลของการทำงานหรือสัญญาณที่ถูกจ่ายออกจากระบบควบคุมการทำงานจะถูกเรียกว่า “เอาต์พุต” (Output) ซึ่งวิธีปรับค่าระบบควบคุมพีไอดีจะใช้วิธีการลองผิดลองถูกแล้วสังเกตการเปลี่ยนของอุปกรณ์ โดยผู้ปฏิบัติงานที่มีประสบการณ์ในการทำงาน

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการปรับค่าระบบควบคุมพีไอดี โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสม ด้วยการออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน และวิธีพื้นผิวตอบสนอง จากการทดลองในแบบจำลองพีไอดีด้วยไมโครซอฟต์เอ็กเซลล์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับค่าควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรม

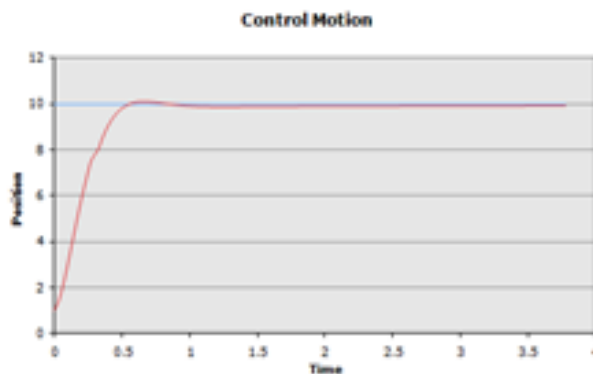
### วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของระบบควบคุมพีไอดี โดยมีขั้นตอนการวิจัยดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการสร้างแบบจำลองพีไอดี (PID control) ในไมโครซอฟต์เอ็กเซลล์ โดยที่ กำหนดค่าทดสอบแบบจำลอง 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 ดังรูปที่ 2



**รูปที่ 2** ผลการทดสอบแบบจำลองการออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) ในไมโครซอฟต์เอ็กเซลล์

2. ออกแบบการทดลองหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) แบบป้อนกลับ (สุพรพิศ ณ พิบูลย์, 2558) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ บ็อก-เบธเคนและวิธีพื้นผิวตอบสนอง (ภูมินทร์ รักษากิจ และคณะ, 2558) มีปัจจัยดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 1** ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย –ค่าความผิดพลาด)

ปัจจัย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
อัตราขยายสัดส่วน (Kp)	1	5
อัตราขยายปริพันธ์ (Ki)	1	5
อัตราขยายอนุพันธ์ (Kd)	1	5

ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) เป็นระบบการควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ในอุตสาหกรรมระบบอัตโนมัติ โดยมีปัจจัยที่สำคัญสามตัวแปรคืออัตราขยายสัดส่วน(Kp) อัตราขยายปริพันธ์(Ki) และ อัตราขยายอนุพันธ์(Kd) ที่ส่งผลต่อค่าความผิดพลาด (Error) ให้เข้าใกล้ค่าเป้าหมาย (Target) มีค่าที่ต่ำสุด ดังรูปที่ 2 และสมการที่ 1 โดยที่

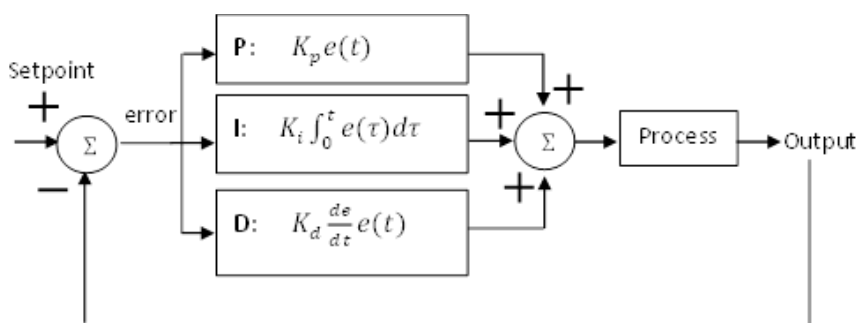
$Y$  = ค่าความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย-ค่าความผิดพลาด)

$K_p$  = อัตราขยายสัดส่วน

$K$  = อัตราขยายปริพันธ์

$K_d$  = อัตราขยายอนุพันธ์

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



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของตัวแบบควบคุมแบบพีไอดี

โดยค่าที่นำไปในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หาจากความแตกต่างระหว่างค่าที่ตั้ง (Target) กับค่าเอาต์พุต (Output) คำนวณเพื่อลดความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยที่สำคัญของการควบคุมแบบพีไอดี จะประกอบด้วยส่วนสำคัญในการควบคุมมี 3 ส่วนคือ

1. อัตราขยายสัดส่วน ( $K_p$ ): จะส่งสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของความผิดพลาด (error) ที่ตอบสนองต่อสัญญาณขาออก

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2)$$

เมื่อ  $P_{out}$  คือสัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน

$K_p$  คืออัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่า

$e$  คือความผิดพลาด ( $S_p - P_v$ )

$t$  คือเวลา

2. อัตราขยายปริพันธ์ ( $K_i$ ): สัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3)$$

เมื่อ  $I_{out}$  คือสัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์

$K_i$  คืออัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่า

$e$  คือความผิดพลาด ( $S_p - P_v$ )

$t$  คือเวลา

$\tau$  คือตัวแปรปริพันธ์หุ่น

3. อัตราขยายอนุพันธ์ ( $K_d$ ): การเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากความชันของความผิดพลาดทุก ๆ เวลา

$$D_{out} = K_d \frac{de}{dt} e(t) \quad (4)$$

เมื่อ  $D_{out}$  คือสัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์

$K_d$  คืออัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่า

$e$  คือความผิดพลาด ( $S_p - P_v$ )

$t$  คือเวลา

งานวิจัยที่นักวิจัยได้ดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี การควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) แบบป้อนกลับ เป็นการควบคุมแบบระบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed-loop control systems, feedback control systems) (กอบเดช วงศ์คินี และคณะ, 2555) การควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) แบบป้อนกลับเป็นระบบควบคุมที่นำไปใช้ในการคำนวณค่าผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ (พุทธารุฒิ ลีกุลธร และสมชาติ ศรีสกุลเดียว, 2561) ซึ่งตัวควบคุมจะพยายามลดค่าให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือ  $K_p$ : อัตราขยายสัดส่วน กำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน  $K_i$ : อัตราขยายปริพันธ์

กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งผ่านพ้นไป และ Kd: อัตราขยายอนุพันธ์ กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการ โดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะสมกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) การปรับค่าด้วยวิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) ไม่รับประกันได้ว่าจะเป็นการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอน (วิเศษ มะมา และธนา ราชภูร์ภักดี, 2560) และส่วนการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Desing) (อิทธิพล วรพันธ์ และคณะ, 2556) ได้ถูกพัฒนาโดย นายบ็อค และนายเบห์นเคน (1996) ใช้ศึกษาปัจจัยปริมาณและอาจจะใช้ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพได้ในบางกรณีขึ้นกับปัจจัย ซึ่งได้พัฒนาประสิทธิภาพการออกแบบการทดลองแบบสามระดับสำหรับพิตพื้นผิวตอบสนองที่มีสมการอันดับสอง (second-order) ลักษณะของการออกแบบ วิธี Box-Behnken จะใช้หลักการของ  $2^2$  แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบผนวกกับจุดกึ่งกลาง (central points) (ชาญณรงค์ สายแก้ว, 2557) รวมเข้าไป โดยที่ K คือจำนวนปัจจัย Box และ Behnken ได้จัดทำตารางสำหรับแผนการทดลอง เพื่อใช้กับปัจจัยได้สูงสุดไม่เกิน 16 ปัจจัย (ไม่รวมกรณี k=80) ตัวอย่างของการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design กรณีศึกษา 3 ปัจจัย

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

การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design) คือวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ ดังสมการที่ 5

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (5)$$

โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย  $x$  และ  $\varepsilon$  คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ  $y$  ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า  $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$  ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้ ดังสมการที่ 6

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (6)$$

ซึ่งจะเรียกว่า พื้นผิวผลตอบ (Response Surface) โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวตอบในรูปของกราฟิก โดยที่  $\eta$  จะถูกพล็อตกับระดับของ  $x_1$  และ  $x_2$  เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวตอบสนอง โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรก จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง  $y$  และเซตของตัวแปรอิสระอาจจะเป็น แบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้เป็นแบบจำลองกำลังหนึ่ง ดังสมการที่ 7

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (7)$$

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากผลการออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน ตารางที่ 3 และรูปที่ 4 และพื้นผิวตอบสนองเป็นวิธีการหาค่าสถานะที่เหมาะสมในแบบจำลองพีไอดีที่เขียนในไมโครซอฟต์เอ็กเซลล์ ได้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 2 และผลของสถานะที่เหมาะสมมีค่าอัตราขยายสัดส่วน ( $K_p$ ) = 5, อัตราขยายปริพันธ์ ( $K_i$ ) = 1, และ อัตราขยายอนุพันธ์ ( $K_d$ ) = 1 มีค่าความผิดพลาด 38.18 และที่ความเชื่อมั่น 100 เปอร์เซนต์ รูปที่ 6 หลังจากนั้นนำค่าเหมาะสมไปทดสอบกับแบบจำลองพีไอดีที่เขียนในไมโครซอฟต์เอ็กเซลล์ ซึ่งได้ค่าความผิดพลาดที่ต่ำที่สุดในการทดลอง (ชาตรี หอมเขียว และคณะ, 2560)



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

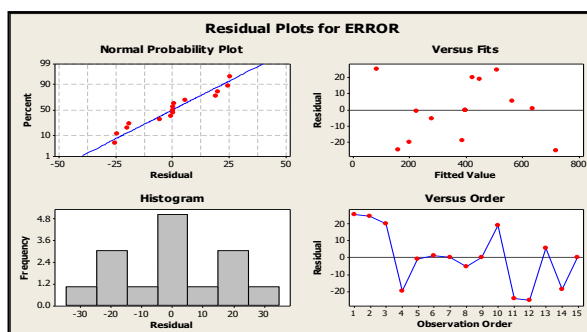
จากนั้นการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของค่าความผิดพลาด ดังรูปที่ 4

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%				

รูปที่ 4 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของค่าความผิดพลาด

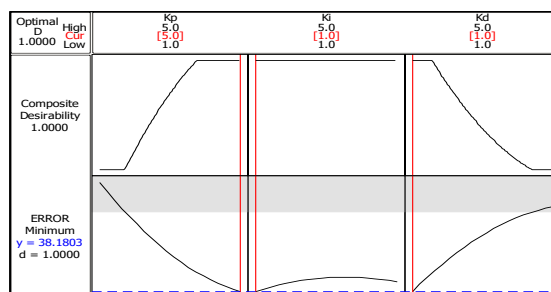
ทำให้ทราบถึงค่าความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของปัจจัยทั้ง 3 เท่ากับ 99.07% ซึ่งตีความหมายว่าค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) ของตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้นั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูล (ธีรวัช สิงห์ศิริ, 2557) และสามารถเขียนเป็นสมการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) ดังสมการ

$$Y = 399.587 + K_p*(174.376) + K_i*(31.843) + K_d*(142.432) + (K_p*K_p)*(56.137) + (K_i*K_i)*(-29.854) + (K_d*K_d)*(-46.194) + (K_p*K_i)*(-3.947) + (K_p*K_d)*(8.788) + (K_i*K_d)*(11.995)$$



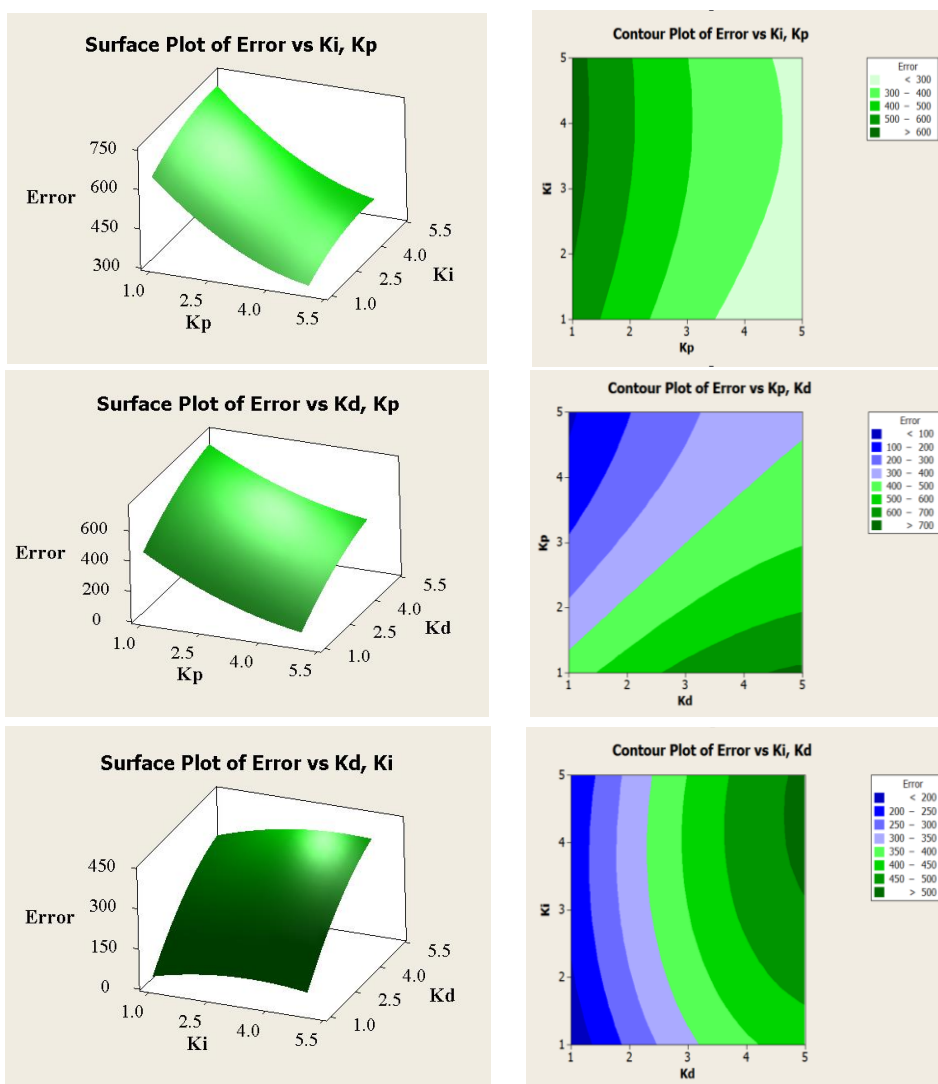
รูปที่ 5 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลการทดลอง

จากรูปที่ 5 ลักษณะของข้อมูลการออกแบบการทดลองมีการกระจายตัวไม่เป็นรูปแบบ ซึ่งพิจารณาแล้วว่ามีค่าความเป็นอิสระของข้อมูลคือข้อมูลเก็บมาอย่างสุ่มและจากกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นถึงการแจกแจงข้อมูลเป็นแบบปกติ และความแปรปรวนมีความเสถียรภาพในการทดลอง (สมศักดิ์ แก้วพลอย และกุลยุทธ บุญแข่ง, 2557) แล้วได้ทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด (Minimum of Error) ของปัจจัยทั้ง 3 ตัว เป็นไปตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 สถานะที่เหมาะสม (Optimization chart) ของค่า  $K_p = 5$ ,  $K_i = 1$  และ  $K_d = 1$

จากรูปที่ 6 ทำให้ทราบว่าค่าความผิดพลาดของโปรแกรมที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 38.2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 100 % (Composite Desirability) โดยที่ค่าของปัจจัยจะเท่ากับ  $K_p=5$ ,  $K_i=1$  และ  $K_d=1$  และ ปัจจัยของค่า  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  ที่มีอิทธิพลต่อค่าความผิดพลาด ดังรูปที่ 6 และผลของค่าสภาวะที่เหมาะสมของ  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  ในไมโครซอฟต์เอ็กเซลล์ ดังรูปที่ 7 และดังรูปที่ 2 ค่าของความผิดพลาดเข้าใกล้ค่าเป้าหมายซึ่งไม่เกิดการโอเวอร์ชูต



รูปที่ 7 Surface plot และ Control plot ของค่า  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  ที่มีอิทธิพล

## สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID control) แบบป้อนกลับ มีปัจจัย 3 ค่า คือ  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  โดยวิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย-ค่าความผิดพลาด) แบบบล็อก-เบห์นเคน และพื้นผิวตอบสนองเป็นวิธีการหาค่าสภาวะที่เหมาะสม มีค่า  $K_p=5, K_i=1, K_d=1$  นำค่าไปทดลองในแบบจำลองมีค่าความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย-ค่าความผิดพลาด) ที่น้อยที่สุด 38.2 และค่าของปัจจัย  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  มีระดับนัยสำคัญ 0.05 ที่ความเชื่อมั่น  $R^2$  99.07% และค่าของความผิดพลาดเข้าใกล้ค่าเป้าหมายซึ่งไม่เกิดการโอเวอร์ชูต จากผลของข้อมูลสามารถใช้เป็นวิธีการที่เอื้อไปใช้ในการปรับค่าทั้ง 3 ค่า ในการควบคุมอุปกรณ์เพื่อให้ได้ความผิดพลาด (ค่าเป้าหมาย-ค่าความผิดพลาด) ที่ต่ำที่สุด จากนั้นก็นำค่าสภาวะที่เหมาะสมที่ได้นำไปทดลองควบคุมอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ในการทำการวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- กอบเดช วงศ์คินี, บัญชา ป้อมสุวรรณ และ วันจักรี เล่นวาริ. (2555). การออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำอุ่น. *วารสารวิจัย มช*, 17(30), 459–468.
- ชาญณรงค์ สายแก้ว. (2557). *สถิติและการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม*. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ชาตรี หอมเขียว, วรพงศ์ บุญช่วยแทน และ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์. (2560). พารามิเตอร์การผลิตที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพาราโดยใช้การออกแบบบล็อก-เบห์นเคน. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 27(2), 315–328.
- ธีรวัช สิงหศิริ. (2557). การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไปอดีเซลจากน้ำมันไข่ไก่โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง. *วารสารวิจัยพลังงาน*, 11(2), 54–65.

- พุทธานุวัฒน์ ลีกุลธร และ สมชาติ ศรีสกุลเดียว. (2561). การสังเคราะห์ตัวควบคุมพีไอดีใหม่ดัดแปลงโดยใช้วงจรขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 20(1), 213–223.
- ภูมิษฐ์ รักษากิจ, ชีรเดช วุฒิพรพันธ์ และ กุศล พิมานันธุ์ศรี. (2558). การลดปริมาณของเสียในกระบวนการกลั่นสารอัลลิลคลอไรด์ โดยใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนอง. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 25(3), 393–403.
- วิเศษ มะมา และ ธนา ราษฎร์ภักดี. (2560). การพัฒนาการควบคุมพีไอดีสำหรับอุปกรณ์ขับเร้าแบบ เปิด/ปิด. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*, 3(1), 19–24.
- สุพรพิศ ณ พินุลย์. (2558). กระบวนการอบแห้งปลาเกล็ดด้วยเครื่องอบพลังงานไฟฟ้า โดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี. *วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์*, 7(1), 1–11.
- สมศักดิ์ แก้วพลอย และ กุลยัทธ บุญเซ่ง. (2557). การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในกระบวนการอบไม้ยางพารา. *วารสารวิจัย มช*, 19(2), 261–221.
- อิทธิพล วรพันธ์, ช่างชัย ชูปวา และ ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. (2556). การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็ก AISI 1015 โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง. *วารสารวิจัย มช*, 18(6), 909–924.
- Kumar, M., Prasad, D., Giri, B. S., & Singh, R. S. (2019). Temperature control of fermentation bioreactor for ethanol production using IMC-PID controller. *Biotechnology Reports*, Doi: 10.1016/j.btre.2019.e00319.
- Yadav, S. P., & Tripathi, V. K. (2016). A Case Study of DC Motor Speed Control with PID Controller through MAT LAB. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 5(5), 1008-1011.
- Karade, V., Sutar, S., & Shinde, A. (2018). Tuning of PID Controller for Temperature Loop. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 7(5), 4874-4879.