



การวิเคราะห์ปัจจัยในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลของหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไลซ์เบดแบบฟองแก๊ส

FACTOR ANALYSIS FOR BIOMASS COMBUSTION IN BUBBLING FLUIDIZED BED BOILER

ธนกร พุ่มชุมพล¹ และวิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาส²

¹นิสิตมหาบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลของหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไลซ์เบดแบบฟองแก๊ส โดยพิจารณาใช้เชื้อเพลิงที่มีต้นทุนต่ำและโรงงานสามารถจัดหาได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ที่สัดส่วนไม้สับต่อกลบต่อไฟเบอร์ต่อขี้เลื่อยที่สัดส่วน 8:6:1:1 จากการวิเคราะห์สมการถดถอยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไอน้ำแรงดันสูงและเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนคือ ค่าความชื้น อัตราการป้อนเชื้อเพลิง อัตราการป้อนอากาศ ความดันเตาเผาไหม้ และอุณหภูมิเตาเผาไหม้ จากวิธี *best subset regression* สำหรับอัตราการผลิตไอน้ำแรงดันสูง และวิธี *stepwise regression* สำหรับเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนส่วนเกิน ซึ่งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่าที่ดีที่สุดอยู่ที่ 95.01% และ 71.65% ตามลำดับ จากนั้นทำการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเดินเครื่องจักรด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองพบว่าสามารถเพิ่มกำลังการผลิตไอน้ำแรงดันสูงได้จากค่าเฉลี่ยก่อนปรับปรุงที่ 39.96 kg/s เพิ่มขึ้นเป็น 43.24 kg/s คิดเป็น 8.20% และต้นทุนเชื้อเพลิงต่อตันไอน้ำลดลงจาก 580.77 บาท/ตันไอน้ำ เหลือ 572.94 บาท/ตันไอน้ำ คิดเป็น 1.35% หรือคิดเป็นมูลค่าต้นทุนลดลงประมาณ 9.66 ล้านบาทต่อปี

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ปัจจัย, การเผาไหม้, ชีวมวล, หม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไลซ์เบดแบบฟองแก๊ส

ABSTRACT

This paper focus on factor analysis for biomass combustion in a bubbling fluidized bed boiler. Considering low cost and available types of fuel, this study applies to the proportion of wood chip: rice husk: fiber: sawdust of 8:6:1:1. The regression found factors that affect the high pressure steam production and percent excess oxygen are moisture content, fuel feed rate, air feed rate, boiler pressure and boiler temperature. Using best subset regression method for high pressure steam production and stepwise regression method for excess percentage of oxygen, R – Squared Adjusted: (R^2_{adj}) of high pressure steam production and excess percentage of oxygen were 95.01% and 71.65% respectively. Then the optimal operating condition were explored using response surface methodology. With the best operating condition, high pressure steam production rate increased from 39.96 kg/s to 43.24 kg/s, which is an increase of 8.20% and the fuel cost of steam generation can be reduce from 580.77 baht/ton-steam to 572.94 baht/ton-steam, which is a decrease by 1.35%. Finally, the company can save 9.66 billion baht per year.

Tanakorn Pumchumpol¹ and Wipawee Tharmmaphornphilas²

¹..... Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

²Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

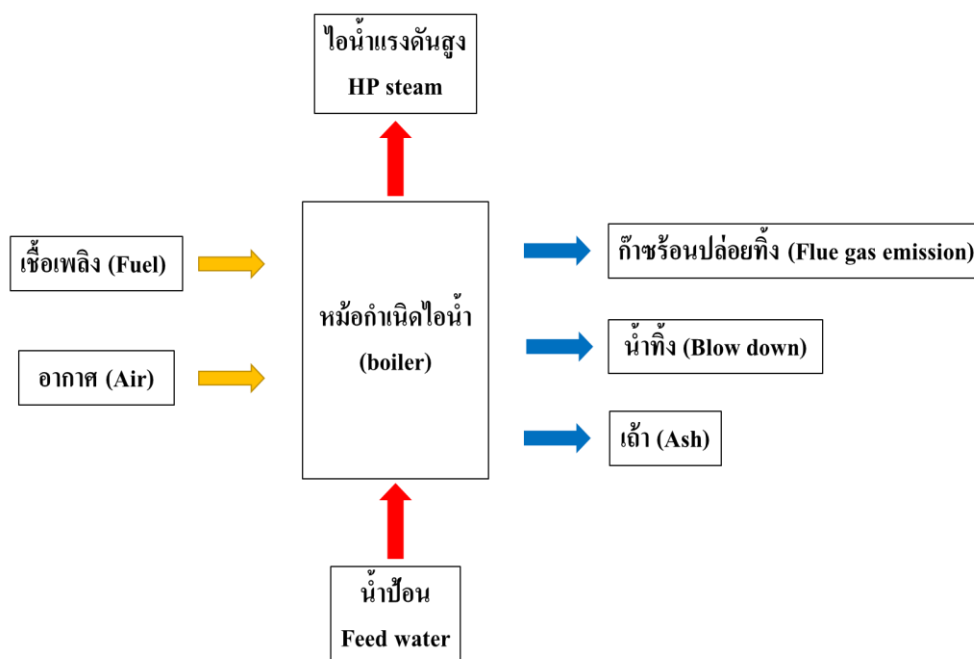
KEYWORD: Factor analysis, Combustion, Biomass, Bubbling fluidized bed boiler

1. บทนำ

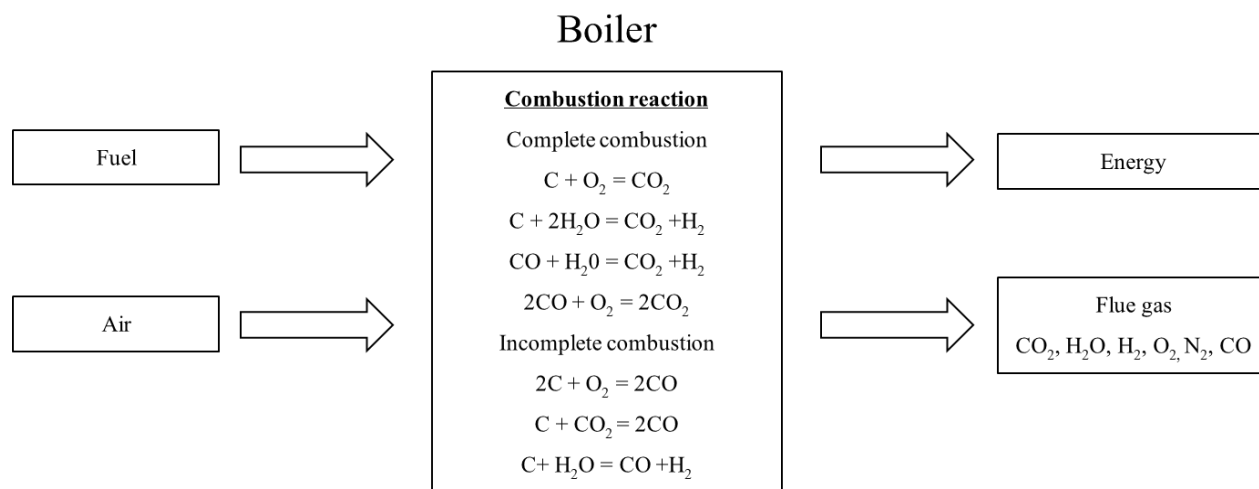
โรงไฟฟ้าการศึกษาเป็นผู้ดำเนินการธุรกิจโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ใช้กระบวนการผลิตด้วยเทคโนโลยีหม้อกำเนิดไอน้ำชนิดฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟองก๊าซ (Bubbling Fluidized Bed (BFB) Boiler) ใช้ชั้นไม้สับและแกลบเป็นเชื้อเพลิงหลัก อย่างไรก็ตามราคาชั้นไม้สับและแกลบกลับมีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงขึ้นตาม อีกทั้งปริมาณเชื้อเพลิงหลักมีไม่เพียงพอต่อความต้องการในการผลิตไฟฟ้า ทำให้ฝ่ายผลิตและฝ่ายจัดซื้อจัดหาเชื้อเพลิงต้องนำผลผลิตชีวมวลทางเลือกอื่น ๆ ที่เหลือใช้จากการเกษตร เช่น เปลือกไม้ กะลามะพร้าว ทะลายปาล์ม และจี้เลื้อย ซึ่งมีต้นทุนต่ำมาผสมกับเชื้อเพลิงหลัก ทั้งนี้การกำหนดสัดส่วนชีวมวลจะสอดคล้องกับแผนการจัดซื้อจัดหาโดยสัดส่วนผสมที่โรงงานใช้คือ ไม้สับ:แกลบ:ไฟเบอร์:จี้เลื้อย ที่สัดส่วน 8:6:1:1 ซึ่งไฟเบอร์คือ สัดส่วนผสมของ เปลือกไม้ กะลามะพร้าว และทะลายปาล์ม ในอัตราส่วน 4:1:1 หลังจากการเผาไหม้ชีวมวล น้ำที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซร้อนกลายเป็นไอน้ำแรงดันสูงแล้วนำไปปั่นกังหันไอน้ำสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป [1]

สำหรับการผลิตไอน้ำแรงดันสูงของโรงไฟฟ้าชีวมวล จะมีการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล (fuel) และอากาศ (air) ที่ใช้ในการเผาไหม้ในหม้อกำเนิดไอน้ำ ทำให้เกิดก๊าซร้อน (flue gas) ไหลเวียนและแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (feed water) ผ่านท่อไอน้ำ จนกระทั่งได้ไอน้ำแรงดันสูง (high pressure steam) สำหรับนำไปปั่นกังหันไอน้ำ (steam turbine) ต่อไป โดยส่วนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้จะกลายเป็นขี้เถ้า (ash) ก๊าซร้อนปล่อยทิ้ง (flue gas emission) และน้ำบางส่วนในหม้อกำเนิดไอน้ำ จะถูกระบายออกเพื่อรักษาคุณภาพน้ำ (blow down) ดังรูปที่ 1 ทั้งนี้การควบคุมสภาวะการเดินเครื่องจักรที่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ จะช่วยให้กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงในหม้อกำเนิดไอน้ำอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ได้ปริมาณไอน้ำตามเป้าหมาย ประหยัดเชื้อเพลิงและลดต้นทุนการผลิตได้ [2]

เมื่อพิจารณาด้านการเผาไหม้ เชื้อเพลิงและอากาศจะถูกป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความดัน เกิดการสันดาประหว่างสารอินทรีย์ หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C) กับก๊าซออกซิเจน (O_2) ซึ่งหากสามารถควบคุมสภาวะการเผาไหม้และมีการป้อนเชื้อเพลิงกับอากาศที่เหมาะสม (air to fuel ratio, AF ratio) จะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) หากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่ยังสามารถเผาไหม้และให้พลังงานได้อีก ซึ่งหากสูญเสียก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้อีกไปกับก๊าซร้อนที่ระบายออกทางปล่องระบายอากาศจะทำให้สูญเสียพลังงานในระบบ รวมถึงหากการป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มากเกินไป ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะสูญเสียไปกับอากาศที่ระบายออกทางปล่องระบายอากาศด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ก๊าซร้อนที่ปล่อยทางปล่องระบายจะมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มากับอากาศป้อนด้วย เช่น ไนโตรเจน (N_2) และน้ำ (H_2O) เป็นต้น [3] โดยสามารถพิจารณาประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้จากเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนส่วนเกินที่ออกมาจากปล่องระบายดังรูปที่ 2 ซึ่งโรงงานการศึกษาควบคุมค่าออกซิเจนส่วนเกินที่ 3-4.5% หากมีค่าต่ำกว่า 3% แสดงว่ามีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) มาก และหากมากกว่า 4.5% แสดงว่ามีการเผาไหม้สมบูรณ์แต่ป้อนอากาศมากเกินไปทำให้ความร้อนในระบบสูญเสียไปกับอากาศส่วนเกิน



รูปที่ 1 ภาพรวมการเผาไหม้ในระบบหม้อกำเนิดไอน้ำ



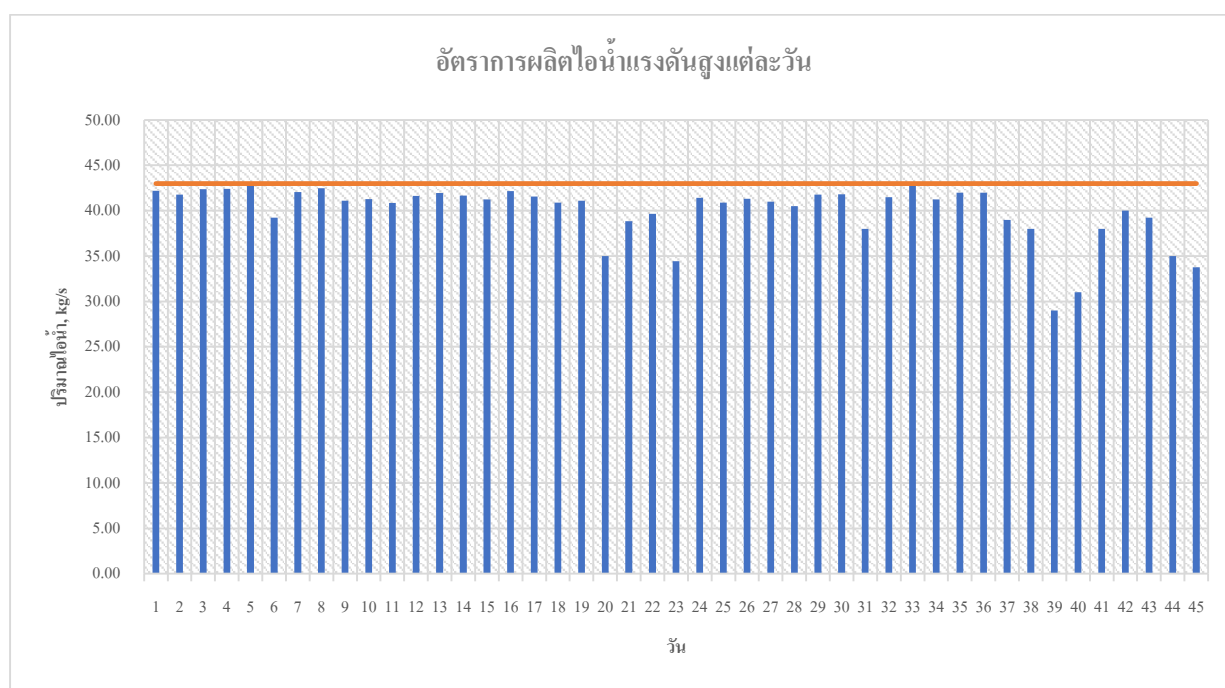
รูปที่ 2 ปฏิบัติการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อกำเนิดไอน้ำ

สำหรับโรงไฟฟ้ากรณีศึกษาที่มีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความหลากหลาย ก่อให้เกิดปัญหาด้านการผลิต ฝ่ายผลิตต้องทำการปรับเปลี่ยนสภาวะการเดินเครื่องตลอดเวลาส่งผลให้ปริมาณไอน้ำที่ผลิตและปริมาณการใช้เชื้อเพลิงไม่คงที่ ส่งผลต่อต้นทุนในการผลิต จากการเก็บข้อมูลต้นทุนเชื้อเพลิงต่อปริมาณไอน้ำแรงดันสูงที่ผลิตย้อนหลัง 6 เดือนพบว่าปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ยังมีการแกว่งตัวต่ำกว่าค่าเป้าหมาย โดยจากการเก็บข้อมูลทั้งหมดมีค่าเฉลี่ย 45 วันอยู่ที่ 39.96 kg/s จากเป้าหมาย 43 kg/s ดังรูปที่ 3 ค่าเปอร์เซ็นต์

ออกซิเจนหลังการเผาไหม้เฉลี่ยอยู่ที่ 5.30% (ค่าควบคุมที่ 3.00 – 4.50%) และต้นทุนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตต่อปริมาณไอน้ำแรงดันสูงเฉลี่ยอยู่ที่ 580.77 บาทต่อตันไอน้ำ

งานวิจัยนี้ใช้หลักการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรตอบสนองเนื่องจากโรงงานมีประวัติข้อมูลการเดินเครื่องจักรในอดีตสามารถนำมาสร้างสมการเพื่อทำนายค่าพื้นผิวตอบสนองได้ รวมถึงการหาพื้นผิวตอบสนองสามารถปรับค่าหาจุดเหมาะสมที่สุดใด ๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้ อย่างไรก็ตามสำหรับการทดลองด้วยหลักการออกแบบการทดลอง (Design of experiment) ต้องใช้การทดลองจริงซึ่งหากเกิดผลกระทบกับกระบวนการผลิตจะสูญเสียเงินมูลค่ามาก

สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อกำเนิดไอน้ำ ทำให้ได้พลังงานสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำมากที่สุด โดยเก็บข้อมูลการเดินเครื่องจักรย้อนหลัง 6 เดือน และใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยหลักพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ของหม้อกำเนิดไอน้ำของโรงไฟฟ้า จากการเก็บข้อมูลพบว่าตัวแปรต้นที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตไอน้ำแรงดันสูงมีทั้งหมด 7 ตัวแปร โดยมีตัวแปรตอบสนอง 2 ตัวแปร ดังตารางที่ 1-2 โดยตัวแปรตอบสนองที่พิจารณาคือ อัตราไหลของไอน้ำแรงดันสูง (Y1) มีค่าเป้าหมายที่ 43 kg/s และเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (Y2) กำหนดค่าในช่วง 3 -4.5%



รูปที่ 3 อัตราการผลิตไอน้ำแรงดันสูงของเชื้อเพลิงผสมแต่ละวัน

ตารางที่ 1 ตัวแปรต้นที่พิจารณาในการหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรต้น	หน่วย	ตัวแปร
ค่าความชื้นเชื้อเพลิง	เปอร์เซ็นต์, %	X1
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง	ตันต่อวัน, t/d	X2
อัตราการป้อนอากาศ	กิโลกรัมต่อวินาที, kg/s	X3
ความดันเตาเผาไหม้	มิลลิบาร์, mbar	X4
อุณหภูมิเตาเผาไหม้	องศาเซลเซียส, °C	X5
อุณหภูมิไอน้ำแรงดันสูง	องศาเซลเซียส, °C	X6
ความดันไอน้ำแรงดันสูง	บาร์, bar	X7

ตารางที่ 2 ตัวแปรตอบสนองที่พิจารณาในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมกับการเผาไหม้

ตัวแปรตอบสนอง	หน่วย	ตัวแปร
อัตราการผลิตไอน้ำแรงดันสูง	กิโลกรัมต่อวินาที, kg/s	Y1
ออกซิเจนส่วนเกินหลังการเผาไหม้	เปอร์เซ็นต์, %	Y2

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

- ศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ของหม้อกำเนิดไอน้ำของโรงไฟฟ้าการศึกษา
- หาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่ส่งผลให้อัตราการผลิตไอน้ำแรงดันสูงตามเป้าหมายที่ 43 กิโลกรัมต่อวินาที
- ลดต้นทุนเชื้อเพลิงต่อตันไอน้ำที่ผลิตให้น้อยกว่าค่าเฉลี่ยเดิมที่ 580.66 บาท/ตันไอน้ำ

3. การดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย

3.1 วิเคราะห์ความสัมพันธ์เบื้องต้น

จากการเก็บข้อมูลการเดินเครื่องจักรทั้งหมด 45 ข้อมูล นำมาพิจารณาความสัมพันธ์เชิงเส้นเบื้องต้นระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตอบสนองด้วยวิธีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Correlation) เพื่อคัดกรองตัวแปรต้นที่น่าจะส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองซึ่งผลลัพธ์จะแสดงในรูปของตัวเลขโดยค่าน้อยที่สุดคือ -1 และมากที่สุดคือ 1 หากค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรเข้าใกล้ค่า -1 หรือ 1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กับในระดับสูง และหากเข้าใกล้ 0 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ โดยงานวิจัยนี้พิจารณาค่ามากกว่า 0.3 หรือน้อยกว่า -0.3 หรือพิจารณาค่า P-value น้อยกว่า 0.05 [4] เพื่อนำตัวแปรที่มีความสัมพันธ์มาวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยต่อไป ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตอบสนอง

Description		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Y1	Pearson correlation	-0.386	0.940	0.518	0.292	0.539	-0.214	-0.098
	P-Value	0.009	0.000	0.000	0.051	0.000	0.158	0.523
Y2	Pearson correlation	0.213	-0.743	-0.635	-0.416	-0.396	0.117	0.040
	P-Value	0.159	0.000	0.000	0.004	0.007	0.445	0.792

จากการตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นเบื้องต้นระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตอบสนองด้วยวิธีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Correlation) ตัวแปรต้นที่มีความสัมพันธ์ต่อ Y1 คือ X1, X2, X3, X5 และ Y2 คือ X2, X3, X4, X5 อย่างไรก็ตาม ค่าความชื้น (X1) และความดันเตาเผาไหม้ (X4) มีผลต่อการเผาไหม้และประสิทธิภาพของหม้อกำเนิดไอน้ำในเชิงทฤษฎี [5-6] เพื่อให้สามารถอธิบายอิทธิพลของตัวแปรต้นที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองทั้งสองตัว จะใช้ตัวแปรต้นทั้งหมดที่พิจารณา คือ X1, X2, X3, X4, X5 หาความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนอง Y1 และ Y2 สร้างสมการถดถอยที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่าที่ดีที่สุด หลังจากนั้นหาสมการที่เหมาะสมด้วยวิธีการพหุคูณตอบสนองต่อไป

3.2 การวิเคราะห์สมการถดถอย

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นนำตัวแปรต้นที่พิจารณาวิเคราะห์สมการถดถอย [7-8] เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตอบสนองผู้วิจัยได้วิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่า (R^2_{adj}) ที่ดีที่สุด โดยใช้สมการถดถอย 4 รูปแบบคือ

1. Full quadratic model หรือพิจารณาตัวแปรและปฏิสัมพันธ์ทุกตัว
2. Best subset regression หรือการเลือกตัวแปรเซตย่อยที่ดีที่สุด
3. Stepwise regression หรือการเลือกตัวแปรด้วยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน
4. Stepwise regression โดยพิจารณาสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (X8) ร่วมด้วย

สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (air to fuel ratio) มีหน่วยเป็น กิโลกรัมของอากาศต่อกิโลกรัมของเชื้อเพลิง ซึ่งตามทฤษฎีการเผาไหม้คืออัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนเหมาะสมที่สุด ทำให้การสันดาปสมบูรณ์และได้พลังงานจากเชื้อเพลิงมากที่สุด [9-10] ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณาใช้สัดส่วนค่าจริงจากการเดินเครื่องจักร

ผลวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่าของสมการถดถอยของตัวแปรตอบสนอง Y1 และ Y2 4 รูปแบบ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่าของสมการถดถอยของตัวแปรตอบสนอง 4 รูปแบบ

รูปแบบที่	รูปแบบสมการถดถอย	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่า (R^2_{adj})	
		Y1	Y2
1	Full quadratic term	93.25%	63.13%
2	Best subset	95.01%	67.21%
3	Stepwise	94.90%	71.65%
4	Stepwise (air to fuel ratio)	94.90%	68.29%

จากตารางที่ 4 เปรียบเทียบการหาสมการถดถอยที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่ามากที่สุด พบว่าสมการถดถอยรูปแบบที่ 2 แบบ Best subset ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่า หรือ R^2_{adj} ของ Y1 มากที่สุดที่ 95.01% และสมการถดถอยรูปแบบที่ 3 แบบ Stepwise regression ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่า หรือ R^2_{adj} ของ Y2 มากที่สุดที่ 71.65% ทั้งนี้ความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตอบสนองสามารถสร้างสมการได้ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$Y1 = -177.2 + 2.93 X1 + 0.2175 X2 - 0.000073 X2^2 - 0.000666 X1^2 - 0.002567 X1^2 X5 + 0.00862 X2^2 X4 + 0.000053 X2^2 X5 - 0.01428 X4^2 X5 \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) จะเห็นได้ว่าตัวแปรต้นที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองหรืออัตราการผลิตไอน้ำแรงดันสูงคือ ความชื้นเชื้อเพลิง อัตราการป้อนเชื้อเพลิง ความดันเตาเผาไหม้ และอุณหภูมิเตาเผาไหม้

$$Y2 = 265.1 - 0.00377 X2 - 7.84 X3 + 27.0 X4 - 0.045 X5 + 0.0364 X3^2 - 0.000147 X5^2 X5 + 0.00450 X3^2 X5 - 0.0327 X4^2 X5 \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) จะเห็นได้ว่าตัวแปรต้นที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองหรือเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนส่วนเกินคือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง อัตราการป้อนอากาศ ความดันเตาเผาไหม้ และอุณหภูมิเตาเผาไหม้

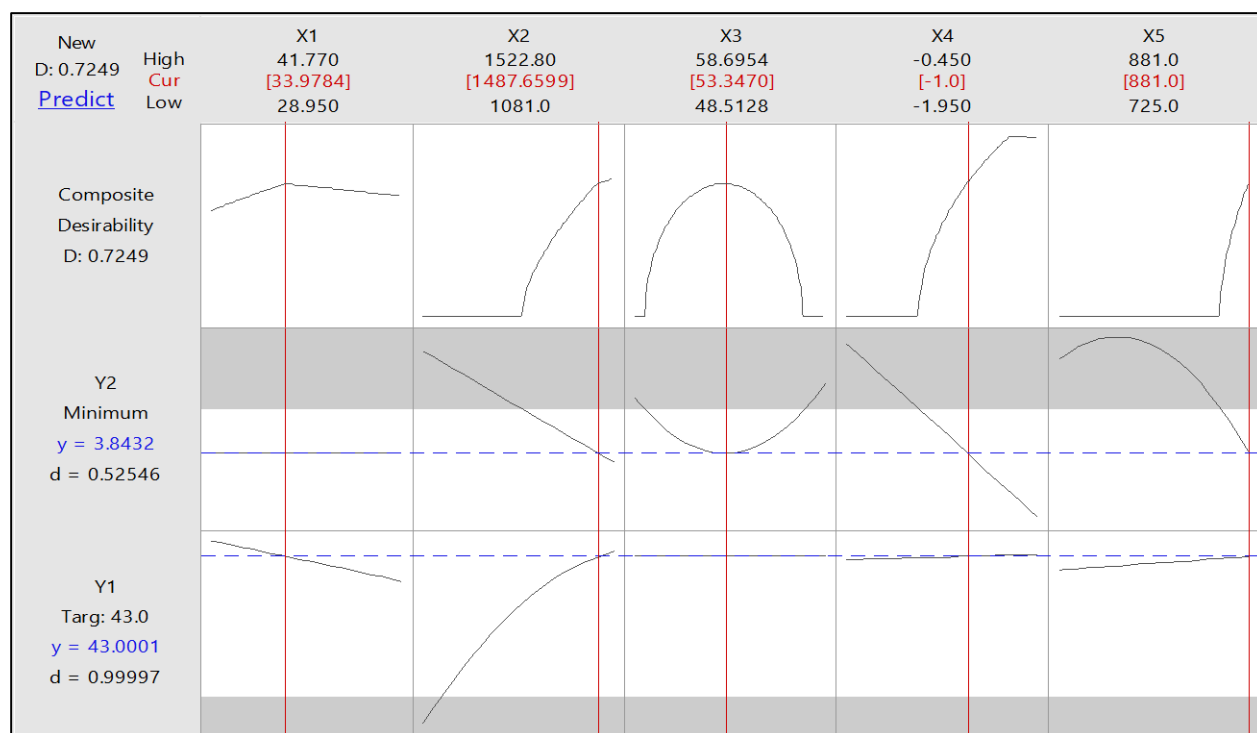
3.3 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

จากสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตอบสนอง (สมการที่ 1 และ 2) หาสถานะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface optimizer) [11-12] โดยกำหนดให้ค่าของตัวแปรต้นอยู่ในช่วงค่าควบคุมของโรงงาน และตัวแปรตอบสนองอยู่ในค่าเป้าหมายดังตารางที่ 5 เมื่อวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองด้วยโปรแกรม minitab ดังรูปที่ 4 พบว่าค่าที่เหมาะสมในการผลิตไอน้ำแรงดันสูงคือ ค่าความชื้นเชื้อเพลิงอยู่ที่ 33.98 เปอร์เซ็นต์ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงอยู่ที่ 1487.66 ตัน/วัน อัตราการป้อน

อากาศอยู่ที่ 53.35 กิโลกรัมต่อวินาที ความดันเตาเผาไหม้อยู่ที่ -1.00 มิลลิบาร์ และอุณหภูมิเตาเผาไหม้อยู่ที่ 881 องศาเซลเซียส ทำให้ได้อัตราการผลิตไอน้ำแรงดันสูงที่ 43.00 กิโลกรัมต่อวินาที และออกซิเจนส่วนเกินหลังการเผาไหม้ที่ 3.84 เปอร์เซ็นต์

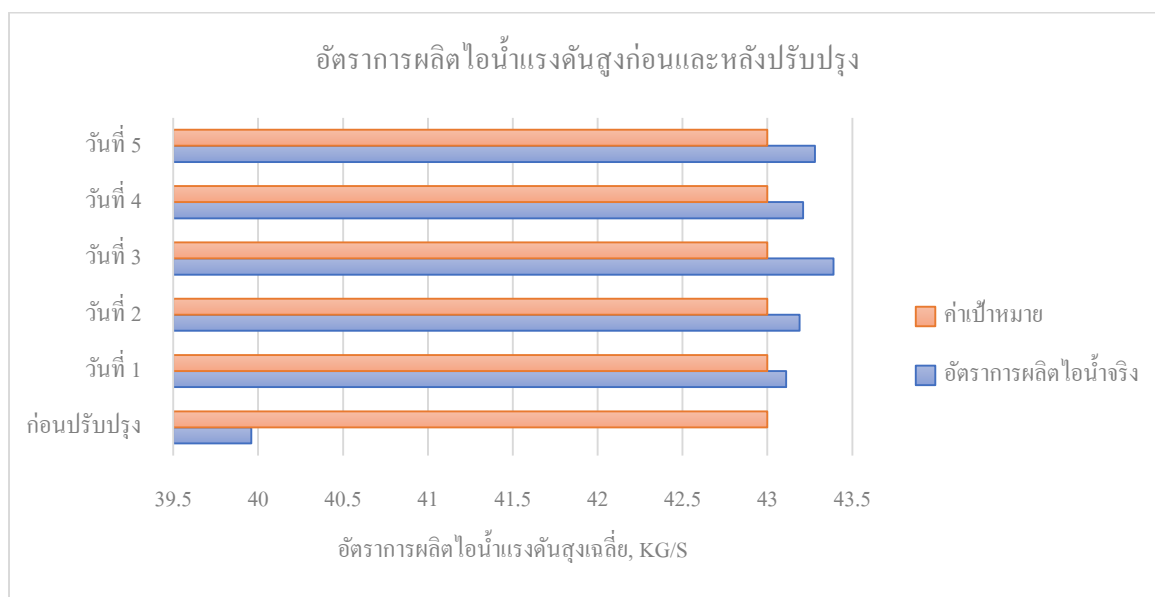
ตารางที่ 5 ผลวิเคราะห์การหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต้นและตัวแปรตอบสนองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

ตัวแปรต้น		หน่วย	ค่าควบคุมโรงงาน	สภาวะที่เหมาะสม
ความชื้นเชื้อเพลิง	X1	%	33-55	33.98
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง	X2	t/d	1450-1600	1487.66
อัตราการป้อนอากาศ	X3	kg/s	39.3 – 66.1	53.35
ความดันเตาเผาไหม้	X4	mbar	-1 ถึง -3	-1.00
อุณหภูมิเตาเผาไหม้	X5	°C	700 – 900	881
ตัวแปรตอบสนอง		หน่วย	ค่าเป้าหมาย	สภาวะที่เหมาะสม
อัตราการผลิตไอน้ำแรงดันสูง	Y1	kg/s	43	43.00
ออกซิเจนส่วนเกินหลังการเผาไหม้	Y2	%	3-4.5	3.84



รูปที่ 4 ผลวิเคราะห์การหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต้นและตัวแปรตอบสนองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวดอกสนองนำค่าที่ได้จากการหาสภาวะที่เหมาะสมไปปรับใช้กับโรงงานกรณีศึกษาจริงเป็นระยะเวลา 5 วันพบว่าสามารถเพิ่มกำลังการผลิตไอน้ำแรงดันสูงได้จากค่าเฉลี่ยก่อนปรับปรุงที่ 39.96 กิโลกรัมต่อวินาที เพิ่มขึ้นคิดเป็น 43.24 กิโลกรัมต่อวินาที (8.20%) จากค่าเฉลี่ย 5 วัน ดังรูปที่ 5 ทั้งนี้อัตราการผลิตไอน้ำแรงดันสูงในแต่ละวันมาจากการวัดค่ารายชั่วโมง



รูปที่ 5 อัตราการผลิตไอน้ำแรงดันสูงก่อนและหลังปรับปรุง

เมื่อพิจารณาด้านต้นทุนเชื้อเพลิงที่ราคาเชื้อเพลิงผสมรับซื้อที่ 1433 บาท/ตัน โดยการคำนวณต้นทุนเชื้อเพลิงต่อตันไอน้ำดังสมการที่ (3)

$$\text{ต้นทุนเชื้อเพลิงต่อตันไอน้ำ (บาท/ตันไอน้ำ)} = \frac{[\text{ปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อน (ตัน/วัน)} \times \text{ราคาเชื้อเพลิง (บาท/ตัน)}]}{[\text{ปริมาณไอน้ำผลิตทั้งวัน (ตัน/วัน)}]} \quad (3)$$

จากการทดลองจริงของโรงงานกรณีศึกษาพบว่าต้นทุนเชื้อเพลิงต่อตันไอน้ำเฉลี่ยลดลงจาก 580.77 บาท/ตันไอน้ำ เหลือ 572.94 บาท/ตันไอน้ำ ดังตารางที่ 6 คิดเป็น 1.35% หรือคิดเป็นมูลค่าต้นทุนลดลงประมาณ 9.66 ล้านบาทต่อปี

ตารางที่ 6 เปรียบต้นทุนเชื้อเพลิงต่อตันไอน้ำจากการทดลองจริงของโรงงานกรณีศึกษา

รายละเอียด	หน่วย	ก่อนปรับปรุง	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	เฉลี่ย
ปริมาณไอน้ำแรงดันสูง	กิโลกรัม/วินาที	39.96	43.11	43.19	43.39	43.21	43.28	43.24
ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้จริง	ตัน/วัน	1399.26	1489.85	1493.05	1497.89	1488.21	1498.74	1493.55
ราคาคำนวณจริง	บาท/ตันไอน้ำ	580.77	573.19	573.35	572.56	571.23	574.34	572.94

หมายเหตุ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้จริงต่างค่ากำหนด (set point ที่ 1487.66 ตัน/วัน) ในห้องควบคุมเล็กน้อย คิดเป็น 0.4% จากค่า set point เนื่องจากการตั้งค่าอัตราการป้อนจากห้องควบคุมคำนวณจากความเร็วของชุดลำเลียงเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีการตัดปริมาณการใช้จริงอีกครั้งเมื่อสิ้นสุดวัน

4. สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาปัจจัยในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลของหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองแก๊ส ของโรงไฟฟ้าชีวมวลกรณีศึกษา ได้มุ่งเน้นพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้รวมถึงสภาวะการเดินเครื่องจักรโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นคือ ค่าความชื้นเชื้อเพลิง(X1) อัตราการป้อนเชื้อเพลิง(X2) อัตราการป้อนอากาศ(X3) ความดันเตาเผาไหม้(X4) อุณหภูมิเตาเผาไหม้(X5) อุณหภูมิไอน้ำแรงดันสูง(X6) ความดันไอน้ำแรงดันสูง(X7) และมีตัวแปรตอบสนองคือ อัตราไหลของไอน้ำแรงดันสูง(Y1) และเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน(Y2) ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) รวมถึงหาสภาวะที่เหมาะสมโดยมีเป้าหมายเพื่อผลิตไอน้ำแรงดันสูงให้ได้ 43 กิโลกรัมต่อวินาที เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนอยู่ในค่าควบคุมที่ 3-4.5 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดต้นทุนเชื้อเพลิงต่อตันไอน้ำจากค่าเฉลี่ยเดิมได้ ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าค่าที่เหมาะสมในการผลิตไอน้ำแรงดันสูงคือ ค่าความชื้นเชื้อเพลิงอยู่ที่ 33.98 เปอร์เซ็นต์ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงอยู่ที่ 1487.66 ตัน/วัน อัตราการป้อนอากาศอยู่ที่ 53.35 กิโลกรัมต่อวินาที ความดันเตาเผาไหม้อยู่ที่ -1.00 มิลลิบาร์ และอุณหภูมิเตาเผาไหม้อยู่ที่ 881 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อนำไปทดลองจริงกับโรงงานกรณีศึกษาพบว่าสามารถเพิ่มกำลังการผลิตไอน้ำแรงดันสูงได้จากค่าเฉลี่ยก่อนปรับปรุงที่ 39.96 kg/s เพิ่มขึ้นคิดเป็นค่าเฉลี่ย 43.24 kg/s (8.20%) ได้ตามเป้าหมายและต้นทุนเชื้อเพลิงต่อตันไอน้ำลดลงจาก 580.77 บาท/ตันไอน้ำ เหลือ 572.94 บาท/ตันไอน้ำ คิดเป็น 1.35% หรือคิดเป็นมูลค่าต้นทุนลดลงประมาณ 9.66 ล้านบาทต่อปี

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาถึงตะกอนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะการหยุดซ่อมบำรุงเท่านั้น ทั้งนี้โรงงานกรณีศึกษาจะมีการเฝ้าระวังจากผลต่างของอุณหภูมิของไอน้ำและก๊าซร้อนแต่ละส่วนในหม้อกำเนิดไอน้ำซึ่งควบคุมไม่ให้เกินค่ากำหนดของโรงงาน

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไอน้ำแรงดันสูงโดยคำนึงถึงการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่หลากหลายมีสูตรผสมตามแผนการจัดซื้อจัดหาของโรงงานโดยผู้วิจัยได้รวมหลักการวิเคราะห์ทางสถิติกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะสามารถนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้กับโรงไฟฟ้าชีวมวลที่มีสูตรเชื้อเพลิงผสมอื่น ๆ ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Foster Wheeler Global Power Group, Bubbling Fluidized Bed (BFB), Industrial Fluidization South Africa, Johannesburg, South Africa, 15 - 17 November 2011. (BFB).
- [2] Bureau of Energy Efficiency Ministry of Power, Govt. of India. UNIT 1, ENERGY PERFORMANCE ASSESSMENT OF BOILERS (accessed Jan 23, 2017).
- [3] Basu P. and Fraser, S.A., Circulating fluidized bed boiler: design and operations, Butterworth-Heinemann 1991.
- [4] David S Moore William I Notz. The Basic Practice of Statistics 6th Edition (2012). New York, United States.

-
- [5] Orang N. and Tran H., Effect of feedstock moisture content on biomass boiler operation, Tappi Journal, OCTOBER 2015, Vol. 14, No. 10, pp 629-637.
- [6] Improving Process Heating System Performance: A Sourcebook for Industry. U.S. Department of Energy (DOE) and the Industrial Heating Equipment Association (IHEA).
- [7] Sreepradha Chandrasekharan*, Rames Chandra Panda, Bhuvaneswari Natrajan Swaminathan, Statistical modeling of an integrated boiler for coalfired thermal powerplant, Department of Electronics and Instrumentation Engineering, CSIR-CLRI, Chennai, India.
- [8] Chayalakshmi C.L, Jangamshetti D.S, Savita S. MULTIPLE LINEAR REGRESSION ANALYSIS FOR PREDICTION OF BOILER LOSSES AND BOILER EFFICIENCY. International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS) Vol.8, No.2, April 2018.
- [9] J. J. HERNÁNDEZ*, J. BARBA, G. ARANDA, COMBUSTION CHARACTERIZATION OF PRODUCER GAS FROM BIOMASS GASIFICATION, Global NEST Journal, Vol 14, No 2, pp 125-132, 2012.
- [10] Carlos Torres-Fuchslocher¹, Felipe Varas-Concha^{1,2}, DESIGN AND EFFICIENCY OF A SMALL-SCALE WOODCHIP FURNACE, Maderas. Ciencia y tecnología 17(2): 355 - 364, 2015.
- [11] Hakan Akçay and A. Sermet Anagün, MULTI RESPONSE OPTIMIZATION APPLICATION ON A MANUFACTURING FACTORY, Mathematical and Computational Applications, Vol. 18, No. 3, pp. 531-538, 2013.
- [12] Cem Bas, Güvenç Arslan, Zehra F. Muluk, ON MULTIPLE RESPONSE OPTIMIZATION: DESIRABILITY FUNCTIONS AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS, MEC EurOPT 2010.