

## การปรับพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง Single Phase Transformer Parameter Modification by Central Composite Design Method

เดือนแรม พ่างเกี้ยว\* และ สมพร เรืองสินชัยวานิช

D. Phaengkiao and S. Ruangsinchaiwanich

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Department of Electrical & Computer Engineering Faculty of Engineering Naresuan University

E-mail: sompornru@yahoo.co.uk

\*Corresponding author E-mail: duanraemp@gmail.com

(Received: March 27, 2018, Revised: April 7, 2018, Accepted: July 23, 2018)

### บทคัดย่อ

แม้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถพัฒนาได้หลากหลายวิธีด้วยแนวทางใหม่ๆ วิธีการทางเลือกอื่นๆ สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้ายังคงถูกนำเสนอโดยนักวิจัยอย่างต่อเนื่อง หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องใช้ไฟฟ้าจำนวนมาก เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าในเครื่องใช้ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นย่อมส่งผลให้เครื่องใช้ไฟฟ้าใช้พลังงานลดลงด้วย บทความวิจัยนี้นำเสนอการปรับพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการใช้วิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design Method) สำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าทางเทคนิคพารามิเตอร์ด้านโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น ความหนาแกนเหล็ก จำนวนรอบขดลวดตัวนำและพื้นที่หน้าตัดขดลวดตัวนำ ถูกวิเคราะห์และปรับเปลี่ยนตามวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง วิธีการที่นำเสนอนี้มีผลที่น่าพอใจสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อแปลงแบบหนึ่งเฟส โดยหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่มีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 3.7% และสามารถลดต้นทุนของค่าวัสดุในหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่ได้ถึง 4.09% เมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

**คำสำคัญ:** การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า วิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### Abstract

Although an electrical transformer can be developed efficiency by many novel approaches, the alternative methods for the transformer efficiency improvement have been proposed by researcher frequently. An electrical transformer is one of main components for many electric appliances. While the transformer of the electric appliance has high efficiency, thus the electric appliance will consume lower power energy. This paper proposes for modifying transformer parameters by using central composite design (CCD) method to improve the efficiency of transformer. Technically, the transformer structural parameters such as core thickness, winding turn number and conductor area are analyzed and modified by the central composite design. Consequently, the proposed method is positive for improving the efficiency of single phase transformer. The efficiency of the innovative transformer is higher 3.7% comparing with the prototype transformer. Also the cost of the innovative transformer can be reduced as 4.09% comparing with the prototype transformer.

**Keywords:** Transformer Design, Central Composite Design Method, Finite Element Method

## 1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้า (Electrical Transformer) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสำคัญของเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม พบว่า การจำหน่ายเครื่องใช้ไฟฟ้าในประเทศไทยของไตรมาสที่หนึ่งปี 2561 เมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปี 2560 มีการปรับตัวเพิ่มขึ้นของเครื่องใช้ไฟฟ้าประเภท คอมเพรสเซอร์ เครื่องซักผ้า อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ตู้เย็น และโทรทัศน์ [1] จากข้อมูลดังกล่าวก่อให้เกิดการแข่งขันทางการตลาด ด้วยวิธีลดราคาของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ส่งผลให้ส่วนประกอบภายในของอุปกรณ์มุ่งเน้นประสิทธิภาพการลดต้นทุน (การแข่งขันทางการตลาด) ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์บางอย่างต่ำลงด้วย โดยทั่วไปการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะกำหนดคุณลักษณะการใช้งานที่ต้องการหรือปรับคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ให้เปลี่ยนไป เช่น วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) วิธีการนี้อาจทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายบางส่วนและอาจได้รับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบมีคุณลักษณะไม่ตรงตามความต้องการ

ในปัจจุบันวิธีการออกแบบการทดลอง (Experimental Design or Design of Experiments, DOE) ถูกนำมาประยุกต์เพื่อใช้ในการออกแบบด้านวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย อาทิ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบมอเตอร์แม่เหล็กถาวรสำหรับอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ เพื่อลดการเกิดการต้านแรงบิดขณะเริ่มหมุน วิธีพื้นผิวสะท้อน นำเสนอโดย Li และคณะ [2] ต่อมาในปี 2007 Chiang [3] พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิงค์ระบายความร้อนแบบคู่ขนาน โดยออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ค่าความเหมาะสมด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design Method) และวิธีพื้นผิวสะท้อน (Response Surface Methodology) และในปี 2014 Li [4] ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ด้วยวิธีทางสถิติและออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนผสมกลาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้า นอกจากนี้ในปี 2016 Aniket [5] ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางและวิธีพื้นผิวสะท้อนสำหรับการออกแบบโครงของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Tank) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดน้ำหนักโครงของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งสามารถลดน้ำหนักได้ถึง 15% และยังคงเสถียรภาพการทำงานเช่นเดิม เนื่องจากการวิเคราะห์สภาพภายในของอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนจึงมีการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite

Element Method) เพื่อช่วยวิเคราะห์สภาพภายในดังกล่าว เนื่องจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยลดเวลาการทดสอบและมีความถูกต้องแม่นยำ [6]- [8]

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น พบว่า วิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลางมีความเหมาะสมสำหรับการศึกษาในลักษณะของโพลิโนเมียลดีกรี 2 (Second -order) [9], [10] และมีความยืดหยุ่นในการใช้งานเนื่องจากสามารถเลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นการทดลองแพคทอเรียลเต็มรูปและการทดลองแพคทอเรียลบางส่วนและมีประสิทธิภาพมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองอื่นโดยเฉพาะปัจจัยเชิงปริมาณ [11] ดังนั้นจึงทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ด้านโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

## 2. วิธีการดำเนินการวิจัย

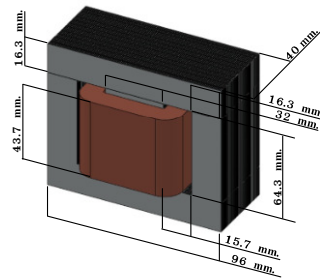
งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางสำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส และใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์สภาพภายในของหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนั้นมีการใช้วิธีการทางสถิติสำหรับวิเคราะห์ค่าความเหมาะสมของสมการต้นแบบที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางและเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบโดยมีรายละเอียด ดังนี้

### 2.1 หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบในงานวิจัยนี้ คือ หม้อแปลงไฟฟ้าเชิงพานิชย์ชนิด 1 เฟส แบบเชลล์ (Shell Type) พิกัดกำลังไฟฟ้า 165 โวลต์แอมป์ แรงดันไฟฟ้าพิกัด 220/12 โวลต์ กระแสไฟฟ้าพิกัด 1.25 แอมแปร์ ความถี่ไฟฟ้า 50 เฮิร์ต ซึ่งเป็นการเลือกสุ่มจากท้องตลาดทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) รูปหม้อแปลงจริง และรูปที่ 1(ข)ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ



(ก) ลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ



(ข) ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ  
รูปที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย

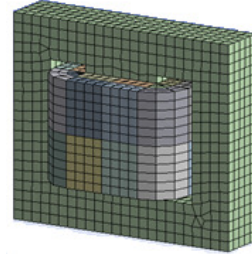
การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) แบบสามมิติ (3D) โดยกำหนดให้ขนาดและพารามิเตอร์ที่สำคัญเหมือนหรือใกล้เคียงกับหม้อแปลงไฟฟ้าจริง โดยมีคุณลักษณะเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าจริง ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ แกนเหล็ก ขดลวดตัวนำ และกำหนดสภาพอากาศให้กับแบบจำลอง ซึ่งรายละเอียดการกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของแบบจำลอง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าจำเพาะของพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

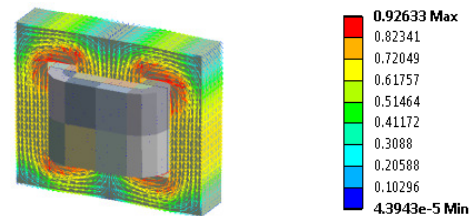
| พารามิเตอร์                   | คุณลักษณะเฉพาะของพารามิเตอร์            |
|-------------------------------|-----------------------------------------|
| แกนเหล็ก<br>(วัสดุ: เหล็ก)    | ค่าความหนาแน่น: 7817 kg/m <sup>3</sup>  |
|                               | ค่าการนำความร้อน: 20 W/m. °C            |
|                               | ค่าความร้อนจำเพาะ: 446 J/kg. °C         |
|                               | ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์: 7000     |
| ขดลวดตัวนำ<br>(วัสดุ: ทองแดง) | ค่าความหนาแน่น: 8300 kg/m <sup>3</sup>  |
|                               | ค่าการนำความร้อน: 386 W/m. °C           |
|                               | ค่าความร้อนจำเพาะ: 385 J/kg. °C         |
|                               | ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์: 1        |
| อากาศ                         | สภาพต้านทานไฟฟ้า: 1.724e-008 Ω          |
|                               | ค่าความหนาแน่น: 1.205 kg/m <sup>3</sup> |
|                               | ค่าการนำความร้อน: 0.0257 W/m. °C        |
|                               | ค่าความร้อนจำเพาะ: 1005 J/kg. °C        |
|                               | ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์: 1        |

จากนั้นสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ตามพิกัดของหม้อแปลงต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 2 และพิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์สภาพการทำงาน ได้แก่ ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดและค่าความร้อนที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3

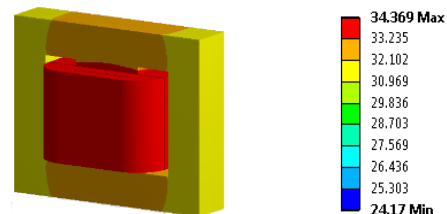
และแสดงผลการเปรียบเทียบการทดสอบระหว่างการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการและการจำลองการทำงาน ของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังตารางที่ 2



รูปที่ 2 การกระจายเมชสำหรับแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า



(ก) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า



(ข) ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 3 ผลการจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

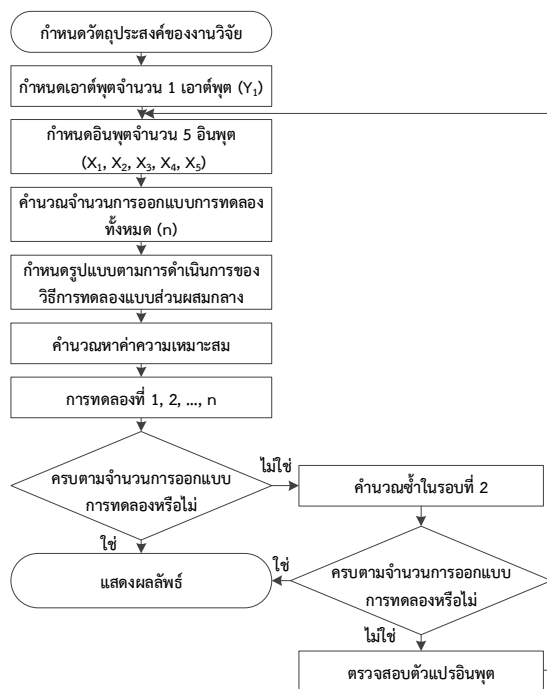
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการและการจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

| พารามิเตอร์                                          | ผลการทดสอบ     |          |
|------------------------------------------------------|----------------|----------|
|                                                      | ห้องปฏิบัติการ | FEM      |
| ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_c$ )                   | 4.30 W         | 4.52 W   |
| ค่าความสูญเสียในขดลวดตัวนำ ( $P_{cu}$ )              | 72.10 W        | 74.25 W  |
| ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด ( $B_{max}$ ) | 0.92 T         | 0.92 T   |
| ค่าความร้อนสูงสุด ( $T_{max}$ )                      | 32.50 °C       | 34.36 °C |
| ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า (% $\eta$ )           | 54.90 %        | 52.53 %  |

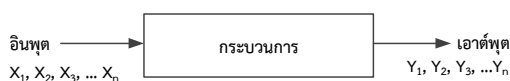
จากผลการเปรียบเทียบการทดลองในตารางที่ 2 พบว่า ผลการจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการจึงนำแบบจำลองดังกล่าวใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและค่าความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อช่วยลดเวลาในการทดสอบ

## 2.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

วิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลางเป็นวิธีหนึ่งในการออกแบบการทดลอง ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบของการออกแบบที่มีประสิทธิภาพ แสดงขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการออกแบบด้วยวิธีการออกแบบการทดลองดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 แผนภาพการไหลของวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการออกแบบ

โดยเริ่มจากกำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการหาค่าต่ำสุดของค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นกำหนดเอาต์พุต ได้แก่ ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุด ( $B_{max}$ ) และอินพุต ได้แก่ ความหนาแน่น

เหล็ก จำนวนรอบขดลวดตัวนำและพื้นที่หน้าตัดขดลวดตัวนำ เมื่อระบบรับข้อมูลอินพุต จากนั้นคำนวณจำนวนการออกแบบการทดลองทั้งหมด และระบบทำการคำนวณค่าอินพุตใหม่ ตามรูปแบบการดำเนินการของวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง โดยคำนวณหาค่าอินพุตจนครบตามจำนวนการทดลอง จากนั้นระบบจะแสดงผลลัพธ์ทั้งหมดและสิ้นสุดการทำงาน ซึ่งงานวิจัยนี้พิจารณาอินพุตสำหรับการออกแบบ 5 อินพุต แสดงค่าดังตารางที่ 3 และพิจารณาเอาต์พุต (B) คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุด

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์อินพุตของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

| พารามิเตอร์อินพุต                          | ขนาด (หน่วย)                       |
|--------------------------------------------|------------------------------------|
| $X_1$ คือ ความหนาแน่นแกนเหล็ก              | 40 mm.                             |
| $X_2$ คือ พื้นที่หน้าตัดขดลวดด้านปฐมภูมิ   | $4.56 \times 10^{-7} \text{ m}^2$  |
| $X_3$ คือ จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ         | 950 รอบ                            |
| $X_4$ คือ จำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ       | 80 รอบ                             |
| $X_5$ คือ พื้นที่หน้าตัดขดลวดด้านทุติยภูมิ | $1.102 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ |

การออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลางเป็นการทดลองที่ 3 ระดับ แทนด้วยสัญลักษณ์ -, 0, + โดยปรับตัวแปรที่ต้องการศึกษาไปตัวแปรละ 3 ค่า เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ Axial Portion (A) เป็นการปรับค่าตัวแปรหนึ่งในขณะที่ให้ค่าตัวแปรอื่นอยู่ที่ค่าเริ่มต้น, Factorial Portion (F) เป็นการนำ 2-Level Full Factorial มาเป็นส่วนหนึ่งของการทดลอง, และจุดศูนย์กลาง (Center Point) เป็นการปรับค่าของทุกตัวแปรที่ค่าเริ่มต้น [11] มีสมการทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

Axial portion สามารถคำนวณจำนวนการทดลองจาก

$$A = 2 \times N \quad (1)$$

Factorial Portion สามารถคำนวณจำนวนการทดลองจาก

$$F = 2^{(N-p)} \quad (2)$$

และจุดศูนย์กลางหนึ่งจุด

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนพารามิเตอร์ และ  $p$  คือ ค่าแฟกทอเรียล

จากสมการที่ (1) และสมการที่ (2) สามารถคำนวณจำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ประกอบด้วยจุดศูนย์กลางจำนวน 1 จุด, Axial Portions จำนวน 10 จุด และ Factorial Portions จำนวน 16 จุด

### 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

การทดสอบค่าความเหมาะสมของสมการต้นแบบที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางใช้วิธีการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) ซึ่งค่า  $R^2$  มาก หมายถึง สมการมีความเหมาะสมมาก โดยสามารถแสดงรูปแบบตารางการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ดังตารางที่ 4 เมื่อ  $N$  คือ จำนวนข้อมูล  $p$  คือ จำนวนพจน์ตัวแปรอิสระในสมการ [12]

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแยกเป็น 3 ส่วน คือ ความแปรปรวนรวม (Sum Square Total, SST) ส่วนที่อธิบายได้ด้วยสมการถดถอย (Sum Squares Regression, SSR) และส่วนที่อธิบายไม่ได้ด้วยสมการถดถอย (Sum Squares Error, SSE) ดังแสดงในสมการ (3)-(7) [12], [13]

$$SST = SSR + SSE \quad (3)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (4)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (5)$$

เมื่อ  $\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2$  คือ ผลบวกของผลต่างกำลังสองของ  $Y$  จากค่าเฉลี่ยซึ่งค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่าง SSR กับ SSE หาได้จาก

$$F = \frac{\text{Mean Square Regression}}{\text{Mean Square Residual}} = \frac{SSR / (p - 1)}{SSE / (N - p)} \quad (6)$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) หาได้จาก

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (7)$$

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA)

| Source of Variation | Degree of Freedom (DF) | Sum of Squares (SS) | Mean Square (MS) |
|---------------------|------------------------|---------------------|------------------|
| Regression          | p-1                    | SSR                 | SSR/(p-1)        |
| Residual (Error)    | N-p                    | SSE                 | SSE/(N-p)        |
| Total               | N-1                    | SST                 |                  |

### 3. ผลการศึกษา

#### 3.1 ผลการออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

ผลการออกแบบการทดลองพิจารณาได้จากตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

| CCD | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> | X <sub>5</sub> | B        |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|
| 1   | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0.926328 |
| 2   | $-\alpha$      | 0              | 0              | 0              | 0              | 0.916525 |
| 3   | $\alpha$       | 0              | 0              | 0              | 0              | 2.155538 |
| 4   | 0              | $-\alpha$      | 0              | 0              | 0              | 1.032934 |
| 5   | 0              | $\alpha$       | 0              | 0              | 0              | 0.839101 |
| 6   | 0              | 0              | $-\alpha$      | 0              | 0              | 0.830378 |
| 7   | 0              | 0              | $\alpha$       | 0              | 0              | 1.022274 |
| 8   | 0              | 0              | 0              | $-\alpha$      | 0              | 0.929641 |
| 9   | 0              | 0              | 0              | $\alpha$       | 0              | 0.923011 |
| 10  | 0              | 0              | 0              | 0              | $-\alpha$      | 0.922642 |
| 11  | 0              | 0              | 0              | 0              | $\alpha$       | 0.929340 |
| 12  | -              | -              | -              | -              | +              | 0.918331 |
| 13  | +              | -              | -              | -              | -              | 1.168876 |
| 14  | -              | -              | -              | -              | -              | 0.863537 |
| 15  | +              | -              | -              | -              | +              | 1.089719 |
| 16  | -              | -              | +              | -              | -              | 0.972008 |
| 17  | +              | -              | +              | -              | +              | 1.245022 |
| 18  | -              | +              | +              | -              | +              | 0.911588 |
| 19  | +              | +              | +              | -              | -              | 1.169110 |
| 20  | -              | -              | -              | +              | -              | 0.913007 |
| 21  | +              | -              | -              | +              | +              | 1.153128 |
| 22  | -              | +              | -              | +              | +              | 0.862547 |
| 23  | +              | +              | -              | +              | -              | 1.085190 |
| 24  | -              | -              | +              | +              | +              | 0.970464 |
| 25  | +              | -              | +              | +              | -              | 1.243596 |
| 26  | -              | +              | +              | +              | -              | 0.913184 |
| 27  | +              | +              | +              | +              | +              | 1.153340 |

ด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง พิจารณาอินพุต 5 อินพุต และ 1 เอาต์พุต ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง โดยที่ -, 0, + แสดงระดับของข้อมูลในแต่ละส่วน และสามารถค่า  $Y$  ได้ดังนี้ )

$$Y = 11 - 5X_1 + 48898067X_2 + 18559654X_5 - 766178(X_1X_2) - 98369(X_1X_5) - 5630(X_2X_3) + 9224(X_2X_4) - 5.26442 \times 10^{11}(X_2X_5) - 820(X_3X_5) - 6091(X_4X_5) - 3.36357 \times 10^{13}(X_2^2) - 6.85337E \times 10^{12}(X_5^2) \quad (8)$$

## 3.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

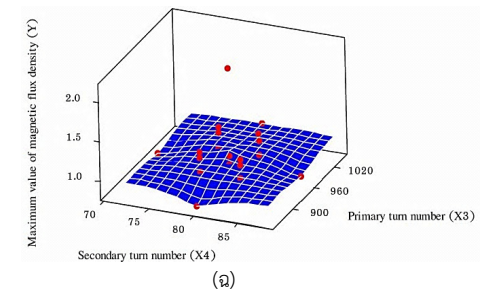
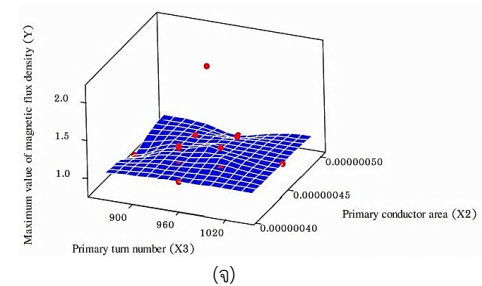
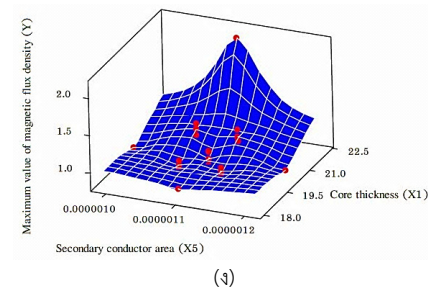
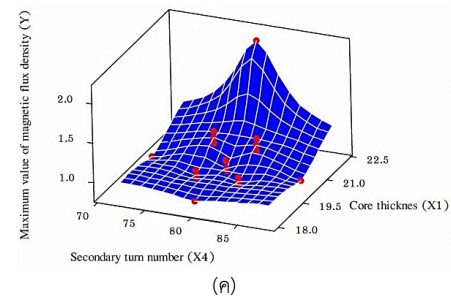
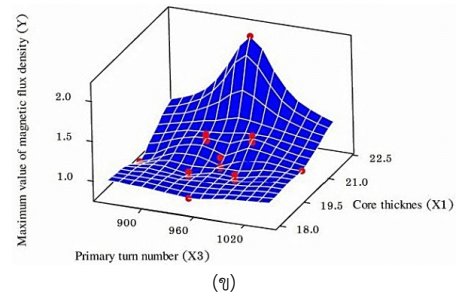
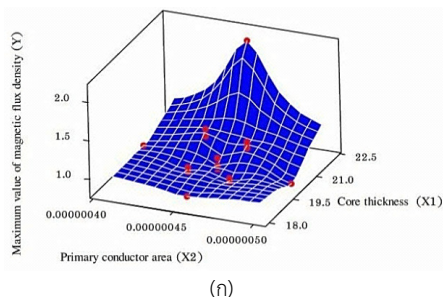
จากผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการทดลองแบบ ส่วนผสมกลาง เมื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ด้วยการ ทดสอบค่าความเหมาะสมของสมการต้นแบบด้วยค่า  $R^2$  จากผล การทดสอบ พบว่า สมการต้นแบบมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 90.83% และมีค่า P-value (ค่าความน่าจะเป็น) เท่ากับ 0.001 แสดงผล การวิเคราะห์ด้วย ANOVA ดังตารางที่ 6 จากการศึกษาเอกสาร วิชาการและวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้อง พบว่า การออกแบบการ ทดลองที่ดีควรมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2 > 70\%$  และค่า P- Value  $< 0.05$  ( $\alpha$ ) แสดงว่าแบบจำลองนี้มีความเพียงพอ ในการฟิตข้อมูลและถือว่าเป็นข้อมูลที่ดี สามารถนำไปสร้าง สมการทำนายเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด [14]

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

| Source         | DF | SS      | MS      | F    | P     |
|----------------|----|---------|---------|------|-------|
| Regression     | 5  | 1.05928 | 0.21186 | 7.04 | 0.001 |
| Residual Error | 21 | 0.63236 | 0.03011 |      |       |
| Total          | 26 | 1.69164 |         |      |       |

## 3.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของปัจจัย (Analysis of each factor interaction)

จากผลการออกแบบในตารางที่ 6 เมื่อนำมาวิเคราะห์ พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก สูงสุด พบว่า ค่าความหนาแน่นแม่เหล็ก จำนวนรอบขดลวดตัวนำ และพื้นที่หน้าตัดขดลวดตัวนำ ส่งผลโดยตรงต่อค่าความ หนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด โดยค่าความหนาแน่น แม่เหล็กส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นเส้นแรง แม่เหล็กมากที่สุด ดังแสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่อค่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดในรูปที่ 6(ก)-(ง) หาก ไม่พิจารณาพารามิเตอร์ความหนาแน่นแม่เหล็ก พบว่า ค่าความ หนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก นักดังแสดงในรูปที่ 6(จ)-(ฉ)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของ เส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด



### 3.4 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ทางไฟฟ้า

จากผลการออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง ในตารางที่ 7 สามารถนำมาคำนวณหาค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและค่าความสูญเสียในขดลวดตัวนำ ดังสมการที่ (9) – (11) และคำนวณหา ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ดังสมการที่ (12) [15]

$$P_c = Vol \times f \times ((ch \times B^{1.6}) + (ce \times B^2 \times f)) \quad (9)$$

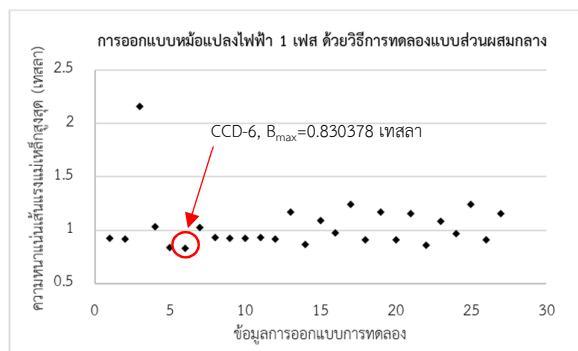
$$P_{CU} = I^2 \times R_s \quad (10)$$

$$P_{loss} = P_c \times P_{CU} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad (12)$$

เมื่อ  $P_c$  คือ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (W),  $P_{CU}$  คือ ค่าความสูญเสียในขดลวดตัวนำ (W),  $P_{loss}$  คือ ค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า (W),  $Vol$  คือ ปริมาตรของแกนเหล็ก ( $m^3$ ),  $f$  คือ ค่าความถี่ทางไฟฟ้า (Hz),  $B$  คือ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (T) และ  $\eta$  คือ ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า (%)

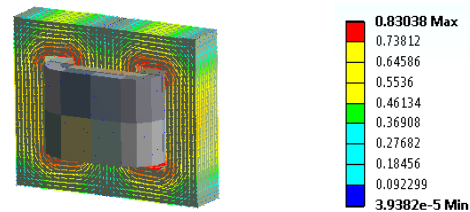
จากผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง ในตารางที่ 5 เมื่อพิจารณา ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่มีค่าน้อยที่สุด ดังรูปที่ 7 พบว่า แบบจำลองที่ 6 (CCD-6) ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 7 จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบแทนกลับในแบบจำลองของไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า แบบจำลองที่ 6 (CCD-6) มีค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.830378 เทสลา มีค่าความร้อนเท่ากับ 30.811 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 8



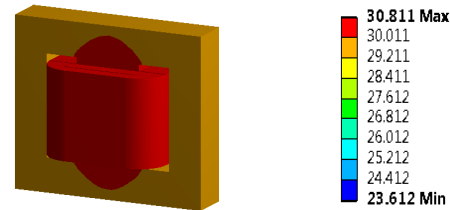
รูปที่ 7 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดจากการออกแบบการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง

ตารางที่ 7 ผลการทดลองที่ดีที่สุดจากการออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

| พารามิเตอร์อินพุต                             | ขนาด (หน่วย)               |
|-----------------------------------------------|----------------------------|
| $X_1$ คือ ความหนาของแกนเหล็ก                  | 40 mm.                     |
| $X_2$ คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านปฐมภูมิ   | $4.56 \times 10^{-7} m^2$  |
| $X_3$ คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ         | 855 รอบ                    |
| $X_4$ คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ       | 80 รอบ                     |
| $X_5$ คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านทุติยภูมิ | $1.102 \times 10^{-6} m^2$ |



(ก) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

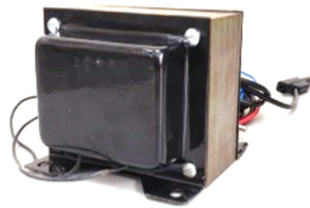


(ข) ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 8 ผลการจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส จากผลการออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

### 3.5 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลางในห้องปฏิบัติการ

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลางมาสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าจริง แสดงลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูปที่ 9(ก) และนำหม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าวไปทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยการทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test) และการทดสอบแบบลัดวงจร (Short Circuit Test) ซึ่งใช้พิกัดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 9(ข) พบว่า ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กเท่ากับ 3.0 วัตต์ ค่าความสูญเสียในขดลวดตัวนำเท่ากับ 65.3 วัตต์ ค่าความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าเท่ากับ 29.1 องศาเซลเซียส



(ก) หม้อแปลงไฟฟ้าจริง



(ข) การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 9 หม้อแปลงไฟฟ้าจริงและการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า  
ในห้องปฏิบัติการ

#### 4. อภิปรายผลการศึกษา

จากผลการออกแบบด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง เมื่อนำค่าพารามิเตอร์มาออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจริงและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ พบว่า การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง มีค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง 8.1 วัตต์ คิดเป็น 10.60 เปอร์เซ็นต์ ค่าความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง 3.4 องศาเซลเซียส คิดเป็น 10.46 เปอร์เซ็นต์ ต้นทุนวัสดุของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง 9 บาท คิดเป็น 4.09 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 3.70 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นผลมาจากค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจากผลการทดลองในตารางที่ 6 ค่าจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิลดลงจึงส่งผลต่อค่าความต้านทานของขดลวดและทำให้ค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส  
ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

| พารามิเตอร์               | ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส |        |              |
|---------------------------|-------------------------------|--------|--------------|
|                           | ต้นแบบ                        | CCD    | ผลต่าง       |
| $P_{loss}$ (W)            | 76.40                         | 68.30  | 8.1 (10.60%) |
| $T_{max}$ ( $^{\circ}$ C) | 32.50                         | 29.10  | 3.4 (10.46%) |
| Cost (Baht)               | 220.00                        | 211.00 | 9.0 (4.09%)  |
| $\eta$ (%)                | 54.91                         | 58.60  | 3.70%        |

#### 5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการปรับพารามิเตอร์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design) และวิเคราะห์พารามิเตอร์สำหรับการออกแบบด้วยวิธีการทางสถิติ จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการทดลองแบบส่วนผสมกลางมีแนวโน้มที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ด้านโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณการสนับสนุนทางด้านการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยนเรศวร ปี 2558 โครงการพัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์ ขอขอบคุณการสนับสนุนทางด้านวัสดุ อุปกรณ์การวิจัย จากหน่วยวิจัยด้านการวิเคราะห์และพัฒนาระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า (Analysis and Development of Electric Drives System) และขอขอบคุณทุนโครงการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาเอก ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ปีการศึกษา 2556 ที่มอบให้แก่ นางสาวเดือนแรม แผงเกี้ยว

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] The Office of Industrial Economics Ministry of Industry. (2561). Economic Trends Report 4<sup>th</sup> quarter of 2017 and Trend of 1<sup>st</sup> quarter of 2018. Retrieved from [http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/industry\\_overview/r\\_octdec60.pdf](http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/industry_overview/r_octdec60.pdf).
- [2] Li, J. T., Liu, Z. J., Jabbar, M. A. and Gao, X. K. (2004). Design Optimization for Cogging Torque Minimization Using Response Surface Methodology. Transactions on Magnetics, 40, 1176-1179.



- [3] Chiang, K. T. (2007). Modeling and optimization of designing parameters for a parallel-plain fin heat sink with confined impinging jet using the response surface methodology. *Applied Thermal Engineering*, 27, 2473-2482.
- [4] Li, Z., Zhang, L., Lun, Q. and Jin, H. (2014). Optimal Design of Multi- DOF Deflection Type PM Motor by Response Surface Methodology. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 10, 965-970.
- [5] Aniket, R., Rajkumar, E. and Sunil, G. (2016). Transformer Tank Optimization using Design of Experiments. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(34), 1-7.
- [6] Phaengkieo, D., Wannarumon, S. and Ruangsinchaiwanich, S. (2012). A model design of transformer by using finite element method (FEM), *Naresuan University Engineering Journal (NUEJ)*. 7(1), 23-28.
- [7] Cros, J., Viarouge, P. and Kakhki, M.T. (2011), Design and Optimization of Soft Magnetic Composite Machines with Finite Element Methods. *IEEE Transaction on Magneti*, 47(10). 4384-4390.
- [8] Al-Momani E., and Rawabdeh, I. (2008). An Application of Finite Element Method and Design of Experiments in the Optimization of Sheet Metal Blanking Process. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering (JJMIE)*, 2(10), 53-63.
- [9] Uy, M., Telford, J. K. (2009). Optimization by Design of Experiment Techniques. *Aerospace Conference*, Mar, 1-10.
- [10] Box, G. E. P., and Draper, N. R. (1987). *Wiley series in probability and mathematical statistics. Empirical model-building and response surfaces*. Oxford, England: John Wiley and Sons.
- [11] Montgomery, D. C. (2013). *Design and Analysis of Experiment*. 8<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley and Sons.
- [12] Sudasna-na-ayudhya, P. and Luangpaiboon, P. (2008). *Design and Analysis of Experiment*. Bangkok: Top Publishing.co.,Ltd.
- [13] Silpcharu, T. (2007). *Research and Statistical Data Analysis by SPSS and AMOS*. Bangkok: VNT Interprint.co.,Ltd
- [14] Haaland, P. D. (1989). *Experimental design in biotechnology*. New York, NY: Marcel Dekker, INC.
- [15] Sarma, M. S. and Pathak, M. K., (2010). *Electric Machines*, Singapore: Cengage learning.