



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

การลดค่าความแปรปรวนคุณภาพในอุตสาหกรรมชุบเคลือบไฟฟ้า

Quality variation reduction in electroplating industry

วราภรณ์ จันทร์เวียง* และ นิวิธ เจริญใจ

Waraporn Junwiang* and Nivit Charoenchai

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 50200

Received December 2012

Accepted April 2013

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความแปรปรวนในกระบวนการชุบไฟฟ้าขึ้นส่วนทรานซิสเตอร์มอสเฟตรุ่น S1NB โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดความแปรปรวนและให้ค่าเฉลี่ยผลตอบเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุด ปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองมี 5 ปัจจัยได้แก่ 1.กระแสไฟฟ้า 2.ระยะเวลาการชุบ 3.ปริมาณดีบุก 4.ปริมาณบิตมัส และ 5.รูปแบบตะแกรงชุบ ใช้การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล เพื่อหาปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบที่ศึกษา จากนั้นวิเคราะห์หาผลตอบที่ดีที่สุด ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 พบว่าค่าสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ คือ กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 40 แอมแปร์ ระยะเวลาการชุบเท่ากับ 10.1629 นาที ปริมาณดีบุกเท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร ปริมาณบิตมัสเท่ากับ 0.4 กรัมต่อลิตร และเลือกใช้ตะแกรงชุบแบบใหม่ ซึ่งทำให้ค่าลอการิทึมความแปรปรวนความหนาผิวเคลือบและค่าลอการิทึมความแปรปรวนเปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุกในผิวเคลือบน้อยที่สุด ส่วนค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบและค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุกในผิวเคลือบเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย ผลคือค่าความแปรปรวนความหนาผิวเคลือบลดลงร้อยละ 66.69 ค่าความแปรปรวนเปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุกลดลงร้อยละ 51.23 ค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบมีค่าใกล้เคียง 10 ไมครอนและค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุกในผิวเคลือบมีค่าใกล้เคียงร้อยละ 97.5

คำสำคัญ : การออกแบบการทดลอง การชุบไฟฟ้า การลดความแปรปรวน

Abstract

The aim of this research study was to reduce the amount of variation occurring during the Mosfet transistor manufacture electroplating process, using the S1NB model and an experimental design to determine those conditions most suitable for reducing such variation, plus provide average outcomes as close as possible to the target. The experiment used a factorial design containing five factors, these being: 1. the electric current,

*Corresponding author.

Email address: somtum_521@hotmail.com

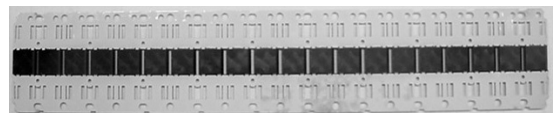
2. the coating period, 3. the quantity of tin used, 4. the quantity of bismuth used, and 5. the coating basket pattern - each of which had two levels. After that, findings ascertain the best coating to use - based on a significance level of 0.05. The results showed that the most appropriate values to use for each factor were an electric current of 40 amperes, a coating period of 10.1629 minutes, a tin quantity of 20 grams per litre, a bismuth quantity of 0.4 grams per litre and choosing the coating new basket pattern. The use of these parameters resulted in the level of variation in terms of thickness was reduced by 66.69 percent, and in terms of the percentage of tin used, by 51.23 percent. In addition, the average thickness and percentage of tin values closer to the target, these being 10 micron and 97.5 percent, respectively.

Keywords : DOE electroplating variation reduction

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการชุบเคลือบไฟฟ้าเป็นอุตสาหกรรมที่มีการลงทุนอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งเป็นส่วนสำคัญในการต่อยอดร่วมกับอุตสาหกรรมอื่นๆ พบได้มากในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุประสงค์ก็เพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้กับชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการชุบ เช่น ป้องกันการกัดกร่อน เพิ่มความต้านทานจากปฏิกิริยาทางเคมี เป็นต้น จึงถือได้ว่าอุตสาหกรรมประเภทนี้มีความสำคัญและส่งผลกระทบโดยตรงกับอุตสาหกรรมปลายทาง

จากการเข้าศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของทางโรงงานกรณีศึกษาพบปัญหาการตีกลับชิ้นงานจากลูกค้าเนื่องจาก เมื่อลูกค้าสุ่มตรวจเช็คชิ้นงานในขณะการส่งมอบพบว่ามีความสามารถกระบวนการผลิต (Cpk) ไม่เป็นไปตามที่ตกลง จึงต้องส่งกลับชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบค่าอีกครั้ง ส่งผลให้สิ้นเปลืองทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ทางโรงงานคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณการผลิตที่สูงที่สุดและมีปัญหาทางด้านการส่งคืนชิ้นงานบ่อยครั้งนั้นก็คือชิ้นส่วนทรานซิสเตอร์มอสเฟตรุ่น S1NB ซึ่งเป็นชิ้นส่วนประกอบในที่ชาร์ตแบตเตอรี่ทุกประเภทดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นส่วนทรานซิสเตอร์มอสเฟตรุ่น S1NB ของผู้ประกอบการต้นแบบ

งานวิจัยนี้จึงทำการค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อความแปรปรวน, ค่าเฉลี่ยผลตอบด้านความหนาผิวเคลือบและเปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุกในผิวเคลือบ ซึ่งได้นำเครื่องมือทางวิศวกรรมที่หลากหลายมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย อาทิเช่น แผนผังก้างปลาเพื่อหาสาเหตุและปัจจัย จากนั้นให้คะแนนโดยผู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อระบุความสำคัญของสาเหตุและปัจจัย การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากปัจจัยต่างๆ การออกแบบการทดลอง การใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการชุบเคลือบไฟฟ้า

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการชุบเคลือบไฟฟ้าพบว่ามียางานวิจัยที่การศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของผิวเคลือบ ดังเช่น Sharma A, et al. [1] ได้ทำการทดลองชุบดีบุกแล้วพบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าความหนาผิวเคลือบจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระดับหนึ่งความหนาจะคงที่ ส่วนงานวิจัยที่ศึกษาองค์ประกอบของสารในผิวเคลือบ

Nusontara T, et al. [2] ทำการชูปแมงกานีสลงในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้ปริมาณแมงกานีสในผิวเคลือบเพิ่มขึ้นแต่ประสิทธิภาพการเคลือบลดลงและกำหนดปริมาณความหนาของชั้นผิวขึ้นงานชุบไว้ที่ 10 ไมครอนเมตร ส่วนงานวิจัยของ Prasitsuparoj B. [3] ศึกษาความแปรปรวนตำแหน่งการวางชิ้นงานในระหว่างกระบวนการชุบ พบว่าสามารถลดความแปรปรวนของความหนาโดยการลดปริมาณแรงดันไฟฟ้า ติดตั้งตัวกันกระแสในแนวหลัก ผลคือช่วยเพิ่มค่าความสามารถกระบวนการผลิตเป็น 1.55 และ Wongkart P. [4] ออกแบบการทดลองไปใช้เพื่อลดความแปรปรวนในอุตสาหกรรมผักกาดดองเค็ม สามารถลดความแปรปรวนความเค็มได้ถึง 97% ซึ่งข้อมูลทั้งหมดนี้ก็จะได้เสนอให้กับโรงงานและผู้ที่เกี่ยวข้องวิเคราะห์ร่วมกันด้วยเทคนิคทางวิศวกรรม

จุดมุ่งหมายในงานนี้ คือ ออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1} เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของผลตอบและหาภาวะที่เหมาะสมในการทำการทดลองเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยผลตอบเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุดโดยตัวแปรที่สนใจศึกษาได้แก่ กระแสไฟฟ้า ระยะเวลาการชุบ ปริมาณดินบุก ปริมาณบิตมัสและรูปแบบตะแกรงชุบ

2. วิธีการการวิจัย

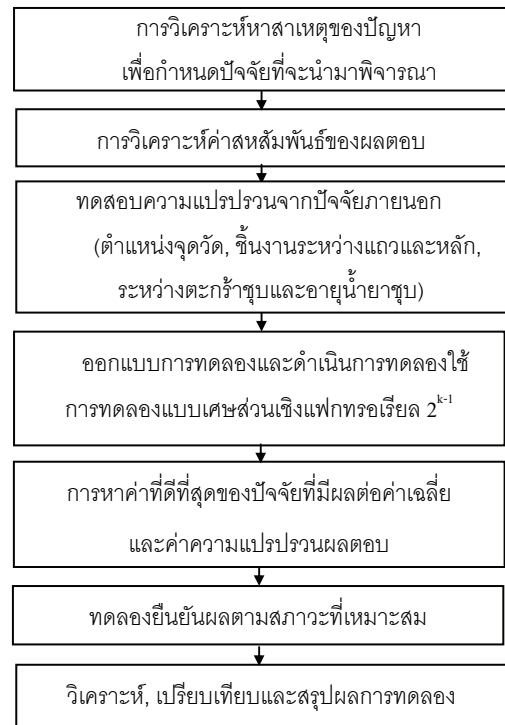
การวิจัยในครั้งนี้ได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนที่ได้สรุปไว้ดังแสดงในรูปที่ 2

3. ผลการดำเนินการวิจัย

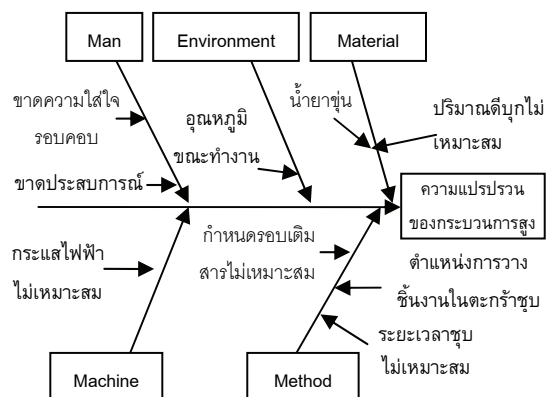
3.1 ผลการศึกษาวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

จากสายการผลิตในปัจจุบัน ศึกษาผลิตภัณฑ์ชิ้นงานทรานซิสเตอร์มอสเฟตรุ่น S1NB โดยสนใจศึกษาที่

ขั้นตอนการชุบ ทำการวิเคราะห์สาเหตุในขั้นตอนการชุบ พบหลายสาเหตุที่น่าจะเป็นสาเหตุทำให้ความแปรปรวนของชิ้นงานสูง โดยแสดงออกมาเป็นแผนผังก้างปลา ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3 แผนผังก้างปลาวิเคราะห์สาเหตุที่ส่งผลต่อค่าความแปรปรวนกระบวนการสูง

จากนั้นวิเคราะห์ให้คะแนนปัจจัยและสาเหตุที่ส่งผลต่อค่าความแปรปรวนในกระบวนการสูงดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางทั่วไปวิเคราะห์ความสำคัญของสาเหตุและปัจจัย

สาเหตุและปัจจัย	A	B	C	D	E
กระแสไฟฟ้าไม่เหมาะสม	5	3	4	60	1
ระยะเวลาชุบไม่เหมาะสม	5	3	4	60	1
ปริมาณดินุกไม่เหมาะสม	5	3	3	45	3
ใช้ปริมาณบิตมัสไม่เหมาะสม	5	3	3	45	3
ตำแหน่งการวางชิ้นงานในตะกร้าชุบ	4	3	4	48	2

$$\text{เมื่อ } A \times B \times C = D \quad (1)$$

A คือ ความรุนแรง

B คือ ความน่าสนใจ

C คือ ความเป็นไปได้แก้ปัญหา

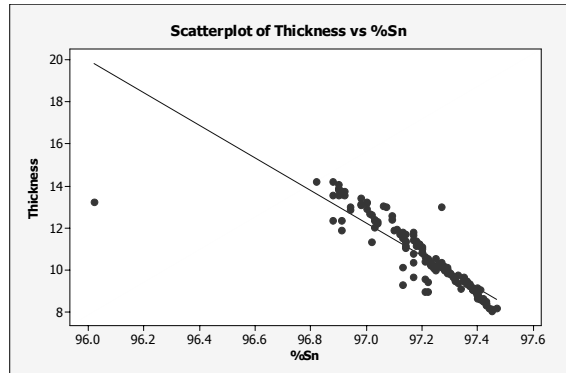
D คือ ผลคุณความสำคัญ

E คือ ลำดับค่าความสำคัญ

จากตารางที่ 1 พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลคือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าไม่เหมาะสม ระยะเวลาชุบไม่เหมาะสม ปริมาณบิตมัสไม่เหมาะสม ปริมาณดินุกไม่เหมาะสม ตำแหน่งการวางชิ้นงานในตะกร้าชุบ ในส่วนปัจจัยด้านตำแหน่งการวางชิ้นงานได้มีการทดสอบในขั้นตอนที่ 3.3

3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบ

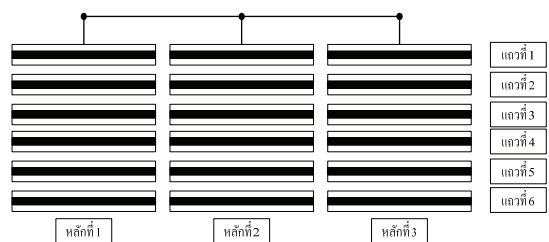
ผลตอบที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้มี 2 ผลตอบนั้นคือ ความหนาผิวเคลือบและเปอร์เซ็นต์การเกาะของดินุกในผิวเคลือบ ทำให้ทราบว่าผลตอบทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงลบ หมายความว่าความหนาผิวเคลือบเพิ่มส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การเกาะของดินุกในผิวเคลือบลดหรือความหนาผิวเคลือบลดส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การเกาะของดินุกในผิวเคลือบเพิ่ม ดังแสดงกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบ

3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากปัจจัยภายนอก

ในขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบความแตกต่างของผลตอบทั้งหมด 5 ปัจจัย คือ ตำแหน่งจุดวัด ชิ้นงานในแต่ละแถว ชิ้นงานในแต่ละหลัก ชิ้นงานระหว่างตะกร้าชุบ และช่วงอายุน้ำยาชุบ ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่งจุดวัด ชิ้นงานระหว่างตะกร้าชุบ และช่วงอายุน้ำยาชุบ ใช้วิธีการสุ่มเก็บข้อมูล ส่วนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นงานในแต่ละแถว ชิ้นงานในแต่ละหลัก ใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง ดังได้แสดงตำแหน่งการวางชิ้นงานในรูปที่ 5



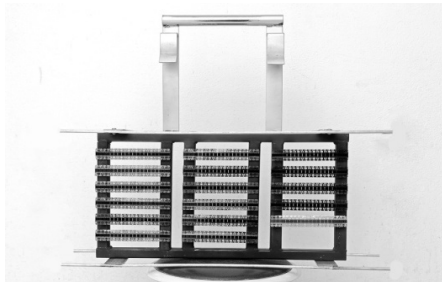
รูปที่ 5 ตำแหน่งวางชิ้นงานในตะกร้าชุบ (ส่วนหน้า)

ผลการวิเคราะห์ปัจจัยภายนอกทำให้ทราบปัจจัยที่มีผลต่อความแตกต่างผลตอบของชิ้นงาน S1NB ในกระบวนการชุบเคลือบ ซึ่งสรุปแต่ละปัจจัยได้ดังนี้

- ไม่มีความแตกต่างผลตอบระหว่างตำแหน่งจุดวัด
- มีความแตกต่างผลตอบระหว่างชิ้นงานแต่ละแถว

- มีความแตกต่างผลตอบระหว่างชิ้นงานแต่ละหลัก
- ไม่มีความแตกต่างผลตอบแต่ละตะกร้าชุบ
- ไม่มีความแตกต่างผลตอบแต่ละช่วงอายุน้ำยาชุบ

จากตารางที่ 1 สามารถนำข้อมูลไปช่วยในการวิจัย การทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแปรปรวนและค่าเฉลี่ยผลตอบของชิ้นงาน โดยทำการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานในการวัดตามตำแหน่งในการชุบเพื่อจะไม่ให้ผลคลาดเคลื่อน และทำการออกแบบตะกร้าชุบใหม่เพื่อให้ผลตอบมีค่าใกล้เคียงกันที่สุด ซึ่งได้แนวคิดจากตะกร้าชุบ Rework ของทางโรงงานโดยต้องการจะลดค่าผลตอบของชิ้นงานแถวล่างและบนสุด ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตะกร้าชุบงานแบบมีตัวล่อ (ออกแบบใหม่)

3.4 ออกแบบตารางการทดลอง

นำปัจจัยที่ทางโรงงานสนใจศึกษาคือปัจจัยที่ได้จากการทดสอบปัจจัยภายนอกที่ส่งผล และปัจจัยที่ได้จากการระดมสมองวิเคราะห์ของผู้ที่เกี่ยวข้อง จากนั้นกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามขอบเขตที่โรงงานใช้ในปัจจุบันมีทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้า ระยะเวลาการชุบ ปริมาณดีบุก ปริมาณบิตมัสและรูปแบบตะกร้าชุบ จากนั้นทำการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (Fractional factorial design) เพื่อช่วยลดจำนวนการทดลองต่อครั้ง เนื่องจากชิ้นงานมีมูลค่าค่อนข้างสูง

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับขอบเขตสำหรับการชุบ

ปัจจัย / หน่วย	ระดับการตั้งค่า		สัญลักษณ์
	ต่ำ (-)	สูง (+)	
กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	30	40	A (Current)
ระยะเวลาชุบ (นาที)	9	13	B (Time)
ปริมาณดีบุก (g/l)	20	24	C (Sn)
ปริมาณบิตมัส (g/l)	0.4	0.5	D (Bi)
รูปแบบตะกร้าชุบ	Old	New	E (Basket)

จากตารางที่ 2 เมื่อทำการทดลองตามลำดับการทดลองแล้วค่าที่สนใจมีทั้งหมด 4 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าผลตอบที่ทำการศึกษา

สัญลักษณ์	ผลตอบที่ทำการศึกษา
Y_1	ค่าเฉลี่ยความหนาของผิวเคลือบ
Y_2	ค่าลอการิทึมความแปรปรวน ($\ln(S^2)$) ความหนาของผิว
Y_3	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุกในผิวเคลือบ
Y_4	ค่าลอการิทึมความแปรปรวน ($\ln(S^2)$) เปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุกในผิวเคลือบ

จากตารางที่ 3 สามารถแบ่งการวิเคราะห์ผลได้ดังแสดงในหัวข้อที่ 1-4

1. ผลตอบที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ

จากการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบโดยใช้โปรแกรมมินิแท็บทำให้ทราบปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าผลตอบค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบคือ ปัจจัย A, B, E, ผลร่วมระหว่างปัจจัย A และ B, ผลร่วมระหว่างปัจจัย A และ E, ผลร่วมระหว่างปัจจัย C และ D ดังแสดงผลในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ

Term	Coef	T	P
Constant	10.4425	410.21	0.000
A	0.3300	12.96	0.000
B	0.3294	12.94	0.000
C	-0.0031	-0.12	0.904
D	0.0038	0.15	0.885
E	-0.7163	-28.14	0.000
A*B	0.0869	3.41	0.004
A*C	0.0069	0.27	0.791
A*D	-0.0025	-0.10	0.923
A*E	0.0725	2.85	0.012
B*C	0.0087	0.34	0.736
B*D	-0.0056	-0.22	0.828
B*E	-0.0219	-0.86	0.403
C*D	0.0644	2.53	0.022
C*E	0.0081	0.32	0.754
D*E	0.0162	0.64	0.532
S = 0.144005 R-Sq = 98.63% R-Sq(adj) = 97.35%			

จากการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจโดยการพิจารณาจากค่าของ R^2 ของค่าความหนาผิวเคลือบจากตารางที่ 4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าเท่ากับร้อยละ 98.63 และหลัง R^2 ได้รับการปรับค่าแล้วมีค่า เท่ากับร้อยละ 97.35 สามารถเขียนสมการทำนายผลค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบได้ดังสมการที่ 2

$$Y_1 = 10.4425 + 0.33A + 0.3294B - 0.0031C + 0.0038D - 0.7163E + 0.0869AB + 0.0725AE + 0.0644CD \quad (2)$$

2. ผลตอบที่ส่งผลต่อค่า $\ln(S^2)$ ความหนาผิวเคลือบ

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแปรปรวนความหนาผิวเคลือบของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ พบว่า ปัจจัย A และ E โดยนำปัจจัยที่ได้ไปวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่า P-Value ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อ ค่า $\ln(S^2)$ ความหนาผิวเคลือบ

Term	Coef	T	P
Constant	0.2947	24.13	0.000
A	0.0293	2.40	0.029
B	0.0137	1.12	0.277
C	0.0113	0.92	0.369
D	-0.0016	-0.13	0.900
E	-0.5118	-41.91	0.000
A*B	-0.0076	-0.62	0.542
A*C	0.0108	0.89	0.388
A*D	0.0097	0.79	0.439
A*E	0.0032	0.26	0.796
B*C	0.0023	0.19	0.859
B*D	-0.0193	-1.58	0.133
B*E	-0.0185	-1.51	0.150
C*D	0.0060	0.49	0.631
C*E	0.0103	0.85	0.409
D*E	0.0009	0.08	0.940
S = 0.0690758 R-Sq = 99.11% R-Sq(adj) = 98.27%			

จากการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจโดยการพิจารณาจากค่าของ R^2 ของค่าความหนาผิวเคลือบจากตารางที่ 4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าเท่ากับร้อยละ 99.11 และหลัง R^2 ได้รับการปรับค่าแล้วมีค่า เท่ากับร้อยละ 98.27 สามารถเขียนสมการทำนายผลต่อค่า $\ln(S^2)$ ความหนาผิวเคลือบได้ดังสมการที่ 3

$$Y_2 = 0.2947 + 0.0293A - 0.5118E \quad (3)$$

3. ผลตอบด้านค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุก

จากการวิเคราะห์หาปัจจัยหลักทำให้ทราบปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุกคือ A, C, E ผลร่วมระหว่างปัจจัย C และ E ดังแสดงผลตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุก

Term	Coef	T	P
Constant	97.5525	5154.35	0.000
A	-0.2931	-15.49	0.000
B	-0.0375	-1.98	0.065
C	0.1362	7.20	0.000
D	-0.0081	-0.43	0.673
E	0.4387	23.18	0.000
A*B	-0.0244	-1.29	0.216
A*C	-0.0206	-1.09	0.292
A*D	-0.0075	-0.40	0.697
A*E	0.0381	2.01	0.061
B*C	-0.0163	-0.86	0.403
B*D	0.0044	0.23	0.820
B*E	-0.0075	-0.40	0.697
C*D	0.0056	0.30	0.770
C*E	-0.0412	-2.18	0.045
D*E	-0.0144	-0.76	0.459
S = 0.107063 R-Sq = 98.15% R-Sq(adj) = 96.41%			

จากการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจโดยการพิจารณาจากค่าของ R^2 ของค่าความหนาผิวเคลือบจากตารางที่ 4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าเท่ากับร้อยละ 98.15 และหลัง R^2 ได้รับการปรับค่าแล้วมีค่า เท่ากับร้อยละ 96.41 สามารถเขียนสมการทำนายผลต่อค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุกได้ดังสมการที่ 4

$$Y_3 = 97.5525 - 0.2931A + 0.1362C + 0.4387E - 0.0412CE \quad (4)$$

4. ผลตอบด้านค่า $\ln(S^2)$ เปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุกในผิวเคลือบ

จากการวิเคราะห์หาปัจจัยหลักโดยใช้โปรแกรมมินิแท็บทำให้ทราบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าผลตอบค่า $\ln(S^2)$ เปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุกคือ E ดังแสดงผลตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่า $\ln(S^2)$ เปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุก

Term	Coef	T	P
Constant	-4.041	-227.04	0.000
A	-0.020	-1.12	0.280
B	-0.010	-0.56	0.586
C	-0.006	-0.32	0.750
D	0.004	0.24	0.816
E	-0.302	-16.95	0.000
A*B	-0.030	-1.70	0.108
A*C	0.012	0.67	0.513
A*D	-0.020	-1.10	0.278
A*E	-0.004	-0.21	0.834
B*C	0.007	0.38	0.708
B*D	-0.029	-1.61	0.126
B*E	-0.000	-0.02	0.988
C*D	-0.039	-2.17	0.046
C*E	-0.025	-1.42	0.175
D*E	0.018	1.04	0.315
S = 0.100697 R-Sq = 95.00% R-Sq(adj) = 90.32%			

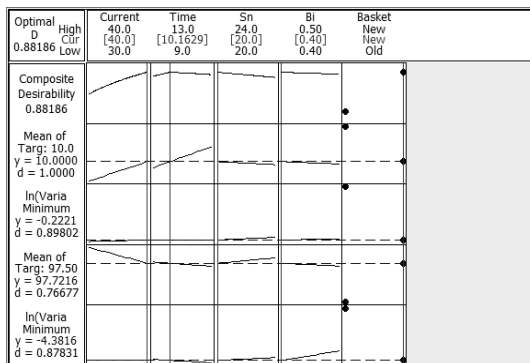
จากการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจโดยการพิจารณาจากค่าของ R^2 ของค่าความหนาผิวเคลือบจากตารางที่ 4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าเท่ากับร้อยละ 95 และหลัง R^2 ได้รับการปรับค่าแล้วมีค่า เท่ากับร้อยละ 90.32 สามารถเขียนสมการทำนายผลต่อค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุกได้ดังสมการที่ 5

$$Y_4 = -4.041 - 0.006C + 0.004D - 0.302E - 0.039CD \quad (5)$$

3.5 หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลทำให้ค่า $\ln(S^2)$ ความแปรปรวนผลตอบน้อยที่สุด และค่าเฉลี่ยผลตอบมีค่าใกล้เคียงเป้าหมายคือ 10 ไมครอนและร้อยละ 97.5

จากการวิเคราะห์ห้โดยฟังก์ชัน Optimization ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใส่ค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยและวัดความ

พึงพอใจโดยรวมของผลตอบ ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 11 โดยค่าของแต่ละปัจจัยที่โปรแกรมคำนวณได้มีค่าดังนี้ กระแสไฟฟ้า 40 แอมแปร์ ระยะเวลาชุบ 10.1629 นาที ปริมาณดีบุก 20 กรัมต่อลิตร ปริมาณบิสมีท 0.4 กรัมต่อลิตรและเลือกใช้ตะกร้าชุบแบบใหม่ สามารถอธิบายค่าทำนายของผลตอบดังต่อไปนี้ ค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบเท่ากับ 10 ไมครอนเมตร มีค่าความพึงพอใจเท่ากับ 1.00 ค่า $\ln(S^2)$ ความหนาผิวเคลือบน้อยที่สุดเท่ากับ (-0.2221) มีค่าความพึงพอใจเท่ากับ 0.898, ค่าเฉลี่ยการเกาะของดีบุกในผิวเคลือบเท่ากับร้อยละ 97.72 มีค่าความพึงพอใจเท่ากับ 0.76 และค่า $\ln(S^2)$ อัตราการเกาะของดีบุกในผิวเคลือบเท่ากับร้อยละ (-4.3816) มีค่าความพึงพอใจเท่ากับ 0.87 ซึ่งมีค่าความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) เท่ากับ 0.88



รูปที่ 7 จุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

3.6 เปรียบเทียบค่าความแปรปรวนผลตอบจากการเลือกใช้ตะกร้าชุบแบบเก่าและแบบใหม่

ทำการชุบที่สภาวะกระแสไฟฟ้า 40 แอมแปร์ ระยะเวลาชุบ 10.1629 นาที ปริมาณดีบุก 20 กรัมต่อลิตร ปริมาณบิสมีท 0.4 กรัมต่อลิตร สามารถลดค่าความแปรปรวนความหนาผิวเคลือบลดลงร้อยละ 66.69 และค่าความแปรปรวนเปอร์เซ็นต์การเกาะของดีบุกลดลงร้อยละ 51.23

4. สรุปผลการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองเพื่อลดความแปรปรวนด้านคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการชุบไฟฟ้าของชิ้นงานทรานซิสเตอร์มอสเฟทรุ่น S1NB จากปัญหาปัจจุบันที่มีความแปรปรวนสูง ทำการวิเคราะห์ปัจจัยและได้ทำการออกแบบตะกร้าชุบ เพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดจากตะกร้าชุบ จากนั้นทำออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลหลักในแต่ละผลตอบที่ศึกษา จากนั้นหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยเพื่อให้ได้ค่าสภาวะที่เหมาะสมคือ กระแสไฟฟ้า 40 แอมแปร์ ระยะเวลาชุบ 10.1629 นาที ปริมาณดีบุก 20 กรัมต่อลิตร ปริมาณบิสมีท 0.4 กรัมต่อลิตรและเลือกใช้ตะกร้าชุบแบบใหม่

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการอนุเคราะห์ข้อมูลและการอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่ อุปกรณ์เครื่องมือเครื่องจักร จากบริษัทตัวอย่างวิจัยรวมไปถึงอาจารย์ที่ปรึกษา เจ้าของกิจการ ผู้จัดการ วิศวกร และพนักงานทุกคน ที่ให้ความร่วมมือในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sharma A, Bhattacharya S, Sen R, Reddy B, Fecht HJ, Das K, Das S. Influence of current density on microstructure of pulse electrodeposited tin coatings. Materials characterization 68th; 2012; Kharagpur, India; p. 22–32
- [2] Nusontara T. Nitipanyawong Ch, Termsuksaway Ph, Electrodeposition of Zn-Mn alloys on low carbon steel for corrosion protection. Conference. Environment and materials energy 1st; 2007 Aug 31; Bangkok, Thailand. (In Thai).

- [3] Prasitsuparoj B. Variation reduction of thickness in electroplating process [MEn thesis]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology North Bangkok; 1997. (In Thai)
- [4] Wongkart P. Saltiness variation reduction of soaking process in canned pickled mustard greens manufacturing by six sigma techniques [MEn IS]. Chiang Mai: ChiangMai University; 2007. (In Thai)