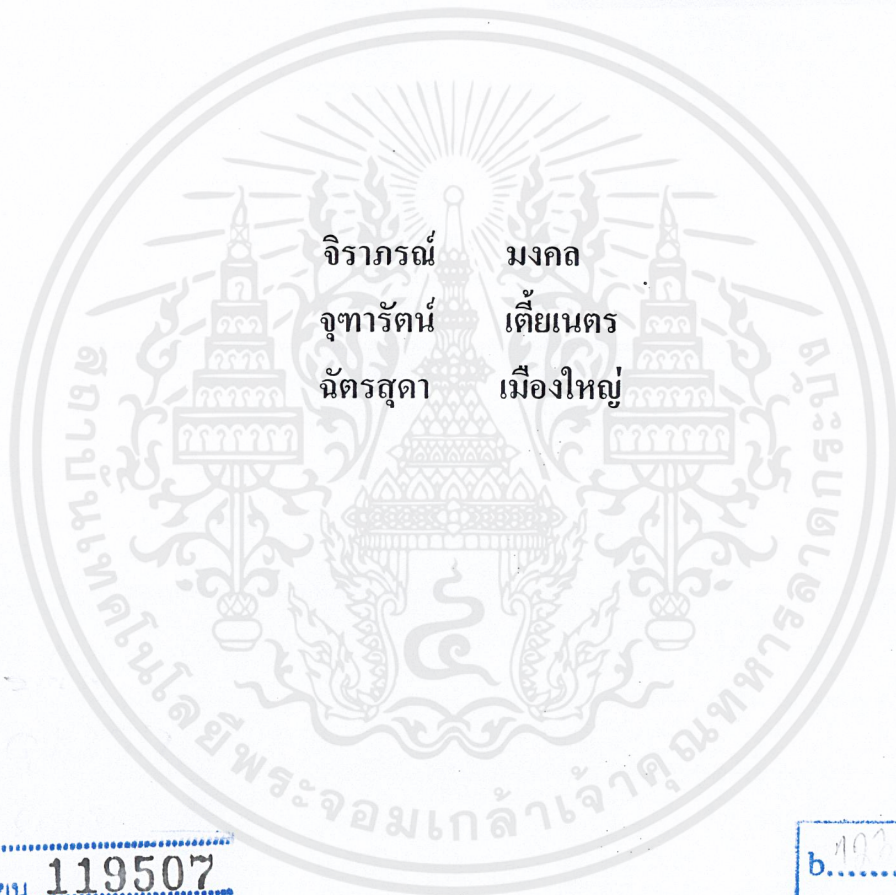


การวิเคราะห์ตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบแผงวงจรพิมพ์ไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นได้



T119507



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **119507**
วัน,เดือน,ปี. - 8 S.ค. 2554

b. 119507
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PARAMETRIC ANALYSIS IN ENTEK PROCESS ON COATING
THICKNESS FOR FLEXIBLE PRINTED CIRCUITS**



**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การวิเคราะห์ตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบผงวงจรพิมพ์ไฟฟ้าชนิดยึดย่นได้

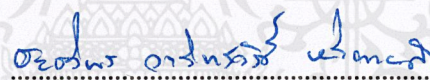
โดย นางสาวจิราภรณ์ มงคล
นางสาวจุฑารัตน์ เตี้ยเนตร
นางสาวฉัตรสุดา เมืองใหญ่


อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ

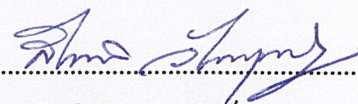
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ชรรมนบุญ อุดมมัน
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)


.....กรรมการ
(อ.บุญชัย โชติวิริยาณิชย์)


.....กรรมการ
(ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การวิเคราะห์ตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบแผงวงจรพิมพ์ไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นได้
โดย	นางสาวจิราภรณ์ มงคล นางสาวจุฑารัตน์ เตี้ยเนตร นางสาวฉัตรสุดา เมืองใหญ่
ปริญญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ธรรมบุญ อุคมมัน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

บทคัดย่อ

กระบวนการ Entek เป็นกระบวนการที่ใช้สารละลาย Entek เคลือบแผงวงจรพิมพ์ไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นได้ (Flexible Printed Circuit: FPC) ตรงตำแหน่งที่ต้องการบัดกรีเพื่อปิดเส้นลายวงจรที่ทำจากทองแดงจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ถ้าความหนาของการเคลือบมากจะทำให้ต้นทุนการผลิตสูง แต่ถ้าความหนางบางจะป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ไม่ดี งานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์ตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบแผงวงจรพิมพ์ไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นได้เพื่อให้ความหนาอยู่ในมาตรฐานของบริษัทและเคลือบได้สม่ำเสมอ จากการศึกษากระบวนการ Entek เบื้องต้น มี 6 ขั้นตอนย่อยที่ต้องการศึกษา ได้แก่ การ Etching การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1 การล้าง FPC ด้วยกรดซัลฟิวริก การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2 การเป่าแห้งด้วย Air knife และการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Organic solderability preservative หรือสารละลาย Entek ซึ่งบริษัทเรียกขั้นตอนสุดท้ายนี้ว่า ขั้นตอน Entek และจากผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบ 2⁶ ที่ทำซ้ำ 2 ครั้ง พบว่าขั้นตอน Entek มีผลต่อความหนาของการเคลือบ ในขั้นตอนนี้มี 4 ตัวแปร ที่คาดว่าจะมีผลต่อความหนาของการเคลือบและต้องควบคุม ได้แก่ ความเข้มข้น ความเป็นกรด อุณหภูมิของสารละลาย Entek และเวลาที่ใช้ในการเคลือบ จากการวิเคราะห์ผลการทดลองในสายการผลิตตามการออกแบบการทดลองแบบ 2⁴ ที่ทำซ้ำ 2 ครั้ง ด้วยโปรแกรมมินิแทป ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการเคลือบกับความเป็นกรด ความเข้มข้นของสารละลาย Entek และเวลาที่ใช้ในการเคลือบ

Report Title	Parametric Analysis in Entek Process on Coating Thickness for Flexible Printed Circuits
Students	Miss Jiraporn Mangkhol Miss Chutharat Tianate Miss Chatsuda Maungyai
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Anchaleeporn W. Lothongkum
Thesis Co-advisor	Mr. Tammanoon Udomman Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering Mahanakorn University of Technology

ABSTRACT

Entek process is a process using Entek solution to coat a flexible printed circuit (FPC) at the soldering areas of the circuit patterns to prevent them from oxidation reaction. High coating thickness increases a substantial production cost while low thickness leads to poor protection from oxidation reaction. This work was parametric analysis of Entek process to obtain a uniform coating thickness of FPC within the company's specification. According to a preliminary study, six consecutive subsidiary target steps were etching, FPC first rinsing by deionized water (DI water), FPC cleaning by sulfuric acid, FPC second rinsing by DI water, FPC drying by air knife, and lastly the so-called "Entek step" for FPC coating by an organic solderability preservative or Entek solution. From 64 experiments with 2 replicates based on the experimental design, it was found that the Entek step was significant to the coating thickness. Accordingly, the relevant parameters in Entek step, i.e., concentration, acidity, temperature of Entek solution, and coating time were investigated in the production line by 16 experimental designs with 2 replicates. From the Minitab program, the correlation of the coating thickness and significant parameters (acidity and concentration of Entek solution, and coating time) was achieved.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณพระคุณ บริษัท เม็กเท็ค แมนูแฟคเจอร์ริง คอร์ปอเรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด ผู้บริหารและวิศวกรของบริษัทที่สนับสนุนการทำงานวิจัย และให้โอกาสในการเรียนรู้และฝึกการทำงานกับบริษัท

คุณสาธิต จิตต์จรัล

กรรมการผู้จัดการ

คุณปราโมทย์ เกศิสำอาง

รองผู้จัดการทั่วไป

คุณเข้มเพชร จินวรรณ

ผู้จัดการส่วนวิศวกรรม

คุณชวลิต จิตรธรรม

ผู้จัดการส่วนบริหาร

คุณทวีเกียรติ ประพทธีระกุล

ผู้จัดการฝ่ายเทคโนโลยี

คุณธิดา เอ็งจ้วน คุณภาสนันท์ วงศ์เหลือ คุณปีทมา กาบคำ คุณชนินทร์ เกตุลอย และคุณพรวิไล อ่อนสนิท

คุณอภิปรียา คงสุวรรณ และคุณจิราพร ทองแย้ม ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี บริษัท เม็กเท็ค แมนูแฟคเจอร์ริง คอร์ปอเรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ธรรมบุญ อุดมมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ระหว่างการทำกรวิจัย ตลอดจนแก้ไขและเพิ่มเติมรายละเอียดของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นแรงผลักดันและให้กำลังใจตลอดมา

จิราภรณ์ มงคล

จุฑารัตน์ เตียนตร

ฉัตรสุดา เมืองใหญ่

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 โครงสร้างและวัสดุสำหรับการผลิต FPC.....	3
2.2 กระบวนการผลิต FPC.....	4
2.3 กระบวนการ Entek.....	6
2.4 เทคโนโลยีการเคลือบเพื่อป้องกันการออกซิเดชันของทองแดง.....	9
2.5 กลไกการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek.....	11
2.6 การออกแบบการทดลอง.....	12
2.6.1 หลักการออกแบบการทดลอง.....	12
2.6.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	13
2.6.3 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป.....	13
2.6.4 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง.....	15
2.7 การออกแบบพื้นผิวผลตอบ.....	17
2.8 โปรแกรมมินิแทป.....	18
2.8.1 การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมมินิแทป.....	18
2.8.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมมินิแทป.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.9.1 การป้องกันการกักกร่อนของโลหะด้วยสารอินทรีย์	23
2.9.2 การใช้สถิติและหลักการออกแบบการทดลองเพื่อ ปรับปรุงกระบวนการผลิต	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.1 การวิเคราะห์ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่คาดว่าจะมีผลต่อความหนา ของการเคลือบ FPC.....	27
3.2 การออกแบบอุปกรณ์ทดลองระดับปฏิบัติการ และการวิเคราะห์ตัวแปรของ ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อความหนาของ การเคลือบ FPC.....	32
3.3 การสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อความหนาของการเคลือบ FPC	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	34
4.1 ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC.....	34
4.2 ตัวแปรของขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนา ของการเคลือบ FPC	42
4.3 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC.....	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	53
5.1 สรุปผลการทดลอง	53
5.1.1 ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek และตัวแปรปฏิบัติการที่มีผลต่อ ความหนาของการเคลือบ FPC.....	53
5.1.2 สมการคำนวณความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek.....	53
5.2 ข้อสังเกต.....	54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง	55
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก สารเคมีและอุปกรณ์สำหรับการทดลองระดับปฏิบัติการ	58
ภาคผนวก ข เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง.....	61
ภาคผนวก ค pH มิเตอร์.....	62
ภาคผนวก ง เครื่องวัดความเป็นกรด	63
ภาคผนวก จ เครื่องวัดความเข้มข้นของสารละลาย Entek และวัดความหนา ของการเคลือบแผ่นทองแดง	64
ภาคผนวก ฉ เครื่องศึกษาลักษณะพื้นผิวทองแดง	65
ภาคผนวก ช วิธีเตรียมสารละลาย	66
ภาคผนวก ซ วิธีวัดสมบัติทั่วไปของสารละลาย.....	67
ภาคผนวก ฌ วิธีปรับค่าสมบัติทั่วไปของสารละลาย.....	69
ภาคผนวก ฎ ข้อมูลดิบ	72

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วัสดุที่ใช้ผลิต FPC	4
2.2 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ต้องการของ FPC จากเทคโนโลยี การเคลือบ.....	11
2.3 ตัวอย่างการออกแบบการทดลองสำหรับ 2 ตัวแปร	13
2.4 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตอบสนองที่ ที่ได้จากการทดลอง	14
2.5 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางสำหรับ 3 ตัวแปรอิสระ.....	16
3.1 ตัวแปรปฏิบัติการของขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek.....	29
3.2 จำนวนการทดลองของแต่ละขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek	31
4.1 การวิเคราะห์ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของ การเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek	36
4.2 ตัวแปรของขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek	42
4.3 การวิเคราะห์ตัวแปรในขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek ที่มีผลต่อความหนาของความหนาของการเคลือบ FPC.....	43
4.4 ค่าของตัวแปรที่ใช้ออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง	46
4.5 ผลการทดลองของการทดลองแบบส่วนประสมกลางระหว่างตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ.....	47
ก.1 อุปกรณ์การทดลอง	59
ญ.1 ผลการทดลองของการวิเคราะห์ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนา ของการเคลือบ FPC	72
ญ.2 ผลการทดลองของการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับความเป็นกรด ความเข้มข้นของสารละลาย Entek และเวลาในการเคลือบ.....	77
ญ.3 การเปรียบเทียบความหนาของการเคลือบ FPC จากการคำนวณด้วยสมการและข้อมูล การผลิตตั้งแต่ ธันวาคม 2553 – มีนาคม พ.ศ. 2554	78

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ภาพตัดขวางของ FPC แบบด้านเดียว (Single side)..... 3
2.2	ตัวอย่างการใช้งาน FPC 3
2.3	ขั้นตอนของ Front process 5
2.4	ขั้นตอนของ Middle process..... 5
2.5	ขั้นตอนของ Back process 6
2.6	ขั้นตอนของ Assembly process 6
2.7	ขั้นตอนของกระบวนการ Entek 6
2.8	ม่านน้ำ DI..... 7
2.9	ขั้นตอนการ Etching 7
2.10	ขั้นตอนการล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1 8
2.11	ขั้นตอนการล้าง FPC ด้วยกรดซัลฟิวริก..... 8
2.12	ขั้นตอนการเป่าแห้ง FPC ด้วย Air knife ครั้งที่ 1 9
2.13	ขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek..... 9
2.14	ตัวอย่างโมเลกุลสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบ OSP 10
2.15	การก่อตัวของฟิล์ม Entek 12
2.16	กราฟแสดงการทดลองแบบส่วนประสมกลางสำหรับ 3 ตัวแปร 17
2.17	ตัวอย่างพื้นผิวผลตอบ..... 18
2.18	การใช้โปรแกรมมินิแทปออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 19
2.19	การใช้โปรแกรมมินิแทปเลือกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ตัวแปร และแต่ละตัวแปรมี 2 ระดับ 19
2.20	การใช้โปรแกรมมินิแทปเลือกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ตัวแปร และแต่ละตัวแปรมี 2 ระดับ โดยกำหนดจำนวนการทำการทดลองซ้ำของแต่ละแบบการทดลอง.... 20
2.21	ตัวอย่างแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ตัวแปรจากโปรแกรมมินิแทป แต่ละตัวแปรมี 2 ระดับ และไม่มีการทำการทดลองซ้ำ..... 20
2.22	การบันทึกผลการทดลองใน โปรแกรมมินิแทป 21
2.23	ตัวอย่าง Pareto chart เพื่อวิเคราะห์หาตัวแปรอิสระที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง 22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24	ตัวอย่าง Main effect plot เพื่อวิเคราะห์ผลของตัวแปรอิสระต่อตัวแปรตอบสนอง.....22
2.25	ตัวอย่าง Interaction plot เพื่อวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างตัวแปร.....23
3.1	รูปจำลองกระบวนการ Entek.....27
3.2	กระบวนการ Entek ของบริษัท28
4.1	การออกแบบการทดลองระดับปฏิบัติการ.....34
4.2	การทดลองระดับปฏิบัติการ35
4.3	การควบคุมคุณภาพของสารละลาย Entek ของการทดลองระดับปฏิบัติการ35
4.4	ผังพาเรโตแสดงขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีนัยสำคัญต่อความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek.....39
4.5	Main effect plot ของขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ต่อความหนาของการเคลือบ....39
4.6	Interaction plot ระหว่างขั้นตอนย่อยต่างๆ ในกระบวนการ Entek40
4.7	การเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบด้วยสารละลาย Entek41
4.8	เปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นทองแดงด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ...41
4.9	ผังพาเรโตแสดงตัวแปรของขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek ที่มีผลต่อการเคลือบ FPC.....44
4.10	Main effect plot ของตัวแปรของขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek.....45
4.11	Main effect plot ของตัวแปรของขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek.....46
4.12	Surface plot ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek ที่เวลาในการเคลือบ 30 วินาที48
4.13	Contour plot แสดงความหนาของการเคลือบ FPC ที่ค่าความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek ต่างๆ และเวลาในการเคลือบ 30 วินาที.....48
4.14	Overlaid contour plot แสดงความหนาของการเคลือบ FPC ที่อยู่ในมาตรฐานของบริษัทที่ค่าความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek ต่างๆ และเวลาในการเคลือบ 30 วินาที49
4.15	Surface plot ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek ที่เวลาในการเคลือบ60 วินาที49
4.16	Contour plot แสดงความหนาของการเคลือบ FPC ที่ค่าความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek ต่างๆ และเวลาในการเคลือบ 60 วินาที.....50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17	Overlaid contour plot แสดงความหนาของการเคลือบ FPC ที่อยู่ในมาตรฐานของบริษัท ที่ค่าความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek ต่างๆ และเวลาในการเคลือบ 60 วินาที 50
4.18	ผลการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบเพื่อสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรใน กระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC 52
5.1	ผลของปริมาณไอออนทองแดงที่มีต่อความถี่ของการกัดผิวทองแดง 54
ก.1	การทำความสะอาดอุปกรณ์การทดลองระดับปฏิบัติการ 60
ข.1	เครื่องชั่งน้ำหนักชี้หือ Mettler toledo รุ่น AX 105 delta range 61
ค.1	เครื่องวัด pH รุ่น DG-115-SC 62
ง.1	เครื่องวัด Acidity ชี้หือ mettler toledo รุ่น DL22 food and beverage analyzer 63
จ.1	เครื่อง UV SHIMADZU รุ่น UV-1800 64
ฉ.1	เครื่อง Scanning electron microscope รุ่น S-3400N type II 65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

บริษัท เม็กเทค แมนูแฟคเจอร์ริง คอร์ปอเรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด (MMCT) เป็นบริษัทชั้นนำในการผลิตแผงวงจรพิมพ์ไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นได้ (Flexible printed circuit: FPC) ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของวงจรในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ กล้องถ่ายภาพดิจิทัล กระบวนการผลิต FPC ประกอบด้วย 1) Front process 2) Middle process 3) Back process และ 4) Assembly process

Entek process เป็นกระบวนการใน Middle process ที่ใช้สารละลาย Entek ซึ่งเป็นสาร Organic solderability preservative (OSP) และมีอนุพันธ์ Benzimidazole เป็นองค์ประกอบหลักเคลือบ FPC ตรงตำแหน่งที่ต้องการบัดกรีเพื่อปิดเส้นลายวงจรที่ทำจากโลหะทองแดงไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและเกิดสนิม และยังช่วยให้การกระจายของโลหะบัดกรีทั่วบริเวณที่บัดกรีติด FPC เข้ากับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการได้ดี เช่น ไอซีหรือวงจรรวม (Integrated circuit) ตัวเชื่อมต่อ (Connector) เป็นต้น งานวิจัยนี้วิเคราะห์ตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาและความสม่ำเสมอของการเคลือบ FPC โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^k ด้วยโปรแกรมมินิแทป และสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการเคลือบกับตัวแปรนั้น เพื่อสามารถตั้งค่าและควบคุมตัวแปรก่อนและระหว่างกระบวนการ Entek ให้ได้ความหนาของการเคลือบตามมาตรฐานของบริษัท (0.32 - 0.44 ไมครอน)

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

1.2.2 สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ เพื่อสามารถตั้งค่าและควบคุมตัวแปรนั้นให้ได้ความหนาสม่ำเสมอและอยู่ในมาตรฐานของบริษัท

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและกระบวนการผลิต FPC

1.3.2 ศึกษาตัวแปรในกระบวนการ Entek

1.3.3 ออกแบบการทดลองและทดลองในระดับปฏิบัติการ (ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง) เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

1.3.4 ทดลองในสายการผลิตเพื่อสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

1.3.5 ทดสอบสมการที่ได้โดยเปรียบเทียบความหนาของการเคลือบ FPC ที่คำนวณจากสมการกับความหนาของการเคลือบผลิตภัณฑ์ FPC ในสายการผลิตของบริษัท (ใช้ตัวแปรปฏิบัติการในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาในการคำนวณความหนาจากสมการ และวัดความหนาของการเคลือบผลิตภัณฑ์ในสายการผลิตเมื่อใช้ตัวแปรปฏิบัติการนั้น)

1.3.6 สรุปและเขียนรายงาน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ทราบตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

1.4.2 ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรให้พนักงานสามารถตั้งค่าตัวแปรในกระบวนการ Entek เพื่อควบคุมความหนาของการเคลือบให้สม่ำเสมอและอยู่ในมาตรฐานของบริษัท

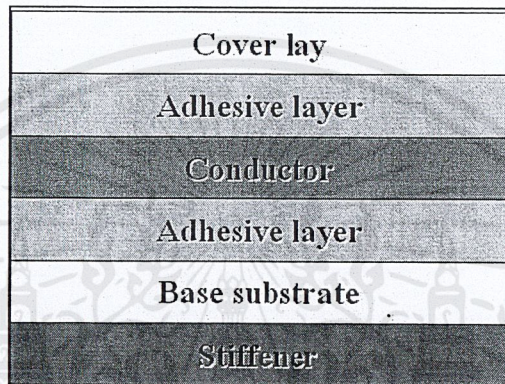
1.4.3 สามารถเพิ่มกำลังการผลิต ลดเวลา และต้นทุนในการตั้งค่าตัวแปรก่อนและระหว่างกระบวนการ Entek

บทที่ 2

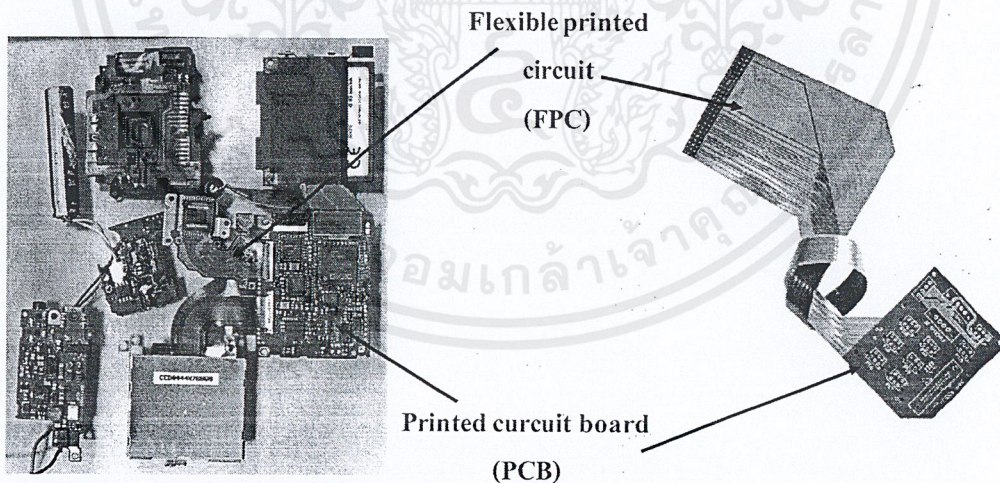
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างและวัสดุสำหรับการผลิต FPC [1-2]

แผงวงจรพิมพ์ไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นได้ประกอบด้วยชั้นต่างๆ ดังรูปที่ 2.1 และภาพตัวอย่างการใช้งาน FPC แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางของ FPC แบบด้านเดียว (Single-side) [2]



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการใช้งาน FPC [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) Stiffener เป็นชั้นที่ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้กับ FPC
- 2) Base substrate เป็นชั้นที่รองรับชั้นตัวนำ (Conductor) เพื่อป้องกันความเสียหายกับเส้นลายวงจรบนชั้นตัวนำจากการเกิดสนิมและรอยขีดข่วน
- 3) Adhesive layer เป็นชั้นที่ทำหน้าที่ยึดติดระหว่าง Base substrate กับชั้นตัวนำและระหว่างชั้นตัวนำกับ Cover lay
- 4) Conductor เป็นชั้นตัวนำสำหรับสร้างเส้นลายวงจร
- 5) Cover lay เป็นชั้นที่คลุมเส้นลายวงจรบนชั้นตัวนำ เพื่อป้องกันความเสียหายของเส้นลายวงจรจากการเกิดสนิมและรอยขีดข่วน

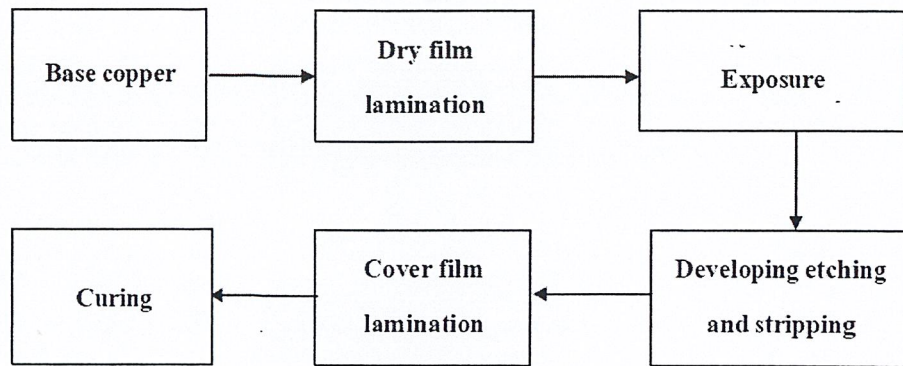
ตารางที่ 2.1 วัสดุที่ใช้ผลิต FPC [3]

ส่วนประกอบของ FPC	ชนิดของวัสดุที่ใช้
Stiffener	PI film, PET film, Glass-epoxy, Metal boards, etc
Base substrate	PI film, PET film, Thin glass-epoxy, Fluorinated ethylene propylene (FEP), Resin-coated paper
Adhesive layer	Acrylic resin, Epoxy resin, Phenol resin, Pressure-sensitive adhesives (PSAs)
Conductor	Electrodeposited (ED) copper foil, RA copper foil, Stainless steel foil, Aluminum foil, etc
Cover lay	Polyimide (PI) film, Polyester terephthalate (PET) film, Flexible solder mask

2.2 กระบวนการผลิต FPC [4-5]

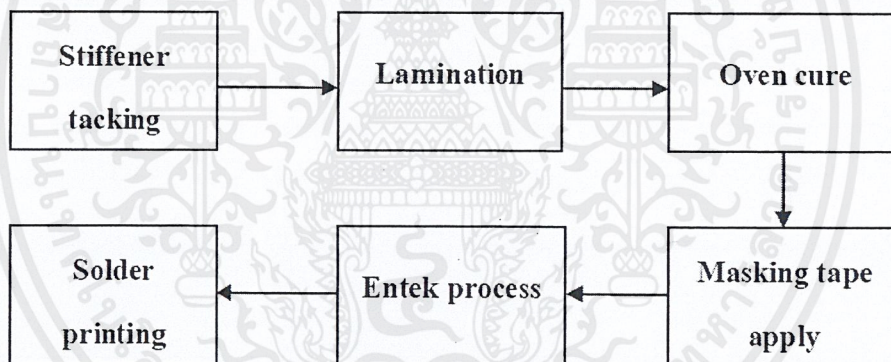
กระบวนการผลิต FPC ประกอบด้วย 4 กระบวนการ ได้แก่ Front process, Middle process, Back process และ Assembly process แต่ละกระบวนการมีรายละเอียด ดังนี้

- 1) Front process แสดงขั้นตอนดังรูปที่ 2.3 เริ่มจากนำแผ่นทองแดงที่ติดกับ Base substrate มาติด Dry film หลังจากนั้นฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านแม่แบบเส้นลายวงจรให้ Dry film แข็ง แล้วกัดขี้รูปเส้นลายวงจรด้วยสารเคมี (Developing etching and stripping) จากนั้นติด Cover film บนผิวหน้าของเส้นลายวงจร แล้วนำไปอบให้ความร้อนเพื่อให้ Cover film ยึดติดกับแผ่นทองแดงและ Base substrate ได้ดียิ่งขึ้น



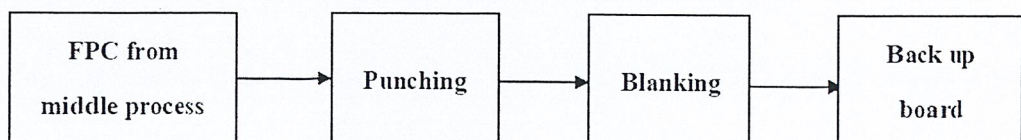
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนของ Front process

2) Middle process นำ FPC ที่ขึ้นรูปเส้นลวดวงจรแล้วจาก Front process มาติด Stiffener เพื่อเพิ่มความแข็งแรง จากนั้นเคลือบด้วยสารละลาย Entek แล้วบัดกรีด้วยโลหะลงบน FPC ตามรูปแบบของงาน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนของ Middle process

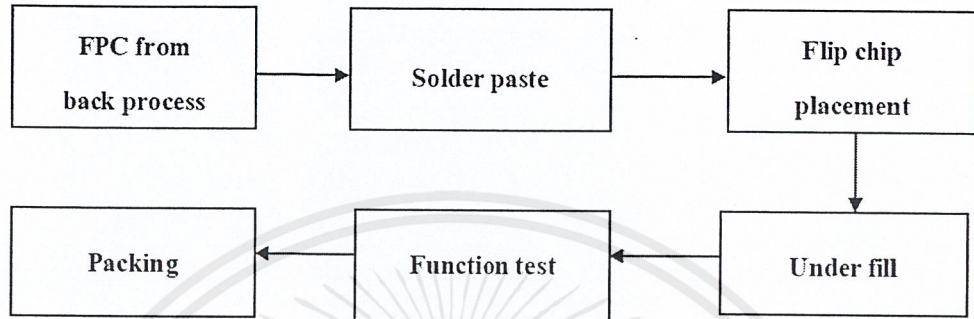
3) Back process เป็นกระบวนการเจาะรูและตัดชิ้นงานออกเป็นชิ้น แล้วนำมาติด Back up board เพื่อเสริมความแข็งแรง ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนของ Back process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

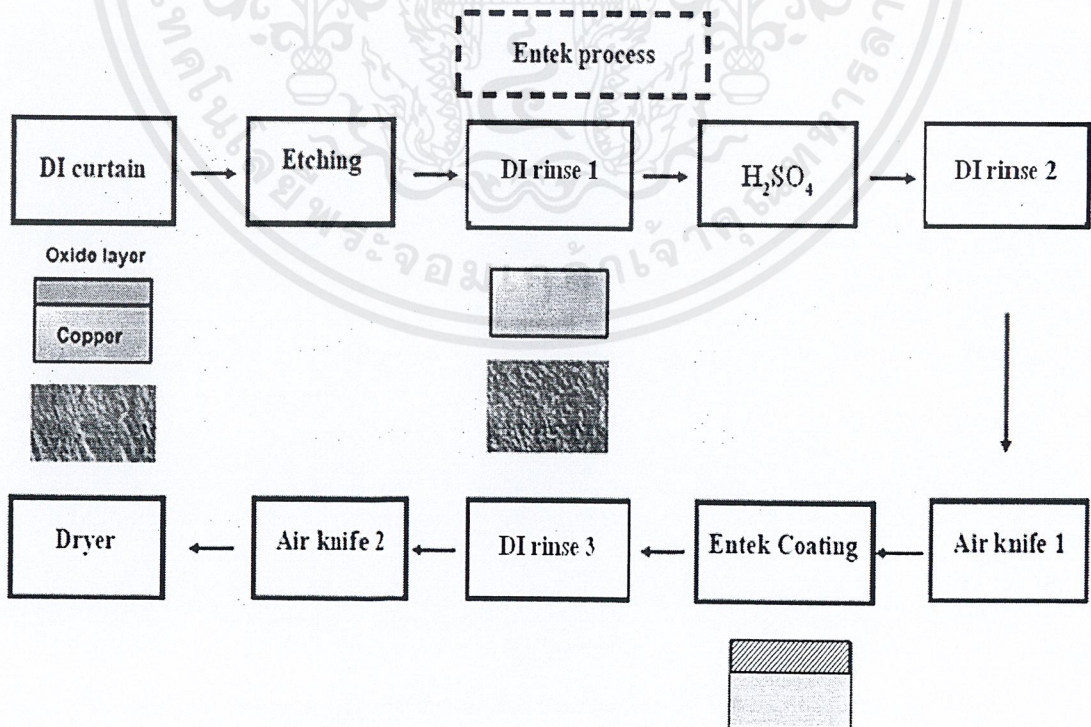
4) Assembly process เป็นการพิมพ์ Solder paste ลงบน FPC ตรงตำแหน่งที่จะติดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการ แล้วผ่านความร้อนเพื่อให้โลหะบัดกรีเชื่อมติดกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ FPC ที่ติดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แล้ว เรียกว่า Flexible printed circuit assembly (FPCA) แล้วบรรจุลงกล่องเพื่อจำหน่ายต่อไป ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนของ Assembly process

2.3 กระบวนการ Entek [6-7]

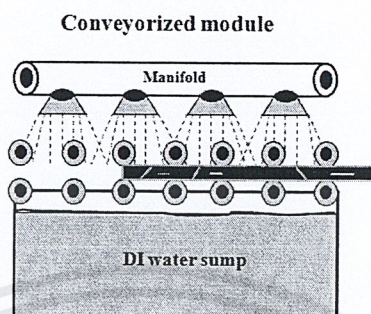
กระบวนการ Entek เป็นกระบวนการใน Middle process ประกอบด้วย 10 ขั้นตอนย่อย ดังรูปที่ 2.7 ได้แก่



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนของกระบวนการ Entek

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

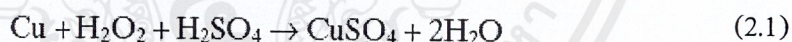
1) ม่านน้ำ DI ใช้น้ำปราศจากไอออน (Deionized water: DI) ฉีดออกมาจากหัวจ่ายสเปรย์ที่มีความดัน 0.03 - 0.05 MPa เพื่อล้างสิ่งสกปรกที่ติดมากับ FPC และป้องกันการกระจายของไอของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้กัดผิวของ FPC ในขั้นตอน Etching



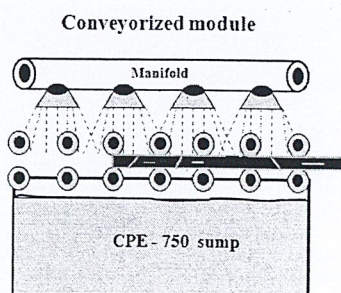
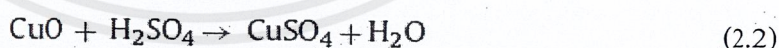
รูปที่ 2.8 ม่านน้ำ DI

2) ขั้นตอนการ Etching เป็นการกัดผิวของ FPC ด้วยสารละลาย CPE-750 ซึ่งมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก และทำหน้าที่ออกซิไดส์ FPC ส่วนกรดซัลฟิวริกทำหน้าที่ปรับผิวของ FPC ให้ละเอียดขึ้น และกำจัดออกไซด์บนผิวของ FPC เพื่อให้สารละลาย Entek ที่จะใช้ในขั้นตอน Entek ติดบนผิว FPC ได้ดียิ่งขึ้น สารละลาย CPE-750 ถูกฉีดออกมาจากหัวจ่ายสเปรย์ที่มีความดัน 0.03 - 0.05 MPa เวลา 30 - 60 วินาที เพื่อให้ได้ความลึกของการกัด 1.3 - 1.6 ไมโครเมตร

ปฏิกิริยาการกัด [7]



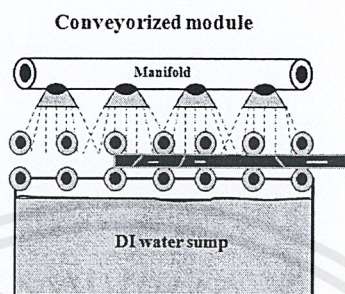
ปฏิกิริยาการกำจัดออกไซด์ [7]



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการ Etching

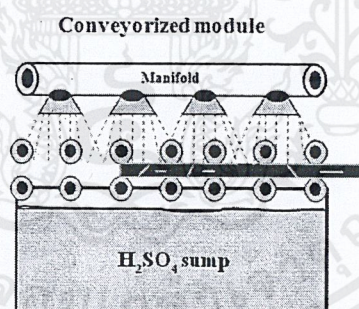
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ขั้นตอนการล้างสารละลาย CPE-750 และเศษทองแดงที่ติดมากับ FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1 น้ำ DI จากแต่ละถังถูกฉีดออกมาตามหัวจ่ายสเปรย์ที่มีความดัน 0.03 - 0.05 MPa ควรเปลี่ยนน้ำ DI ก่อนที่ pH จะต่ำกว่า 6 เพราะไม่ต้องการให้ FPC มีปริมาณไอออนของทองแดงจากขั้นตอนการ Etching ติดไปปนเปื้อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1

4) ขั้นตอนการล้าง FPC ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก เพื่อล้างสารละลาย CPE-750 และ ออกไซด์ที่ตกค้างอยู่บน FPC จากขั้นตอนการ Etching ไม่ให้ปนเปื้อนกับสารละลาย Entek โดย สเปรย์สารละลายกรดซัลฟิวริกออกมาจากหัวจ่ายที่มีความดัน 0.03 - 0.05 MPa

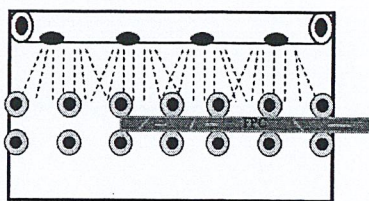


รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการล้าง FPC ด้วยกรดซัลฟิวริก

5) ขั้นตอนการล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2 เพื่อล้างสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ติดมากับ FPC ด้วยน้ำ DI ลักษณะการล้างเหมือนกับขั้นตอนการล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1

6) ขั้นตอนการเป่าแห้ง FPC ด้วย Air knife ครั้งที่ 1 ใช้ลมเป่าไล่ความชื้นที่ติดมากับ FPC ไม่ให้ปนเปื้อนกับสารละลาย Entek

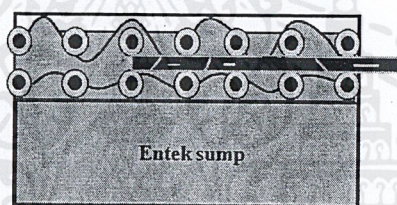
Conveyorized module



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการเป่าแห้ง FPC ด้วย Air knife ครั้งที่ 1

7) ขั้นตอน Entek หรือขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek ตรงตำแหน่งที่จะบัดกรี ชั้นเคลือบทำหน้าที่ปกป้องเส้นลายวงจรที่ทำจากทองแดงจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดย FPC เคลือบที่ผ่านสารละลาย Entek ที่หนุนวนอย่างต่อเนื่อง ไม่ใช้การสเปรย์เนื่องจากจะเกิด Aeration และทำให้สารละลาย Entek เสื่อมคุณภาพ

Conveyorized module



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek

8) ขั้นตอนการล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 3 เพื่อล้างสารละลาย Entek ที่ติดมากับ FPC ลักษณะการล้างเหมือนกับขั้นตอนการล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1 ควรเปลี่ยนน้ำ DI ก่อนที่ pH จะต่ำกว่า 5 เพราะจะทำให้สารละลาย Entek ที่เป็นชั้นเคลือบถูกทำลายด้วยกรดและหลุดออกจาก FPC

9) ขั้นตอนการเป่าแห้ง FPC ด้วย Air knife ครั้งที่ 2 ใช้ลมเป่าไล่ความชื้นที่ติดมากับ FPC

10) ขั้นตอนการอบแห้ง FPC ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดความชื้นออกจาก FPC และนำไปบัดกรีด้วยโลหะต่อไป

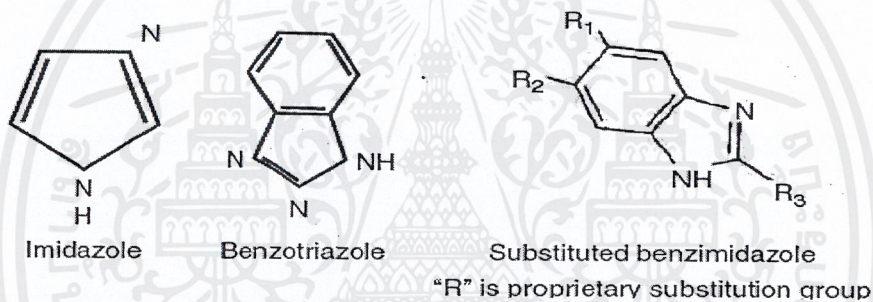
2.4 เทคโนโลยีการเคลือบเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันของทองแดง [8-10]

บางส่วนของเส้นลายวงจรบน FPC จะถูกเปิดไว้สำหรับการบัดกรีเพื่อติดชิ้นส่วน อิเล็กทรอนิกส์ ถ้าบริเวณดังกล่าวเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้เส้นลายวงจรเกิดสนิม และโลหะบัดกรีกระจายตัวได้ไม่ดี ดังนั้นจึงต้องป้องกันการออกซิเดชันโดยเคลือบปิดผิวหน้าของเส้นลายวงจร ซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) Hot air solder leveling (HASL) นำ FPC ไปสัมผัสกับโลหะบัดกรีหลอมเหลว จากนั้นเป่า FPC ด้วยลมร้อน เพื่อกำจัดโลหะบัดกรีส่วนเกินออกจาก FPC เกิดเป็นชั้นของโลหะบัดกรีเคลือบบนผิว FPC มีความหนาของการเคลือบเท่ากับ 1.5 - 5.1 ไมครอน ข้อจำกัดของ HASL คือโลหะบัดกรีมักมีส่วนประกอบของโลหะตะกั่วที่อันตรายและเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ทำให้ไม่สามารถส่งสินค้าออกไปจำหน่ายยังประเทศที่ใช้มาตรฐาน Reduction of hazardous substances (RoHS) และ Waste electrical and electronic equipment (WEEE) เช่น สหภาพยุโรป (EU) ญี่ปุ่น และ อเมริกา เป็นต้น

2) Organic solder preservative (OSP) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้สารเคลือบอินทรีย์ที่เป็นอนุพันธ์ของ Benzotriazole, Imidazole และ Substituted benzimidazole เป็นต้น เรียกสารประกอบประเภทนี้ว่า Azole มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.14 สารเคลือบชนิดนี้เหมาะกับการผลิต FPC ที่มีความหนาแน่นของเส้นลายวงจรสูง



รูปที่ 2.14 ตัวอย่าง โมเลกุลสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบ OSP [9]

3) Immersion tin เป็นเทคโนโลยีใหม่ของการเคลือบที่ได้ผิวหน้าของการเคลือบเรียบ แต่ความสามารถในการบัดกรีของ FPC จะลดลงเมื่อผ่านการให้ความร้อนขณะบัดกรี (Reflow) จำนวนหลายรอบ

4) Immersion silver เป็นเทคโนโลยีการเคลือบที่เริ่มมีการใช้มากขึ้น ใช้การเคลือบโลหะเงินบนบริเวณที่ต้องการบัดกรี ชั้นเคลือบมีความหนาประมาณ 0.1 - 0.45 ไมครอน เทคโนโลยีนี้เหมาะกับการบัดกรีที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง แต่มีข้อจำกัดคือเกิดการเกิดช่องว่างขนาดเล็ก (Void) ตรงรอยบัดกรี ดังนั้นเส้นลายวงจรอาจเกิดการออกซิเดชันที่บริเวณดังกล่าวได้

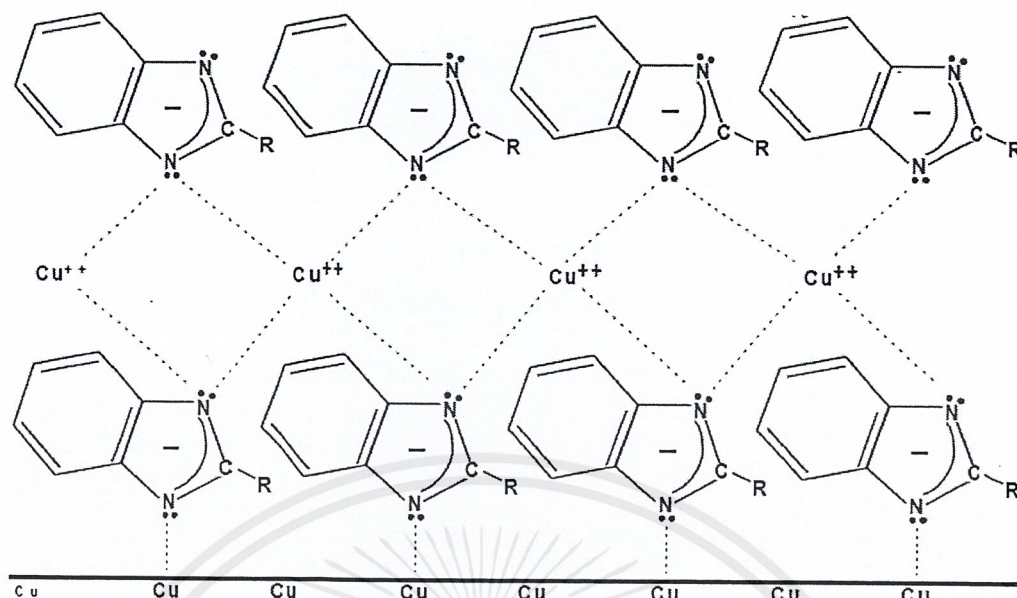
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ต้องการของ FPC เพื่อปกป้องการออกซิเดชันของทองแดงที่ได้จากเทคโนโลยีการเคลือบต่างๆ [9]

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ต้องการของ FPC จากเทคโนโลยีการเคลือบ [9]

Comparison	HASL	OSP	Immersion Silver	Immersion Tin
Surface flatness	Poor	Best	Best	Good
Fine pitch quality	Poor	Best	Best	Good
Surface contrast	Poor	Best	Best	Good
Solder volume	Not predictable	Predictable	Predictable	Predictable
Environmental hazard	High	Low	Medium	Medium
Thermal stress	Yes	No	No	No
Electrical contact	Fair	Poor	Good	Fair
Shelf life (typical)	12 Months	12 Months	Testing Required	12 Months
Total cost of surface finishing	Standard (1x)	Lowest (0.2-0.3x)	Highest (1.5-2x)	Standard (0.9-1x)

2.5 กลไกการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek [11-12]

สารละลาย Entek เป็นสาร OSP ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของ Substituted benzimidazole โดยมีกรดฟอรั่มิกเป็นตัวทำละลาย การเคลือบ FPC เริ่มจากนำ FPC มากัดผิวทองแดงให้ปราศจากออกไซด์ และสร้างความขรุขระให้กับพื้นผิวทองแดง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวการเคลือบด้วยสารละลาย Entek และเพิ่มความแข็งแรงของรอยบัดกรี ในโครงเงินของ Substituted benzimidazole ในสารละลาย Entek ยึดเกาะกับทองแดงด้วยพันธะเคมีและสร้างฟิล์ม Entek แสดงดังรูปที่ 2.15 จากนั้นไอออนทองแดงในสารละลาย Entek สร้างพันธะกับไนโตรเจนอีกอะตอมหนึ่งของ Substituted benzimidazole เกิดเป็นชั้นของสารเคลือบ Organometallic จนได้ความหนาประมาณ 0.1 - 0.6 ไมครอน



รูปที่ 2.15 การก่อตัวของฟิล์ม Entek [9]

2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of experiments: DOE) [13-14]

การออกแบบการทดลองคือการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลและผลการทดลองที่น่าเชื่อถือมาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ เพื่อทดสอบสมมติฐานของการทดลองว่าเป็นไปตามที่ตั้งไว้หรือไม่ โดยควบคุมการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น (Independent variables) ของกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง แล้วดูผลที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนอง (Response variables) ของกระบวนการนั้น

2.6.1 หลักการออกแบบการทดลอง

- 1) การสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีลำดับของการทดลองเป็นแบบสุ่ม เพื่อให้ข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกันและมีการกระจายอย่างอิสระ
- 2) จำนวนครั้งของการทดลองซ้ำ (Replication) แสดงถึง การทดลองซ้ำเพื่อให้สามารถประเมินค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้
- 3) การบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลองหรือเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

2.6.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

- 1) ทำความเข้าใจปัญหาของกระบวนการ โดยศึกษาข้อมูลจากบุคคลหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง
- 2) เลือกตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนอง (Response variables) ให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยเลือกตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้ และกำหนดวิธีการวัดค่าตัวแปรนั้น
- 3) เลือกตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น (Independent variables) และกำหนดระดับของตัวแปร (Level) ที่คาดว่าจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยอาศัยความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการเพื่อพิจารณาคัดเลือกตัวแปร
- 4) ออกแบบการทดลอง (Experiment design) ได้แก่ การกำหนดขนาดตัวอย่าง กำหนดจำนวนการทดลองซ้ำ การเลือกลำดับการทดลอง และวิธีการบันทึกผลการทดลอง
- 5) ดำเนินการทดลอง (Perform the experiment) เป็นการทดลองตามแผนการทดลองที่ออกแบบไว้ ตั้งแต่วิธีการดำเนินการ ความถูกต้องในการวัด การควบคุมตัวแปรในการทดลอง และเก็บผลการทดลองเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่น่าเชื่อถือ
- 6) การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistical analysis) เพื่อหาตัวแปรอิสระที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง
- 7) สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

2.6.3 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial design)

ใช้สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป โดยพิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นจากการรวมกันของระดับตัวแปรทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น สามารถประมาณอิทธิพลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของหลายตัวแปรพร้อมกันและประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปรได้ ตัวอย่างเช่น การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อผลได้ (Yield) ของผลิตภัณฑ์หนึ่งตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิ และเวลา โดยทดลองที่อุณหภูมิ 2 ค่า คือ 60 และ 80 องศาเซลเซียส และเวลา 2 ค่า คือ 30 และ 45 นาที เรียกค่าของแต่ละตัวแปรว่า “ระดับ” คือ อุณหภูมิมี 2 ระดับ และเวลามี 2 ระดับ ไม่มีการทดลองซ้ำ แสดงการออกแบบทดลองอย่างง่าย ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการออกแบบทดลองสำหรับ 2 ตัวแปร

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	
	30	45
60		
80		

อิทธิพลที่มีต่อตัวแปรตอบสนองของการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปมี 2 ประเภท คือ อิทธิพลหลัก (Main effect) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับตัวแปรนั้นเปลี่ยนแปลง และอิทธิพลร่วม (Interaction effect) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของตัวแปร 2 ตัวแปรขึ้นไป

1) การออกแบบแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ตัวแปร เป็นการออกแบบแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปที่มีรูปแบบง่ายที่สุด เพราะเกี่ยวข้องกับตัวแปรอิสระเพียง 2 ตัวแปร คือ A และ B ตัวแปร A ประกอบด้วย a ระดับ ตัวแปร B ประกอบด้วย b ระดับ มีจำนวนการทดลอง n ครั้ง (n Replicate) ดังนั้นการทดลองมีทั้งหมด $a \times b \times n$ การทดลอง เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง $a \times b \times n$ ครั้ง ถูกเลือกมาอย่างสุ่มจึงจัดได้ว่าเป็นการออกแบบแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely randomized design) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ตัวแปรอิสระ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทดลอง [14]

		Factor B			
		1	2	...	b
Factor A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$		$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$		$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$
	⋮				
	a	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$		$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$

ผลการทดลองสามารถวิเคราะห์และเขียนในรูปแบบจำลองสถิติเชิงเส้น คือ [13]

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \tag{2.3}$$

โดยที่ i = ระดับตัวแปร A (i = 1, 2, ..., a)

j = ระดับตัวแปร B (j = 1, 2, ..., b)

k = ลำดับการทดลองซ้ำ (k = 1, 2, ..., n)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

y_{ijk} = ค่าตัวแปรตอบสนองเมื่อตัวแปร A อยู่ที่ระดับ i และตัวแปร B อยู่ที่ระดับ j
สำหรับลำดับการทดลองซ้ำที่ k

μ = ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนองทั้งหมด

τ_i = ค่าคงที่ที่เกิดจากระดับที่ i ของตัวแปร A

β_j = ค่าคงที่ที่เกิดจากระดับที่ j ของตัวแปร B

$(\tau\beta)_{ij}$ = ค่าคงที่ที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร A และตัวแปร B

ϵ_{ijk} = ค่าความคลาดเคลื่อน

2) การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป 2^k เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปที่มีหลายตัวแปรอิสระ โดยศึกษาผลรวมของทุกตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง ในกรณีที่มี k ตัวแปรอิสระ แต่ละตัวแปรอิสระมี 2 ระดับ ระดับเหล่านี้เป็นได้ทั้งข้อมูลเชิงปริมาณ อาจแทนด้วยระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” และข้อมูลเชิงคุณภาพ แทนด้วยการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของตัวแปรนั้นๆ ในแต่ละการทดลองซ้ำ (Replicate) จะมี $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2$ k ตัว เท่ากับ 2^k การทดลอง เรียกการออกแบบการทดลองแบบนี้ว่า “การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป 2^k ” ถ้ามีจำนวนการทำซ้ำเท่ากับ n ครั้ง ดังนั้นจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ $2^k \times n$ การทดลอง

2.6.4 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design: CCD)

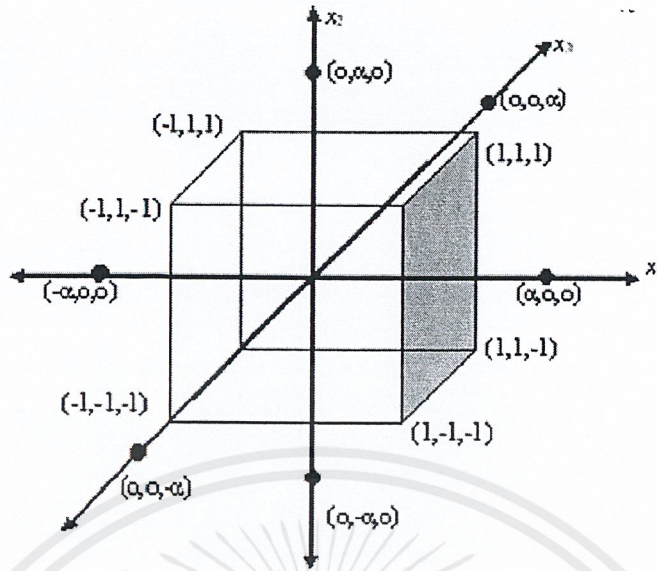
สำหรับการศึกษาตัวแปรจำนวนมาก เมื่อใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป จะมีจำนวนการทดลองเป็นจำนวนมาก จึงทำให้สิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย ดังนั้นจึงนิยมใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งช่วยลดจำนวนการทดลองและเป็นการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมสำหรับสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในลักษณะของพหุนามดีกรี 2

การทดลองแบบส่วนประสมกลางจะคล้ายกับการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปที่เพิ่มจำนวนตำแหน่งการทดลอง เพื่อให้มีผลการทดลองเพียงพอที่จะสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในลักษณะของพหุนามดีกรี 2 ได้ ซึ่งตำแหน่งการทดลองประกอบด้วย ส่วนของการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial portion) ส่วนของจุดศูนย์กลาง (Central portion) และส่วนของจุดแกน (Axial portion) ตัวอย่างเช่น การศึกษา 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ แสดงดังตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.16

ตารางที่ 2.5 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางสำหรับ 3 ตัวแปรอิสระ [15]

การทดลองที่	ตัวแปรอิสระ			ส่วนการทดลอง
	A	B	C	
1	-	-	-	ส่วนของการทดลอง แบบแฟกทอเรียล
2	-	-	+	
3	-	+	-	
4	-	+	+	
5	+	-	-	
6	+	-	+	
7	+	+	-	
8	+	+	+	
9	0	0	0	ส่วนของจุดศูนย์กลาง
10	0	0	0	
11	0	0	0	
12	0	0	0	
13	0	0	0	
14	0	0	0	
15	α	0	0	ส่วนของจุดแกน
16	$-\alpha$	0	0	
17	0	α	0	
18	0	$-\alpha$	0	
19	0	0	α	
20	0	0	$-\alpha$	

หมายเหตุ α เท่ากับ $\pm 2^{n/4}$ เมื่อ n คือ จำนวนตัวแปรอิสระ



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงการทดลองแบบส่วนประสมกลางสำหรับ 3 ตัวแปร [16]

2.7 การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response surface design) [17]

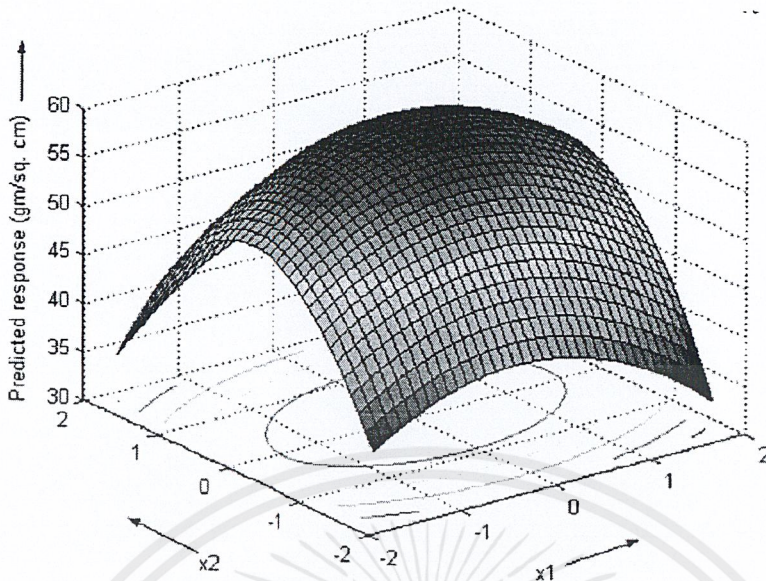
การออกแบบพื้นผิวผลตอบเป็นการสร้างแบบจำลองพื้นผิวสามมิติของผลการทดลองสำหรับวิเคราะห์ค่าของตัวแปรอิสระเพื่อให้ตัวแปรตอบสนองเป็นไปตามที่ต้องการ (Process optimization) และสามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตอบสนอง โดยมีหลักการออกแบบดังนี้

1) ข้อมูลสำหรับสร้างพื้นผิวผลตอบ ต้องมาจากการออกแบบการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือ ได้แก่ การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป และการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง เป็นต้น

2) นำผลการทดลองที่ได้มาสร้างพื้นผิวผลตอบซึ่งมีลักษณะเป็นภาพสามมิติ แสดงดังรูปที่ 2.17

3) พื้นผิวผลตอบสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับผลลัพธ์ของกระบวนการ รูปทั่วไปของสมการ แสดงดังสมการที่ 2.3 และค่าของตัวแปรกระบวนการเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของกระบวนการเป็นไปตามที่ต้องการ (Process optimization)

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_i X_i \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างพื้นผิวผลตอบ [16]

2.8 โปรแกรมมินิแทป (Minitab program) [18-21]

โปรแกรมมินิแทปเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่ใช้ออกแบบการทดลอง ได้แก่ การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ และการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง เป็นต้น เพื่อศึกษาผลของตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป และสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ ได้แก่ การวิเคราะห์ความแปรปรวน การวิเคราะห์สมการถดถอย เป็นต้น การใช้โปรแกรมมินิแทปช่วยออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และมีความถูกต้องสูง

2.8.1 การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมมินิแทป [21]

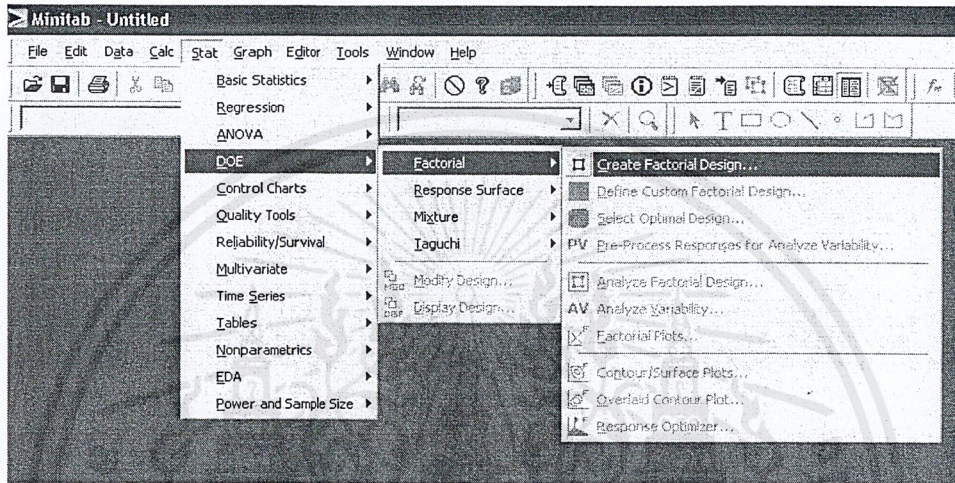
สมมติการทดลองมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร ได้แก่ เวลา และอุณหภูมิ กำหนดให้แต่ละตัวแปรมี 2 ระดับ ไม่มีการทำการทดลองซ้ำ ตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ ความแข็ง ดังนั้นจำนวนการทดลองจึงเป็น 2×2 เท่ากับ 4 การทดลอง การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบด้วยโปรแกรมมินิแทปสามารถทำได้ดังนี้

- 1) เรียกใช้งานโปรแกรมมินิแทป Start > All program > Minitab solution > Minitab version 15
- 2) ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบด้วยโปรแกรมมินิแทป Stat > DOE > Factorial > Create factorial design แสดงดังรูปที่ 2.18
- 3) จากนั้นหน้าจอมินิแทปจะเปลี่ยนไป เพื่อใส่ข้อมูล ดังรูปที่ 2.19 จากนั้น (1) คลิกเลือกช่อง 2-level factorial (Default generators) (2) ใส่จำนวนตัวแปรที่ศึกษา กรณีนี้มี

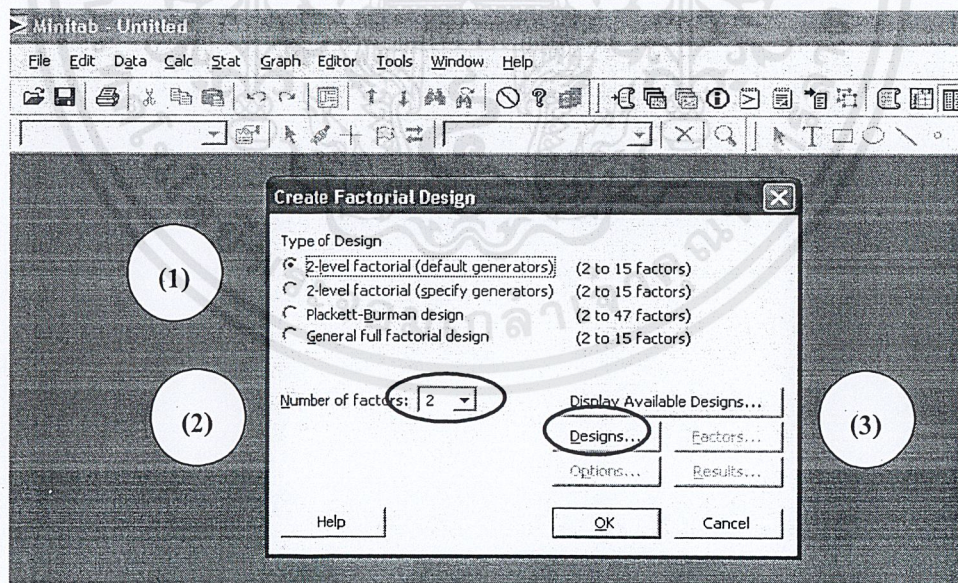
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 ตัวแปร จึงใส่เลข 2 ในช่อง Number of factors (3) คลิก Design เพื่อเลือกจำนวนครั้งที่ต้องการทำการทดลองซ้ำ

4) เมื่อปรากฏกล่องข้อความขึ้นมาใหม่ดังรูปที่ 2.20 ในช่อง Number of replicate for corner point ให้คลิกที่ลูกศรเพื่อเลือกจำนวนการทำการทดลอง ในที่นี้เลือก 1 จากนั้น คลิก OK > คลิก OK จะปรากฏตารางการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ตัวแปร ดังรูปที่ 2.21

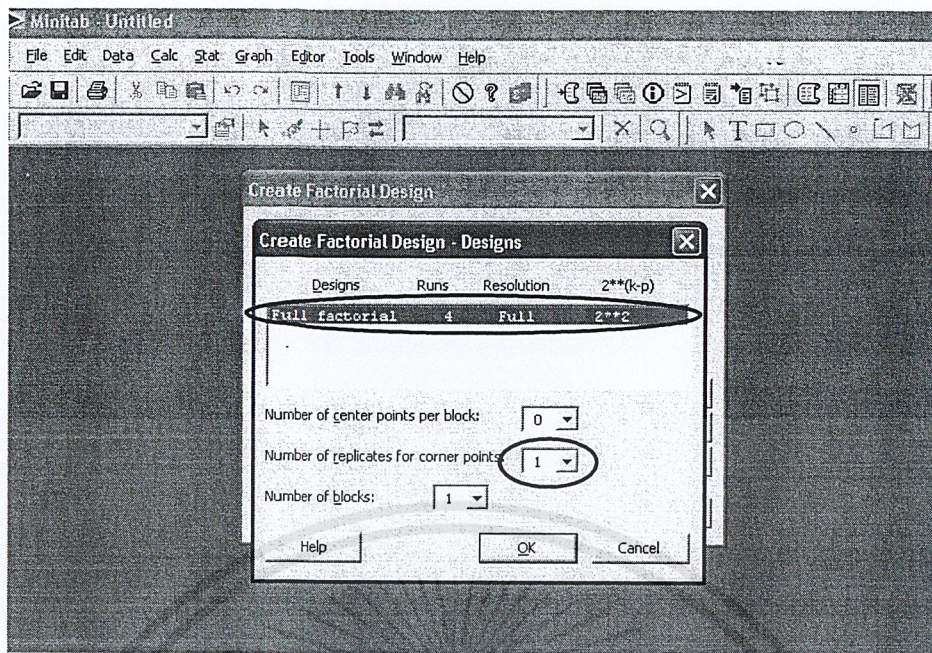


รูปที่ 2.18 การใช้โปรแกรมมินิแทปออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ



รูปที่ 2.19 การใช้โปรแกรมมินิแทปเลือกการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ตัวแปร และแต่ละตัวแปรมี 2 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 การใช้โปรแกรมมินิแทปเลือกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ตัวแปร และแต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ โดยกำหนดจำนวนการทำการทดลองซ้ำของแต่ละแบบการทดลอง

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	ความเข้มข้น	เวลา	
1	1	1	1	1	-1	-1	
2	4	2	1	1	1	1	
3	2	3	1	1	1	-1	
4	3	4	1	1	-1	1	
5							
6							

รูปที่ 2.21 ตัวอย่างการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ตัวแปร จากโปรแกรมมินิแทป แต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ และไม่มีทำการทดลองซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมมินิแทป

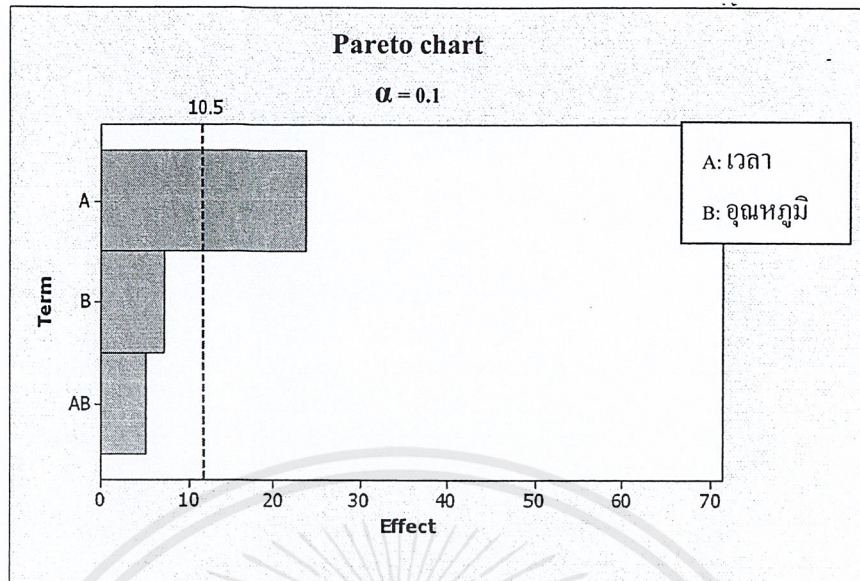
หลังจากทำการทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบด้วยโปรแกรมมินิแทป จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลองโดยป้อนข้อมูลในคอลัมน์ว่างถัดไปทางขวามือ และใส่ชื่อผลการทดลองที่ช่องบนสุด ดังรูปที่ 2.22 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง ดังนี้

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	ความเข้มข้น	เวลา	ความแข็ง	
1	1	1	1	1	-1	-1	179.70	
2	4	2	1	1	1	1	168.75	
3	2	3	1	1	1	-1	170.75	
4	3	4	1	1	-1	1	164.60	
5								
6								

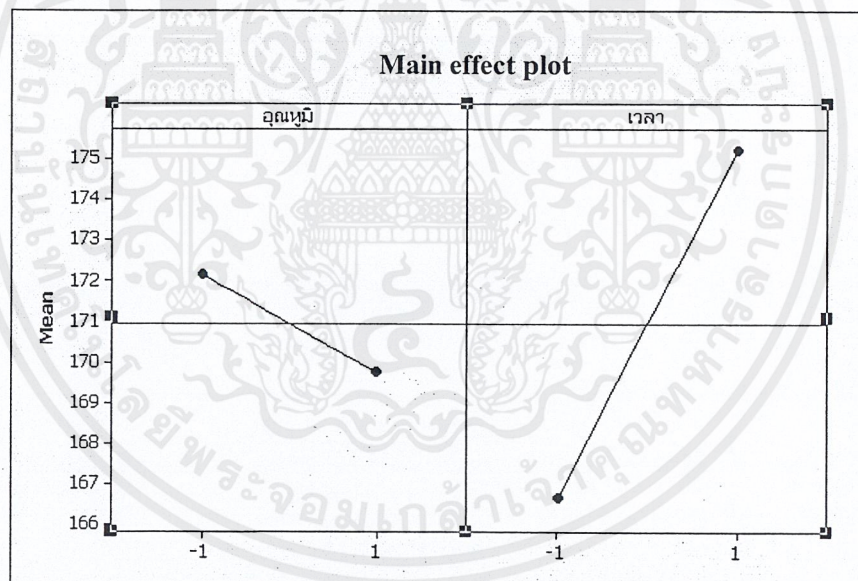
รูปที่ 2.22 การบันทึกผลการทดลองในโปรแกรมมินิแทป

1) การวิเคราะห์ตัวแปรอิสระที่มีผลต่อผลการทดลองโดยใช้ผังพาเรโต (Pareto) ถ้าตัวแปรอิสระใดมีค่าร้อยละของผลกระทบ (ค่าในแนวแกน X) สูงกว่าเส้นแสดงค่าของอัลฟาเท่ากับ 0.1 (เส้นประ) แสดงว่าตัวแปรอิสระนั้นมีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง โดยทั่วไปจะวิเคราะห์ผลการทดลองที่แอลฟาเท่ากับ 0.1 หรือ 0.05 จากรูปที่ 2.23 พบว่าตัวแปร A (เวลา) มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (ความแข็ง) ส่วนตัวแปร B (อุณหภูมิ) และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร A และ B ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

2) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตอบสนองโดยใช้ Main effect plot ถ้าเส้นกราฟที่ได้เป็นเส้นตรงที่มีความชันในเชิงบวก หมายความว่า ตัวแปรตอบสนองนั้นมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับตัวแปรอิสระ ถ้ามีความชันในเชิงลบหมายความว่าตัวแปรนั้นมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับตัวแปรอิสระ ความชันของเส้นกราฟมากแสดงว่าตัวแปรอิสระมีผลต่อตัวแปรตอบสนองมาก แต่ถ้าความชันของเส้นกราฟน้อยตัวแปรอิสระมีผลต่อตัวแปรตอบสนองน้อย ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 ตัวอย่าง Pareto chart เพื่อวิเคราะห์หาตัวแปรอิสระที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

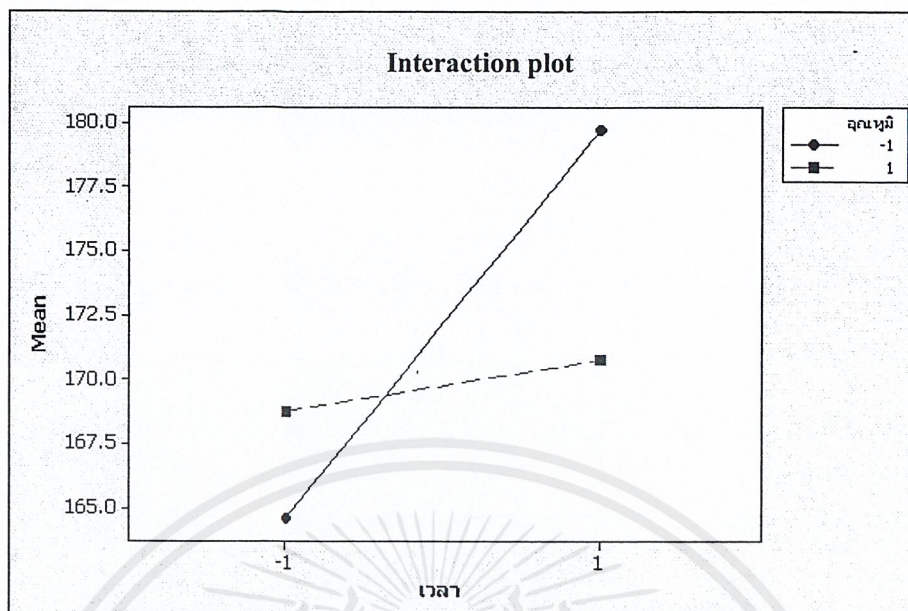


รูปที่ 2.24 ตัวอย่าง Main effect plot เพื่อวิเคราะห์ผลของตัวแปรอิสระต่อตัวแปรตอบสนอง

3) การวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรอิสระโดย Interaction plot เพื่อวิเคราะห์ว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวแปรมีอันตรกิริยาระหว่างกันหรือไม่ ถ้าเส้นกราฟที่ได้เป็นเส้นทึบและเส้นประตัดกัน หมายความว่า ตัวแปรอิสระทั้งสองมีอันตรกิริยาระหว่างกัน แต่ถ้าเส้นกราฟทั้งสองขนานกัน หมายความว่า ตัวแปรทั้งสองไม่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน แสดงดังรูปที่

2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 ตัวอย่าง Interaction plot เพื่อวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างตัวแปร

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

2.9.1 การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะด้วยสารอินทรีย์

Lewis G. [22] ศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงด้วยสารเบนซิมิดาโซล (Benzimidazole) โดยนำแผ่นทองแดงเคลือบสารเบนซิมิดาโซลในสารละลายที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิโมลต่อลิตร pH เท่ากับ 8 และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที, 1 ชั่วโมง และ 16 ชั่วโมง พบว่าที่ผิวหน้าของแผ่นทองแดงเกิดชั้นฟิล์ม Cu(I)-Benzimidazole และมีปริมาณของเบนซิมิดาโซลมากขึ้นเมื่อเวลาในการเคลือบมากขึ้น จากนั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบ Benzimidazole ไปทดสอบการกัดกร่อนในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 6.2 และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าพื้นผิวการเคลือบของทองแดงที่มีความเข้มข้นของเบนซิมิดาโซลมากกว่า มีอัตราการกัดกร่อนต่ำกว่า

Artaki I. และคณะ [23] ศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงด้วยอิมิดาโซล (Imidazole) และอนุพันธ์ของเบนซิมิดาโซล (Alkyl substituted benzimidazole) ชั้นตอนแรกนำแผ่นทองแดงขนาด 2×2 นิ้ว ที่ผ่านการกัดผิวด้วยสารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟตและกรดซัลฟิวริก จากนั้นเคลือบอิมิดาโซลโดยพ่นสารละลายอิมิดาโซลลงบนแผ่นทองแดง ชั้นฟิล์มที่ได้เป็นแบบชั้นเดี่ยว (Monolayer) มีความหนา 20 - 50 อังสตรอม ส่วนการเคลือบแผ่นทองแดงด้วยอนุพันธ์ของเบนซิมิดาโซล ทำโดยจุ่มแผ่นทองแดงลงในสารละลาย Alkyl substituted benzimidazole ประมาณ 1 - 3 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ชั้นฟิล์มที่ได้เป็นแบบหลายชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Multilayer) มีความหนา 3,000 - 5,000 อังสตรอม จากนั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบไปทดสอบความต้านทานของชั้นเคลือบต่อความร้อนที่อุณหภูมิ 75 - 200 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออบที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ความหนาของชั้นเคลือบอิมิดาโซลจะลดลงอย่างรวดเร็ว และมีชั้นออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของทองแดงกับออกซิเจนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ขณะที่ชั้นเคลือบอนุพันธ์ของเบนซิมิดาโซลสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 150 องศาเซลเซียส ส่วนที่เวลาในการอบ 2 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความหนาของชั้นเคลือบอนุพันธ์ของเบนซิมิดาโซลลดลงครั้งหนึ่งในเวลาเพียงครึ่งชั่วโมง แต่เมื่อนำทองแดงที่เคลือบอิมิดาโซลและอนุพันธ์ของเบนซิมิดาโซลไปทดสอบความสามารถในการบัดกรี (Solderability) ด้วยวิธี Wetting balance พบว่าผลการทดลองที่ได้ไม่แตกต่างกัน คือ การอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส ทำให้ความสามารถในการบัดกรีลดลงอย่างมาก เนื่องจากออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านรูพรุนของชั้นเคลือบแล้วจึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับทองแดง

Witold Paw และคณะ [24] ศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนของทองแดงด้วยอนุพันธ์ของเบนซิมิดาโซล โดยจุ่มแผ่นทองแดงในสารละลายที่มีอนุพันธ์ของเบนซิมิดาโซลที่มีชนิดไอออนของโลหะและความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เช่น ไอออนของทองแดง ไอออนของสังกะสี พบว่าแผ่นทองแดงที่จุ่มในสารละลายที่มีอนุพันธ์ของเบนซิมิดาโซลเพียงอย่างเดียว ชั้นเคลือบจะทนต่ออุณหภูมิได้ต่ำกว่าชั้นเคลือบที่มีอนุพันธ์ของเบนซิมิดาโซลและไอออนของโลหะทองแดง และชั้นเคลือบที่มีอนุพันธ์ของเบนซิมิดาโซลและไอออนของโลหะสังกะสี ตามลำดับ

จากงานวิจัยข้างต้นนี้ แสดงให้เห็นว่าการป้องกันการกัดกร่อนและออกซิเดชันของทองแดงโดยการเคลือบพื้นผิวทองแดงด้วยสารอินทรีย์ เช่น อนุพันธ์ของเบนซิมิดาโซล ทำให้ความสามารถในการบัดกรีของทองแดงที่เป็นเส้นลวดวงจรของวงจรพิมพ์ไฟฟ้าชนิดหุ้มได้ โดยสมบัติสำคัญของชั้นเคลือบสารอินทรีย์ คือ การทนต่อความร้อน และความหนาของชั้นเคลือบ ซึ่งสามารถควบคุมหรือปรับเปลี่ยนความหนาของชั้นเคลือบได้โดยปรับเปลี่ยนส่วนประกอบ เช่น ชนิดของสารอินทรีย์ ชนิดและปริมาณไอออนโลหะ นอกจากนี้ต้องพิจารณาความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้เคลือบ ระยะเวลาที่ใช้เคลือบ และอุณหภูมิของสารละลายด้วย

2.9.2 การใช้สถิติและหลักการออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต

ปริศรา ธรรมเสวต [21] วิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการผลิตระบบเฟล็กโซกราฟฟีแบบพิมพ์พื้นผิว (Surface printing) บนเทปกาวยพอลิโพรพิลีนชนิด Biaxial oriented polypropylene (BOPP) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปโดยใช้โปรแกรมมินิแทป โดยทดลองผลิตเทปกาวยพิมพ์ลาย 2 ชนิด คือ เทปกาวยพอลิโพรพิลีนที่มีการปรับผิวหน้าเทปโดยวิธีทางเคมีก่อนเข้าสู่กระบวนการพิมพ์ลวดลาย ตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิของลูกกลิ้งชุดพิมพ์ ความหนืดของหมึกพิมพ์ อุณหภูมิของเทปก่อนพิมพ์ และอุณหภูมิของตู้อบหมึกพิมพ์ และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทพกาวพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการปรับผิวหน้าเทพโดยวิธีทางเคมีก่อนเข้าสู่กระบวนการพิมพ์ ลวดลาย ดังนั้น จึงต้องปรับผิวหน้าเทพโดยใช้โคโรนา ก่อนเข้าสู่กระบวนการพิมพ์ ตัวแปรที่ศึกษา คือ ระดับโคโรนา ความหนืดของหมึกพิมพ์ อุณหภูมิของตู้อบหมึกพิมพ์ อุณหภูมิของลูกกลิ้งชุด พิมพ์ อุณหภูมิของตู้อบสารเคลือบดิน และปริมาณของแข็งในสารเคลือบดิน จากการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณภาพการพิมพ์บนเทพกาวพอลิโพรพิลีนที่มีการปรับผิวหน้าเทพโดยวิธี ทางเคมีก่อนเข้าสู่กระบวนการพิมพ์ลวดลาย คือ อุณหภูมิของลูกกลิ้งชุดพิมพ์ ความหนืดของหมึก พิมพ์ และอุณหภูมิของเทพก่อนพิมพ์ ในกรณีที่ไม่มี การปรับผิวหน้าเทพโดยวิธีทางเคมีก่อนเข้าสู่ กระบวนการพิมพ์ลวดลาย ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณภาพการพิมพ์ คือ ระดับโคโรนา อุณหภูมิ ของลูกกลิ้งชุดพิมพ์ ความหนืดของหมึกพิมพ์ และอุณหภูมิของตู้อบสารเคลือบดิน ผลที่ได้จาก งานวิจัยสามารถนำไปใช้กำหนดสภาวะการผลิตที่เหมาะสมและกำหนดเป็นมาตรฐานวิธีการ ปฏิบัติงานสำหรับพนักงาน

Bayley R.W. [25] ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดดินที่ปนเปื้อน สารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้เครื่องสูบลมแบบพ่น (Jet pump) ตัวแปรอิสระที่ศึกษาคือ ความ เข้มข้นของสารปนเปื้อนเริ่มต้น (A) จำนวนรอบของการบำบัด (B) ความดันของการพ่น (C) ขนาด อนุภาคของดินที่ปนเปื้อน (D) และความหนืดของสารปนเปื้อน (E) โดยนำตัวแปรอิสระทั้งหมดมา ออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^5 แต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ คือ ระดับสูง และต่ำ ผลการ วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทปที่อัลฟาเท่ากับ 0.05 พบว่าตัวแปรอิสระที่มีผลต่อประสิทธิภาพการ บำบัดดินที่ปนเปื้อนมากที่สุด คือ จำนวนรอบของการบำบัด (B) ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน เริ่มต้น (A) และอันตรกิริยาระหว่างจำนวนรอบของการบำบัดและความเข้มข้นของสารปนเปื้อน เริ่มต้น (AB) ดังนั้นทำให้ทราบภาวะของการปฏิบัติงานที่เหมาะสม คือ เมื่อทราบความเข้มข้นของ สารปนเปื้อนเริ่มต้นจึงรู้ว่าต้องบำบัดจำนวนกี่รอบ โดยไม่ต้องใช้ความดันของการพ่นสูง แต่อย่างไร ก็ตามการทดลองนี้ยังไม่ได้นำตัวแปรอื่นๆ ที่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดดินที่ปนเปื้อนมา ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ ส่วนผสมของสารอินทรีย์ ความละเอียดของอนุภาค และระยะเวลาที่ดิน ปนเปื้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

ปองพล เปรียญวรรัตน์ และสันติชัย ชิวสุทธิศิลป์ [26] วิเคราะห์ตัวแปรอิสระที่มีผลต่อ ค่าความแข็งแรงของการดึงลวดระหว่างแผงวงจรพิมพ์ไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นได้ (Flexible printed circuit) และแผ่นเสริมกำลัง (Stiffener) โดยเริ่มจากการศึกษากระบวนการการผลิตที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย 4 กระบวนการ คือ (1) การเจาะชิ้นงานด้วยเลเซอร์จนถึงการล้างด้วยน้ำ (2) การทำ ความสะอาดชิ้นงานด้วยสารเคมี (3) การทำความสะอาดชิ้นงานด้วยพลาสมา และ (4) การเคลือบ สารปกป้องพื้นผิวทองแดง ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^4 แต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ คือ การมี (With) และการไม่มี (Without) ของกระบวนการนั้น จากการศึกษาวิเคราะห์ผลการ ทดลองพบว่ากระบวนการทำความสะอาดแผ่นงานด้วยสารเคมีไม่มีผลต่อความแข็งแรงของการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดึงลอก จากนั้นนำตัวแปรของ 3 กระบวนการที่คาดว่าจะมีผลต่อความแข็งแรงของการดึงลอก ทั้งหมด 48 ตัวแปรมาวิเคราะห์โดยใช้เมทริกซ์เหตุและผล (Cause and effect matrix) การวิเคราะห์ปัญหาและผลกระทบ (Failure mode and effects analysis, FMEA) และการทดสอบสมมติฐานโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-way ANOVA hypothesis testing) เพื่อลดจำนวนตัวแปรอิสระจนเหลือ 6 ตัวแปร จากนั้นใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^6 พบว่าตัวแปรอิสระที่มีผลต่อความแข็งแรงของการดึงลอก คือ เวลาการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยพลาสติก อุณหภูมิการอบเบื้องต้นในการพลาสติก และเวลาในการทำอัลตราโซนิค และได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของการดึงลอก

วสันต์ พุกผาสุก และอรรถกร เก่งพล [27] งานวิจัยนี้ศึกษาเพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นและปรับปรุงคุณภาพผิวงานชุบโครเมียม สาเหตุที่ทำให้เกิดของเสียมากที่สุดคือการเกิดเม็ดหรือตามคบนผิวชิ้นงาน จากนั้นวิเคราะห์สาเหตุที่ก่อให้เกิดตามคบนผิวชิ้นงาน โดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล และนำมาเชื่อมโยงกับการวิเคราะห์ปัญหาและผลกระทบเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการ จากนั้นศึกษาระบบการวัดของชิ้นงานก่อนชุบโครเมียมเพื่อเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้องของระบบการวัด ต่อมาจึงวิเคราะห์สาเหตุที่มีผลกระทบต่อความหยาบของผิวชิ้นงาน พบว่าสาเหตุที่อาจส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดของเสีย คือ ขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นงานก่อนชุบชิ้นงาน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และ pH ในบ่อนิกเกิล ผลจากการวิเคราะห์แบบทีละสาเหตุในแต่ละตัวแปร (One factor at a time) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-way ANOVA) พบว่าวิธีการล้างและตัวแปรของบ่อชุบนิเกิล ได้แก่ pH และ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า มีผลต่อความขรุขระบนผิวของชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดเป็นเม็ดหรือตามค จากนั้นออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response surface design) เพื่อหาภาวะตัวแปรที่ไม่ก่อให้เกิดความขรุขระบนผิวชิ้นงานเพื่อนำไปเขียนคู่มือการปฏิบัติงาน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนนี้แสดงถึงความสำคัญของการออกแบบการทดลองในการหาผลของตัวแปรอิสระต่อตัวแปรตอบสนอง การใช้เครื่องมือทางสถิติในการวิเคราะห์ตัวแปรอิสระที่มีผลต่อกระบวนการผลิตหรือการเกิดของเสีย เช่น การใช้แผนผังเหตุและผล การวิเคราะห์ปัญหาและผลกระทบ และการทดสอบสมมติฐานโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติทำให้ทราบค่าของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมต่อการผลิต และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเขียนคู่มือการปฏิบัติงานเพื่อควบคุมค่าของตัวแปรอิสระที่สำคัญ จากข้อมูลและงานวิจัยต่างๆ ที่ได้นำเสนอนี้จะเป็นแนวทางในการศึกษาตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek

บทที่ 3

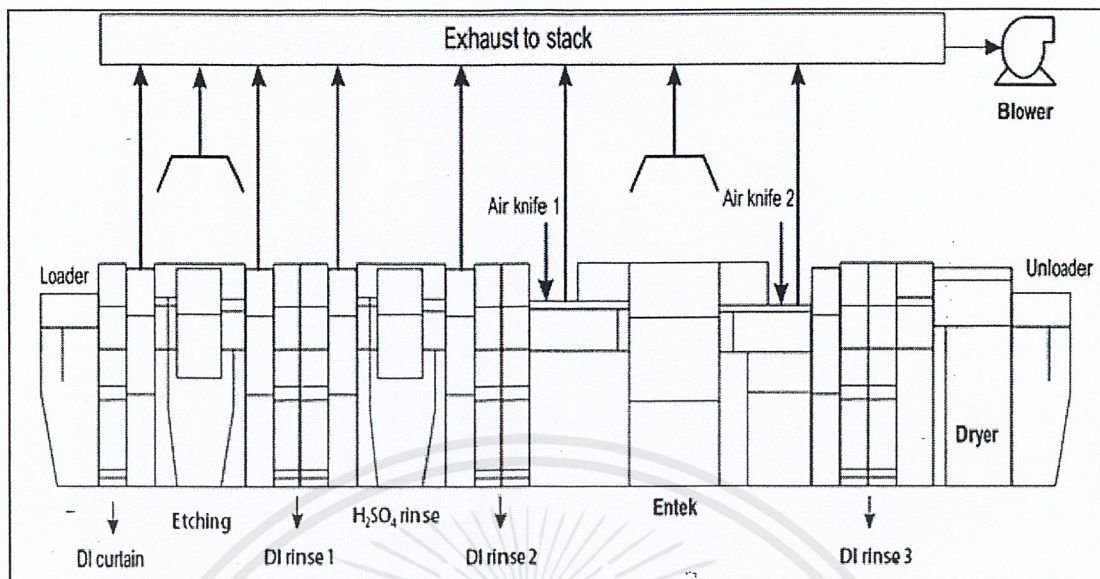
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek และความสม่ำเสมอของการเคลือบเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของ FPC และการบัดกรีปิดเส้นลายวงจรที่ทำจากทองแดงเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มาตรฐานความหนาของการเคลือบ FPC ของบริษัท คือ 0.38 - 0.44 ไมครอน ถ้าความหนาของการเคลือบสูงกว่ามาตรฐานจะทำให้ต้นทุนการผลิตสูง เพราะสิ้นเปลืองสารเคมีที่มีราคาแพง และอาจเกิดตำหนิที่รอยบัดกรี แต่ถ้าความหนาของการเคลือบต่ำกว่ามาตรฐานจะไม่สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ตำแหน่งบัดกรีได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek โดยอาศัยหลักการออกแบบการทดลอง (Design of experiments: DOE) และวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรมมินิแทป วิธีการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากศึกษาขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek วิเคราะห์ตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ จากนั้นออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลของตัวแปรนั้นต่อความหนาของการเคลือบ FPC เพื่อสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับตัวแปรที่ผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

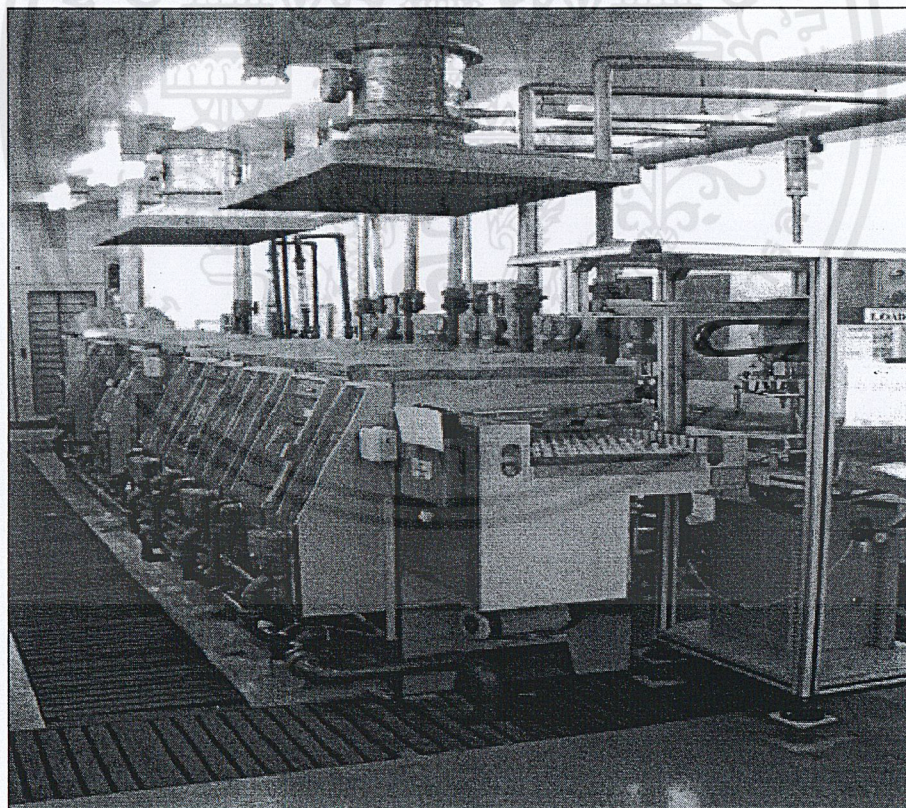
3.1 การวิเคราะห์ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่คาดว่าจะมีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

ขั้นตอนย่อยของกระบวนการ Entek แสดงดังรูปที่ 3.1 ตัวแปรปฏิบัติการของแต่ละขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 3.1

- 1) การ Etching
- 2) การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1
- 3) การล้าง FPC ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
- 4) การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2
- 5) การเป่าแห้ง FPC ด้วย Air knife ครั้งที่ 1
- 6) การเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek
- 7) การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2
- 8) การเป่าแห้ง FPC ด้วย Air knife ครั้งที่ 2
- 9) การอบแห้ง FPC



รูปที่ 3.1 รูปจำลองกระบวนการ Entek



รูปที่ 3.2 กระบวนการ Entek ของบริษัท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรปฏิบัติการของขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek

ขั้นตอนย่อย	ตัวแปร	หน่วย
การ Etching	เวลาการ Etching	sec
	ความดันของการฉีดพ่นสารละลาย CPE	MPa
	ปริมาณไอออนทองแดงในสารละลาย CPE	%
	อัตราการไหลของสารละลาย CPE	LPM
	ความลึกของการกัด FPC	μm
	ความเข้มข้นของสารละลาย CPE	% v/v
การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1	เวลา	sec
	ความดันของการฉีดพ่นน้ำ DI	MPa
	อัตราการไหลของน้ำ DI	LPM
	pH ของน้ำ DI	-
การล้าง FPC ด้วยกรดสารละลายกรดซัลฟิวริก	เวลา	sec
	ความดันของการฉีดพ่น	MPa
	อัตราการไหลของสารละลายกรดซัลฟิวริก	LPM
	ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก	% v/v
การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2	เวลา	sec
	ความดันของการฉีดพ่นน้ำ DI	MPa
	อัตราการไหลของน้ำ DI	LPM
	pH ของน้ำ DI	-
การเป่าแห้ง FPC ด้วย Air knife ครั้งที่ 1	เวลา	sec
	ความดันของอากาศ	MPa
การเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek	เวลาในการเคลือบ FPC	sec
	อัตราการไหลของสารละลาย Entek	LPM
	ความเข้มข้นของสารละลาย Entek เทียบกับสารละลายมาตรฐาน	%
	ความเป็นกรดของสารละลาย Entek เทียบกับสารละลายมาตรฐาน	%
	อุณหภูมิของสารละลาย Entek	$^{\circ}\text{C}$
	pH ของสารละลาย Entek	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรปฏิบัติการของขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek (ต่อ)

ขั้นตอนย่อย	ตัวแปร	หน่วย
การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 3	เวลา	sec
	ความดันของการฉีดพ่นน้ำ DI	MPa
	อัตราการไหลของน้ำ DI	LPM
	pH ของน้ำ DI	-
การเป่าแห้งด้วย Air knife ครั้งที่ 1	เวลา	sec
	ความดันของอากาศ	MPa
การอบแห้ง	อุณหภูมิ Heater F-T, F-B, R-T, R-B	°C
	อุณหภูมิต่ำสุด	°C

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลาย Entek 90 และ 140 % โดยปริมาตร หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลาย Entek 9 และ 14 % โดยปริมาตรของสารละลาย Entek Replenisher ซึ่งเป็นสารละลายเริ่มต้นในการเตรียมสารละลาย Entek

จากขั้นตอนย่อยทั้งหมดจะมีตัวแปร 34 ตัวแปร ดังตารางที่ 3.1 ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2^k เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC ทำให้มีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 2^{34} การทดลอง (ตารางที่ 3.2) ซึ่งมีจำนวนมากและจะเสียเวลาและสิ้นเปลืองสารเคมี ดังนั้นจาก 9 ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek จึงระดมสมอง (Brain storming) ในการวิเคราะห์ขั้นตอนย่อยที่คาดว่าจะมีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC เพื่อลดจำนวนของการทดลอง และใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2^k ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แบบมี (With) และ ไม่มี (Without) บางขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek เพื่อหาขั้นตอนย่อยที่มีนัยสำคัญต่อความหนาของการเคลือบ FPC

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลองของแต่ละขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek

ขั้นตอนย่อย	ตัวแปร	หน่วย	จำนวนการทดลอง
การ Etching	เวลาการ Etching	sec	2 ⁶
	ความดันของการฉีดพ่นสารละลาย CPE	MPa	
	ปริมาณไอออนทองแดงในสารละลาย CPE	%	
	อัตราการไหลของสารละลาย CPE	LPM	
	ความลึกของการกัด FPC	µm	
	ความเข้มข้นของสารละลาย CPE	% v/v	
การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1	เวลา	sec	2 ⁴
	ความดันของการฉีดพ่นน้ำ DI	MPa	
	อัตราการไหลของน้ำ DI	LPM	
	pH ของน้ำ DI	-	
การล้าง FPC ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก	เวลา	sec	2 ⁴
	ความดันของการฉีดพ่นสารละลายกรดซัลฟิวริก	MPa	
	อัตราการไหลของสารละลายกรดซัลฟิวริก	LPM	
	ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก	%	
การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2	เวลา	sec	2 ⁴
	ความดันของการฉีดพ่นน้ำ DI	MPa	
	อัตราการไหลของน้ำ DI	LPM	
	pH ของน้ำ DI	-	
การเป่าแห้ง FPC ด้วย Air knife ครั้งที่ 1	เวลา	sec	2 ²
	ความดันของอากาศ	MPa	
การเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek	เวลาในการเคลือบ FPC	sec	2 ⁶
	ความเข้มข้นของสารละลาย Entek เทียบกับสารละลายมาตรฐาน	%	
	ความเป็นกรดของสารละลาย Entek เทียบกับสารละลายมาตรฐาน	%	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลองของแต่ละขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek (ต่อ)

ขั้นตอนย่อย	ตัวแปร	หน่วย	จำนวนการทดลอง
การเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek (ต่อ)	อัตราการไหลของสารละลาย Entek	LPM	
	อุณหภูมิของสารละลาย Entek	°C	
	pH ของสารละลาย Entek	-	
การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 3	เวลา	sec	2 ⁴
	ความดันของการฉีดพ่น	MPa	
	อัตราการไหลของน้ำ DI	LPM	
	pH ของน้ำ DI	-	
การเป่าแห้งด้วย Air knife ครั้งที่ 1	เวลา	sec	2 ⁴
	ความดันของลมเป่าแห้ง	MPa	
การอบแห้ง	อุณหภูมิ Heater F-T, F-B, R-T, R-B	°C	
	อุณหภูมิต่ำสุด	°C	

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลาย Entek 90 และ 140 % โดยปริมาตร หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลาย Entek 9 และ 14 % โดยปริมาตรของสารละลาย Entek Replenisher ซึ่งเป็นสารละลายเริ่มต้นในการเตรียมสารละลาย Entek

3.2 การออกแบบอุปกรณ์ทดลองระดับปฏิบัติการ และการวิเคราะห์ตัวแปรของขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อความหนาของการเคลือบ FPC

เมื่อทราบขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC แล้ว จึงนำตัวแปรของขั้นตอนย่อยนั้นมาออกแบบการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อความหนาของการเคลือบ FPC โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^k ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แต่ละตัวแปรมี 2 ระดับ คือ ระดับสูง (+) และระดับต่ำ (-)

การทดสอบตัวแปรของขั้นตอนย่อยที่มีนัยสำคัญต่อความหนาของการเคลือบ FPC ต้องปรับค่าตัวแปรนั้นในสายการผลิตของบริษัท แต่เนื่องจากบริษัททำการผลิตตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องทดลองในระดับปฏิบัติการที่ใกล้เคียงกับสายการผลิตก่อน

3.3 การสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับ ตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อความหนาของการเคลือบ FPC

เมื่อทราบตัวแปรของขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีนัยสำคัญต่อความหนาของการเคลือบ FPC จึงนำตัวแปรที่ได้นั้นมาออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง และทดสอบตัวแปรในสายการผลิตของบริษัท แบบทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ผลการทดลองโดยการออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response surface design) ด้วยโปรแกรมมินิแทป เพื่อสร้างสมการและยืนยันสมการที่ได้โดยทดสอบในกระบวนการผลิต หรือกับข้อมูลการผลิตของบริษัท



บทที่ 4

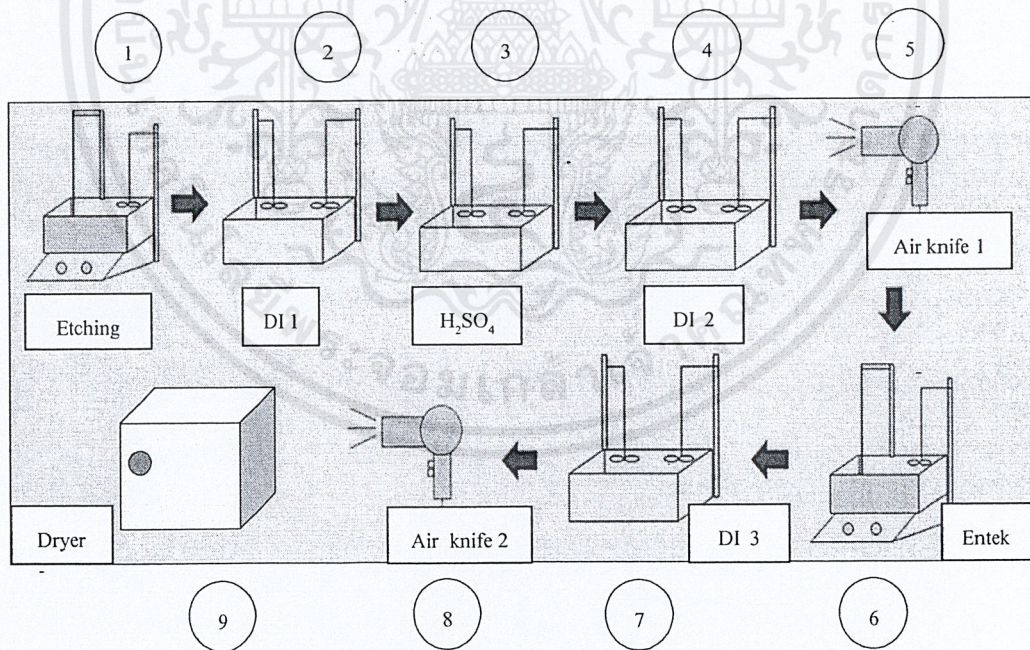
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

กระบวนการ Entek มี 9 ขั้นตอนย่อย แต่จากการระดมสมองคาดว่า มี 6 ขั้นตอนย่อยที่จะมีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC ได้แก่

- 1) การ Etching
- 2) การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1
- 3) การล้าง FPC ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
- 4) การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2
- 5) การเป่าแห้ง FPC ด้วย Air knife ครั้งที่ 1
- 6) การเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek

แต่เนื่องจากบริษัททำการผลิตตลอดเวลา ดังนั้นจึงออกแบบการทดลองในระดับปฏิบัติการ ดังรูปที่ 4.1 - 4.3 และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ขั้นตอนย่อยที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การออกแบบการทดลองระดับปฏิบัติการ

หมายเหตุ ลำดับที่ 1 - 9 หมายถึงขั้นตอนย่อย ของกระบวนการ Entek 9 ขั้นตอน ได้แก่

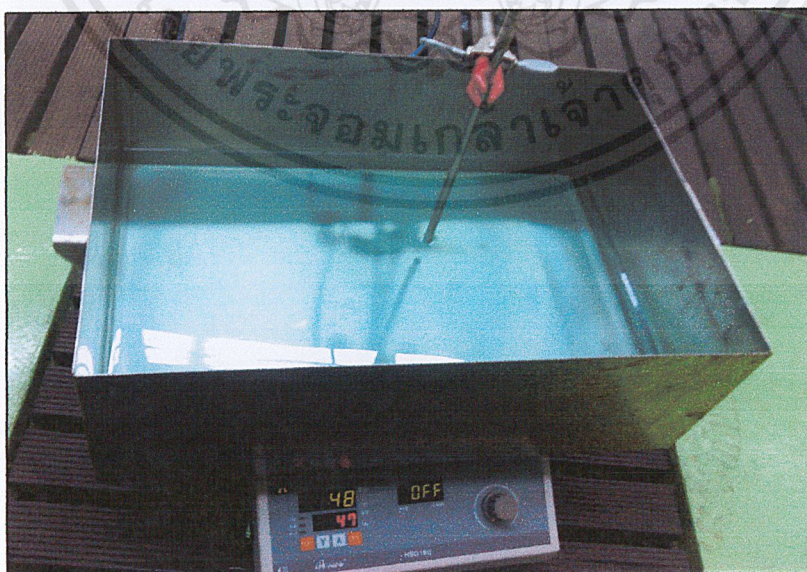
- 1) การ Etching
- 2) การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) การล้าง FPC ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
- 4) การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2
- 5) การเป่าแห้ง FPC ด้วย Air knife ครั้งที่ 1
- 6) การเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek
- 7) การล้าง FPC ด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2
- 8) การเป่าแห้ง FPC ด้วย Air knife ครั้งที่ 2
- 9) การอบแห้ง FPC



รูปที่ 4.2 การทดสอบระดับปฏิบัติการ



รูปที่ 4.3 การควบคุมอุณหภูมิสารละลาย Entek ของการทดสอบระดับปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ชั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek

การทดลองที่	ชั้นตอนย่อย						ความหนา (μm)
	การ Etching	การล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1	การล้างด้วยกรดซัลฟิวริก	การล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2	การเป่าแห้งด้วย Air knife ครั้งที่ 1	การเคลือบด้วยสารละลาย Entek	
1	-	-	-	-	-	-	0.01
2	-	-	-	-	-	+	0.39
3	-	-	-	-	+	-	0.01
4	-	-	-	-	+	+	0.37
5	-	-	-	+	-	-	0.01
6	-	-	-	+	-	+	0.38
7	-	-	-	+	+	-	0.01
8	-	-	-	+	+	+	0.39
9	-	-	+	-	-	-	0.01
10	-	-	+	-	-	+	0.38
11	-	-	+	-	+	-	0.01
12	-	-	+	-	+	+	0.37
13	-	-	+	+	-	-	0.01
14	-	-	+	+	-	+	0.37
15	-	-	+	+	+	-	0.01
16	-	-	+	+	+	+	0.38
17	-	+	-	-	-	-	0.01
18	-	+	-	-	-	+	0.38
19	-	+	-	-	+	-	0.01
20	-	+	-	-	+	+	0.36
21	-	+	-	+	-	-	0.01
22	-	+	-	+	-	+	0.39
23	-	+	-	+	+	-	0.01
24	-	+	-	+	+	+	0.40
25	-	+	+	-	-	-	0.0126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ขั้นต้นน้อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek (ต่อ)

การทดลองที่	ขั้นต้นน้อย						ความหนา (μm)
	การ Etching	การล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1	การล้างด้วยกรดซัลฟิวริก	การล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2	การเป่าแห้งด้วย Air knife ครั้งที่ 1	การเคลือบด้วยสารละลาย Entek	
26	-	+	+	-	-	+	0.4015
27	-	+	+	-	+	-	0.0118
28	-	+	+	-	+	+	0.3644
29	-	+	+	+	-	-	0.0118
30	-	+	+	+	-	+	0.3943
31	-	+	+	+	+	-	0.0135
32	-	+	+	+	+	+	0.3723
33	+	-	-	-	-	-	0.0121
34	+	-	-	-	-	+	0.3793
35	+	-	-	-	+	-	0.0141
36	+	-	-	-	+	+	0.3777
37	+	-	-	+	-	-	0.0118
38	+	-	-	+	-	+	0.4068
39	+	-	-	+	+	-	0.0119
40	+	-	-	+	+	+	0.4343
41	+	-	+	-	-	-	0.0112
42	+	-	+	-	-	+	0.3733
43	+	-	+	-	+	-	0.0131
44	+	-	+	-	+	+	0.4178
45	+	-	+	+	-	-	0.0117
46	+	-	+	+	-	+	0.4195
47	+	-	+	+	+	-	0.0118
48	+	-	+	+	+	+	0.4218
49	+	+	-	-	-	-	0.0129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ขั้นต้นก่อนย่อในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek (ต่อ)

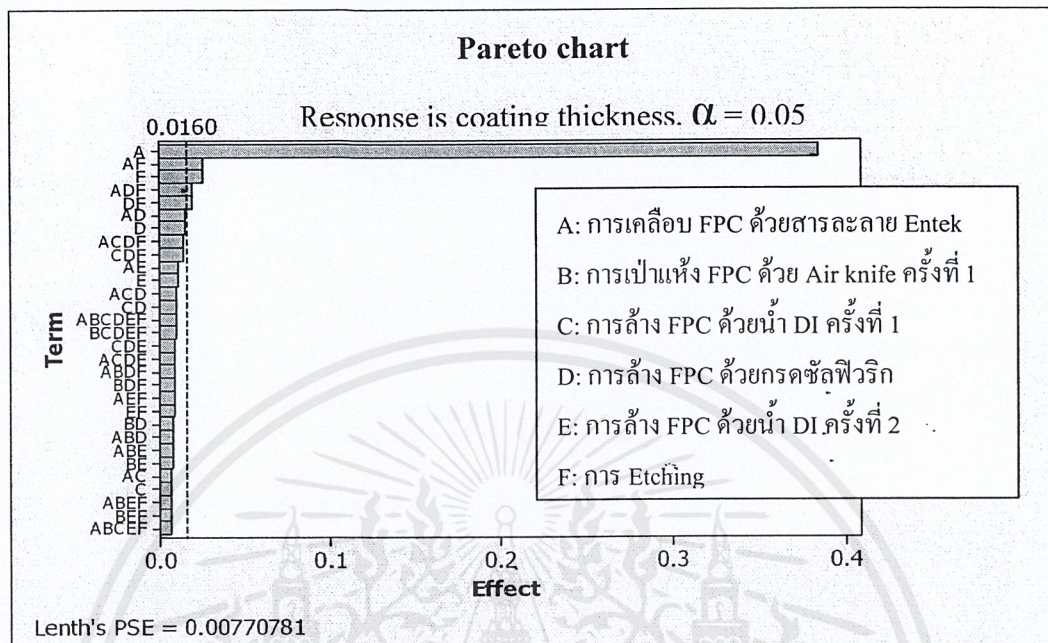
การทดลองที่	ขั้นต้นก่อนย่อ						ความหนา (μm)
	การ Etching	การล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1	การล้างด้วยกรดซัลฟิวริก	การล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2	การเป่าแห้งด้วย Air knife - ครั้งที่ 1	การเคลือบด้วยสารละลาย Entek	
50	+	+	-	-	-	+	0.3979
51	+	+	-	-	+	-	0.0116
52	+	+	-	-	+	+	0.4168
53	+	+	-	+	-	-	0.0158
54	+	+	-	+	-	+	0.4232
55	+	+	-	+	+	-	0.0142
56	+	+	-	+	+	+	0.4211
57	+	+	+	-	-	-	0.0115
58	+	+	+	-	-	+	0.3811
59	+	+	+	-	+	-	0.0119
60	+	+	+	-	+	+	0.4058
61	+	+	+	+	-	-	0.0135
62	+	+	+	+	-	+	0.4195
63	+	+	+	+	+	-	0.0126
64	+	+	+	+	+	+	0.4210

หมายเหตุ เครื่องหมาย +, - หมายถึงการมีและไม่มีขั้นตอนในกระบวนการผลิตตามลำดับความหนาของการเคลือบแผ่นทองแดงวัดค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

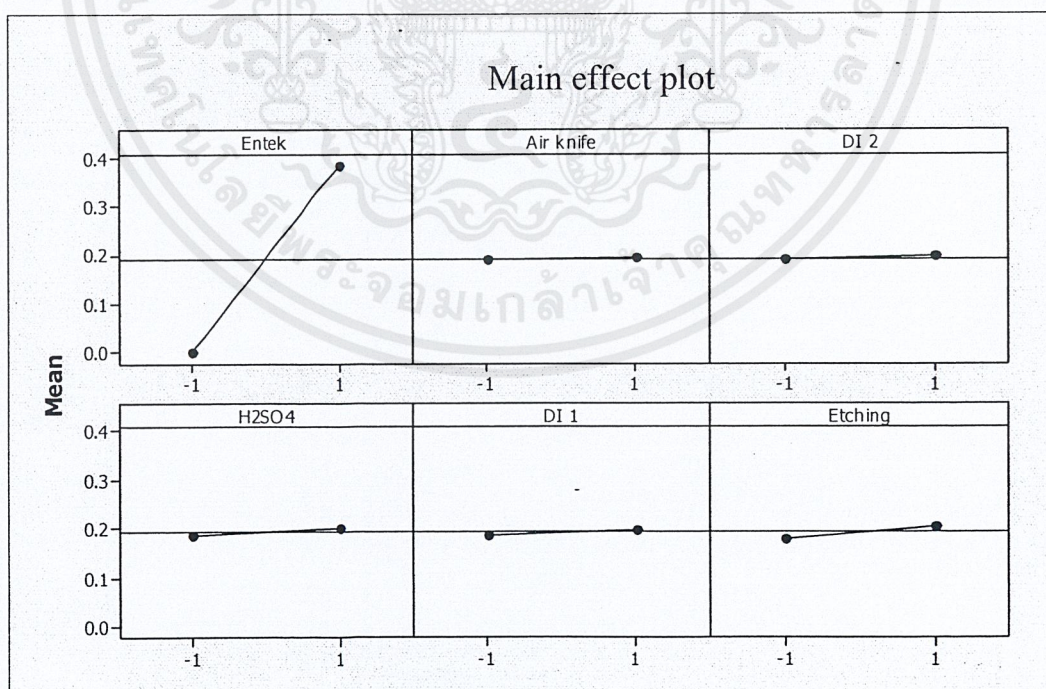
จากการวิเคราะห์ผลการทดลองในตารางที่ 4.1 ด้วยโปรแกรมมินิแทป ใช้ฟังก์ชันพารโต ดังรูปที่ 4.4 พบว่าที่อัลฟาเท่ากับ 0.05 (เส้นประ) เมื่อเทียบกับขั้นต้นก่อนย่ออื่น ขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek สูงกว่าเส้นแสดงค่าของอัลฟา 0.05 อย่างชัดเจน แสดงว่าขั้นตอนการเคลือบ FPC มีนัยสำคัญต่อความหนาของการเคลือบ FPC และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขั้นต้นก่อนย่อกับความหนาของการเคลือบ FPC ด้วย Main effect plot ในรูปที่ 4.5 สังเกตได้ว่าเส้นกราฟของขั้นตอนการเคลือบ FPC มีความชันในเชิงบวกกับความหนาของการเคลือบ FPC หมายความว่าความหนาของการเคลือบ FPC จะเพิ่มขึ้นตามตัวแปรที่มีนัยสำคัญที่อยู่ในขั้นตอนการเคลือบ FPC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนอีก 5 ขั้นตอนย่อยเส้นกราฟเกือบเป็นเส้นตรง จึงยืนยันได้ว่าขั้นตอนย่อยเหล่านี้ไม่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek



รูปที่ 4.4 ผังพาเรโตแสดงขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีนัยสำคัญต่อความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek



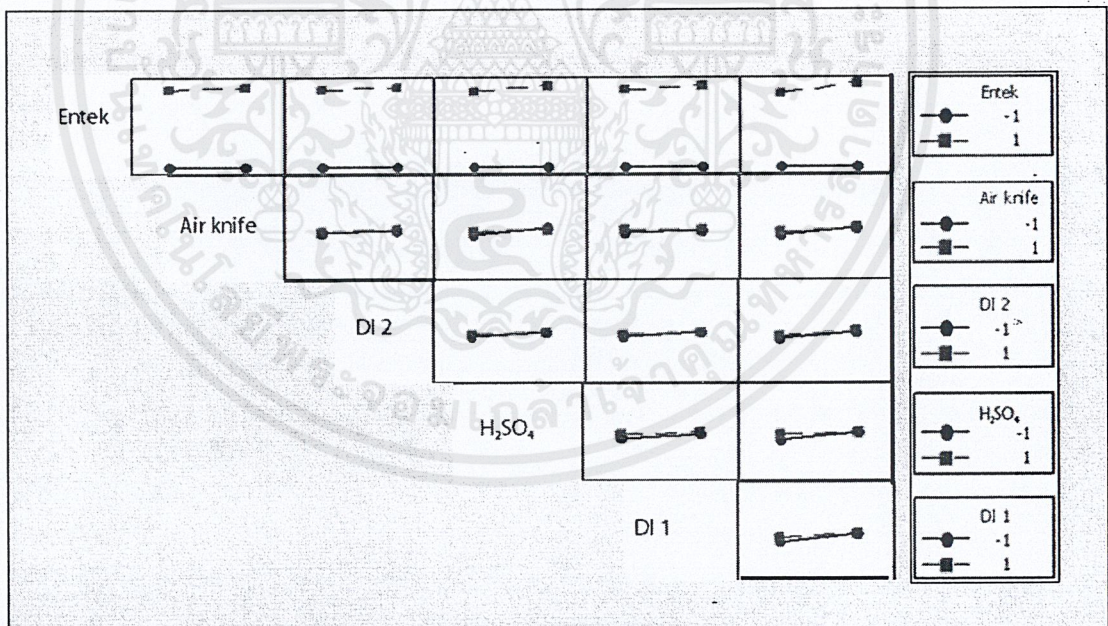
รูปที่ 4.5 Main effect plot ของขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ต่อความหนาของการเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ต่อความหนาของการเคลือบ FPC ด้วย Interaction plot ดังรูปที่ 4.6 พบว่ามีอันตรกิริยาระหว่างขั้นตอนย่อยจำนวน 10 อันตรกิริยา ได้แก่

- 1) การเป่าแห้งด้วย Air knife 1 กับการล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2
- 2) การเป่าแห้งด้วย Air knife 1 กับการล้างด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
- 3) การเป่าแห้งด้วย Air knife 1 กับการล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1
- 4) การเป่าแห้งด้วย Air knife 1 กับการ Etching
- 5) การล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2 กับการล้างด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
- 6) การล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2 กับการล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1
- 7) การล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 2 กับการ Etching
- 8) การล้างด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกกับการล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1
- 9) การล้างด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกกับการ Etching
- 10) การล้างด้วยน้ำ DI ครั้งที่ 1 กับการ Etching

พบว่าไม่มีอันตรกิริยาระหว่างขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek กับขั้นตอนย่อยอื่นๆ



รูปที่ 4.6 Interaction plot ระหว่างขั้นตอนย่อยต่างๆ ในกระบวนการ Entek

นอกจากความหนาของการเคลือบแล้วความสม่ำเสมอในการเคลือบยังเป็นคุณภาพที่สำคัญของชิ้นงาน เมื่อพิจารณาแผ่นทองแดงที่ไม่ผ่านขั้นตอนการปรับสภาพผิวกับที่ผ่านขั้นตอนการปรับสภาพผิวก่อนส่งเข้าขั้นตอนการเคลือบด้วยสารละลาย Entek ดังรูปที่ 4.7 พบว่าหลังการเคลือบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยสารละลาย Entek คุณภาพของแผ่นทองแดงที่ไม่ผ่านขั้นตอนการปรับสภาพผิวไม่ผ่านมาตรฐานของบริษัท แม้ความหนาของการเคลือบจะอยู่ในมาตรฐานของบริษัท เพราะมีพื้นผิวการเคลือบไม่สม่ำเสมอ พื้นผิวการเคลือบที่ไม่สม่ำเสมอเกิดจากออกไซด์บนผิวทองแดง ทำให้ไม่สามารถเคลือบสารละลาย Entek ได้สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นทองแดง ดังนั้นขั้นตอนการ Etching เพื่อกำจัดออกไซด์จึงเป็นขั้นตอนย่อยที่มีความสำคัญเพื่อให้สามารถเคลือบผิวได้สม่ำเสมอ

สำหรับขั้นตอนการล้าง FPC ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก แม้ไม่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC แต่ทำให้ได้พื้นผิวหลังการกัดในขั้นตอนการ Etching สะเอียดขึ้น (ดังรูปที่ 4.8) ซึ่งช่วยให้โลหะบัดกรียึดติดกับพื้นผิว FPC ได้ดี จากรูปที่ 4.8 เมื่อวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นทองแดงด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) พบว่าแผ่นทองแดงที่ผ่านขั้นตอนการ Etching และการล้างด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกมีพื้นผิวละเอียดมากกว่าแผ่นทองแดงที่ผ่านขั้นตอนการ Etching เท่านั้น



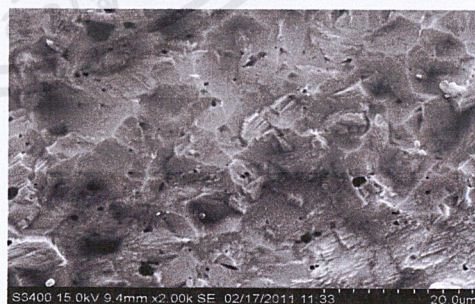
(ก) ผ่านขั้นตอนการปรับสภาพผิวก่อนเข้า
ขั้นตอนการเคลือบด้วยสารละลาย Entek

(ข) ไม่ผ่านขั้นตอนการปรับสภาพผิว

รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นทองแดงหลังการเคลือบด้วยสารละลาย Entek



(ก) ผ่านทุกขั้นตอนย่อยใน
กระบวนการ Entek



(ข) ผ่านทุกขั้นตอนย่อยในกระบวนการ
Entek ยกเว้นการล้างด้วยกรดซัลฟิวริก

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นทองแดงด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ตัวแปรของขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

ตารางที่ 3.1 ในบทที่ 3 แสดงตัวแปรปฏิบัติการของขั้นตอนการเคลือบ FPC 6 ตัวแปร แต่ในการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC นั้น ได้เลือก 4 ตัวแปร ที่สามารถปรับค่าได้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ ความเข้มข้น เวลาที่ใช้ในการเคลือบ ความเป็นกรด และอุณหภูมิ กำหนดตัวแปรในการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2^k แต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ คือ ระดับสูง (+) และระดับต่ำ (-) ดังตารางที่ 4.2 ทดลองในระดับปฏิบัติการซ้ำ 2 ครั้ง การกำหนดค่าของตัวแปรที่จะทดสอบมีแนวทางจากค่าที่บริษัทใช้ในสายการผลิต คู่มือการใช้สารละลาย Entek จากตัวแทนจำหน่าย และการระดมสมองร่วมกับทีมงานของบริษัท

ตารางที่ 4.2 ตัวแปรของขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ทดลอง		ค่าของบริษัท	หน่วย
	ค่าต่ำ	ค่าสูง		
ความเข้มข้นของสารละลาย Entek เทียบกับสารละลายมาตรฐาน	90	140	115 ± 10	%
ความเป็นกรดของสารละลาย Entek เทียบกับสารละลายมาตรฐาน	110	140	115 ± 10	%
อุณหภูมิของสารละลาย Entek	40	47	43 ± 3	°C
เวลาในการเคลือบ	30	60	30	sec

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลาย Entek 90 และ 140 % โดยปริมาตร หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลาย Entek 9 และ 14 % โดยปริมาตรของสารละลาย Entek Replenisher ซึ่งเป็นสารละลายเริ่มต้นในการเตรียมสารละลาย Entek

ผลการทดลองการวิเคราะห์ตัวแปรในขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC แสดงดังตารางที่ 4.3

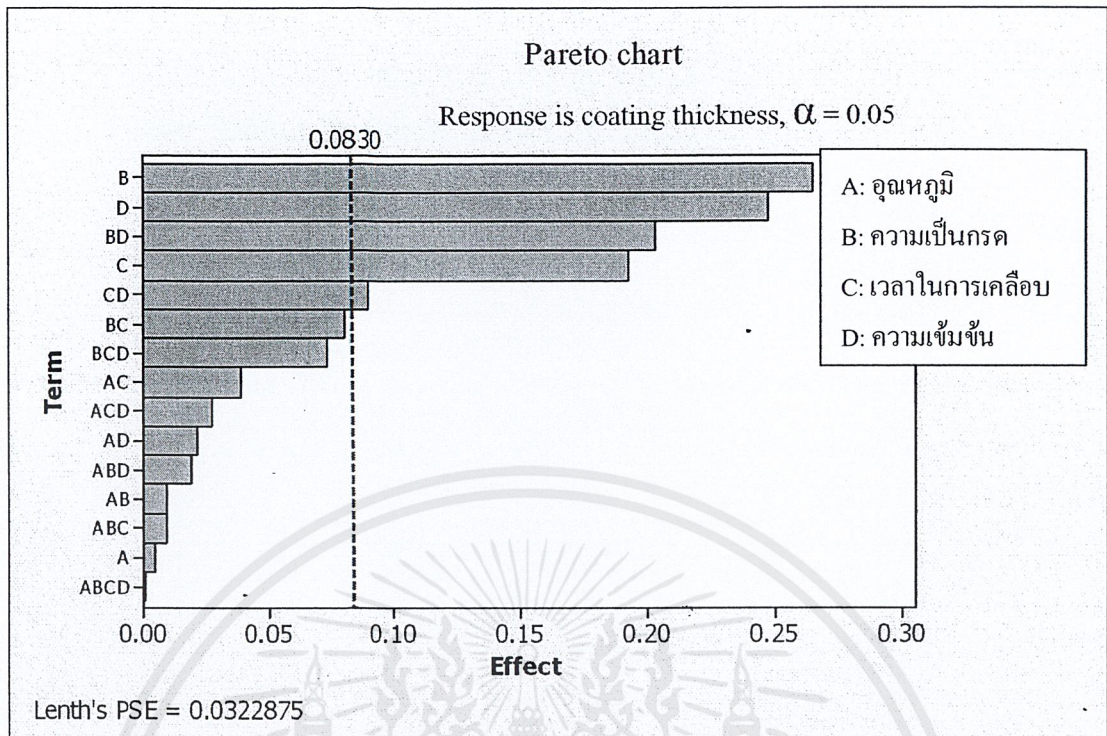
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ตัวแปรในขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

การทดลองที่	ตัวแปร				ความหนา (μm)
	ความเข้มข้น (%)	เวลาในการ เคลือบ (sec)	ความเป็นกรด (%)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	
1	90	30	110	40	0.2282
2	90	30	110	47	0.2311
3	90	30	140	40	0.2820
4	90	30	140	47	0.3636
5	90	60	110	40	0.2636
6	90	60	110	47	0.5645
7	90	60	140	40	0.3009
8	90	60	140	47	1.0198
9	140	30	110	40	0.2473
10	140	30	110	47	0.2990
11	140	30	140	40	0.3219
12	140	30	140	47	0.3163
13	140	60	110	40	0.3185
14	140	60	110	47	0.5948
15	140	60	140	40	0.3614
16	140	60	140	47	0.8680

หมายเหตุ ความหนาของการเคลือบแผ่นทองแดงวัดค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

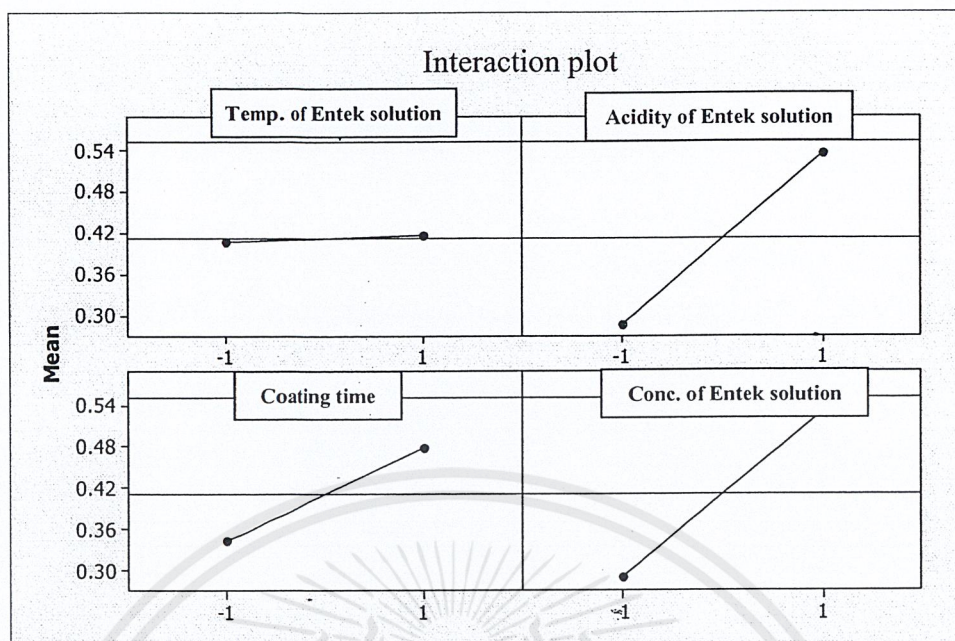
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป ใช้ฟังก์ชันโด ดังรูปที่ 4.9 เมื่อพิจารณาที่อัลฟาเท่ากับ 0.05 (เส้นประ) ขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC คือ

- 1) ความเป็นกรดของสารละลาย Entek
- 2) ความเข้มข้นของสารละลาย Entek
- 3) อันตรกิริยาระหว่างความเข้มข้นและค่าความเป็นกรดของสารละลาย Entek
- 4) เวลาในการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek



รูปที่ 4.9 พังพาร โตแสดงตัวแปรของขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek ที่มีผลต่อการเคลือบ FPC

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek กับความหนาของการเคลือบ FPC ด้วย Main effect plot ในรูปที่ 4.10 สังเกตได้ว่าความชันของเส้นกราฟของความเป็นกรด ความเข้มข้นของสารละลาย Entek และเวลาในการเคลือบมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับค่าความหนาของการเคลือบ FPC หมายความว่า ความหนาของการเคลือบ FPC จะสูงขึ้นเมื่อระดับความเป็นกรด ความเข้มข้นของสารละลาย Entek และเวลาในการเคลือบสูงขึ้น ส่วนความชันของเส้นกราฟของอุณหภูมิของสารละลาย Entek เกือบเป็นศูนย์ นั่นคือ อุณหภูมิของสารละลาย Entek ไม่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

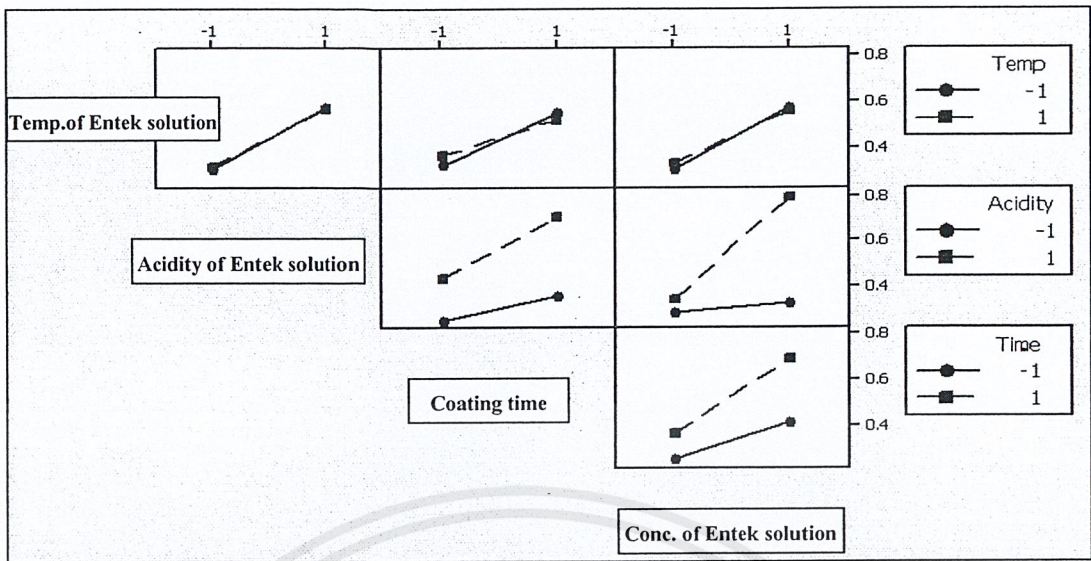


รูปที่ 4.10 Main effect plot ของตัวแปรของขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek

การวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรโดยใช้ Interaction plot แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่ามีอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร ดังนี้

- 1) อุณหภูมิของสารละลาย Entek กับความเข้มข้นของสารละลาย Entek
- 2) อุณหภูมิของสารละลาย Entek กับเวลาในการเคลือบ

จากผังพาเรโตพบว่าร้อยละของผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างความเป็นกรดกับความเข้มข้นของสารละลาย Entek สูงเกินอัลฟาเท่ากับ 0.05 แต่จาก Interaction plot ไม่พบอันตรกิริยาระหว่างทั้งสองตัวแปรนี้ แสดงว่าอันตรกิริยาระหว่างความเป็นกรดกับความเข้มข้นของสารละลาย Entek ไม่มีผลต่อการความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek



รูปที่ 4.11 Main effect plot ของตัวแปรของขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek

4.3 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

จากการวิเคราะห์ด้วยผังพาเรโตในโปรแกรมมินิแทป ตัวแปรที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek คือ ความเป็นกรด ความเข้มข้นของสารละลาย Entek และเวลาในการเคลือบ จึงออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางจากตัวแปรเหล่านี้ เพื่อสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับความเป็นกรด ความเข้มข้นของสารละลาย Entek และเวลาในการเคลือบ สำหรับพนักงานใช้เป็นแนวทางควบคุมค่าของตัวแปรเหล่านี้ให้ได้ความหนาของการเคลือบ FPC ตามที่ต้องการ ตารางที่ 4.4 แสดงตัวแปรที่ใช้ออกแบบการทดลองที่จะได้ความหนาของการเคลือบอยู่ในมาตรฐานของบริษัท คือ 0.32 - 0.44 ไมครอน ตารางที่ 4.4 ค่าของตัวแปรที่ใช้ออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

ตัวแปร	ค่าต่ำ	ค่าสูง	ค่าของบริษัท	หน่วย
ความเข้มข้นของสารละลาย Entek เทียบกับสารละลายมาตรฐาน	90	140	115 ± 5	%
ความเป็นกรดของสารละลาย Entek เทียบกับสารละลายมาตรฐาน	110	140	115 ± 5	%
เวลาที่ใช้ในการเคลือบ	30	60	30	sec

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลาย Entek 90 และ 140 % โดยปริมาตร หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลาย Entek เป็น 9 และ 14 % โดยปริมาตรของสารละลาย Entek replenisher ซึ่งเป็นสารละลายเริ่มต้นในการเตรียมสารละลาย Entek

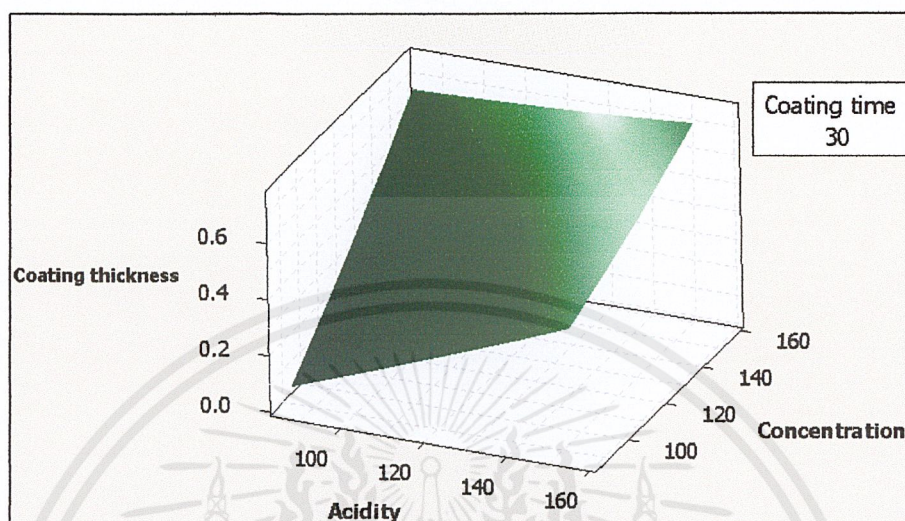
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองในสายการผลิตโดยปรับค่าความเป็นกรด ความเข้มข้นของสารละลาย Entek และกำหนดเวลาในการเคลือบตามค่าในตารางที่ 4.4 ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง และบันทึกค่าเฉลี่ยของความหนาของการเคลือบแผ่นทองแดง

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองของการทดลองแบบส่วนประสมกลางระหว่างตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ

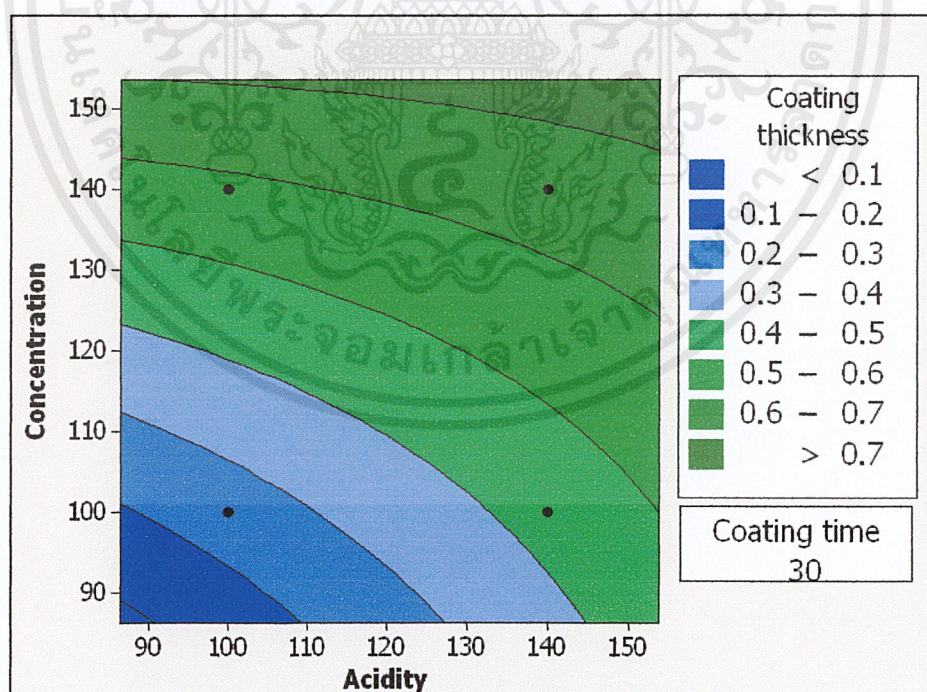
การทดลอง ที่	ตัวแปร			ความหนา (μm)
	ความเป็นกรด (%)	ความเข้มข้น (%)	เวลาในการเคลือบ (sec)	
1	100	100	30	0.28
2	140	100	30	0.42
3	100	140	30	0.56
4	140	140	30	0.66
5	100	100	60	0.40
6	140	100	60	0.57
7	100	140	60	0.78
8	140	140	60	0.75
9	80	120	45	0.46
10	150	120	45	0.66
11	120	80	45	0.33
12	120	150	45	0.82
13	120	120	19	0.38
14	120	120	70	0.68
15	120	120	45	0.56
16	120	120	19	0.56
17	120	120	17	0.5851
18	120	120	18	0.5071
19	120	120	19	0.5637
20	120	120	20	0.5401

หมายเหตุ ความหนาของการเคลือบแผ่นทองแดงวัดค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด และความเข้มข้นของสารละลาย Entek ที่พล็อตกับ ความหนาของการเคลือบ FPC ที่เวลาในการเคลือบ 30 และ 60 วินาที จากการออกแบบพื้นผิว ผลตอบ แสดงดังรูปที่ 4.12-4.17

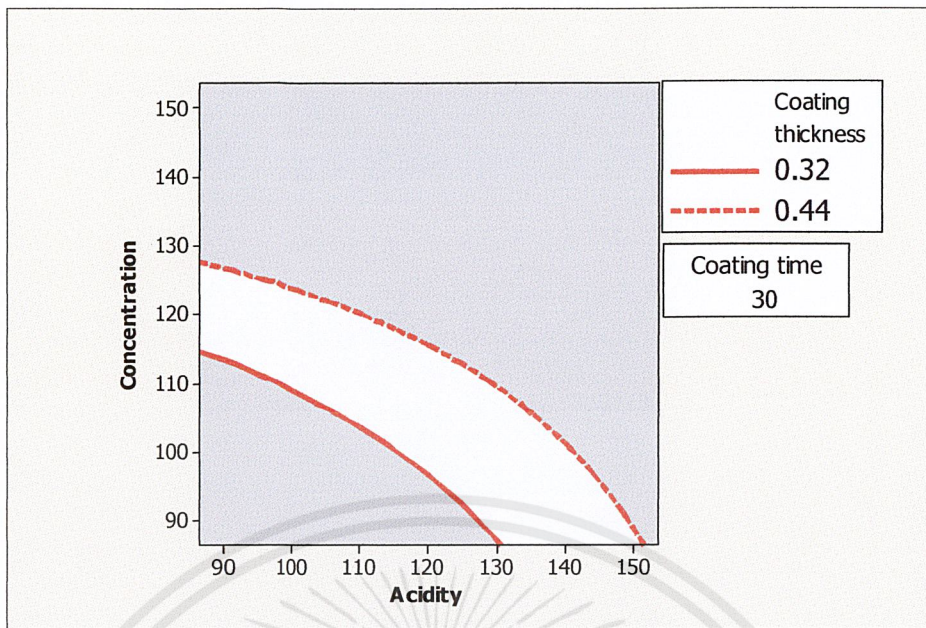


รูปที่ 4.12 Surface plot ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek ที่เวลาในการเคลือบ 30 วินาที

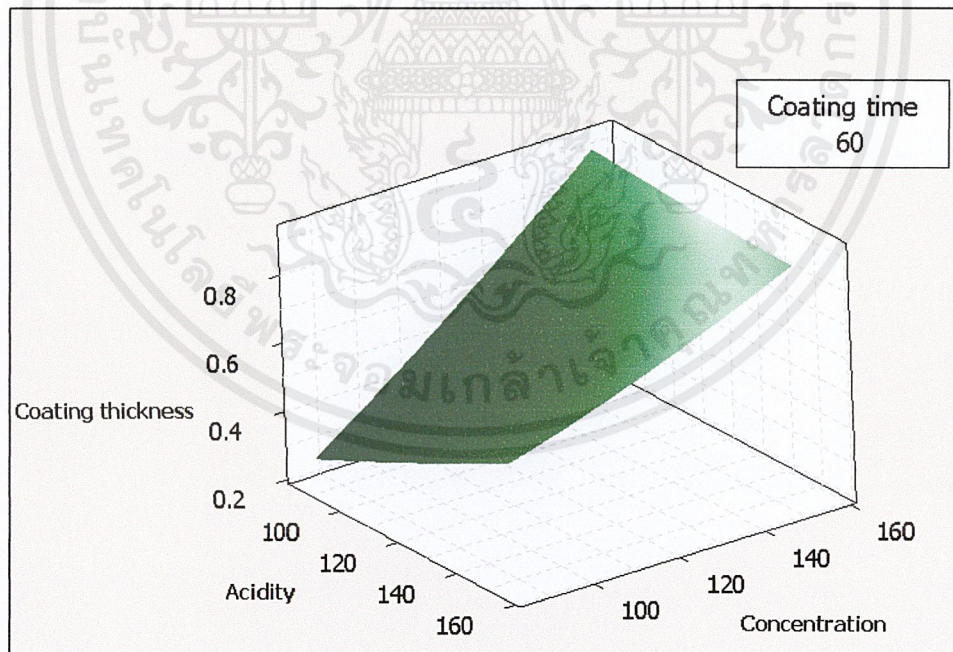


รูปที่ 4.13 Contour plot แสดงความหนาของการเคลือบ FPC ที่ค่าความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek ต่างๆ และเวลาในการเคลือบ 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

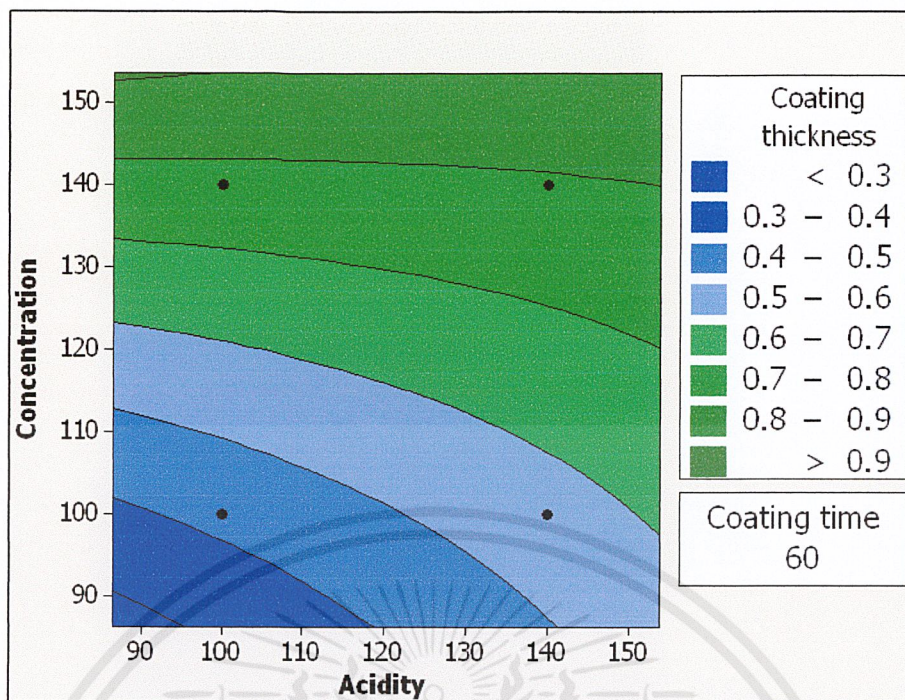


รูปที่ 4.14 Overlaid contour plot แสดงความหนาของการเคลือบ FPC ที่อยู่ในมาตรฐานของบริษัท ที่ค่าความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek ต่างๆ และเวลาในการเคลือบ 30 วินาที

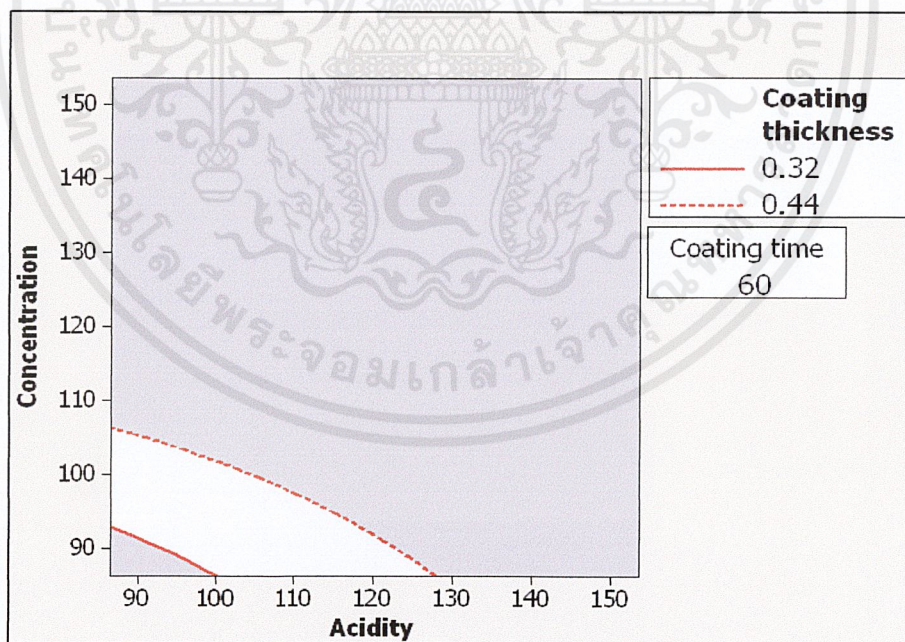


รูปที่ 4.15 Surface plot ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับค่าความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek ที่เวลาในการเคลือบ 60 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 Contour plot แสดงความหนาของการเคลือบ FPC ที่ค่าความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek ต่างๆ และเวลาในการเคลือบ 60 วินาที



รูปที่ 4.17 Overlaid contour plot แสดงความหนาของการเคลือบ FPC ที่อยู่ในมาตรฐานของบริษัทที่ค่าความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek ต่างๆ และเวลาในการเคลือบ 60 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 และ 4.17 ค่าตัวแปรที่ได้ความหนาของการเคลือบ FPC 0.38 -0.44 ไมครอน คือ

1) ความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek เท่ากับ 131 - 151 % และ 115 - 127 % ตามลำดับ เวลาในการเคลือบ 30 วินาที (รูปที่ 4.14)

2) ความเป็นกรดและความเข้มข้นของสารละลาย Entek เท่ากับ 92 - 107 % และ 100 - 127 % ตามลำดับ เวลาในการเคลือบ 60 วินาที (รูปที่ 4.17)

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารละลาย Entek 115 - 127 % และ 100 - 127 % โดยปริมาตร

หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลาย Entek 11.5-12.7 และ 10.0-12.7 % โดยปริมาตร ของสารละลาย Entek Replenisher ซึ่งเป็นสารละลายเริ่มต้นในการเตรียมสารละลาย Entek

จากรูปที่ 4.18 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับความเป็นกรด ความเข้มข้นของสารละลาย Entek และเวลาในการเคลือบ คือ

$$Y = -1.79379 + 4.50215 \times 10^{-6} \text{Acidity}^2 + 1.63609 \times 10^{-5} \text{Conc.}^2 - 3.92414 \times 10^{-5} \text{Time}^2 - 7.22917 \times 10^{-5} \text{Acidity} * \text{Conc.} - 4.01944 \times 10^{-5} \text{Acidity} * \text{Time} + 1.24722 \times 10^{-5} \text{Conc.} * \text{Time} + 0.0119529 \text{Acidity} + 0.0111787 \text{Conc.} + 0.0121246 \text{Time}$$

เมื่อ Y = ความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek (ไมครอน)

Acidity = ความเป็นกรดของสารละลาย Entek (% โดยปริมาตร)

Conc. = ความเข้มข้นของสารละลาย Entek (% โดยปริมาตร)

Time = เวลาในการเคลือบ (วินาที)

Estimated Regression Coefficients for Coating thickness using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-1.79379
acidity	0.0119529
conc.	0.0111787
time	0.0121246
acidity*acidity	4.50215E-06
conc.*conc.	1.63609E-05
time*time	-3.92414E-05
acidity*conc.	-7.22917E-05
acidity*time	-4.01944E-05
conc.*time	1.24722E-05

S = 0.0313518 PRESS = 0.0525050
R-Sq = 97.59%

รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบเพื่อสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

ทดสอบสมการที่ได้โดยแทนค่าข้อมูลที่วัดรายวัน (Daily check sheets) ตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ. 2553 - มีนาคม พ.ศ.2554 จากสายการผลิต ได้แก่ ความเป็นกรด ความเข้มข้นของสารละลาย Entek และเวลาของสายการผลิต 30 วินาที ลงในสมการ แล้วเปรียบเทียบความหนาของการเคลือบ FPC ที่คำนวณจากสมการกับความหนาของการเคลือบผลิตภัณฑ์ FPC จากสายการผลิตพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 8.45 %

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ และวิเคราะห์ผลการทดลองตามหลักการสถิติด้วยโปรแกรมมินิแทป นำตัวแปรนั้นทดลองในสายการผลิต แล้วสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับตัวแปรนั้นจากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง และทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการด้วยตัวแปรนั้นที่วัดรายวันในสายการผลิต (เปรียบเทียบความหนาที่คำนวณจากสมการกับความหนาของการเคลือบผลิตภัณฑ์ในสายการผลิต)

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek และตัวแปรปฏิบัติการที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

จาก 9 ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ขั้นตอนที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC คือ ขั้นตอนการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek

ตัวแปรของขั้นตอนการเคลือบ FPC ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC ได้แก่ ความเป็นกรด ความเข้มข้นของสารละลาย Entek และเวลาในการเคลือบ

5.1.2 สมการคำนวณความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับความเป็นกรด ความเข้มข้นของสารละลาย Entek และเวลาในการเคลือบ คือ

$$Y = -1.79379 + 4.50215 \times 10^{-6} \text{ Acidity}^2 + 1.63609 \times 10^{-5} \text{ Conc.}^2 - 3.92414 \times 10^{-5} \text{ Time}^2 \\ - 7.22917 \times 10^{-5} \text{ Acidity} * \text{Conc.} - 4.01944 \times 10^{-5} \text{ Acidity} * \text{Time} \\ + 1.24722 \times 10^{-5} \text{ Conc.} * \text{Time} + 0.0119529 \text{ Acidity} + 0.0111787 \text{ Conc.} + 0.0121246 \text{ Time}$$

เมื่อ	Y	= ความหนาของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek (ไมครอน)
	Acidity	= ความเป็นกรดของสารละลาย Entek (% โดยปริมาตร)
	Conc.	= ความเข้มข้นของสารละลาย Entek (% โดยปริมาตร)
	Time	= เวลาในการเคลือบ (วินาที)

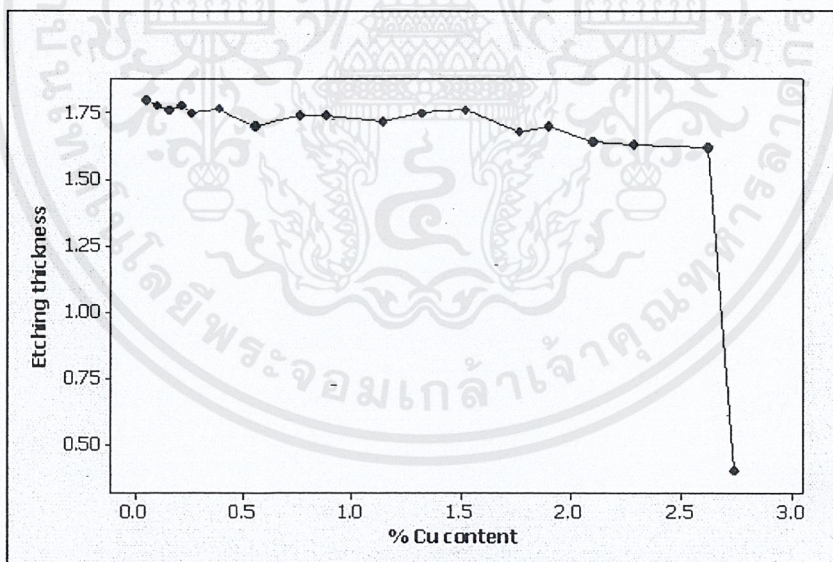
(ความหนาของการเคลือบ FPC ตามมาตรฐานของบริษัทเท่ากับ 0.38 -0.44 ไมครอน)

ผลการทดสอบการใช้สมการเปรียบเทียบกับความหนาของการเคลือบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสายการผลิต พบว่าสมการมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 8.45 % (ภาคผนวก ญ ตารางที่ ญ.3)

5.2 ข้อสังเกต

เนื่องจากก่อนส่ง FPC เข้าขั้นตอนการเคลือบด้วยสารละลาย Entek ต้องผ่านขั้นตอน Etching เพื่อกัดผิว FPC ด้วยสารละลาย CPE ความขรุขระของผิวมีผลต่อความสม่ำเสมอของการเคลือบผิว FPC ดังนั้นการ Etching จะทำให้ปริมาณไอออนทองแดงในสารละลาย CPE เพิ่มขึ้นจนสารละลาย CPE อิ่มตัวด้วยไอออนทองแดงจนความสามารถในการกัดผิวของสารละลาย CPE ลดลงมาก การปฏิบัติที่ทำอยู่ในปัจจุบันพนักงานจะวัดความเข้มข้นของสารละลาย CPE และเติมเพิ่ม (Make up) ด้วยประสบการณ์

ทีมงานได้ทดลองปรับปริมาณของไอออนทองแดงในสารละลาย CPE และวัดความลึกของการกัดผิวของแผ่นทองแดง พบว่าสารละลาย CPE อิ่มตัวที่ปริมาณไอออนทองแดงประมาณ 2.65 % wt ดังรูปที่ 5.1 พนักงานควรปรับสารละลาย CPE เพื่อลดปริมาณไอออนทองแดง เมื่อตรวจพบปริมาณไอออนทองแดงในสารละลาย CPE มากกว่าหรือเท่ากับ 2.65 wt %



รูปที่ 5.1 ผลของปริมาณ ไอออนทองแดงที่มีต่อความลึกของการกัดผิวทองแดง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Clyde F. Coombs, Jr, **Printed Circuits Handbook**, 6th ed., McGraw –Hill, 2008.
- [2] “การประยุกต์ใช้งานแผงวงจรพิมพ์ไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นได้” [Online].
http://farm4.static.flickr.com/3033/3089837275_26f0038edf.jpg.(12/9/ 2010)
- [3] Joseph Fjelstad, **Flexible Circuit Technology**, 3rd ed., BR Publishing, 2007.
- [4] กระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดยืดหยุ่นได้, [Online]. [http:// www.mektec.co.th](http://www.mektec.co.th).
(5/4/2010)
- [5] AT engineer. **FPC Rapid Prototype Process Project**. Mektec Manufacturing Corporation
(Thailand) Ltd.
- [6] **ENTEK PLUS OPERATING GUIDE**, [Online]. <http://www.cooksonelectronics.com>.
(18/9/ 2010)
- [7] N. Habbache, N. Alane, S. Djerad and L. Tifouti, **Leaching of copper oxide with different acid solutions**, Chemical Engineering Journal, vol. 132, issue 2-3, pp 73-84 , 2008
- [8] **Surface finish options**. [Online] http://easypcb.xonelectronics.com/surface_finish_options.html (18/9/2010)
- [9] John H. Lau, **Electronic Manufacturing with Lead-free, Halogen-free and Conductive-adhesive material**, McGraw-Hill Companies, 2003.
- [10] Rod Kellner, **Alternative surface finishes – options and environmental considerations**, Circuit World, vol. 30, issue 32, pp 30-33, (2003).
- [11] Paul T. Vianco, **An overview of surface finishes and their role in printed circuit board solderability and solder joint performance**, Circuit World, vol. 30, issue 32, pp. 6 –24, 1999.
- [12] G. Xue, J. Ping, P. Wu and G. Ji, J. , **Investigation of the kinetics of assisted potassium ion transfer by dibenzo-18-crown-6 at the micro-ITIES by means of steady-state voltammetry** , Electroanal Chem, vol. 380, issue 1-2, pp.167-175, 1995.
- [13] ฉลอง สี่แก้วสีว, **สถิติเชิงประยุกต์**, <http://www.statistics.ob.tc/index.htm> .(15/01/ 2011)
- [14] ปารเมศ ชุติมา, **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [15] รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ รศ.ดร.พงษ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง**, บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2551.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] B.Oraon, G.Majumdar and B.Ghosh, **Parametric optimization and prediction of electroless Ni-B deposition**, Material and Design, vol. 27, issue 10, pp. 1035 –1045, 2006.
- [17] B.Oraon, G.Majumdar and B.Ghosh, **Application of response surface method for predicting electroless nickel plating**, Material and Design, vol. 28, issue 7, pp. 2138 – 2147, 2007.
- [18] บริษัท เทคคอน จำกัด, **คู่มือการใช้โปรแกรมมินิแทป**, 2549.
- [19] Issa Bass, **Six Sigma Statistics with Excel and Minitab**, United States of America, The McGraw-Hill Companies, 2007.
- [20] อาทิตย์ เลิศภูมิศิต, **แนวคิดและการระบุปัญหา**, 2545.
- [21] ปรีดารดา ธรรมเสวต, **การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟฟีแบบพิมพ์พื้นผิวบนเทปกาวพอลิโพรพิลีนด้วยโปรแกรมมินิแทป**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, หน้า 36-44, 2548
- [22] Lewis G. **The corrosion inhibition of copper by benzimidazole**, Corrosion Science, vol. 22, no. 6, pp. 579-584, 1982.
- [23] I. Artaki, U. Ray, H.M. Gordon and R.L. Opila, **Corrosion Protection of Copper Using Organic Solderability Preservatives**, Circuit World, vol. 19, no.3, pp.40-45, 1993.
- [24] Witold Paw, Jun Nable and John Swanson, **Behind the Scenes of Effective OSP Protection in Pb-free Processing**, MacDermid Electronic Solution, vol. 11, issue 16, pp.72-78, 1995.
- [25] Bayley R.W. and Biggs C.A., **Remediation of contaminated media using a jet pump Part 1:Screening for significant parameters**, Chemical Engineering Journal, vol. 118, issue 24, pp. 221-231, 2006.
- [26] ปองพล เปรียญญารัตน์ และสันติชัย ชิวสุทริศศิลป์, **การวิเคราะห์และการควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของการดึงลวดระหว่างแผงวงจรแบบอ่อนและแผ่นเสริมกำลัง**, วารสารวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 45-53, 2551.
- [27] วสันต์ พุกผาสุก และอรรถกร เก่งพล, **การลดของเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม โดยประยุกต์ใช้วิธีการซิกซ์ ซิกม่า: กรณีศึกษาบริษัทในอุตสาหกรรมชุบโครเมียม**, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 พ.ค. - ส.ค., หน้า 33-42, 2551



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

สารเคมีและอุปกรณ์สำหรับการทดลองระดับปฏิบัติการ

1. สารเคมี

- 1) สารละลาย Entek replenisher
- 2) สารละลาย Entek additive
- 3) สารละลาย CPE
- 4) สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 37 % โดยปริมาตร
- 5) สารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 96 % โดยปริมาตร
- 6) สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร
- 7) สารละลาย EDTA ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร
- 8) สารละลายโซเดียมแอซีเตต ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร
- 9) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 5 % โดยปริมาตร
- 10) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร
- 11) สารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร
- 12) ฟีนอล์ฟทาลินอินดิเคเตอร์
- 13) D - 321 อินดิเคเตอร์ (Xylenol orange)
- 14) น้ำ DI

2. อุปกรณ์การทดลองระดับปฏิบัติการ

ตารางที่ ก.1 อุปกรณ์การทดลอง

ลำดับ	รายการ	ขนาด	จำนวน (ชิ้น)
1	ถังอะคริลิก	กว้าง x ยาว x สูง 25 x 35 x 12 เซนติเมตร	4
2	ถังสเตนเลส	กว้าง x ยาว x สูง 25 x 35 x 12 เซนติเมตร	2
3	ฝาอะคริลิก	กว้าง x ยาว 25 x 15 เซนติเมตร	6
4	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ	80 รอบต่อนาที 110 รอบต่อนาที	1 5
5	ใบพัดอะคริลิก		6
6	เครื่องควบคุมอุณหภูมิ		2
7	เครื่องวัด pH		1
8	Blower	1,000 วัตต์	1
9	ตู้อบ		1
10	เครื่อง UV spectrophotometer		1
11	pH มิเตอร์		1
12	เครื่องวัดความเป็นกรด		1
13	เทอร์โมมิเตอร์		1
14	เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง		1
15	ปิเปต	1 มิลลิลิตร 5 มิลลิลิตร 25 มิลลิลิตร	1 1 1
16	บีกเกอร์	100 มิลลิลิตร 250 มิลลิลิตร	4 1
17	บิวเรต	50 มิลลิลิตร	2
18	ขวดวัดปริมาตร	250 มิลลิลิตร 1000 มิลลิลิตร	2 1
19	แผ่นทองแดง	กว้าง x ยาว 15 x 25 เซนติเมตร	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

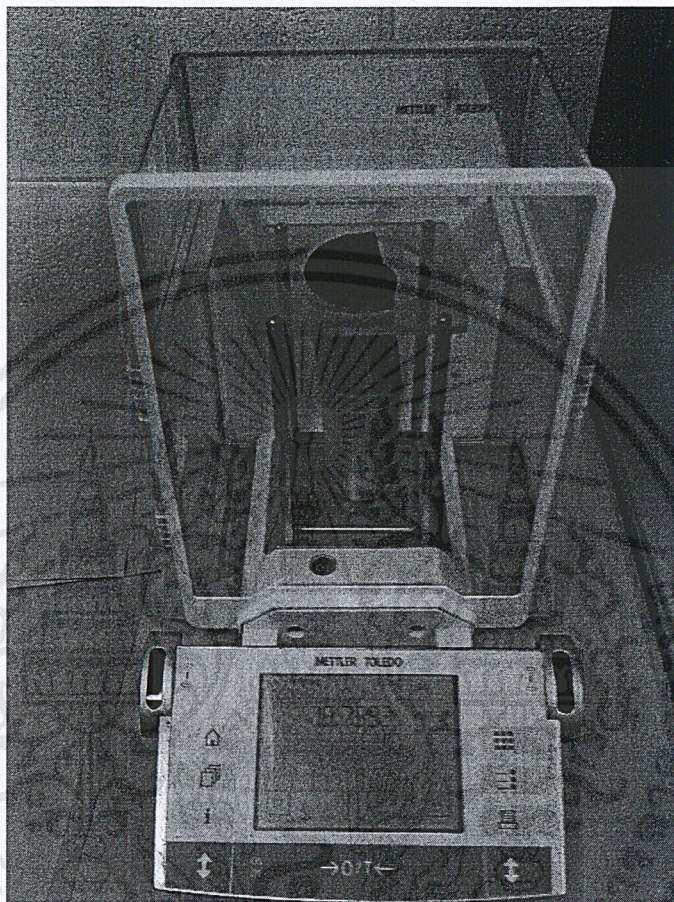
3. การทำความสะอาดอุปกรณ์การทดลองระดับปฏิบัติการ

ก่อนทำการทดลองต้องทำความสะอาดอุปกรณ์ ได้แก่ ถังอะคริลิก ถังสแตนเลส และไบพัตอะคริลิก โดยแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 % โดยปริมาตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ ก.1 การทำความสะอาดอุปกรณ์การทดลองระดับปฏิบัติการ

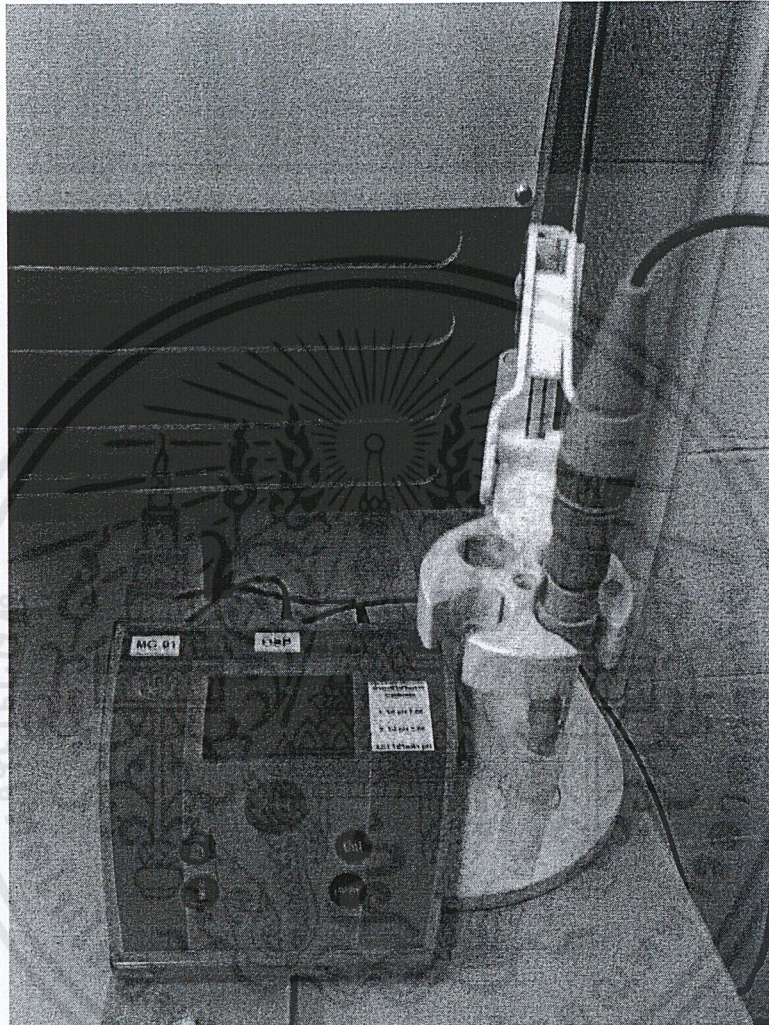
ภาคผนวก ข
เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง



รูปที่ ข.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น AX 105 delta range

ภาคผนวก ค

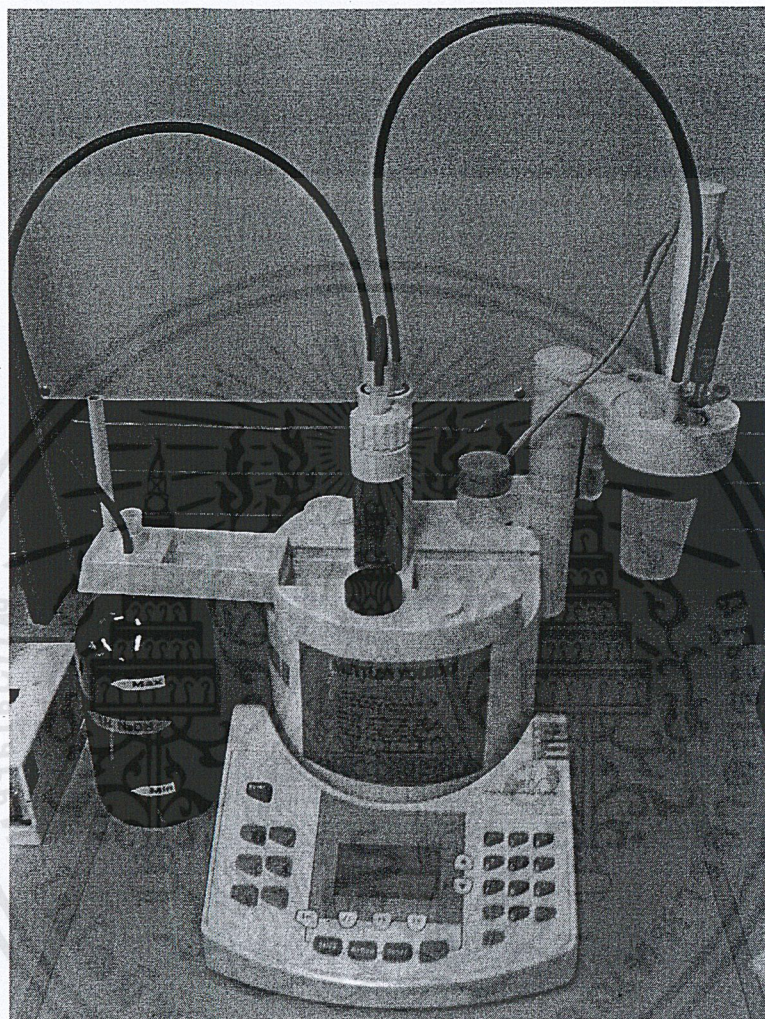
pH มิเตอร์



รูปที่ ค.1 เครื่องวัด pH รุ่น DG-115-SC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
เครื่องวัดความเป็นกรด

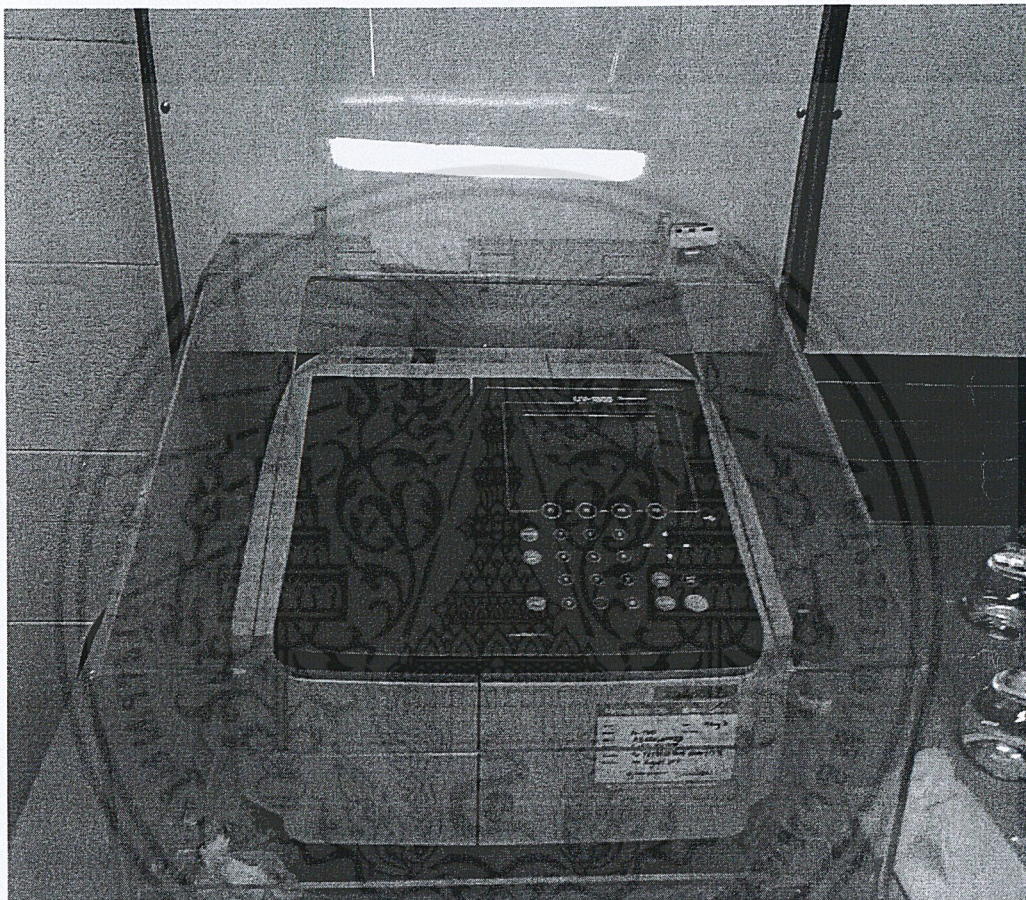


รูปที่ ง.1 เครื่องวัด Acidity ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น DL22 food and beverage analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

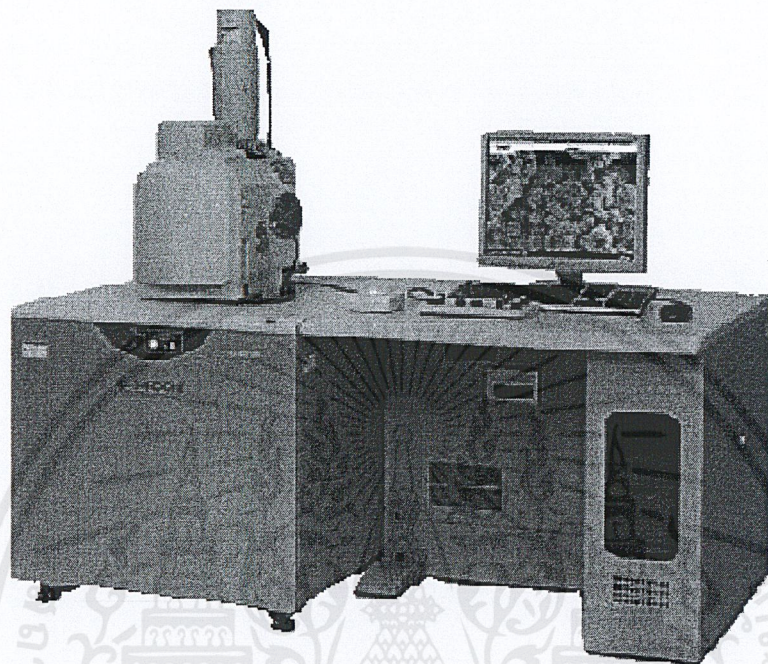
เครื่องวัดความเข้มข้นของสารละลาย Entek และวัดความหนาของ การเคลือบแผ่นทองแดง



รูปที่ จ.1 เครื่อง UV SHIMADZU รุ่น UV-1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ
เครื่องศึกษาลักษณะพื้นผิวทองแดง



รูปที่ ฉ.1 เครื่อง Scanning electron microscope รุ่น S-3400N type II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

วิธีการเตรียมสารละลาย

1. สารละลาย Entek

1.1 ผสมน้ำ DI ปริมาตร 250 ลิตร กับสารละลาย Entek replenisher ปริมาตร 36 ลิตร กวนผสมเป็นเวลา 5 นาที

1.2 เติมน้ำ DI ปริมาตร 45 ลิตร กวนผสมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

1.3 ผสมน้ำ DI กับสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วน 4 :1 โดยปริมาตร ครั้งละ 2.5 ลิตร เติมลงในสารละลาย Entek ทั้งหมด 7 ครั้ง-

1.4 เติมสารละลาย Entek additive ปริมาตร 5 ลิตร กวนผสมเป็นเวลา 30 นาที

1.5 ให้ความร้อนจนสารละลาย Entek มีอุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส จากนั้นปรับความเข้มข้นความเป็นกรด pH และความหนาของการเคลือบ FPC ตามลำดับ

2. สารละลาย CPE

2.1 ผสมสารละลาย CPE กับน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:4 โดยปริมาตร

2.2 ปรับความเข้มข้นของไอออนทองแดง โดยนำแผ่นทองแดงใส่ลงในสารละลาย CPE

2.3 วัดความลึกของการกัดผิวของทองแดงโดยการชั่งน้ำหนัก ความเข้มข้นของสารละลาย CPE และความเข้มข้นของไอออนทองแดง

3. สารละลายบัฟเฟอร์

3.1 นำขดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร วางบนเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง หยดกรดแอสซิติกลงในขดวัดปริมาตรจนมีน้ำหนัก 30.025 กรัม จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI

3.2 นำขดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร วางบนเครื่องชั่งทศนิยม ตำแหน่ง ใส่โซเดียมแอสซิติเตดลงในขดวัดปริมาตรจนมีน้ำหนัก 68.05 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI แล้วเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นผสมสารละลายจากขั้นตอนที่ 3.1 และ 3.2 ในขดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร

ภาคผนวก ข

วิธีวัดสมบัติทั่วไปของสารละลาย

1. สารละลาย Entek

1.1 ความเข้มข้น

1.1.1 การเพิ่มความเข้มข้นโดยเติม Entek replenisher

$$\text{Entek replenisher (ลิตร)} = \frac{(\text{ความเข้มข้นที่ต้องการ} - \text{ความเข้มข้นที่วัดได้}) \times \text{ปริมาตรสารละลาย}}{1,000}$$

1.1.2 การลดความเข้มข้นโดยเติมน้ำ DI

$$\text{น้ำ DI (มิลลิลิตร)} = \frac{(\text{ความเข้มข้นที่วัดได้} - \text{ความเข้มข้นที่ต้องการ}) \times \text{ปริมาตรสารละลาย}}{1,000}$$

1.2 ความเป็นกรด

1.2.1 การเพิ่มความเป็นกรดโดยเติม Entek additive

$$\text{Entek additive (ลิตร)} = \frac{(\text{ความเป็นกรดที่ต้องการ} - \text{ความเป็นกรดที่วัดได้}) \times \text{ปริมาตรสารละลาย}}{1,000}$$

1.2.2 การลดความเป็นกรด คือ ปล่อยให้กรดฟอร์มิกในสารละลาย Entek ระเหย

1.3 pH

1.3.1 การเพิ่ม pH โดยเติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

$$\text{สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)} = (\text{pH ที่ต้องการ} - \text{pH ที่วัดได้}) \times 1,000$$

หมายเหตุ ห้ามเติมเกินครั้งละ 500 มิลลิลิตร และทุกครั้งที่เติมต้องเจือจางด้วยน้ำ DI ในอัตราส่วนของน้ำ DI ต่อสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็น 4 :1 เสมอ

1.3.2 การลด pH โดยเติมสารละลายกรดฟอร์มิก

$$\text{สารละลายกรดฟอร์มิก (มิลลิลิตร)} = (\text{pH ที่วัดได้} - \text{pH ที่ต้องการ}) \times 1,000$$

หมายเหตุ ลำดับในการปรับค่าตัวแปรของสารละลาย Entek

- 1) ความเข้มข้น
- 2) ความเป็นกรด
- 3) pH

2. สารละลายกรดซัลฟิวริก

2.1 การเพิ่มความเข้มข้นโดยเติมสารละลายกรดซัลฟิวริก

$$\text{สารละลายกรดซัลฟิวริก (ลิตร)} = \frac{\text{ความเข้มข้นที่ต้องการ} - \text{ความเข้มข้นที่วัดได้}}{\text{ความเข้มข้นที่ต้องการ}}$$

2.2 การลดความเข้มข้นโดยเติมน้ำ DI

$$\text{น้ำ DI (ลิตร)} = \frac{\text{ความเข้มข้นที่วัดได้} - \text{ความเข้มข้นที่ต้องการ}}{\text{ความเข้มข้นที่ต้องการ}}$$



ภาคผนวก ฅ

วิธีปรับค่าสมบัติทั่วไปของสารละลาย

1. สารละลาย Entek

1.1 ความเป็นกรด

1.1.1 ปิเปิดน้ำ DI ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร

1.1.2 ปิเปิดสารละลาย Entek ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จนเป็น 60 มิลลิลิตร หยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ 2 – 3 หยด แล้ววัดด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด

1.2 ความเข้มข้น

1.2.1 ปิเปิดน้ำ DI ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วปิเปิดสารละลาย Entek ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI

1.2.2 นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV spectrophotometer โดย Calibrate ด้วยน้ำ DI ที่ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร คำนวณความเข้มข้นจากสมการ

$$\text{ความเข้มข้น (\% โดยปริมาตร)} = \text{ค่าการดูดกลืนแสง} \times 106$$

1.3 pH

ปิเปิดสารละลาย Entek ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร รอจนสารละลาย Entek มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปวัดด้วย pH มิเตอร์

1.4 ความหนืดของการเคลือบ FPC ด้วยสารละลาย Entek

1.4.1 ปิเปิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 % โดยปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 3 บีกเกอร์

1.4.2 ตัดแผ่นทองแดงที่ผ่านกระบวนการ Entek เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3 x 5 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้น (ตำแหน่งหัว กลาง และท้ายแผ่น) ใส่แต่ละบีกเกอร์ที่เตรียมไว้ข้างต้น ทิ้งไว้เป็นเวลา 3 นาที แล้วนำแผ่นทองแดงออกจากบีกเกอร์

1.4.3 นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV spectrophotometer โดย Calibrate ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 % โดยปริมาตร ที่ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร กำหนดความหนาจากสมการ

$$\text{ความหนาของการเคลือบ} = \text{ค่าดูดกลืนแสง} \times 0.67$$

2. สารละลาย CPE

2.1 ความเข้มข้น

2.1.1 ปิเปตสารละลาย CPE ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.1.2 ปิเปตสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 % โดยปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์

2.1.3 เติมน้ำ DI ใส่บีกเกอร์ให้มีปริมาตรของสารละลายรวมกันไม่เกิน 100 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน

2.1.4 โทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร เพื่อวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลาย CPE สารละลายจะเปลี่ยนจากสีใสเป็นสีชมพูอ่อน บันทึกปริมาตรโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใช้ไป กำหนดความเข้มข้นจากสมการ

$$\text{ความเข้มข้น (\% โดยปริมาตร)} = \frac{\text{ปริมาตรโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใช้ไป} \times 0.17}{0.2}$$

2.2 ความเข้มข้นของไอออนทองแดง

2.2.1 ปิเปตสารละลาย CPE ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.2.2 ปิเปตสารละลายบัฟเฟอร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ที่เตรียมจากข้อ 2.2.1

2.2.3 เติมน้ำ DI อุณหภูมิ 60 – 70 องศาเซลเซียส ลงในบีกเกอร์ให้มีปริมาตรสารละลายรวมกันไม่เกิน 100 มิลลิลิตร

2.2.4 หยด D - 321 อินดิเคเตอร์ (Xylenol orange) 2 - 3 หยด

2.2.5 นำสารละลายที่ได้โทเทรตกับสารละลาย Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) สารละลายจะเปลี่ยนจากสีชมพูอ่อนเป็นเขียวอ่อนหรือเหลืองอ่อน บันทึกปริมาตร EDTA ที่ใช้ไป กำหนดความเข้มข้นจากสมการ

$$\text{ความเข้มข้น (\% โดยมวลต่อปริมาตร)} = \frac{\text{ปริมาตร EDTA ที่ใช้ไป} \times 0.6354}{0.5}$$

2.3 ความลึกของการกัดผิวทองแดงด้วยสารละลาย CPE

- 2.3.1 นำแผ่นทองแดงขนาด 15 x 25 เซนติเมตร ไปขั้่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 2.3.2 นำแผ่นทองแดงจากข้อ 2.3.1 ไปผ่านกระบวนการ Entek
- 2.3.3 นำแผ่นทองแดงที่ผ่านกระบวนการ Entek ไปขั้่งน้ำหนัก
- 2.3.4 คำนวณความลึกของการกัดผิวทองแดงจากสูตร

$$\text{ความลึกของการกัดผิวทองแดง} = (\text{น้ำหนักก่อนขั้่ง} - \text{น้ำหนักหลังขั้่ง}) \times 2.98$$

3. ความเข้มข้นสารละลายกรดซัลฟิวริก

- 3.1 ปีเปิดน้ำ DI ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 3.2 ปีเปิดสารละลายกรดซัลฟิวริกปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ในข้อ 3.1
- 3.3 ปรับปริมาตรจนเป็น 60 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI จากนั้นหยดฟีนอล์ฟทาไลน์อินดิเคเตอร์ 2-3 หยด
- 3.4 ไทเทรตสารละลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร บันทึกปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ คำนวณความเข้มข้นจากสมการ

$$\text{ความเข้มข้น (\% โดยปริมาตร)} = \text{ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้} \times 0.95$$

ภาคผนวก ญ

ข้อมูลดิบ

ตารางที่ ญ.1 ผลการทดลองของการวิเคราะห์ขั้นต้นย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC

การทดลองที่	ขั้นต้นย่อย						ความหนาของการเคลือบแผ่นทองแดง (ไมครอน)			
	การ Etching	การล้างด้วย DI ครั้งที่ 1	การล้างด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก	การล้างด้วย DI ครั้งที่ 2	การเป่าแห้งด้วย Air knife ครั้งที่ 1	การเคลือบด้วยสารละลาย Entek	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	เฉลี่ย
1	-	-	-	-	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	-	-	-	-	-	+	0.3611	0.4130	0.3974	0.3905
3	-	-	-	-	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	-	-	-	-	+	+	0.3847	0.3971	0.3391	0.3736
5	-	-	-	+	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	-	-	-	+	-	+	0.3589	0.3964	0.3897	0.3817
7	-	-	-	+	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	-	-	-	+	+	+	0.3623	0.4019	0.4123	0.3824
9	-	-	+	-	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	-	-	+	-	-	+	0.3386	0.3952	0.4133	0.3727
11	-	-	+	-	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	-	-	+	-	+	+	0.3515	0.3887	0.3778	0.3743
13	-	-	+	+	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

ตารางที่ ๑.1 ผลการทดลองของการวิเคราะห์ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนา
ของการเคลือบ FPC (ต่อ)

การทดลองที่	ขั้นตอนย่อย						ความหนาของการเคลือบแผ่นทองแดง (ไมครอน)			
	การ Etching	การล้างด้วย DI ครั้งที่ 1	การล้างด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก	การล้างด้วย DI ครั้งที่ 2	การเป่าแห้งด้วย Air knife ครั้งที่ 1	การเคลือบด้วยสารละลาย Entek	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	เฉลี่ย
14	-	-	+	+	-	+	0.3533	0.3862	0.3835	0.3743
15	-	-	+	+	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16	-	-	+	+	+	+	0.3368	0.4010	0.4048	0.3809
17	-	+	-	-	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18	-	+	-	-	-	+	0.3616	0.4054	0.3936	0.3869
19	-	+	-	-	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	-	+	-	-	+	+	0.3383	0.3878	0.3687	0.3649
21	-	+	-	+	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22	-	+	-	+	-	+	0.3792	0.4005	0.3902	0.3900
23	-	+	-	+	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
24	-	+	-	+	+	+	0.3697	0.4208	0.4167	0.4024
25	-	+	+	-	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	-	+	+	-	-	+	0.3763	0.4094	0.4188	0.4015
27	-	+	+	-	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	-	+	+	-	+	+	0.3363	0.3937	0.3632	0.3644
29	-	+	+	+	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.1 ผลการทดลองของการวิเคราะห์ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC (ต่อ)

การทดลองที่	ขั้นตอนย่อย						ความหนาของการเคลือบแผ่นทองแดง (ไมครอน)			
	การ Etching	การล้างด้วย DI ครั้งที่ 1	การล้างด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก	การล้างด้วย DI ครั้งที่ 2	การเป่าแห้งด้วย Air knife ครั้งที่ 1	การเคลือบด้วยสารละลาย Entek	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	เฉลี่ย
30	-	+	+	+	-	+	0.3777	0.4020	0.4033	0.3943
31	-	+	+	+	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
32	-	+	+	+	+	+	0.3365	0.3848	0.3956	0.3723
33	+	-	-	-	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34	+	-	-	-	-	+	0.3365	0.3848	0.3956	0.3723
35	+	-	-	-	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
36	+	-	-	-	+	+	0.3430	0.3928	0.3973	0.3777
37	+	-	-	+	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
38	+	-	-	+	-	+	0.3643	0.4277	0.4284	0.4068
39	+	-	-	+	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	+	-	-	+	+	+	0.3973	0.4561	0.4496	0.4343
41	+	-	+	-	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
42	+	-	+	-	-	+	0.3515	0.3719	0.3966	0.3733
43	+	-	+	-	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
44	+	-	+	-	+	+	0.3769	0.4338	0.4426	0.4178
45	+	-	+	-	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑๖.1 ผลการทดลองของการวิเคราะห์ขั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC (ต่อ)

การทดลองที่	ขั้นตอนย่อย						ความหนาของการเคลือบแผ่นทองแดง (ไมครอน)			
	การ Etching	การล้างด้วย DI ครั้งที่ 1	การล้างด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก	การล้างด้วย DI ครั้งที่ 2	การเป่าแห้งด้วย Air knife ครั้งที่ 1	การเคลือบด้วยสารละลาย Entek	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	เฉลี่ย
46	+	-	+	+	-	+	0.3925	0.4332	0.4329	0.4195
47	+	-	+	+	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
48	+	+	+	+	+	+	0.3973	0.4374	0.4308	0.4218
49	+	+	-	-	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50	+	+	-	-	-	+	0.3806	0.4112	0.4018	0.3979
51	+	+	-	-	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
52	+	+	-	-	+	+	0.4299	0.4252	0.3954	0.4168
53	+	+	-	+	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
54	+	+	-	+	-	+	0.4218	0.4245	0.4233	0.4232
55	+	+	-	+	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
56	+	+	-	+	+	+	0.4033	0.4349	0.4251	0.4211
57	+	+	+	-	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
58	+	+	+	-	-	+	0.3855	0.3806	0.3773	0.3811
59	+	+	+	-	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
60	+	+	+	-	+	+	0.3881	0.4200	0.4094	0.4058
61	+	+	+	+	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ญ.1 ผลการทดลองของการวิเคราะห์ชั้นตอนย่อยในกระบวนการ Entek ที่มีผลต่อความหนาของการเคลือบ FPC (ต่อ)

การทดลองที่	ชั้นตอนย่อย						ความหนาของการเคลือบแผ่นทองแดง (ไมครอน)			
	การ Etching	การล้างด้วย DI ครั้งที่ 1	การล้างด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก	การล้างด้วย DI ครั้งที่ 2	การเป่าแห้งด้วย Air knife ครั้งที่ 1	การเคลือบด้วยสารละลาย Entek	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	เฉลี่ย
62	+	+	+	+	-	+	0.3970	0.4401	0.4215	0.4195
63	+	+	+	+	+	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
64	+	+	+	+	+	+	0.4127	0.4138	0.4366	0.4210

หมายเหตุ เครื่องหมาย +, - หมายถึง การมีและไม่มีชั้นตอนย่อยในกระบวนการผลิต

ตารางที่ ๒.2 ผลการทดลองของการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการเคลือบ FPC กับความเป็นกรด ความเข้มข้นของสารละลาย Entek และเวลาในการเคลือบ

การทดลองที่	ตัวแปร			ความหนาของการเคลือบแผ่นทองแดง (ไมครอน)			
	ความเป็นกรด	ความเข้มข้น	เวลาในการเคลือบ	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	เฉลี่ย
1	100	100	30	0.2879	0.2879	0.2879	0.2879
2	140	100	30	0.4213	0.4213	0.4213	0.4213
3	100	140	30	0.5691	0.5691	0.5691	0.5691
4	140	140	30	0.6641	0.6641	0.6641	0.6641
5	100	100	60	0.4076	0.4076	0.4076	0.4076
6	140	100	60	0.5701	0.5701	0.5701	0.5701
7	100	140	60	0.7811	0.7811	0.7811	0.7811
8	140	140	60	0.7506	0.7506	0.7506	0.7506
9	86	120	45	0.4643	0.4643	0.4643	0.4643
10	153	120	45	0.6642	0.6642	0.6642	0.6642
11	120	86	45	0.3304	0.3304	0.3304	0.3304
12	120	153	45	0.8249	0.8249	0.8249	0.8249
13	120	120	19	0.3820	0.3820	0.3820	0.3820
14	120	120	70	0.6864	0.6864	0.6864	0.6864
15	120	120	45	0.5693	0.5693	0.5693	0.5693
16	120	120	45	0.5851	0.5851	0.5851	0.5851
17	120	120	45	0.5071	0.5071	0.5071	0.5071
18	120	120	45	0.5637	0.5637	0.5637	0.5637
19	120	120	45	0.5401	0.5401	0.5401	0.5401
20	120	120	45	0.5815	0.5815	0.5815	0.5815

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓ การเปรียบเทียบความหนาของการเคลือบ FPC จากการค้าด้วยสมการและข้อมูลการผลิตตั้งแต่ ธันวาคม 2553 – มีนาคม พ.ศ. 2554

ลำดับที่	ตัวแปร			ความหนา (ไมครอน)		ความผิดพลาด (%)
	ความเป็นกรด	ความเข้มข้น	เวลาในการเคลือบ	สายการผลิต	สมการ	
1	104	115	30	0.3450	0.3813648	10.54
2	100	110	30	0.3500	0.3279325	6.30
3	105	112	30	0.3330	0.3617108	8.62
4	108	105	30	0.3370	0.3214691	4.60
5	109	107	30	0.3450	0.3398857	1.48
6	105	106	30	0.3330	0.3165373	4.94
7	108	110	30	0.3390	0.3577839	5.54
8	106	115	30	0.3150	0.3881228	23.21
9	110	112	30	0.3660	0.3798026	3.77
10	106	110	30	0.3630	0.350267	3.50
11	111	115	30	0.3550	0.4051752	14.13
12	106	109	30	0.3200	0.3427941	7.12
13	105	108	30	0.3830	0.3314643	13.45
14	115	107	30	0.3910	0.3640077	6.90
15	117	109	30	0.3760	0.3853778	2.49
16	106	103	30	0.3940	0.2986433	24.20
17	106	107	30	0.3580	0.3279463	8.39
18	105	107	30	0.3600	0.3239844	10.00
19	105	102	30	0.3650	0.2870761	21.34
20	101	101	30	0.3390	0.2623004	22.62
21	105	105	30	0.3540	0.3091229	12.67
22	105	105	30	0.3340	0.3091229	7.44
23	115	105	30	0.3320	0.3505921	5.60
24	104	101	30	0.3450	0.2754061	20.17
25	103	105	30	0.3490	0.3009372	13.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.3 การเปรียบเทียบความหนาของการเคลือบ FPC จากการคำนวณด้วยสมการและข้อมูลการผลิตตั้งแต่ ธันวาคม 2553 – มีนาคม พ.ศ. 2554 (ต่อ)

ลำดับที่	ตัวแปร			ความหนา (ไมครอน)		ความผิดพลาด (%)
	ความเป็นกรด	ความเข้มข้น	เวลาในการเคลือบ	สายการผลิต	สมการ	
26	110	104	30	0.3460	0.3227247	6.72
27	115	115	30	0.3230	0.4189793	29.71
28	108	110	30	0.3940	0.3577839	9.19
29	107	110	30	0.3800	0.354021	6.83
30	116	111	30	0.3570	0.3949944	10.64
31	118	109	30	0.3370	0.3978309	18.05
32	106	112	30	0.3540	0.3893031	9.97
33	113	111	30	0.3360	0.3653112	8.72
34	118	110	30	0.3350	0.3837334	14.54
35	114	108	30	0.4130	0.3959086	4.13
36	110	113	30	0.3520	0.3667941	4.20
37	115	110	30	0.3820	0.3870846	1.33
38	115	106	30	0.3540	0.3843766	8.58
39	123	108	30	0.3620	0.3572835	1.30
40	106	107	30	0.3520	0.4028533	14.44
41	110	109	30	0.2820	0.3279463	16.29
42	112	110	30	0.3220	0.358153	11.22
43	110	105	30	0.3550	0.3729257	5.04
44	124	108	30	0.3370	0.329745	2.15
45	112	110	30	0.3250	0.4069048	25.20
46	116	110	30	0.3850	0.3729257	3.13
47	116	110	30	0.3750	0.3882116	3.52
48	120	111	30	0.3850	0.3882116	0.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.3 การเปรียบเทียบความหนาของการเคลือบ FPC จากการค้าด้วยสมการและข้อมูล
การผลิตตั้งแต่ ธันวาคม 2553 – มีนาคม พ.ศ. 2554 (ต่อ)

ลำดับที่	ตัวแปร			ความหนา (ไมครอน)		ความ ผิดพลาด (%)
	ความเป็น กรด	ความ เข้มข้น	เวลาใน การ เคลือบ	สายการผลิต	สมการ	
49	117	105	30	0.3850	0.4101352	6.52
50	108	110	30	0.3690	0.3589939	2.71
51	118	108	30	0.4270	0.3577839	16.20
52	112	118	30	0.3900	0.3827303	1.86
53	109	110	30	0.4400	0.4304176	2.17
54	117	112	30	0.4030	0.3615559	10.28
55	123	106	30	0.4200	0.4055093	3.45
56	120	108	30	0.3700	0.3905288	5.54
57	111	108	30	0.3780	0.3907525	3.37
58	118	105	30	0.3540	0.3549364	0.26
59	112	111	30	0.3260	0.3632084	11.41
60	114	109	30	0.3830	0.3799977	0.78
61	120	110	30	0.3950	0.373656	5.40
62	121	109	30	0.3760	0.4036416	7.35
63	121	114	30	0.3990	0.401133	0.53
64	115	110	30	0.3640	0.4334032	19.06
65	114	110	30	0.3830	0.3843766	0.35
66	118	109	30	0.4070	0.3805507	6.49
67	120	110	30	0.4120	0.3893031	5.50
68	122	108	30	0.3860	0.4036416	4.57
69	121	112	30	0.4130	0.3988107	3.43
70	120	114	30	0.4240	0.4203969	0.84
71	121	109	30	0.3840	0.4298124	11.93
72	123	110	30	0.3890	0.401133	3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.3 การเปรียบเทียบความหนาของการเคลือบ FPC จากการคำนวณด้วยสมการและข้อมูลการผลิตตั้งแต่ ธันวาคม 2553 – มีนาคม พ.ศ. 2554 (ต่อ)

ลำดับที่	ตัวแปร			ความหนา (ไมครอน)		ความผิดพลาด (%)
	ความเป็นกรด	ความเข้มข้น	เวลาในการเคลือบ	สายการผลิต	สมการ	
73	120	112	30	0.4110	0.4153086	1.04
74	114	109	30	0.4060	0.4166615	2.62
75	121	107	30	0.4360	0.373656	14.29
76	119	111	30	0.3850	0.3884539	0.89
77	119	112	30	0.3890	0.4063365	4.45
78	112	111	30	0.3760	0.4129351	9.82
79	116	106	30	0.3960	0.3799977	4.04
80	120	111	30	0.4000	0.3614077	9.64
81	119	113	30	0.3760	0.4101352	9.07
82	121	114	30	0.4930	0.4195665	14.89
83	120	114	30	0.3880	0.4334032	11.70