ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ	วิศวกรรมอุตสาหการ
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย : กรณีศึกษา โรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์

Design of Experiments for Optimizing Parameters in the Transfer Molding Process : A Case Study in a Semiconductor Factory

นามผู้วิจัย นายอภิสิทธิ์ มีพัฒน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย : กรณีศึกษา โรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์

Design of Experiments for Optimizing Parameters in the Transfer Molding Process : A Case Study in a Semiconductor Factory

โดย

นายอภิสิทธิ์ มีพัฒน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)
พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อภิสิทธิ์ มีพัฒน์ 2553: การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดใน
กระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย : กรณีศึกษา โรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D. 70 หน้า

กระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายของสารประกอบพลาสติกในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นกระบวนการที่สร้างปัญหามลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากส่วนประกอบในสารประกอบพลาสติก สหภาพยุโรปจึงได้มีการตั้งข้อกำหนดของสารอันตราย (Restriction of Hazardous Substances, RoHS) ขึ้นมา เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาสารประกอบโดยการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบในสารประกอบพลาสติก ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาของเสียในกระบวนการขึ้นรูป ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลและหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายโดยใช้การทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) เพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นและปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย ภายหลังการปรับปรุงพบว่า ของเสียในกระบวนการผลิตลดลงคิดเป็น 8.34-19.8 %

__________ __________ ____ / ____ / ____

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Apisit Meepat 2010: Design of Experiments for Optimizing Parameters in the Transfer Molding Process : A Case Study in a Semiconductor Factory. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prapaisri Sudusna-na-Ayudthya, Ph.D. 70 pages.

A transfer molding process of plastic compounds in the electronic industry causes the environmental problems due to composition in the compounds. European Union (EU), therefore, issues the Restriction of Hazardous Substances (RoHS) specification. According to RoHS, a new compound is developed by changing some substances in the compound, which leads to major defects in the molding process. In this research, the design of experiments was applied to study significant factors and optimize the parameters setting of the molding process using the Box-Behnken design in order to reduce the defects and improve the efficiency of the transfer molding process. After the improvement, it was found that the defects in the production were significantly decreased by 8.34-19.8 %.

______________________________	______________________________	____ / ____ / ____
Student's signature	Thesis Advisor's signature	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอขอบพระคุณ ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ กรรมการที่ปรึกษาวิชารอง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำเพิ่มเติมในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณนาวิน แสงสระศรี วิศวกรส่วนนวัตกรรม คุณสุริยัน วงศ์เมืองแก่น วิศวกรส่วนผลิต และพนักงานตรวจสอบคุณภาพ ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยด้วยดีมาตลอด

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษามาโดยตลอด รวมทั้งเพื่อนๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำต่างๆ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

อภิสิทธิ์ มีพัฒน์

มีนาคม 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	10
การตรวจเอกสาร	11
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	34
วิธีการ	34
ผลและวิจารณ์	39
สรุปและข้อเสนอแนะ	54
สรุป	54
ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	57
ภาคผนวก	60
ภาคผนวก ก แสดงข้อมูลสำหรับคัดเลือกปัจจัยด้วยแผนการทดลองแบบ 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน	61
ภาคผนวก ข แสดงข้อมูลสำหรับหาระดับที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการทดลองบ๊อกซ์-เบห์นเคน	63
ภาคผนวก ค แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับหาระดับที่เหมาะสมด้วย Response Optimizer	66
ภาคผนวก ง แสดงข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์	68
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	70

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1	รายละเอียดของแผนการทดลองและความหมาย	18
2	แผนการทดลอง 2^{4-1} การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน	19
3	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับกรณีศึกษา 2 ปัจจัยที่ a ระดับ และ b ระดับ	23
4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอย	29
5	แสดงระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน	39
6	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน	43
7	แสดงระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน	47
8	วิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวผลตอบสนองสำหรับการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน	49
9	ผลการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับปัจจัยที่ศึกษา	50
10	การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบความถดถอย	51
11	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน	55
12	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน	55

ตารางผนวกที่

ก1	ข้อมูลการออกแบบการทดลอง 2^{4-1}แฟคทอเรียลบางส่วน (ทำซ้ำ 2 รอบ)	62
ข1	ข้อมูลการออกแบบการทดลองบ๊อกซ์-เบห์นเคน (ทำซ้ำ 2 รอบ)	64
ง1	ข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์การทดลอง 2^{4-1}แฟคทอเรียลบางส่วน	69
ง2	ข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์การทดลองบ๊อกซ์-เบห์นเคน	69

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการผลิตเซมิคอนดักเตอร์	1
2	แสดงภาพแผ่นลายวงจรและตัววงจรด้านหน้า	3
3	แสดงภาพแผ่นลีดเฟรมด้านหน้า	4
4	แสดงภาพตัววงจรที่ผ่านกระบวนการนำตัววงจรติดลงบนแผ่นลีดเฟรม	4
5	แสดงภาพตัววงจรที่ผ่านกระบวนการเชื่อมลวดทองระหว่างวงจรกับขาบนลีดแฟรม	4
6	แสดงภาพสารประกอบพลาสติก	5
7	แสดงภาพตัววงจรที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย	5
8	แสดงขั้นตอนเตรียมสารประกอบพลาสติกก่อนเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย	6
9	แสดงปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงาน	7
10	แสดงปัญหาการขึ้นรูปไม่สมบูรณ์	7
11	แสดงปัญหาเส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอมากกว่าที่กำหนด	8
12	แสดงปัญหาฟองอากาศขนาดเล็กที่ผิวชิ้นงาน	8
13	แสดงปัญหารอยด้านที่ผิวชิ้นงาน	9
14	แบบจำลองทั่วไปของระบบ	13
15	Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อนที่มีการแจกแจงแบบปกติ	20
16	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูลที่มีความเป็นอิสระ	21
17	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณค่าตอบสนองที่มีความเสถียรของ σ^2	22
18	แสดงเมตริกซ์ของการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย	25
19	แสดงเมตริกซ์ของการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย	26
20	แผนผังเหตุและผลสาเหตุของปัญหาที่เกิดในกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย	35
21	Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน	40
22	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูลสำหรับการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน	41

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณค่าตอบสนอง สำหรับการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน	41
24	กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (D)	44
25	กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติกและความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (AB)	44
26	Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน	47
27	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล สำหรับการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน	48
28	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณค่าตอบสนอง สำหรับการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน	49

ภาพผนวกที่

ค1	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับหาระดับที่เหมาะสม	67

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

p_1 = สัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานก่อนทำการทดลอง

p_2 = สัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานหลังทำการทดลอง 2^{4-1} การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน

p_3 = สัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานหลังทำการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน

A = เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก

B = ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก

C = เวลาที่ใช้ในการคงรูปหรือการบ่มสุก

D = เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก

AB = อิทธิพลร่วมเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติกและความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก

AC = อิทธิพลร่วมเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติกและเวลาที่ใช้ในการคงรูปหรือการบ่มสุก

AD = อิทธิพลร่วมเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติกและเวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในกระบวนการขึ้นรูป แบบส่งถ่าย : กรณีศึกษา โรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์

Design of Experiments for Optimizing Parameters in the Transfer Molding Process : A Case Study in a Semiconductor Factory

คำนำ

ผลิตภัณฑ์เซมิคอนดักเตอร์หรือสารกึ่งตัวนำ หมายถึง สารชนิดหนึ่งที่เป็นได้ทั้งตัวนำและฉนวนทางไฟฟ้า ในสารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากตัวนำและฉนวน คือ การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ แสงที่ตกกระทบและปริมาณสารเจือปน จึงทำให้สารกึ่งตัวนำมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมากและเป็นส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ในรถยนต์และยานอวกาศ เป็นต้น

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เซมิคอนดักเตอร์มีอยู่ 10 กระบวนการด้วยกันดังนี้

ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตเซมิคอนดักเตอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายของสารประกอบพลาสติกในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นกระบวนการหนึ่งที่สร้างปัญหามลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากตัวสารประกอบพลาสติกมีส่วนประกอบของโบรมีน เมื่อได้รับความร้อนอาจทำให้เกิดไดออกซินซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและเป็นอันตรายต่อสภาวะแวดล้อม ต่อมาสหภาพยุโรป (EU) จึงได้มีการตั้งข้อกำหนดของสารอันตราย (Restriction of Hazardous Substances, RoHS) ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่ 2002/95/EC ว่าด้วยเรื่องของการใช้สารที่เป็นอันตรายในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเริ่มมีผลบังคับใช้ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2549 (เทพวิทูรย์ และ วันดี, 2548) ดังนั้น เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดจึงได้มีการพัฒนาสารประกอบพลาสติกและให้ชื่อเรียกสารประกอบพลาสติกชนิดใหม่นี้ว่า Dark Green แต่เมื่อส่วนประกอบบางตัวของสารประกอบพลาสติกได้เปลี่ยนแปลงไปจึงก่อให้เกิดปัญหาต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายซึ่งของเสียที่พบเกิดจากปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงาน (Internal Void) ซึ่งมีสัดส่วนของเสียอยู่ในช่วงร้อยละ 11.40 - 21.94 และในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาปัญหาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นต่อกระบวนการขึ้นรูปเพิ่มเติมเพื่อให้คลอบคลุมทั้งกระบวนการซึ่งได้แก่ ปัญหาขึ้นรูปไม่สมบูรณ์ (Incomplete Mold) ปัญหาเส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอมากกว่ากำหนด (Wire Sweep) ปัญหาฟองอากาศที่ผิวชิ้นงาน (Void) และปัญหารอยด้านที่ผิวชิ้นงาน (Sticking)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลในกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายโดยใช้สารประกอบพลาสติกซึ่งเป็นสารประกอบพลาสติกชนิด Dark Green และกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยศึกษาจากปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงาน ปัญหาการขึ้นรูปไม่สมบูรณ์ ปัญหาเส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอมากกว่าที่กำหนด ปัญหาฟองอากาศขนาดเล็กที่ผิวชิ้นงานและปัญหารอยด้านที่ผิวชิ้นงาน โดยมีปัจจัย 4 ปัจจัย คือเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก (Transfer time) ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (Plunger Pressure) เวลาที่ใช้ในการคงรูปหรือการบ่มสุก (Cure Time) และเวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (Preheat time) โดยการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ การทดลอง 2^{k-p} แฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment) และการทดลองบ๊อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Experiment)

ความเป็นมาและปัญหาของโรงงานตัวอย่าง

โรงงานตัวอย่างเป็นหนึ่งในผู้ผลิตเซมิคอนดักเตอร์ ทำการประกอบและทดสอบแผงวงจรรวมเพื่อการส่งออก ซึ่งผลิตภัณฑ์เซมิคอนดักเตอร์แบ่งออกเป็นหลายชนิดที่มีลักษณะและการใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกันออกไป โดยส่วนของงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษานั้นเป็นผลิตภัณฑ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เซมิคอนดักเตอร์ชนิด HTSSOP20 ที่มีจำนวนขางาน 20 ขา ขึ้นรูปแบบส่งถ่ายด้วยสารประกอบพลาสติกชนิด Dark Green

กระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย

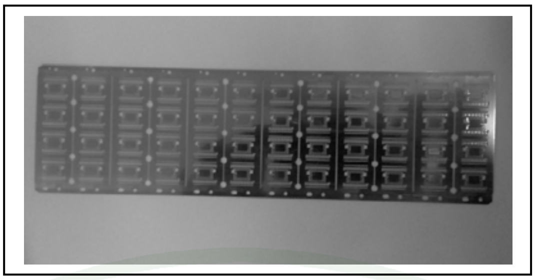
1. การลดความหนาของแผ่นลายวงจรเพื่อลดปัญหาจากการทำการเชื่อมตัววงจรและสามารถลดขนาดของผลิตภัณฑ์เซมิคอนดักเตอร์ได้

2. การตัดแยกวงจรเป็นการแยกตัววงจรออกจากกัน ซึ่งภายในแผ่นลายวงจรประกอบด้วยตัววงจรจำนวนมาก

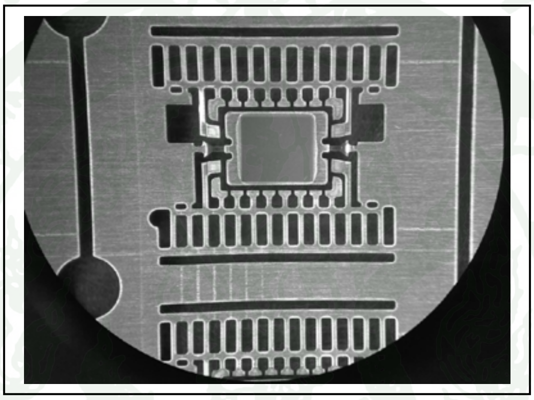
ภาพที่ 2 แสดงภาพแผ่นลายวงจรและตัววงจรด้านหน้า

3. การนำตัววงจรติดลงบนแผ่นโลหะลีดเฟรมด้วยกาวที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

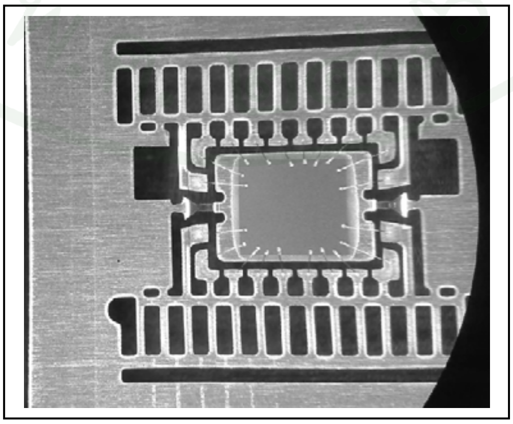


ภาพที่ 3 แสดงภาพแผ่นลีดเฟรมด้านหน้า



ภาพที่ 4 แสดงภาพตัววงจรที่ผ่านกระบวนการนำตัววงจรติดลงบนแผ่นลีดเฟรม

4. การเชื่อมลวดทองระหว่างวงจรกับขาบนแผ่นโลหะลีดเฟรมโดยใช้เส้นลวดทองคำบริสุทธิ์ 99%

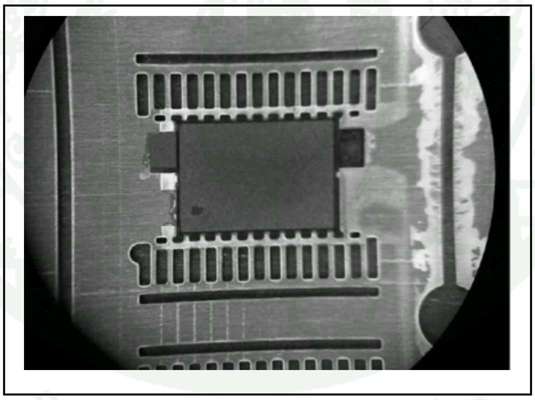


ภาพที่ 5 แสดงภาพตัววงจรที่ผ่านกระบวนการเชื่อมลวดทองระหว่างวงจรกับขาบนลีดเฟรม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

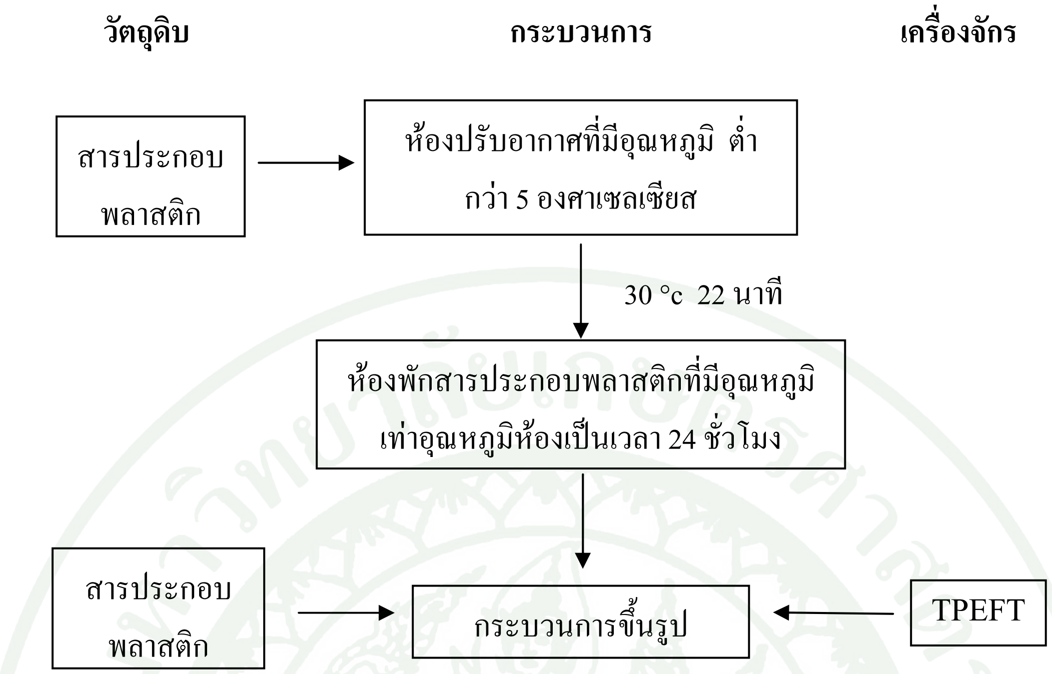
5. การขึ้นรูปแบบส่งถ่ายด้วยสารประกอบพลาสติกเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับตัววงจร ทั้งในเรื่องฝุ่นละอองและความชื้น โดยเป็นตัวห่อหุ้มตัววงจรที่ผ่านการเชื่อมลวดทองเรียบร้อยแล้ว

ภาพที่ 6 แสดงภาพสารประกอบพลาสติก



ภาพที่ 7 แสดงภาพตัววงจรที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 แสดงขั้นตอนการเตรียมสารประกอบพลาสติกก่อนเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย

6. การอบหลังการขึ้นรูปเพื่อให้พันธะทางเคมีของสารประกอบพลาสติกแข็งแรงขึ้น

7. การประทับตราเป็นการทำสัญลักษณ์เพื่อระบุชื่อบริษัท ชื่อชนิด ชื่อรุ่นบนตัวเซมิคอนดักเตอร์

8. การตัดแยกและดัดขาตัวงานเซมิคอนดักเตอร์ในขั้นตอนการตัดนั้นเป็นการตัดแยกตัวงานที่อยู่ลีดเฟรมเดียวกันออกจากกัน หลังจากนั้นจึงทำการดัดขาตัวงานให้เข้ารูปเพื่อให้เป็นไปตามรูปแบบที่ตั้งไว้

9. การตรวจสอบลักษณะภายนอกและทดสอบทางไฟฟ้าเป็นการตรวจสอบการทำงานของตัวงานเซมิคอนดักเตอร์

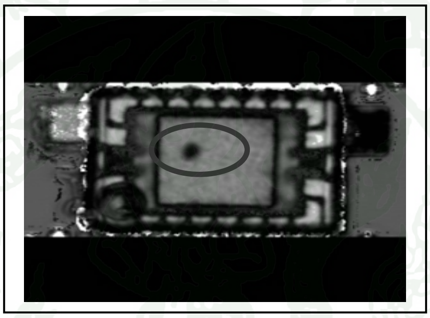
10. การบรรจุหีบห่อเป็นกระบวนการตรวจนับจำนวนงานและบรรจุหีบห่อ

เนื่องจากส่วนประกอบบางตัวของสารประกอบพลาสติกได้เปลี่ยนไปจึงก่อให้เกิดปัญหาต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายซึ่งของเสียที่พบเกิดจากปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงาน ซึ่งมี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

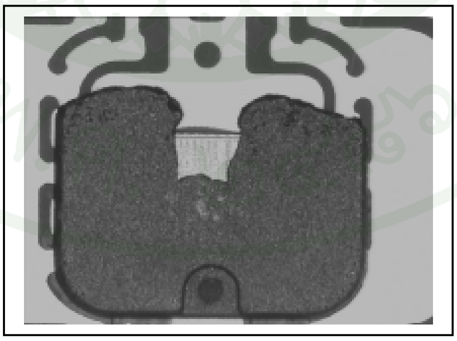
สัดส่วนของเสียอยู่ในช่วงร้อยละ 11.40 - 21.94 และในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาปัญหาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นต่อกระบวนการขึ้นรูปเพิ่มเติมเพื่อให้คลอบคลุมทั้งกระบวนการซึ่งได้แก่ ปัญหาขึ้นรูปไม่สมบูรณ์ ปัญหาเส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอมากกว่ากำหนด ปัญหาฟองอากาศที่ผิวชิ้นงาน และปัญหารอยด้านที่ผิวชิ้นงาน ซึ่งปัญหาดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

1. ปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงานทำการตรวจสอบ Scaning Acoustical Tomography ด้วยเครื่อง Sonoscan C-SAM Series D-9000 โดยโปรแกรม VHR Visual Acoustic เป็นการตรวจสอบโดยใช้คลื่นพลังงานกลความถี่เหนือเสียงซึ่งมีน้ำเป็นสื่อกลาง



ภาพที่ 9 แสดงปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงาน

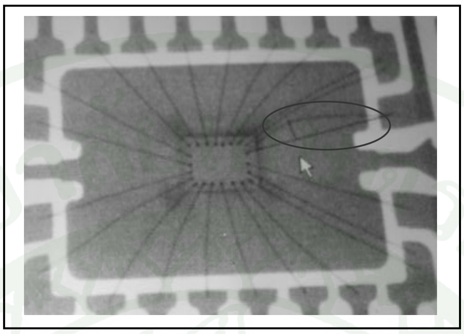
2. ปัญหาการขึ้นรูปไม่สมบูรณ์ สามารถทำการตรวจสอบได้ด้วยตาหรือใช้กล้องจุลทรรศน์



ภาพที่ 10 แสดงปัญหาการขึ้นรูปไม่สมบูรณ์

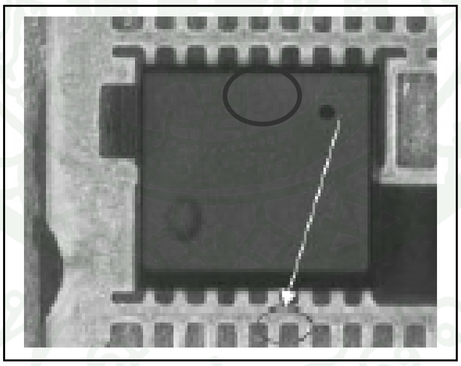
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ปัญหาเส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอมากกว่าที่กำหนดโดยทางบริษัทได้มีมารตราฐานว่าต้องมีแอมพิจูดความโค้งน้อยกว่า 10 % ถึงจะยอมรับผลิตภัณฑ์ตัวนั้นๆ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการเอ็กเรย์ ด้วยเครื่อง SOFTEX SFX-100 โปรแกรม VIP-82



ภาพที่ 11 แสดงปัญหาเส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอมากกว่าที่กำหนด

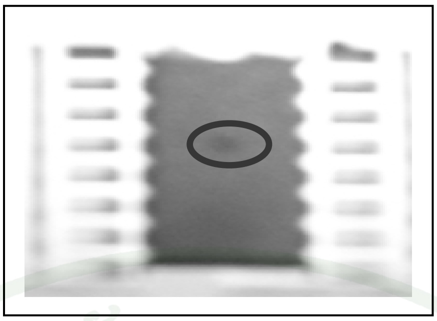
4. ปัญหาฟองอากาศขนาดเล็กที่ผิวชิ้นงาน ทำการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์หรือทำการตรวจสอบได้ด้วยตา



ภาพที่ 12 แสดงปัญหาฟองอากาศขนาดเล็กที่ผิวชิ้นงาน

5. ปัญหารอยด้านที่ผิวชิ้นงานเป็นปัญหาที่เกิดจากการไหม้ของสารประกอบพลาสติกที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ทำการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์หรือทำการตรวจสอบได้ด้วยตา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 13 แสดงปัญหารอยด้านที่ผิวชิ้นงาน

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นและเสนอพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย เพื่อปรับปรุงคุณภาพและลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายซึ่งได้แก่ ปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงาน ปัญหาการขึ้นรูปไม่สมบูรณ์ ปัญหาเส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอมากกว่าที่กำหนด ปัญหาฟองอากาศขนาดเล็กที่ผิวชิ้นงานและปัญหารอยด้านที่ผิวชิ้นงาน

2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายและหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในกระบวนการขึ้นรูป

3. เพื่อสร้างสมการถดถอยและพยากรณ์ค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน โดยวิธีการหาพื้นผิวตอบสนองตามแผนการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะผลิตภัณฑ์เซมิคอนดักเตอร์ชนิด HTSSOP20 ที่มีจำนวนขางาน 20 ขา โดยพิจารณาเฉพาะกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายซึ่งมีขอบเขตในงานวิจัยดังนี้

1. เครื่องขึ้นรูปแบบส่งถ่ายเป็นเครื่องแบบ Auto-run ชนิด GPEFT
2. สารประกอบพลาสติกชนิด Dark Green
3. ความดันหน้าแม่พิมพ์ (Clamp pressure) คือ 173 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร
4. ระยะในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก (Transfer stroke) คือ 20 มิลลิเมตร
5. อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) คือ 180 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

ผลิตภัณฑ์เซมิคอนดักเตอร์

ผลิตภัณฑ์เซมิคอนดักเตอร์หรือสารกึ่งตัวนำหมายถึง สารชนิดหนึ่งที่เป็นได้ทั้งสื่อนำและฉนวนกั้นกระแสไฟฟ้าในตัวสารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากตัวนำและฉนวน คือ การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ แสงที่ตกกระทบ ปริมาณสารเจือปนและปริมาณของจุดบกพร่องในเนื้อสารจึงทำให้สารกึ่งตัวนำมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมากและเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มากมายเช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ รีโมทคอนโทลรวมไปถึงอุปกรณ์ในรถยนต์และยานอวกาศ อีกด้วย

ไอซีหรือแผงวงจร (Integrated Circuit ; IC) หมายถึง วงจรที่นำเอาไดโอด ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและองค์ประกอบวงจรต่างๆ มาประกอบรวมกันบนแผ่นวงจรขนาดเล็ก ในปัจจุบันแผ่นวงจรนี้จะทำด้วยแผ่นซิลิคอนบางทีอาจเรียกว่าชิปหรือตัววงจรและสร้างองค์ประกอบวงจรต่างๆ ฝังอยู่บนแผ่นผลึกโดยใช้กรรมวิธีทางด้านการถ่ายภาพอย่างละเอียดผสมกับขบวนการทางเคมีทำให้ลายวงจรมีความละเอียดสูงจึงสามารถบรรจุองค์ประกอบวงจรได้จำนวนมาก (สมเกียรติ, 2545)

กระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย

กระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายเป็นกระบวนการอัดแบบชนิดฉีดซึ่งจัดเป็นกระบวนการที่รวดเร็ว ทำงานได้โดยอัตโนมัติ สามารถใช้ผลิตชิ้นงานพลาสติกที่มีรูปทรงเรขาคณิตค่อนข้างซับซ้อน ผลิตชิ้นงานที่มีขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ โดยใช้วัสดุพลาสติก (สมศักดิ์, 2543)

เครื่องอัดแบบชนิดฉีดมีหน้าที่หลักในการฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าไปยังแม่พิมพ์ที่ปิดสนิทและเกิดเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ โดยแม่พิมพ์จะปิดภายในระยะเวลาที่กำหนดเพื่อให้เกิดการบ่มตัวและวัสดุที่เป็นของเหลวอยู่จะได้เป็นของแข็งและอยู่ตัว โดยมีการหล่อเย็นไหลผ่านส่วนของแม่พิมพ์เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนของพลาสติกที่ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์และช่วยทำให้เกิดการบ่มตัวของของไหลให้เป็นของแข็งได้เร็วขึ้น เมื่อเกิดการบ่มตัวแล้วแม่พิมพ์จะเปิดออก ชิ้นงานจะถูกปลดออกได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ จากนั้นจึงเริ่มต้นรอบการทำงานใหม่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อกำหนดของสารอันตราย

ข้อกำหนดของสารอันตราย (Restriction of Hazardous Substances, RoHS) ซึ่งเป็นระเบียบที่กำหนดโดยกลุ่มประเทศในสหภาพยุโรป โดยบังคับให้อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่จะส่งเข้าไปในตลาดของกลุ่มประเทศในสหภาพยุโรป หลังวันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2549 ต้องปราศจากสารอันตราย 6 ชนิดดังนี้ (เทพวิทูรย์ และ วันดี, 2548)

1. ตะกั่ว (Pb)
2. ปรอท (Hg)
3. เฮกซะวาเลนท์ (Cr-VI)
4. โพลีโบรมิเนต ไบเฟนนิลส์ (PBB)
5. โพลีโบรมิเนต ไดเฟนนิลอีเธอร์ (PBDE)
6. แคดเมียม (Cd)

ข้อกำหนด Restriction of Hazardous Substances เป็นระเบียบที่มุ่งเน้นการกำจัดการใช้สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ แล้วยังสอดคล้องกับระเบียบที่ให้ผู้ผลิตต้องรับผิดชอบเรียกคืนซากสินค้าที่หมดอายุ (The Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment หรือ WEEE) ตามคณะกรรมาธิการยุโรป กำหนดไว้ในปี พ.ศ. 2546 การลดปริมาณสารอันตรายในผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของผลิตภัณฑ์เหล่านี้คือชิ้นส่วนโลหะ ชิ้นส่วนพอลิเมอร์ ชิ้นส่วนเซรามิกและแก้ว ทั้งนี้เพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจว่าความเสี่ยงต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมจากสารเหล่านี้จะลดลงได้ จากการที่สหภาพยุโรปประกาศใช้ระเบียบเหล่านี้ ทำให้ประเทศต่างๆ มีมาตรการการกำหนดปริมาณสารพิษในผลิตภัณฑ์ด้วยเช่นกัน

เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดจึงได้มีการพัฒนาสารประกอบพลาสติกโดยทำการเปลี่ยน Br ในสารหน่วงการติดไฟเป็น $Mg(OH)_2$ และให้ชื่อเรียกสารประกอบพลาสติกชนิดใหม่นี้ว่า Dark Green แต่เมื่อส่วนประกอบบางตัวของสารประกอบพลาสติกได้เปลี่ยนแปลงไปจึงก่อให้เกิดปัญหาต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย งานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคการออกแบบการทดลองมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงกระบวนการและลดปัญหาที่เกิดขึ้น

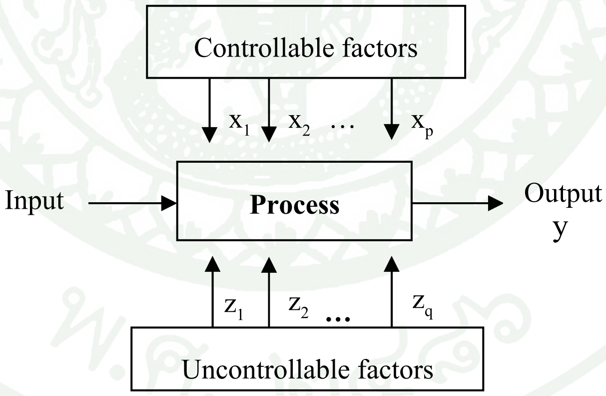
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Experiment) คือการจำลองสภาพความเป็นจริงให้มาอยู่ในสภาพที่เราสามารถควบคุมได้เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อเท็จจริงอันเป็นผลจากการปฏิบัติในการศึกษาการทดลอง โดยที่การทดลองจะแบ่งเป็นการทดลองเบื้องต้น คือการทดลองเพื่อให้ทราบผลอย่างกว้างๆ ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะนำไปวิเคราะห์และแปรผลในขั้นต่อไป

การทดลองขั้นตัดสินใจ เป็นขั้นตอนการนำผลการทดลองเบื้องต้นมาทำการทดลองขั้นต่อมาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบหรือหาผลที่ดีที่สุดในกลุ่มผลการทดลองโดยวิธีการทดลองแบบต่างๆ การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงและสมเหตุสมผล

Montgomery (2005) ได้กล่าวไว้ว่าวัตถุประสงค์ของการทดลองก็คือเพื่อที่จะศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการทำงานและกระบวนการของระบบ



ภาพที่ 14 แบบจำลองทั่วไปของระบบ

ที่มา: Montgomery (2005)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากภาพที่ 14 สามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการคือ การทำงานร่วมกันของเครื่องจักร คน และทรัพยากรณ์อื่นๆ $z_1, z_2, z_3, \ldots, z_q$ เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นในการออกแบบการทดลองจึงมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. หาตัวแปรที่มีผลต่อ y มากที่สุด

2. หาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อ y ที่ทำให้ได้ค่า y ตามที่ต้องการ

3. หาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อ y ที่ทำให้ได้ค่า y มีความแปรปรวนน้อยสุด

4. หาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อ y เพื่อให้ผลของตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้($z_1, z_2, z_3, \ldots, z_q$) ส่งผลกระทบต่อ y น้อยที่สุด

การทดลองแฟคทอเรียล

การทดลองแฟคทอเรียลเป็นการทดลองที่สนใจทำการศึกษาปัจจัยหลายปัจจัยพร้อมกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือต้องการศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction) เช่น กรณีที่ศึกษา 3 ปัจจัย คือปัจจัย A B และ C ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ผลกระทบหลักหรือผลกระทบปัจจัยเดี่ยว (Main Effects) คือ ผลกระทบกรณีที่สนใจพิจารณาปัจจัยเดี่ยวได้แก่ผลกระทบของปัจจัย A ผลกระทบของปัจจัย Bและผลกระทบของปัจจัย C

2. ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factors หรือ 2-ways Interaction) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันเป็นคู่ (ครั้งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัยร่วม (อันตรกิริยา) AB BC และ AC

3. ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three-Factors หรือ 3-ways Interaction) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยสามปัจจัยพร้อมกัน ในที่นี้ได้แก่ ผลกระทบร่วม ABC

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดยทั่วไปผู้ทดลองจะให้ความสำคัญแก่การศึกษา ผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยเท่านั้น เนื่องจากผลกระทบร่วมตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไปส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยมากจึงไม่นิยมนำมาพิจารณา

ตัวอย่างการทดลองแฟคทอเรียลของปัจจัย 3 ปัจจัย A B และ C โดยให้

i = 1,2,…,a คือ ระดับของปัจจัย A

j = 1,2,…,b คือ ระดับของปัจจัย B

k = 1,2,…,c คือ ระดับของปัจจัย C

l = 1,2,…,n คือ จำนวนซ้ำ

สมการตัวแบบของแหล่งความผันแปรต่อตัวแปรตอบสนอง คือ

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad .... (1)$$

โดยที่ Y คือ ค่าตัวแปรตอบสนองของการทดลอง

μ คือ ค่าเฉลี่ย

τ_i คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย A

β_j คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย B

γ_k คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย C

$(\tau\beta)_{ij}$ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ τ กับ β

$(\tau\gamma)_{ik}$ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ τ กับ γ

$(\beta\gamma)_{jk}$ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ β กับ γ

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ τ กับ β กับ γ

ε_{ijkl} คือ ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการทดลอง

การทดลองแฟคทอเรียลแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีหลัก คือ การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment) และการทดลองแบบแฟคตอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment)

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูป กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณหรือข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ สูง หรือ ต่ำ ของปัจจัยหนึ่ง ๆ หรือการ มี หรือ ไม่มี ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบไปด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times \ldots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

2. การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment)

Li and Nachtsheim (2000) ได้เสนอรูปแบบแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลกรณีพิจารณาแผนการทดลองที่มีจำนวนปัจจัย 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ปัจจัยโดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ และจำนวนรันเท่ากับ 8, 12 และ 16 เท่านั้น โดยนำหลักการ robust มาช่วยพิจารณาหารูปแบบแผนการทดลองที่เหมาะสมเพื่อที่จะนำมาพิจารณาการวางแผนการทดลอง ที่สามารถศึกษาอิทธิพลหลักของปัจจัย และอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย จำนวน g ปัจจัย แต่วิธีการของ William Li และ Christhopher J. Nachtsheim มีข้อจำกัดตรงที่ผู้ทดลองต้องทราบล่วงหน้าว่าต้องการศึกษาอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัยใด โดยที่อิทธิพลร่วมอื่นๆ ผู้ทดลองจะไม่ให้ความสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ผู้ทดลองส่วนใหญ่ไม่ต้องการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยร่วมทั้งหมดทุกๆ ปัจจัย แต่ต้องการศึกษาเพียงอิทธิพลหลักของปัจจัยทุกปัจจัย และอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัยบางปัจจัยเท่านั้น วิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ช่วยให้ได้แผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับหลายๆ สถานการณ์

Box and Hunter (2000) ได้เสนอบทความที่เกี่ยวกับการวางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน เป็นแผนการทดลองที่ศึกษาในกรณีของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล มีสิ่งทดลองหรือปัจจัยที่ต้องการศึกษาเพิ่มมากขึ้นจำนวนทรีทเมนต์คอมบิเนชันที่จะต้องใช้ในการทดลองย่อมเพิ่มจำนวนมากขึ้น การที่มีทรีทเมนต์คอมบิเนชันเป็นจำนวนมากย่อมทำให้เกิดปัญหาในการจัดหาหน่วยทดลองมาใช้ นอกจากนี้ยังเป็นการสิ้นเปลืองงบประมาณและเสียเวลาในการดำเนินการทดลองเป็นอย่างมาก การแก้ไขปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการทดลองเพียงบางส่วนของซ้ำ กล่าวคือ อาจทดลองเพียง 1/2 , 1/4 , 1/8 , ...ของจำนวนทรีทเมนต์คอมบิเนชันทั้งหมด

การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน คือ การทดลองที่ทำโดยลดรูปลงจากการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปในสัดส่วนของจำนวนระดับปัจจัย กล่าวคือการทดลอง $2^{k-p} = \frac{2^k}{2^p}$ เมื่อ p=1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จำนวนวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป $\frac{1}{2}(2^k)$ ของ k ปัจจัย และเมื่อ p = 2 จำนวนวิธีปฏิบัติทั้งหมดจะเท่ากับ $\frac{1}{4}(2^k)$ เป็นต้น กรณีการทดลองที่ 3 ระดับ 3^{k-p} ก็เช่นเดียวกันเมื่อ p = 1 จำนวนวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะเท่ากับ $\frac{1}{3}(3^k)$ เป็นต้น การทดลองนี้จะมีข้อเสีย คือ ไม่สามารถศึกษาผลกระทบหลักหรือผลกระทบร่วมได้ทุกกรณี เนื่องจากมีการเกิดโครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias Structure) ทำให้การตีความผลมีความซับซ้อนมากขึ้น แต่ก็เป็นที่นิยมเนื่องจากสามารถลดจำนวนการทดลองได้เป็นจำนวนมากอย่างมีนัยสำคัญ แผนการทดลองอยู่ในรูปของ Orthogonal Design ซึ่งทำให้ศึกษาได้ทั้งส่วนที่เป็นผลกระทบเชิงเส้นหรือผลกระทบหลักได้ทั้งหมดและผลกระทบร่วมที่ต้องการได้ตามที่ระบุไว้ซึ่งจะถูกกำหนดโดยค่า Resolution หรือ โดยการเลือก Generator และกำหนด Defining Relationship; I

กรณีศึกษา 2^{k-p} แฟคทอเรียลบางส่วน (p=1) การทดลองแบบครึ่งหนึ่งของการทดลองเต็มรูปจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

2.1 ส่วนของแผนเชิงบวกหรือแผนศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่เป็นจำนวนคี่ (Plus Design หรือ Odd Design) เป็นส่วนที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบปัจจัยหลักและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่เป็นจำนวนคี่ ได้แก่ ผลกระทบหลัก (A, B, C,…) ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (ABC, BCD, ACD,…) เป็นต้น

2.2 ส่วนแผนเชิงลบหรือแผนศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่เป็นจำนวนคู่ (Minus Design หรือ Even Design) เป็นส่วนการทดลองที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบปัจจัยร่วมของปัจจัยจำนวนคู่ เช่น ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย ได้แก่ ผลกระทบร่วม (AB, BC,…) ผลกระทบร่วม 4 ปัจจัย (ABCD, ACDE,…) เป็นต้น

โครงสร้างซ้ำซ้อนและรายละเอียดของแผนการทดลอง

ในกรณีศึกษา 2^{k-p} และ 3^{k-p} การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนโดยทั่วไปผู้ทดลองนิยมใช้ศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับทดลองเพื่อการคัดเลือกปัจจัยและศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับทดลองเพื่อต้องการศึกษาความสัมพันธ์กรณีกำลังสองซึ่งในการศึกษาแบบลดรูปนี้ จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการทดลอง เนื่องจากจะมีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมซ้ำซ้อนกันได้ โดยทั่วไปเรียกว่า โครงสร้างซ้ำซ้อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาโครงสร้างซ้ำซ้อนนั้นสามารถพิจารณาจากค่ารายละเอียดของแผนการทดลอง เป็นตัวช่วยกำหนดและช่วยในการเลือก I หรือ Generator ได้ และเป็นตัวบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมในการทดลอง โดยมีนิยามกำหนด ดังนี้

Design Resolution “R” คือ แผนการทดลองที่ผลกระทบระหว่าง p ปัจจัยจะไม่มีโครงสร้างซ้ำซ้อน ($\nrightarrow$) กับผลกระทบปัจจัยจำนวนน้อยกว่า k-p ปัจจัย ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของแผนการทดลองและความหมาย

รายละเอียดของแผนการทดลอง	P	R-p	ความหมาย
III	1	2	ผลกระทบหลักจะไม่ซ้ำซ้อนกันเองแต่จะซ้ำซ้อนกับโครงสร้างผลกระทบร่วม
	2	1	2 ปัจจัยและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยจะซ้ำซ้อนกันและกัน
IV	1	3	ผลกระทบหลักจะไม่ซ้ำซ้อนกันเองและจะไม่ซ้ำซ้อนกับโครงสร้างผลกระทบ
	2	2	ร่วม 2 ปัจจัยแต่ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยจะซ้ำซ้อนกันและกัน
	3	1	
V	1	4	ผลกระทบหลักจะไม่ซ้ำซ้อนกันเองและจะไม่ซ้ำซ้อนกับโครงสร้างผลกระทบ
	2	3	ร่วม 2 ปัจจัยและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยจะไม่ซ้ำซ้อนกันและกันแต่ผลกระทบ
	3	2	ร่วม 2 ปัจจัยจะซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากตารางที่ 1 สามารถสรุปได้ว่ากรณีที่ผู้ทดลองต้องการศึกษาผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย ควรใช้รายละเอียดของแผนการทดลอง III ขึ้นไป

ตารางที่ 2 แผนการทดลอง 2^{4-1} การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน

A	B	C	D(ABC)
+	+	+	+
+	+	-	-
+	-	+	-
+	-	-	+
-	+	+	-
-	+	-	+
-	-	+	+
-	-	-	-

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการทดลอง 2^{4-1} การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนใช้จำนวนการทดลอง 8 การทดลองซึ่งน้อยกว่า 2^4 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป เนื่องจากจำนวนชิ้นงานที่มีอยู่อย่างจำกัดในการทดลองเบื้องต้นจึงเลือกใช้การทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน โดยกำหนดให้ Design Generators D = ABC และ Alias Structure มีดังนี้

$A = A(ABCD) = A^2BCD = BCD$

$B = B(ABCD) = AB^2CD = ACD$

$C = C(ABCD) = ABC^2D = ABD$

$D = D(ABCD) = ABCD^2 = ABC$

$AB = AB(ABCD) = A^2B^2CD = CD$

$AC = AC(ABCD) = A^2BC^2D = BD$

$BC = BC(ABCD) = AB^2C^2D = AD$

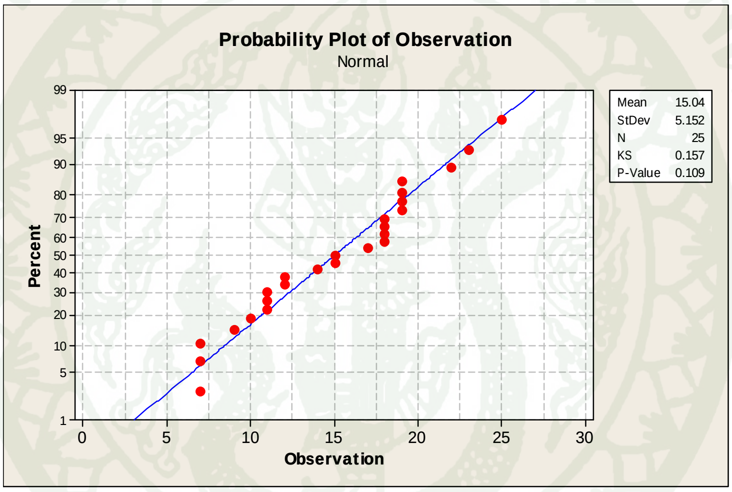
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในส่วนต่อไปจึงทำการเก็บข้อมูลค่าตอบสนอง ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และทำการวิเคราะห์ผลด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1. Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน

เป็นการตรวจสอบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ถ้ากราฟที่ได้ค่อนข้างเป็นเส้นตรงแสดงว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 15 Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อนที่มีการแจกแจงแบบปกติ

ที่มา: Montgomery (2005)

อาจจะทดสอบการกระจายแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อน โดยการตั้งสมมติฐานด้วยวิธีการของ Kolmogorov–Smirnov ดังนี้

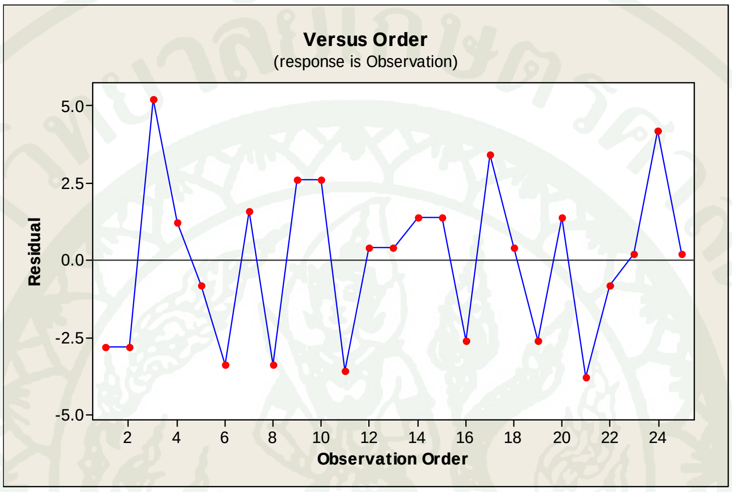
H_0: ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ
H_1: ค่าคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

จะปฏิเสธ H_0 เมื่อ p-value < α

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ(Independent) ของค่าคลาดเคลื่อน

เป็นการตรวจสอบว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระหรือไม่ โดยพิจารณาจากรูปแบบการกระจายของค่าคลาดเคลื่อน คือ ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวควรมีแนวโน้มที่มีการกระจายแบบสุ่มหรือมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน



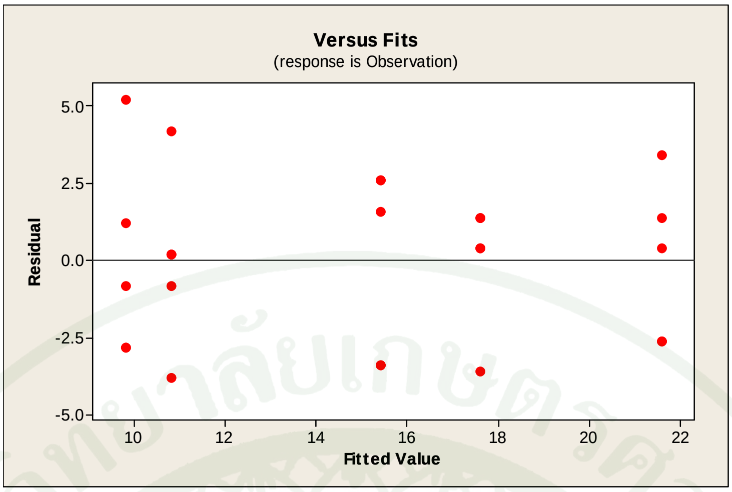
ภาพที่ 16 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูลที่มีความเป็นอิสระ

ที่มา: Montgomery (2005)

3. การตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 (Variance Stability)

เป็นการตรวจสอบโดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายของค่าคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าประมาณค่าตอบสนอง คือ ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวควรมีแนวโน้มที่มีการกระจายแบบสุ่ม ไม่ควรมีแนวโน้มของรูปทรงลักษณะลำโพงหรือกรวยปลายเปิด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 17 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณค่าตอบสนองที่มีความเสถียรของ σ^2

ที่มา: Montgomery (2005)

Cochran and Cox (1975) กล่าวว่า ถ้าสถิติทดสอบ F ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง จะเกิดผลกระทบทั้งระดับความมีนัยสำคัญ และความไวของการทดสอบ (sensitivity) ถ้าผู้วิจัยคิดว่าจะทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่ความจริงแล้วอาจเป็น 0.08

ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

Fisher and Mackenzie (1923) คิดวิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรมากกว่าสองกลุ่ม เรียกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance: ANOVA) โดยมีสมมติฐานการทดสอบว่า มีค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่นำมาทดสอบทุกกลุ่มไม่แตกต่างกัน

H_0: $\mu_1 = \mu_2 = \ldots = \mu_k$
H_1: มีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 2 ค่าที่แตกต่างกัน

Snedecor (1967) ได้ตั้งชื่อสถิติที่นำมาทดสอบนัยสำคัญในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ว่า สถิติทดสอบ (F-test) เพื่อเป็นเกียรติแก่ Fisher

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$F_0 = \frac{MS_{Factor}}{MS_E} \; ; V= (V_{Factor}, V_E) \quad \text{..........} \quad (2)$$

การทดสอบเป็นการทดสอบทางเดียวด้านบนบริเวณปฏิเสธ H_0 คือ $F_0 > F_{\alpha,(V)}$

ตารางที่ 3 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับกรณีศึกษา 2 ปัจจัยที่ a ระดับและ b ระดับ

แหล่งที่มา (Source)	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง MS = SS/d.f.	ค่าสถิติ F
A	a-1	SS_A	MS_A	$F_A = \frac{MS_A}{MSE}$
B	b-1	SS_B	MS_B	$F_B = \frac{MS_B}{MSE}$
AB	(a-1)(b-1)	SS_{AB}	MS_{AB}	$F_{AB} = \frac{MS_C}{MSE}$
ค่าผิดพลาด	ab(n-1)	SS_E	MSE	
ทั้งหมดที่ปรับแล้ว	N-1	SS_T		

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

เมื่อพิจารณาหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญโดยใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้วจึงนำปัจจัยที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด ซึ่งกราฟที่ใช้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) เป็นกราฟที่ใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยตัวแปลงตอบสนองในกรณีที่ปัจจัยหลักมีผลอย่างมีนัยสำคัญ (แกนตั้ง: ค่าเฉลี่ย แกนนอน: ปัจจัยที่สนใจ)โดยจะใช้กราฟนี้ในการพิจารณาหาจุดที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยหลักนั้นๆ

2. กราฟผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (Interaction Plot) เป็นกราฟที่ใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยตัวแปรตอบสนอง (แกนตั้ง: ค่าเฉลี่ย แกนนอน: ปัจจัยที่หนึ่ง และค่า label ในกราฟจะชี้ถึงระดับของปัจจัยที่ 2) และใช้ในการกำหนดจุดที่เหมาะสมสำหรับผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟไปทำการยืนยันผล และทำการทดลองต่อในส่วนการหาพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง

แผนการทดลองสำหรับการหาสมการพื้นผิวตอบสนองนั้น มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับกลุ่มของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองนั้นๆ และเพื่อหาเงื่อนไขของปัจจัยต่างๆ ในระบบที่ทำให้ได้ค่าของตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด วิธีการนี้ได้มีการเสนอแนะครั้งแรกโดย (Box and Wilson, 1951)

Vining and Myers (1990) กล่าวว่า Response Surface Methodology (RMS) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งในการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) มีทฤษฎีที่น่าสนใจและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยนำมาใช้ในการพัฒนางานด้านคุณภาพในการผลิตเพื่อหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตโดยทำการปรับปรุงเข้าหาจุดที่เหมาะสมเป็นขั้นๆ ซึ่งเทคนิคหรือวิธีการนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานได้หลายด้าน ซึ่งเทคนิคที่ได้รับความนิยมไดแก่ การทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Experiment) และ การทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Experiment)

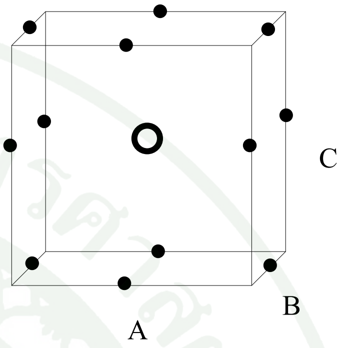
1. การทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Experiment)

เป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่มี 3 ระดับ โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการตัวแบบเมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ ซึ่งพัฒนาขึ้นมาโดย Box and Behnken (1960) โดยรวมการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่มี 2 ระดับผนวกกับจุดกึ่งกลางรวมเข้าไป แผนการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคนมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ 3^k การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป โดยที่ k คือจำนวนปัจจัย (Box and Behnken, 1960) ได้จัดทำตารางสำหรับแผนการทดลองเพื่อใช้กับปัจัยได้สูงสุดไม่เกิน 16 ปัจจัย (ไม่รวมกรณี 8 ปัจจัย) แผนการทดลองนี้ไม่มีการพิจารณาจุดมุม

แผนการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน มีลักษณะเกือบจะเป็น Orthogonal (จำนวนการทดลองแต่ละ combination ทำในจำนวนครั้งที่ไม่เท่ากัน โดยเฉพาะการทดลองที่ทำ ณ จุดศูนย์กลาง (Center points) ข้อดี คือมีค่ารายละเอียดของแผนการทดลองเท่ากับ IV ซึ่งทำให้สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสองและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย ข้อเสีย คือ จำนวนครั้งที่ทดลองมีจำนวนมากและไม่สามารถที่จะลดได้) แผนการทดลองนี้จะมีประสิทธิภาพด้อยกว่าการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต เมื่อจำนวนปัจจัยที่ศึกษามีจำนวนมากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

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



ภาพที่ 18 แสดงเมตริกซ์ของการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย

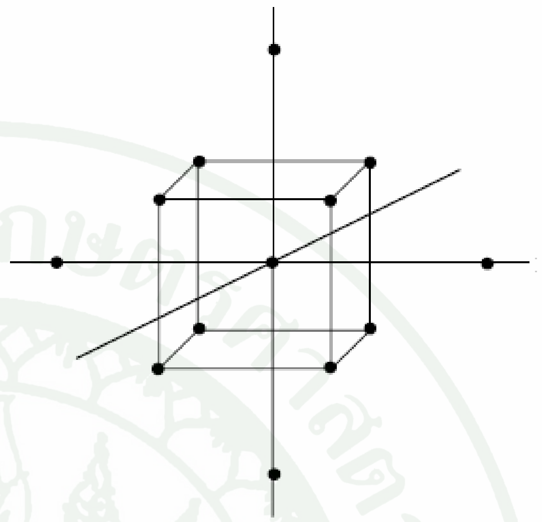
ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

2. การทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Experiment)

เป็นแผนการทดลองที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการศึกษาหรือสร้างตัวแบบโพลิโนเมียลดีกรี 2 จากงานวิจัยของ (Box and Drapper, 1987) พบว่าการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตมีความยืดหยุ่นในการใช้งานและมีประสิทธิภาพสูง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Run	A	B	C
1	-	-	-
2	-	-	+
3	-	+	-
4	-	+	+
5	+	0	-
6	+	0	+
7	+	0	-
8	+	0	+
9	0	-	-
10	0	+	+
11	0	-	-
12	0	+	+
13	0	0	0
14	0	0	0
15	α	0	0
16	$-\alpha$	0	0
17	0	α	0
18	0	$-\alpha$	0
19	0	0	α
20	0	0	$-\alpha$



ภาพที่ 19 แสดงเมตริกซ์ของการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

จากภาพที่ 18 และ 19 พบว่าการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย มีจำนวนการทดลอง 15 การทดลอง ในส่วนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตมีจำนวนการทดลอง 20 การทดลอง แสดงให้เห็นว่า การทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนมีจำนวนการทดลองน้อยกว่า เนื่องจากจำนวนชิ้นงานมีจำกัดในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์การถดถอย

1. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression)

การถดถอยแบบง่าย (ทรงศิริ, 2542) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว เท่านั้นโดยที่กำหนดให้ตัวแปรหนึ่งเป็นตัวแปรตามและอีกตัวแปรหนึ่งเป็นตัวแปรอิสระ รูปแบบการถดถอยแบบง่ายเป็นดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon \quad \text{.......... (3)}$$

2. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Linear Regression)

การถดถอยเชิงพหุเป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 3 ตัวขึ้นไป โดยตัวแปรตัวหนึ่งเป็นตัวแปรตาม ส่วนตัวแปรอื่นๆ ที่เหลือเป็นตัวแปรอิสระ หรือกล่าวง่ายๆ ได้อีกอย่างหนึ่ง คือ การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุนั้น เป็นการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งจะเขียนรูปแบบการถดถอยเชิงพหุเมื่อมีตัวแปรอิสระ k ตัวได้ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad \text{.......... (4)}$$

2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอยเชิงพหุ

เป็นการทดสอบว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ($\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_k$) มีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ ซึ่งถ้าพบว่ามีอย่างน้อย 1 ค่าที่ไม่เท่ากับ 0 แสดงว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบสนอง(Y) และเซตย่อยของปัจจัย $X_1, X_2, \ldots, X_k$

สมมติฐานในการทดสอบ (Hypothesis Test)

H_0: $\beta_0 = \beta_1 = \ldots = \beta_k = 0$
H_1: มีอย่างน้อย 1 ค่าที่ไม่เท่ากับ 0

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตัวสถิติทดสอบ $F = \frac{MSR}{MSE}$ .... (5)

ปฏิเสธ H_0 เมื่อ $F > F_{\alpha,(p-1,n-p)}$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองได้ในสัดส่วนเท่าใด ดังนั้นค่า R^2 ยิ่งมาก สมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก

$$R^2 = \frac{SS_{Regs}}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (6)$$

เนื่องจากค่า R^2 มีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือเมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการ ค่า R^2 จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จึงใช้ค่า R^2 ที่ทำการปรับแล้ว (R^2_{adj}) แทน

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{MSE}{MST}; \quad MST = \frac{SST}{n-1} \quad (7)$$

ซึ่งจะสามารถอธิบายสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองที่อธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในสมการถดถอยเช่นกัน ซึ่งถ้า R^2_{adj} มีค่ามากกว่า 64% (> 0.64) แสดงว่ารูปแบบสมการเหมาะสม

Lack of Fit Test

Lack of Fit Test (LOF) ใช้ทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยว่าเหมาะที่จะใช้ในการพยากรณ์หรือไม่ ในกรณีที่มีตัวแปรอิสระ(X) ซ้ำกันที่ให้ผลของตัวแปรตอบสนอง (Y) ที่แตกต่างกันหรือมีอย่างน้อย 1 ค่าของ x ที่ให้ค่า y ได้หลายค่า โดยมีสมมติฐานที่ใช้ทดสอบคือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

H_0 : สมการเหมาะสมแล้ว

H_1 : สมการขาดความเหมาะสม

โดยการทดสอบ LOF นี้จะทำการทดสอบโดยใช้ตัวสถิติ F

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอย

แหล่งที่มา (Source)	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS)	ค่าสถิติ (F)
Regression	p-1	$SS_{Regr} = \hat{\beta}' X' Y' - n\overline{y}^2$	MS_{Regr}	$F_1 = \frac{MS_{Regr}}{MSE}$
Error	n-p	SSE=SST-SSR	MSE	$F_2 = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}}$
LOF	m-p	$SS_{LOF} = SSE - SS_{PE}$	MS_{LOF}	
PE	n-m	$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_i}\left(y_{ij} - \overline{y_i}\right)^2$	MS_{PE}	
ทั้งหมดที่ปรับแล้ว	n-1	$SST = Y'Y - n\overline{y}^2$		

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

จากตารางที่ 4 สามารถทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับสมการตามลำดับได้ดังนี้

1. H_0: สมการถดถอยไม่สามารถสร้างได้

   H_1: สมการถดถอยสร้างได้

   ปฏิเสธ H_0 เมื่อ $F_1 > F_{\alpha,(p,n-p)}$

2. ทดสอบ LOF ซึ่งจะทำการทดสอบเมื่อสมมติฐานข้างต้น (1) ได้รับการปฏิเสธ นั้นคือสมการถดถอยสามารถสร้างได้ โดยทำการทดสอบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

H_0: สมการเหมาะสมแล้ว

H_1: สมการขาดความเหมาะสม

ปฏิเสธ H_0 เมื่อ $F_2 > F_{\alpha,(m-p, n-m)}$ จึงจะสามารถสรุปได้ว่าสมกรถดถอยมีความเหมาะสมแล้ว

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นวรัตน์ (2548) ได้ทำการศึกษากระบวนการเชื่อมวงจรซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งในการผลิตเซมิคอนดัคเตอร์เพื่อหาจุดเหมาะสมที่สุดของกระบวนการ โดยทำให้ค่าแรงเฉือนลูกบอลมีค่าสูงที่สุดภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ ปรับปรุงค่า C_{pk} ให้เพิ่มขึ้นและลดความผันแปรในกระบวนการผลิต โดยนำเอาหลักการทางสถิติต่างๆ เช่น การออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์การถดถอยและการควบคุมคุณภาพ มาประยุกต์ใช้ นอกจากนี้ยังทำการเปรียบผลของการออกแบบการทดลอง 2 วิธี ระหว่างแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพซิต (CCD) และวิธีการของทากูชิ จากผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยที่มีผลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ระยะเวลาในการสร้างลูกบอล แรงกดที่ใช้ในการสร้างลูกบอลและแรงขยี้ที่ใช้ในการสร้างลูกบอล และพบว่าแผนการทดลองทั้งเซ็นทรัลคอมโพซิต (CCD) และวิธีการของทากูชิสามารถเพิ่มค่าเฉลี่ยแรงเฉือนของลูกบอล ลดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเพิ่มค่า C_{pk} ได้ทั้งคู่ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีและอยู่ภายใต้ข้อกำหนด

สุนีย์ (2535) ได้นำหลักการวางแผนการทดลองและวิธีวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาตัวงานเซมิคอนดักเตอร์ ที่เกิดข้อบกพร่องคือ ลวดที่ทำการเชื่อมระหว่างตัววงจรกับขางานมีลักษณะขาดที่รอยเชื่อมและลักษณะลวดล้ม ในขั้นตอนของการปิดผนึกตัววงจรด้วยสารพลาสติก ซึ่งได้เลือกศึกษาปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย คือ แรงดันสารพลาสติกเมื่อสารพลาสติกไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์ ช่วงเวลาอัดสารพลาสติกด้วยแรงดันที่กำหนด ช่วงเวลาก่อนอัดสารพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ และอุณหภูมิสารพลาสติก โดยใช้ 2^4 แฟคทอเรียลที่ใช้แผนการทดลองสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ พบว่าแรงดันสารพลาสติกเมื่อสารพลาสติกไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์ ช่วงเวลาก่อนอัดสารพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ และอุณหภูมิสารพลาสติก เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการขาดและการล้มของเส้นลวดอย่างมีนัยสำคัญ จึงนำปัจจัยดังกล่าวไปทดลองต่อเพื่อหาระดับที่เหมาะสมด้วยแผนการทดลอง เซ็นทรัลคอมโพสิต และการวิเคราะห์คาโนนิคอล พบว่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดคือ แรงดันสารพลาสติกที่ระดับ 400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ช่วงเวลาก่อนอัดสารพลาสติกที่ระดับ 3 วินาที และอุณหภูมิสาร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พลาสติก 184 องศาฟาเรนไฮต์ โดยมีสัดส่วนการขาดของเส้นลวดเท่ากับ 0.07 ตัวงานต่อ 1 ล้านตัวงาน และมีสัดส่วนการขาดและการล้มของเส้นลวดเท่ากับ 33.567 ตัวงาน ต่อ 1 ล้านตัวงาน

อเนกพงศ์ (2546) ได้ทำการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง เพื่อศึกษาสภาวะของพารามิเตอร์ภายในเครื่องบัตกรีแบบอัตโนมัติ ที่จะทำให้เกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงานน้อยที่สุด จากผลการคัดปัจจัยออกโดยการใช้การออกแบบการทดลอง 2^{6-1} แฟคทอเรียลบางส่วน พบว่ามุมเอียงของรางเลื่อน แรงดันไฟฟ้าสร้างคลื่นชิป และแรงดันไฟฟ้าสร้างคลื่นแลมด้า มีอิทธิพลต่อการเกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ = 0.05 ส่วนภายในอุณหภูมิภายในอ่างส่วนผสมโลหะเหลว อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน และความเร็วในการเคลื่อนที่ของรางเลื่อนไม่มีนัยสำคัญต่อการเกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงาน เมื่อนำพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงานมาออกแบบและวิเคราะห์การทดลองอีกครั้ง จะได้คำตอบของสภาวะเหมาะสมที่ทำให้เกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงานน้อยที่สุดคือ แรงดันไฟฟ้าสร้างคลื่นชิปที่ 35.5 โวลท์ มุมเอียงของรางเลื่อนที่ 6.5 องศา และแรงดันไฟฟ้าสร้างคลื่นแลมด้าที่ 40 โวลท์ เมื่อนำผลการวิจัยมาใช้กับกระบวนการทำงานจริงพบว่า จำนวนจุดบกพร่องลดลง 76.75%

Boning and Mozumder (1993) ได้ทำการออกแบบการทดลองและนำเทคนิค Response Surface Methodology (RMS) เข้ามาปรับปรุงกระบวนการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า ผลปรากฏว่าสามารถทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตได้มากกว่า 94%

Dante *et al*. (2003) ได้ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงการไหลของพลังงาน PEM (Proteomic Exchange Membrane) โดยศึกษาปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ความดันไฮโดรเจน ความดันออกซิเจน อัตราการไหลของไฮโดรเจนและอัตราการไหลของออกซิเจน ซึ่งใช้การออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial Design (2^{4-1}) จากผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างความดันไฮโดรเจนและอัตราการไหลของไฮโดรเจน และพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการไหลของพลังงาน คือ ความดันไฮโดรเจนที่ 69 KPa ความดันออกซิเจนที่ 138 KPa อัตราการไหลของไฮโดรเจนที่ 4.1×10^{-5} m^3/s และปรับอัตราการไหลของออกวิเจนที่ 1.2×10^{-4} m^3/s

Gao and Wang (2009) ได้ทำการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมเพื่อลด warpage ในส่วนของการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองและ simulation analysis โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิในการหลอม เวลาในการฉีด เวลาในการบรรจุและความดันในการบรรจุ หลังทำการทดลองพบว่า warpage ในส่วนการขึ้นรูปลดลง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Karnachi and Khan (1996) ได้ทำการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเพื่อหาความเหมาะสมของการผสมส่วนประกอบซิลิกาสำหรับใช้ในโพลิเมอร์ โดยทำการศึกษาซิลิกาบริสุทธิ์ที่มีขนาดต่างกัน 6 ขนาด ได้ทำการทดลอง 54 การทดลอง วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Design Expert คอมบิเนชันที่เหมาะสมมี Correlation Coefficient เท่ากับ 0.95782

Ledolter (2002) ได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อการปรับปรุงคุณภาพการผลิตเส้นใยซึ่งเป็นวัสดุสิ่งทอ ซึ่งมุ่งเน้นที่คุณภาพความแข็งแรง (Strength) ของเส้นใยและความสามารถในการยืดขยาย (Elongation) ของเส้นใย โดยใช้การออกแบบการทดลอง 2^{10-5} Fractional Factorial Design ทีมีปัจจัยทั้งหมด 10 ปัจจัย ได้แบ่งออกเป็น 3 ปัจจัยหลัก คือ ส่วนประกอบของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ (เปอร์เซ็นต์เซลลูโลส อัตราส่วนของโซเดียม เปอร์เซ็นต์คาร์บอนซัลไฟต์ อุณหภูมิของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์) การแปลี่ยน Spin bath (H_2SO_4 Na_2SO_4 $ZnSO_4$ และอุณหภูมิ Spin bath) การปรับที่เครื่องจักร (Stretch speed และ Drawing) จากผลการวิจัยพบว่า Stretch speed มีผลต่อความแข็งแรงและค่าการยืดของเส้นใยได้มากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาของเส้นใยมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของเส้นใย

Leon and Cabrera (1997) นำการออกแบบการทดลองมาใช้ในการผลิต Electrical Igniter ในการทดลองได้ทำการเก็บข้อมูลการทดลองเพียงครึ่งหนึ่งของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล และจากการทดลองพบว่าอิทธิพลจากการขนส่ง Igniter ทางเรือเพื่อทำให้ตกผลึก (ซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้) และอุณหภูมิในการอบ มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของ Igniter มากกว่าอัตราการไหลของไนโตรเจน

Muthukuma *et al.* (2003) นำเอาการออกแบบการทดลองมาหาส่วนผสมซิลิกาที่ความเหมาะสมที่ใช้ใน Polymer โดยทำการศึกษาปัจจัยขนาด particle ของซิลิกาที่แตกต่างกัน 6 ขนาด และทำการทดลอง 54 การทดลองด้วยแผนการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน ใช้ Design Expert softwareในการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม โดยได้ค่า correlation coefficient = 0.95782

Pazur (2004) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตและสูตรการผลิตที่มีอิทธิพลต่อการเกิดเจล (Gel) ในการอัดรีดขึ้นรูปพีวีซี (PVC) ที่อ่อนตัวลงโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ พบว่าปัจจัยในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปพีวีซี (PVC) ที่อ่อนตัวที่ทำให้เกิดปัญหาเจล (Gel) ได้แก่ ลักษณะเม็ดพีวีซี (PVC) ความเร็วรอบสกรู อัตราส่วนการอัดแน่นสกรู และอุณหภูมิภายนอก รวมถึงการปนเปื้อนในขั้นตอนของการผสม Dry Blend และพีวีซีเรซิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Shad (2004) ได้นำการออกแบบการทดลอง (DOE) ไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดเรซิ่น (Plastic Injection Molding Process) ซึ่ง Shad ต้องการนำการออกแบบการทดลองเข้ามาแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดพลาสติก (Plastic Injection Molding) โดยการต้องลดระยะเวลาในการทำงานของกระบวนการ โดยเลือกปัจจัยทั้งหมด 6 ปัจจัยได้แก่ ความดันในการฉีดเรซิ่น(Injection Pressure) ความเร็วในการฉีดเรซิ่น (Injection Velocity) อุณหภูมิในการอบ(Cure Time) อุณหภูมิของแม่พิมพ์(Mold Temperature) อุณหภูมิการหลอมเหลวของเรซิ่น (Resin Melting Point Temperature) และจำนวนเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมของเรซิ่น (The Percentage of Regrind material to be used) โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน 2^k เพื่อคัดเลือกหาปัจจัยที่มีผลต่อระยะในการทำงานของกระบวนการซึ่งปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ จำนวนเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมของเรซิ่น ความดันในการฉีดเรซิ่น ความเร็วในการฉีดเรซิ่น และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ หลังจากนั้นจึงนำปัจจัยที่มีผลกระทบทั้งสี่ปัจจัยไปทำการหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยอีกครั้งซึ่ง Shad ได้สรุปว่าการออกแบบการทดลองสามารถเข้ามาแก้ไขปัญหาและลดระยะเวลาการทำงานของกระบวนการฉีดพลาสติกได้ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำ

Sheffer and Livine (1990) ได้กล่าวถึงงานวิจัยในอุตสาหกรรมการผลิตแผงวงจรไฟฟ้าโดยศึกษาความบกพร่องของเส้นลวดในขั้นตอนของการเชื่อมลวด และทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญทางสถิติจาก 5 ปัจจัยด้วยแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน

Siefried *et al.* (1992) กล่าวถึงการศึกษาการปรับปรุงศักยภาพของกระบวนการพ่นสี เพื่อทำให้ค่าความหนาของชั้นสีเข้าใกล้จุดเป้าหมาย โดยอาศัยการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีการทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยจะให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความหนาของชั้นสีเป็นตัวแปรตาม โดยค่าจุดเป้าหมายจะอยู่ที่บริเวณ 2 มิลลิเมตร ถึง 2.5 มิลลิเมตร โดยที่การทดลองครั้งแรก จะใช้การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment) ทำการตัดปัจจัยออกจากเดิม 6 ปัจจัย เหลือเพียง 4 ปัจจัย ทำการทดลองครั้งที่สองด้วยการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนและทำการทดลองครั้งที่สามด้วยการทดลอง 2^3 แฟคทอเรียล (Factorial Experiment) โดยกำหนดให้ปัจจัย D อยู่ที่ระดับต่ำ หลังทำการทดลองพบว่าระดับที่เหมาะสมของปัจจัย A B C และ D ที่ทำให้ผลลัพธ์เข้าใกล้จุดหมาย คือ (1, -2, 0, 1) และ (2, 0, 0, -1)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย

1. ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการของการติดวงจรและเชื่อมลวดแล้วและไม่มีข้อบกพร่อง พร้อมเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูป

2. สารประกอบพลาสติกชนิด Dark Green

3. เครื่องขึ้นรูป ชนิด GPEFT

4. เครื่อง Scanning Acoustical Tomography ที่ใช้ในการตรวจสอบปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงาน

5. เครื่องตรวจสอบปัญหาเส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอ SOFTEX SFX-100

6. กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการตรวจสอบปัญหาฟองอากาศขนาดเล็กและปัญหารอยด้านที่ผิวชิ้นงาน

7. โปรแกรม MINITAB เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

วิธีการ

เนื่องจากจุดประสงค์ในการวิจัยครั้งนี้ คือ เพื่อลดของเสียและปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย ซึ่งของเสียที่พบเกิดจากปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงานและได้ทำการศึกษาปัญหาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นต่อกระบวนการขึ้นรูปเพิ่มเติม เพื่อให้คลอบคลุมทั้งกระบวนการ ซึ่งได้แก่ ปัญหาขึ้นรูปไม่สมบูรณ์ ปัญหาเส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอมากกว่ากำหนด ปัญหาฟองอากาศที่ผิวชิ้นงาน และปัญหารอยด้านที่ผิวชิ้นงาน สร้างสมการถดถอยและหาระดับ

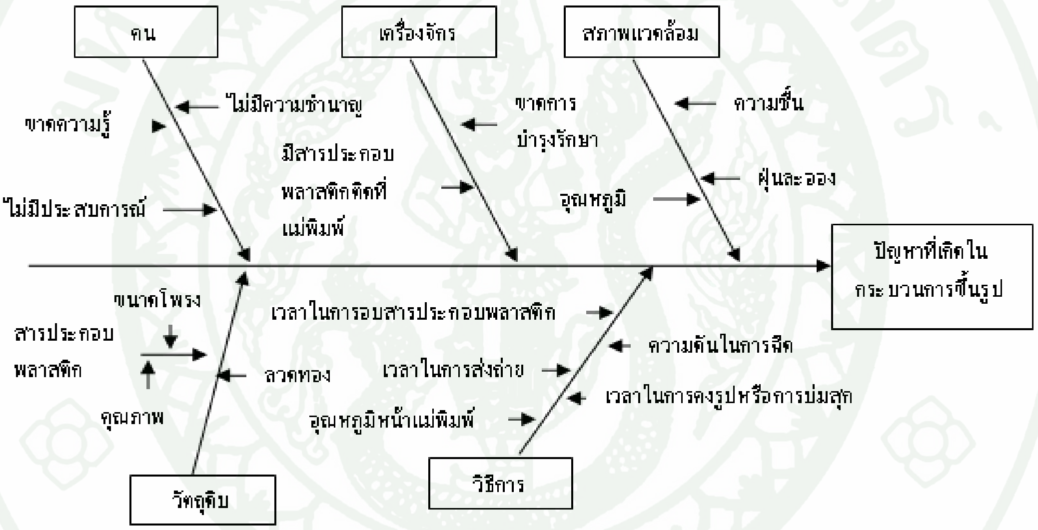
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้มีจำนวนชิ้นงานที่เกิดปัญหาน้อยที่สุด โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้

ศึกษากระบวนการผลิตรวมและกำหนดหัวข้อปัญหา

ทำการศึกษากระบวนการต่างๆ ในการผลิตเซมิคอนดักเตอร์และเลือกกระบวนการที่สนใจทำการศึกษา

ระบุปัญหาและศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการและผลิตภัณฑ์ที่สนใจ



ภาพที่ 20 แผนผังเหตุและผลจากสาเหตุของปัญหาที่เกิดในกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย

กำหนดตัวแปรหรือปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

1. ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) เป็นตัวแปรที่สนใจทำการศึกษา ซึ่งในที่นี้คือ

1.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานแทนด้วย y_1
1.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปไม่สมบูรณ์แทนด้วย y_2
1.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานเส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอแทนด้วย y_3
1.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ผิวชิ้นงานแทนด้วย y_4
1.5 ค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดรอยด้านที่ผิวชิ้นงานแทนด้วย y_5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากผลการทดลองเบื้องต้นปัญหาที่พบ คือ ปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงาน แต่ในส่วนปัญหาอื่นไม่พบ จึงทำการพิจารณาเฉพาะค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน (y_1) เท่านั้น

2. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Control Factors) เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าของตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้มาจากการระดมความคิดของผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการขึ้นรูปในที่นี้มีปัจจัยที่ทำการศึกษา 4 ปัจจัยดังนี้

2.1 เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก (Transfer time)

2.2 ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (Plunger pressure)

2.3 เวลาที่ใช้ในการคงรูปหรือการบ่มสุก (Cure time)

2.4 เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (Preheat time)

ออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลองแบบ 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน

ในขั้นตอนนี้เป็นการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายที่พิจารณาศึกษาจากค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน ค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปไม่สมบูรณ์ ค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอมากกว่าที่กำหนด ค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ผิวชิ้นงานและค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดรอยด้านที่ผิวชิ้นงาน

1. ออกแบบการทดลอง โดยแบ่งปัจจัยออกเป็นปัจจัยละ 2 ระดับคือ ระดับต่ำและสูง แต่ละระดับมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง แต่ละการทดลองใช้จำนวนตัวอย่าง 48 ตัวอย่าง ดังนั้นใช้จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 768 ตัวอย่างโดยมี Design Generators D = ABC

2. ทำการทดลองกับกระบวนการผลิตจริงตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้และทำการบันทึกข้อมูล

3. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อเป็นการยืนยันว่าข้อมูลที่เก็บมาได้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือและสามารถนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ได้จริง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย

5. นำปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายมาพล็อตกราฟแสดงอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมของปัจจัยเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ชิ้นงานมีปัญหาน้อยลง

6. นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้จริงในกระบวนการผลิต เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแผนการทดลอง 2^{k-p} แฟคทอเรียลบางส่วน

ออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน

ในขั้นตอนนี้เป็นการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย ภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ออกแบบการทดลองโดยนำปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายที่ได้จากการทดลองแบบ 2^{k-p} แฟคทอเรียลบางส่วน แบ่งแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษาออกเป็น 3 ระดับคือ ระดับต่ำ กลางและสูง แต่ละระดับมีรอบทำซ้ำ 2 ซ้ำ ศึกษาต่อโดยการทดลองแบบบ๊อกซ์- เบห์นเคน

2. ทำการทดลองกับกระบวนการผลิตจริงตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้และทำการบันทึกข้อมูล

3. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อเป็นการยืนยันว่าข้อมูลที่เก็บมาได้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือและสามารถนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ได้จริง

4. วิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย

5. ตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบ เพื่อเป็นการยืนยันว่าสมการถดถอยที่สร้างได้มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือและสามารถนำสมการถดถอยไปใช้ได้จริง

6. หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายที่ทำให้ชิ้นงานมีปัญหาน้อยที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

นำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแผนการทดลองบ๊อกซ์-เบห์นเคน ไปใช้จริงในกระบวนการผลิตวิเคราะห์ข้อมูลและคำนวณค่าสถิติต่างๆ

สรุปผลการทดลอง

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการยืนยันผล เพื่อทำการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

ผลการวิเคราะห์โดยใช้แผนการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยใช้แผนการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วนซึ่งมี 8 การทดลอง แต่ละการทดลองใช้จำนวนตัวอย่าง 48 ตัวอย่าง ประกอบไปด้วยปัจจัยควบคุม 4 ปัจจัย ซึ่งทำการศึกษาปัจจัยละ 2 ระดับ คือต่ำกับสูง แต่ละระดับมีการทำซ้ำ 2 ซ้ำ ใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 768 ตัวอย่าง Design Generators D = ABC และกำหนดให้ Alias Structure ดังนี้

A = BCD

B = ACD

C = ABD

D = ABC

AB = CD

AC = BD

BC = AD

A คือ เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก (วินาที)

B คือ ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)

C คือ เวลาที่ใช้ในการคงรูปหรือการบ่มสุก (วินาที)

D คือ เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (วินาที)

ซึ่งมีระดับของปัจจัยต่างๆ แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน

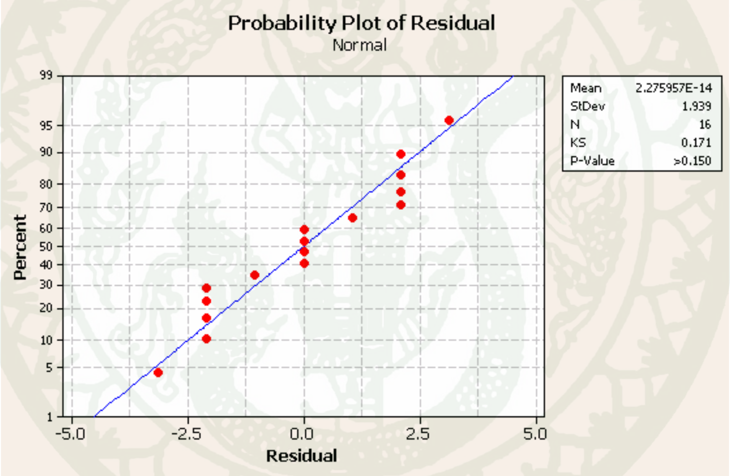
ปัจจัย	ระดับต่ำ	ระดับสูง
A	6	10
B	75	100
C	60	90
D	3	7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากผลการทดลองเบื้องต้นปัญหาที่พบ คือ ปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงาน แต่ในส่วนปัญหาอื่นไม่พบ จึงทำการพิจารณาเฉพาะค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานเท่านั้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางผนวกที่ ก1

1. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าคลาดเคลื่อน จากการพิจารณาการกระจายของค่าคลาดเคลื่อน ซึ่งใช้การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ และจากการทดสอบของ Kolmogorov - Smirnov



ภาพที่ 21 Normal Probability Plot สำหรับการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน

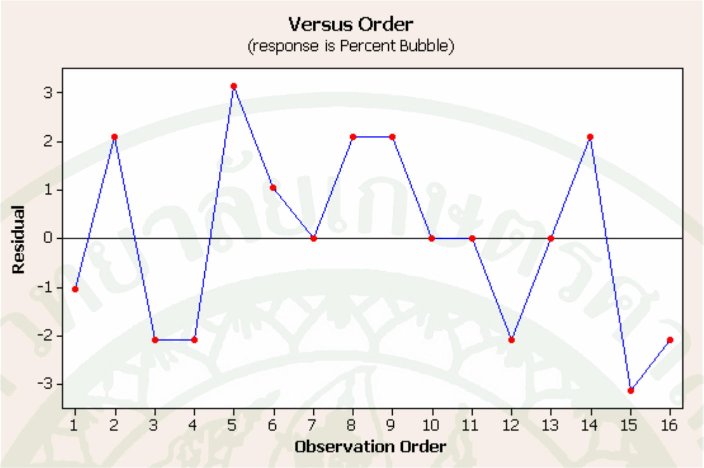
จากการทดสอบของ Kolmogorov – Smirnov โดยมีสมมติฐานคือ

H_0: ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ
H_1: ค่าคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เมื่อพิจารณาค่า P-Value ที่ได้มาจากภาพที่ 25 พบว่าค่า P-Value > 0.15 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

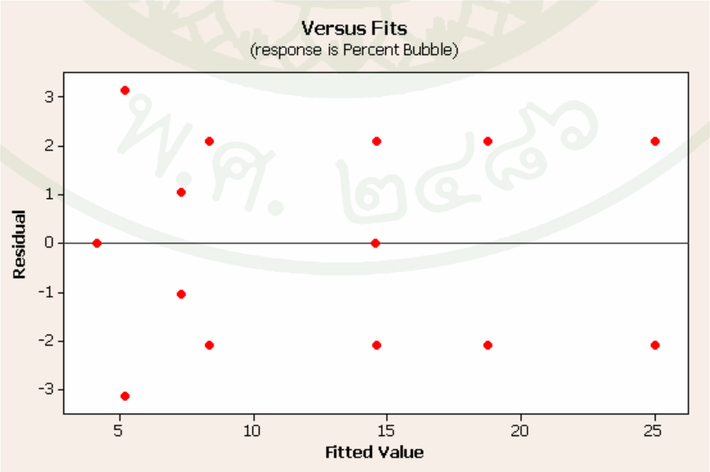
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าคลาดเคลื่อน โดยพิจารณาจากการกระจาย พบว่าการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน



ภาพที่ 22 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล สำหรับการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน

1.3 การตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 (Variance Stability) โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายของค่าคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าประมาณค่าตอบสนองพบว่า σ^2 ของค่าคลาดเคลื่อนเห็นได้ชัดเจนว่ามีความเสถียรอยู่ในระดับที่น่าพอใจ



ภาพที่ 23 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณค่าตอบสนอง สำหรับการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การกำหนดรูปแบบจำลอง ดังนี้

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + \lambda_l + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\tau\lambda)_{il} + \varepsilon_{ijkl}$$

โดย i = 1, 2

j = 1, 2

k = 1, 2

l = 1, 2

μ หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด (Overall Mean)

τ_i หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติกระดับที่ i

β_j หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติกระดับที่ j

γ_k หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการคงรูปหรือการบ่มสุกในระดับที่ k

λ_l หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติกในระดับที่ l

$(\tau\beta)_{ij}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก ระดับที่ i และปัจจัยความดันการฉีดสารประกอบพลาสติกระดับที่ j

$(\tau\gamma)_{ik}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก ระดับที่ i และปัจจัยเวลาที่ใช้ในการคงรูปหรือการบ่มสุกระดับที่ k

$(\tau\lambda)_{il}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก ระดับที่ i และปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติกระดับ l

ε_{ijkl} หมายถึง ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการทดลอง

โดยมีรูปแบบทั่วไปของสมมติฐานที่ทำการทดสอบ คือ

2.1 การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

H_0: ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน

H_1: ปัจจัยหลักมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วม

H_0: ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน

H_1: ปัจจัยร่วมมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน

ตารางที่ 6 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน

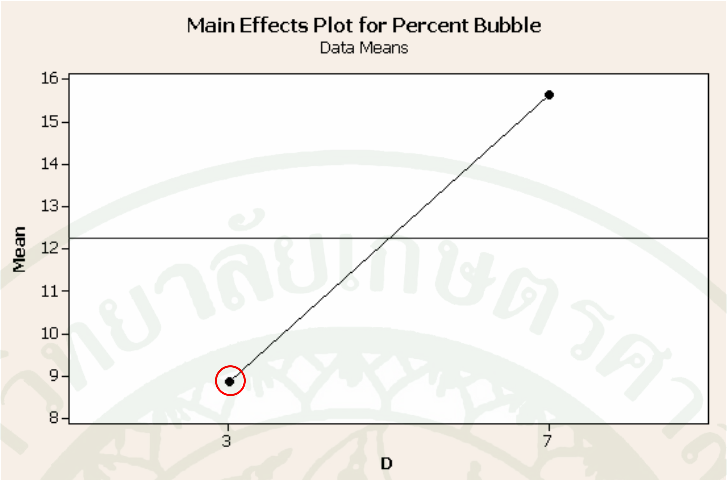
แหล่งความผันแปร	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS)	ค่าสถิติ F	ค่า P-Value
A	1	277.76	277.76	39.39	0
B	1	212.67	212.67	30.16	0.001
C	1	9.77	9.77	1.38	0.273
D	1	183.38	183.38	26.00	0.001
AB	1	53.18	53.18	7.54	0.025
AC	1	4.34	4.34	0.62	0.455
AD	1	0	0	0	1.000
ความคลาดเคลื่อน	8	56.42	7.05		
ทั้งหมด	15	797.52			

หมายเหตุ S= 2.65566 R^2 = 92.93% R^2 (adj) = 86.74%

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน ปัญหาที่พบ คือ ปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงาน แต่ในส่วนปัญหาอื่นไม่พบ ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน ดังตารางที่ 6 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แบ่งออกเป็นอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย โดยอิทธิพลหลักคือ เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (D) และอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยคือ เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติกและความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (AB) เมื่อนำปัจจัยดังกล่าว มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละระดับของปัจจัยและเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานได้ผลดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

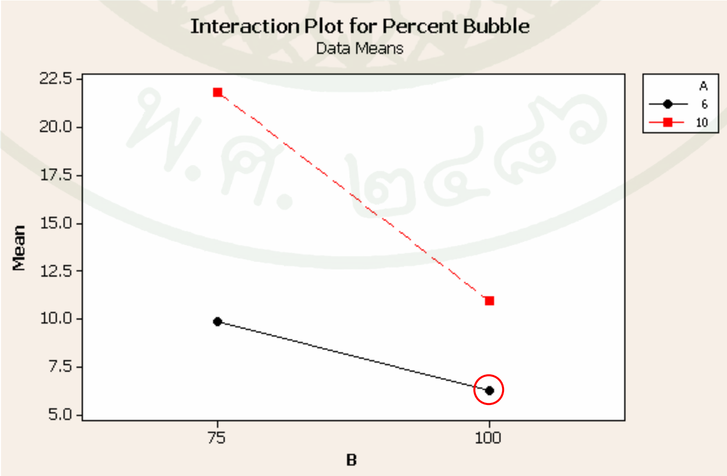
2.2.1 อิทธิพลหลัก



ภาพที่ 24 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (D)

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบสารพลาสติกในระดับที่ต่ำ คือ เวลาที่ใช้ในการอบสารพลาสติก = 3 วินาที จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานน้อยลง

2.2.2 อิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย



ภาพที่ 25 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติกและความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (AB)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติกในระดับที่ต่ำคือ เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก = 6 วินาที และ ค่าของปัจจัยความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติกในระดับที่สูงคือความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก = 100 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานน้อยลง

3. ยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการยืนยันผลโดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลอง 2^{4-1} การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน โดยทำการทดลองเก็บข้อมูลทั้งหมด 96 ตัวอย่าง ซึ่งพบจำนวนชิ้นงานที่เกิดปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงานลดลงจากเดิม แสดงดังตารางผนวก ง1

กำหนดให้

p_1 = สัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานก่อนทำการทดลอง
p_2 = สัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานหลังทำการทดลอง 2^{4-1} การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน

ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 % ($\alpha = 0.05$) ของสัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานก่อนทำการทดลอง คือ

$$0.114 < p_1 < 0.2194$$

นั้นคือ สัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานก่อนทำการทดลองจะอยู่ระหว่างร้อยละ 11.4 - 21.94 ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95%

ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 % ($\alpha = 0.05$) ของสัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานหลังทำการทดลอง 2^{4-1} การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน คือ

$$0.0141 < p_2 < 0.1109$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นั้นคือ สัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานหลังทำการทดลอง 2^{4-1} การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน จะอยู่ระหว่างร้อยละ 1.41 - 11.09 ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95%

ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 % ($\alpha = 0.05$) สำหรับความแตกต่างของสัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานก่อนและหลังทำการทดลอง 2^{4-1} การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน คือ

$$0.0326 < p_1 - p_2 < 0.1758$$

นั้นคือ สัดส่วนชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานก่อนทำการทดลองและหลังทำการทดลอง 2^{4-1} การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนจะอยู่ระหว่างร้อยละ 3.26 - 17.58 ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% และคิดเป็นเงินลดลง 337,996.8 - 1,822,694.4 บาท/ปี

ดังนั้นผู้ทดลองจึงทำการทดลองต่อไป โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน (Box Behnken Design)

ผลการวิเคราะห์โดยใช้แผนการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน

เนื่องจากผลการทดลองเบื้องต้นโดยใช้แผนการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วนและการวิเคราะห์กราฟอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมพบว่าควรตั้งค่าเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติกในระดับต่ำและความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติกในระดับที่สูงจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานน้อยลง ดังนั้นในการกำหนดระดับของการออกแบบการทดลองแบบบ๊อกซ์- เบห์นเคน จึงได้มีการกำหนดระดับของเวลาที่ใช้ในการคงรูปหรือการบ่มสุก (C) ที่ 60 วินาทีและปรับค่าระดับของปัจจัยอื่นๆ ให้ออกนอกช่วงที่เคยทำการทดลอง โดยพิจารณาผลที่ได้เมื่อทำการปรับค่าระดับของปัจจัยขึ้นลงซึ่งอาจทำให้เปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานน้อยลงแต่ทำให้พบของเสียอื่นๆ เช่น ปัญหาเส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอมากกว่าที่กำหนด เป็นต้น ดังนั้นผู้ทดลองจึงทำการเพิ่มลดค่าระดับของปัจจัยออกไปนอกช่วงเพียงเล็กน้อยดังตารางที่ 7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

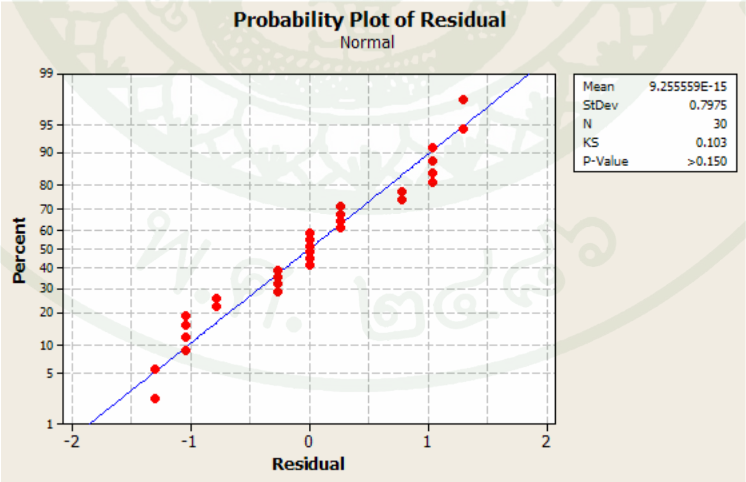
ตารางที่ 7 แสดงระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลองแบบบ๊อกซ์- เบห์นเคน

ปัจจัย	ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง
A	4	6	8
B	80	100	120
D	2	3	4

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แผนการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน แสดงดังตารางผนวกที่ ข1

1. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ ของค่าคลาดเคลื่อนจากการพิจารณาการกระจายของค่าคลาดเคลื่อน ซึ่งใช้การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ และจากการทดสอบของ Kolmogorov - Smirnov



ภาพที่ 26 Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

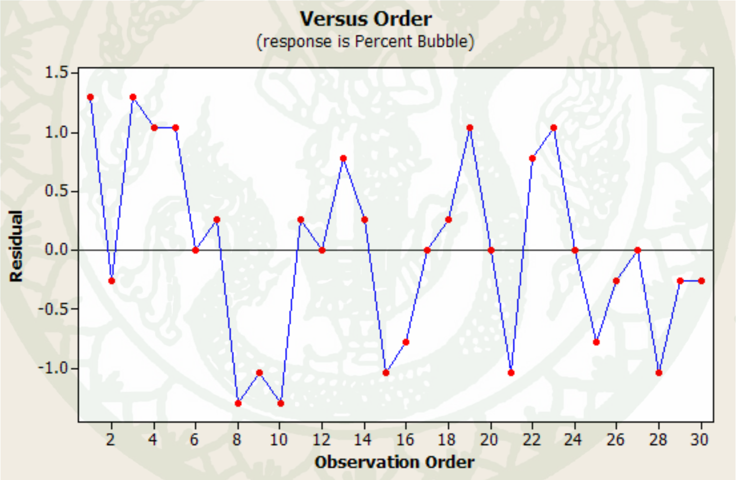
จากการทดสอบของ Kolmogorov - Smirnov โดยมีสมมติฐานคือ

H_0: ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ค่าคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เมื่อพิจารณาค่า P-Value ที่ได้มาจากภาพที่ 26 พบว่าค่า P-Value > 0.15 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

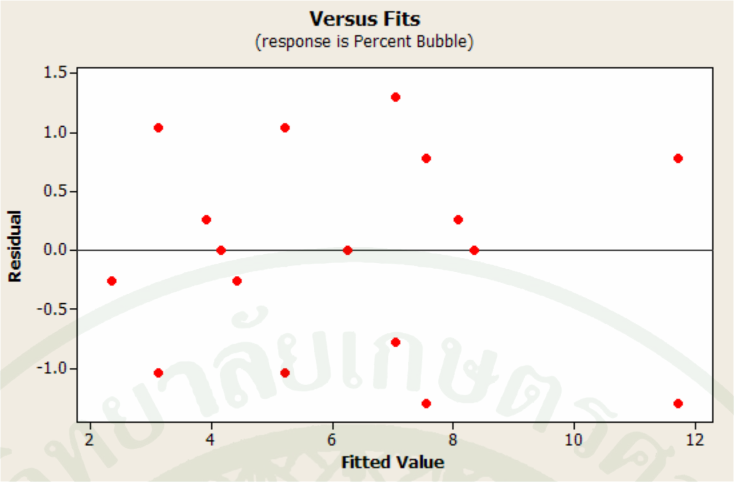
1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ ของค่าคลาดเคลื่อน โดยพิจารณาจากการกระจาย พบว่าการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน



ภาพที่ 27 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล สำหรับการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน

1.3 การตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายของค่าคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าประมาณค่าตอบสนองพบว่า σ^2 ของค่าคลาดเคลื่อนเห็นได้ชัดเจนว่ามีความเสถียรอยู่ในระดับที่น่าพอใจ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 28 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณค่าตอบสนอง สำหรับการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน

2. การวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวผลตอบสนอง

ตารางที่ 8 วิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวผลตอบสนองสำหรับการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณ β_i	ค่าสถิติ T	ค่า P-Value
Constant	41.7969	3.247	0.004
A	-2.3437	-1.610	0.123
B	-0.6901	-3.609	0.002
D	4.1667	1.431	0.168
AA	0.2930	3.316	0.003
BB	0.0029	3.316	0.003
DD	-0.9115	-2.579	0.018
AB	-0.0065	-0.767	0.452
AD	0.1302	0.767	0.452
BD	0.0130	0.767	0.452

จากตารางที่ 8 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(B) และพจน์กำลังสองของเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก (AA) พจน์กำลังสองของความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (BB) และพจน์กำลังสองของเวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (DD)

เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานจากการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน มาทำการวิเคราะห์การถดถอยต่อเพื่อสร้างสมการถดถอยและพยากรณ์ค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน ได้ผลดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับปัจจัยที่ศึกษา

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณ β_i	ค่าสถิติ T	ค่า P-Value
Constant	39.4531	3.967	0.001
A	-2.6042	-2.509	0.020
B	-0.6901	-4.006	0.001
D	6.2500	3.011	0.006
AA	0.2930	3.409	0.002
BB	0.0029	3.409	0.002
DD	-0.9115	-2.651	0.014

หมายเหตุ S= 0.934223 R^2 = 88.85% R^2 (adj) = 85.94%

จากตารางที่ 9 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก (A) ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (B) เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (D) พจน์กำลังสองของเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก (AA) พจน์กำลังสองของความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (BB) และพจน์กำลังสองของเวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (DD) และได้สมการถดถอยดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\hat{Y}_1 = 39.4531 - 2.6042A - 0.6901B + 6.2500\,D + 0.2930\,AA + 0.0029\,BB - 0.9115\,DD$$

โดยกำหนดให้

- เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก (A) มีค่าอยู่ระหว่าง 4 - 8 วินาที
- ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (B) มีค่าอยู่ระหว่าง 80 - 120 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร
- เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (D) มีค่าอยู่ระหว่าง 2 - 4 วินาที

ซึ่งมีค่า R^2 (adj) = 85.94 % หมายความว่าในความผันแปรของเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานทั้งหมด 100 % สมการถดถอยสามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 85.94 %

3. การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบ (Lack of Fit Test) มีสมมติฐาน ดังนี้

H_0 : สมการเหมาะสมแล้ว

H_1 : สมการขาดความเหมาะสม

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบความถดถอย

แหล่งความผันแปร	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง(MS)	อัตราส่วน F	ค่า P-Value
Regression	6	159.903	26.65051	30.54	0
Residual Error	23	20.074	0.87277		
Lack of Fit	6	2.713	0.45211	0.44	0.840
Pure Error	17	17.361	1.02124		
Total	29	179.977			

จากตารางที่ 10 จะเห็นได้ว่าค่า P-Value ของ Lack of Fit = 0.840 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 แสดงว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เหมาะสมแล้ว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ผลจากการใช้ Respone Optimizer ค่าที่ดีที่สุดในที่นี้คือ มีค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานเท่ากับ 1.8962 % และได้ค่าของปัจจัยต่างๆ ดังนี้คือ

เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก (A) คือ 4.5 วินาที
ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (B) คือ 120 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร
เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (D) คือ 2 วินาที

5. ยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการยืนยันผลโดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยแผนการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคนไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง โดยทำการทดลองเก็บข้อมูลทั้งหมด 192 ตัวอย่าง ซึ่งพบจำนวนชิ้นงานที่เกิดปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงานลดลงจากก่อนทำการทดลอง แสดงดังตารางผนวก ง2

กำหนดให้

p_1 = สัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานก่อนทำการทดลอง
p_3 = สัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานหลังทำการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน

ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 %($\alpha = 0.05$) ของสัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานหลังทำการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน คือ

$$0.0035 < p_3 < 0.0485$$

นั้นคือ สัดส่วนชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานหลังทำการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน จะอยู่ระหว่างร้อยละ 0.35 - 4.85 ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 % ($\alpha = 0.05$) สำหรับความแตกต่างของสัดส่วนของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานก่อนทำการทดลองและหลังทำการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน คือ

$$0.0834 < p_1 - p_3 < 0.1980$$

นั้นคือ สัดส่วนชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานก่อนทำการทดลองและหลังทำการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน จะอยู่ระหว่างร้อยละ 8.34 - 19.8 ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95 % และค่าใช้จ่ายลดลง 864,691.2 - 2,052,864 บาท/ปี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียและปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่าย ซึ่งของเสียที่พบเกิดจากปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงาน ซึ่งมีสัดส่วนของเสียอยู่ในช่วงร้อยละ 11.40-21.94 และในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาปัญหาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นต่อกระบวนการขึ้นรูปเพิ่มเติมเพื่อให้คลอบคลุมทั้งกระบวนการซึ่งได้แก่ ปัญหาขึ้นรูปไม่สมบูรณ์ ปัญหาเส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอมากกว่ากำหนด ปัญหาฟองอากาศที่ผิวชิ้นงาน และปัญหารอยด้านที่ผิวชิ้นงาน โดยตัวแปรผลตอบสนองที่สนใจทำการศึกษาในที่นี้คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน ค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปไม่สมบูรณ์ ค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เส้นลวดในตัวงานล้มหรือโค้งงอมากกว่าที่กำหนด ค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ผิวชิ้นงานและค่าเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่เกิดรอยด้านที่ผิวชิ้นงานโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกปัจจัยโดยแผนการทดลองแบบ 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วนจากการระดมความคิดระหว่างผู้ทำการวิจัยและผู้เชี่ยวชาญซึ่งเป็นวิศวกรแผนกการขึ้นรูป พบว่าปัจจัยที่นำมาศึกษามี 4 ปัจจัยคือเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก (A) ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (B) เวลาที่ใช้ในการคงรูปหรือบ่มสุก (C) เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (D) หลังทำการทดลองปัญหาที่พบ คือ ปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงาน แต่ในส่วนปัญหาอื่นไม่พบ ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานเท่านั้น จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในส่วนอิทธิพลหลักคือ เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (D) และอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย คือ เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติกและความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (AB) เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ จะได้ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ดังตารางที่ 11

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 11 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน

ปัจจัย	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม	
เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก	6	วินาที
ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก	100	กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร
เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก	3	วินาที

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงพบ สัดส่วนจำนวนชิ้นงานที่เกิดปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงานที่ช่วงร้อยละ 1.41 - 11.09 และลดลงจากก่อนทำการทดลองร้อยละ 3.26 - 17.58 ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากทางผู้ทำการวิจัยและผู้เชี่ยวชาญเห็นว่ายังสามารถลดสัดส่วนจำนวนชิ้นงานที่เกิดปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงานลงได้อีกจึงทำการทดลองต่อในส่วนของการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งจากผลการทดลองแบบ 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วนทำให้สามารถกำหนดปัจจัยที่นำมาศึกษาคือ เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก (A) ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (B) เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (D) จากการวิเคราะห์การถดถอยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก (A) ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (B) เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (D) พจน์กำลังสองของเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก (AA) พจน์กำลังสองของความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก (BB) พจน์กำลังสองของเวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก (DD) โดยมีรูปแบบสมการถดถอย คือ $\hat{Y}_1 = 39.4531 - 2.6042A - 0.6901B + 6.2500\ D + 0.2930\ AA + 0.0029\ BB - 0.9115\ DD$ โดยมีค่า R^2 (adj) = 85.94% และได้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีสุดดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน

ปัจจัย	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม	
เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก	4.5	วินาที
ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก	120	กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร
เวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติก	2	วินาที

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงพบ สัดส่วนจำนวนชิ้นงานที่เกิดปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงานที่ช่วงร้อยละ 0.35 – 4.85 และลดลงจากก่อนทำการทดลองร้อยละ 8.34 -19.8 ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95 % และค่าใช้จ่ายลดลง 864,691.2 -2,052,864 บาท/ปี

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเฉพาะในกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายเท่านั้น ซึ่งในกระบวนการผลิตจริงนั้น ยังมีกระบวนการอื่นที่ประสบปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของงานไม่ได้มาตรฐาน เช่น การเชื่อมลวดทองและการประทับตรา เป็นต้น ดังนั้นจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการอื่นๆ ที่เกิดปัญหาในลักษณะเช่นนี้ได้

2. เนื่องจากงานวิจัยในครั้งนี้ มุ่งเน้นที่จะศึกษาเฉพาะผลิตภัณฑ์ HTSSOP20 โดยใช้สารพลาสติก Dark Green ซึ่งทำการผลิตมากที่สุดในแผนก ดังนั้นจึงสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ ที่เกิดปัญหาในลักษณะเดียวกันได้

3. งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัย 4 ปัจจัยคือ เวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายสารประกอบพลาสติก ความดันในการฉีดสารประกอบพลาสติก เวลาที่ใช้ในการคงรูปหรือการบ่มสุกและเวลาที่ใช้ในการอบสารประกอบพลาสติกเท่านั้น แต่อาจจะมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบส่งถ่ายอีก เช่น อุณหภูมิแม่พิมพ์ เป็นต้น ดังนั้นจึงควรศึกษาอุณหภูมิแม่พิมพ์ด้วย

4. ควรทำความสะอาดและเคลือบหน้าแม่พิมพ์เมื่อถึงกำหนดคือ เมื่อทำการรันครบ 500 ชอร์ต ก่อนทำการรันในครั้งต่อไป เพราะสารเคลือบหน้าแม่พิมพ์อาจจะหมดแล้วก่อให้เกิดปัญหาต่อชิ้นงานได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

นวรัตน์ จันทร์กระเวน. 2548. **การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเฉือนลูกบอลในกระบวนการเชื่อมวงจร: กรณีศึกษา โรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. **การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง**. บริษัทสำนักพิมพ์ท้อปจำกัด, กรุงเทพฯ.

ทรงศิริ แต้สมบัติ. 2542. **การวิเคราะห์การถดถอย**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เทพวิทูรย์ ทองศรี และ วันดี ลือสายวงศ์. 2548. สารพิษต้องห้ามกับระเบียบ RoHS. **วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ** 53 (167): 3-7

สุนีย์ ชัยยุทธนาภรณ์. 2535. **การประยุกต์ใช้วิธีหาพื้นผิวตอบสนองในอุตสาหกรรมการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมเกียรติ ศุภเดช. 2545. **เซมิคอนดัคเตอร์ดีไวซ์**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2543. **เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 2**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

อเนกพงศ์ สุขมี. 2546. **การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบัดกรีแผ่นวงจรอิเล็คทรอนิคส์ด้วยกระบวนการใช้คลื่นน้ำโลหะเหลวโดยวิธีการออกแบบการทดลอง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

Boning, D.S. and P.K. Mozumder. 1993. DOE/Opt: A system for design of experiments, response surface modeling, and optimization using process and device simulation. **IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing** 7: 233-244.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Box, G. E. P. and D. W. Behnken. 1960. Some new thee level designs for the study of quantitative variables. **Technometrics** 2: 455-476.

_______ and J. S. Hunter. 2000. The 2^{k-p} Fractional Factorial Designs Part I. **Technometrics** 42: 28-43.

_______ and R. D. Norman. 1987. **Empirical Model-Building and Response Surfaces**. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Cochran, W.G. and G.M.Cox. 1957. **Experimental Designs**. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Dante, C. R. E., L. J. Madrigal, V. Theuss, T. Solorza, Omar and R. Ruben. 2003. Fractional factorial of experiments for PEM fuel cell performances improvement. **Journal of hydrogen Energy** 28: 343-348.

Fisher, R. A. and W. A. Mackenzie. 1923. Studies in crop variation II. The manorial response of different potato varieties. **Journal of Agricultural Science** 13: 311-320.

Gao, Y. and X. Wang. 2009. Surrogate-based process optimization for reducing warpage in injection molding. **Journal of Materials Processing Technology** 209: 1302-1309

Karnachi, A. A. and M. A. Khan. 1996. Box-behnken design for the optimization of formulation variables of indomethacin coprecipitates with polymer mixtures. **Journal of Pharmaceutics** 131: 9-17.

Ledolter, J. 2002. A case study in design of experiment: Improving the manufacture of viscose fiber. **Quality Engineering** 15: 311-322.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Leon, N. A. and F. M. Cabrera. 1997. Improvement of igniter quality characteristic using experiment design. **Computers ind. Engng** 33: 145-148.

Montgomery, D. C. 2005. **Design and Analysis of Experiments.** 6th ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Muthukumar, M., D. Mohan and M. Rajendran. 2003. Optimization of mix proportions of mineral aggregates using box behnken design of experiments. **Cement & Concrete Composites** 25: 751-758

Pazur, A. S. 2004. Processing and formulation effects on gel levels in flexible PVC extrusions. **Journal of Vinyl and Additive Technology** 3: 126-131.

Shad, D. 2004. An application of design of experiments for optimization of plastic injection molding processes. **Journal of Manufacturing Technology Management** 15: 445-454.

Sheffer, M. and L. Levine. 1990. How to optimize and control the wire bonding process : Part I. **Solid State Technology** 53: 119-122

Siefried, E. 1992. Achieving a target value for a manufacturing process: A case study. **Journal of Quality Technology** 24: 22-26.

Snedecor, G. W. and W. G. Cochran. 1967. **Statistical Methods**. The lowa State University Press, lowa.

Vining, G. G. and R. H. Myers. 1990. Combining taguchi and response surface philosophi a dual reponse approach. **Journal of Quality Technology** 22: 38-45.

William, Li. and J. N. Christopher. 2000. Model-robust factorial designs. **Technometrics** 42: 345-352.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

แสดงข้อมูลสำหรับคัดเลือกปัจจัยด้วยแผนการทดลองแบบ 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลการออกแบบการทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน (ทำซ้ำ 2 รอบ)

ลำดับการ	ปัจจัย						Percent
ทดลอง	A	B	C	D	Bubble	Total	Bubble
1	10	100	60	3	3	48	6.25
2	10	75	60	7	13	48	27.083
3	10	75	90	3	8	48	16.667
4	10	75	60	7	11	48	22.917
5	6	75	60	3	4	48	8.333
6	10	100	60	3	4	48	8.333
7	6	100	90	3	2	48	4.167
8	10	75	90	3	10	48	20.833
9	6	100	60	7	5	48	10.417
10	10	100	90	7	7	48	14.583
11	10	100	90	7	7	48	14.583
12	6	75	90	7	6	48	12.5
13	6	100	90	3	2	48	4.167
14	6	75	90	7	8	48	16.667
15	6	75	60	3	1	48	2.083
16	6	100	60	7	3	48	6.25

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

แสดงข้อมูลสำหรับหาระดับที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการทดลองบ๊อกซ์- เบห์นเคน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลการออกแบบการทดลองบ๊อกซ์- เบห์นเคน (ทำซ้ำ 2 รอบ)

ลำดับการ	ปัจจัย					
ทดลอง	A	B	D	Bubble	Total	Percent Bubble
1	8	120	3	4	48	8.333
2	6	120	2	1	48	2.083
3	6	80	2	4	48	8.333
4	6	100	3	3	48	6.25
5	6	100	3	3	48	6.25
6	8	100	4	4	48	8.333
7	6	80	4	4	48	8.333
8	8	80	3	5	48	10.417
9	6	100	3	2	48	4.167
10	4	80	3	3	48	6.25
11	4	120	3	2	48	4.167
12	8	100	2	3	48	6.25
13	8	80	3	6	48	12.5
14	4	120	3	2	48	4.167
15	6	100	3	2	48	4.167
16	8	120	3	3	48	6.25
17	8	100	2	3	48	6.25
18	6	80	4	4	48	8.333
19	6	100	3	3	48	6.25
20	4	100	4	2	48	4.167
21	6	100	3	2	48	4.167
22	4	80	3	4	48	8.333
23	4	100	2	2	48	4.167
24	4	100	4	2	48	4.167
25	6	80	2	3	48	6.25
26	6	120	4	2	48	4.167

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

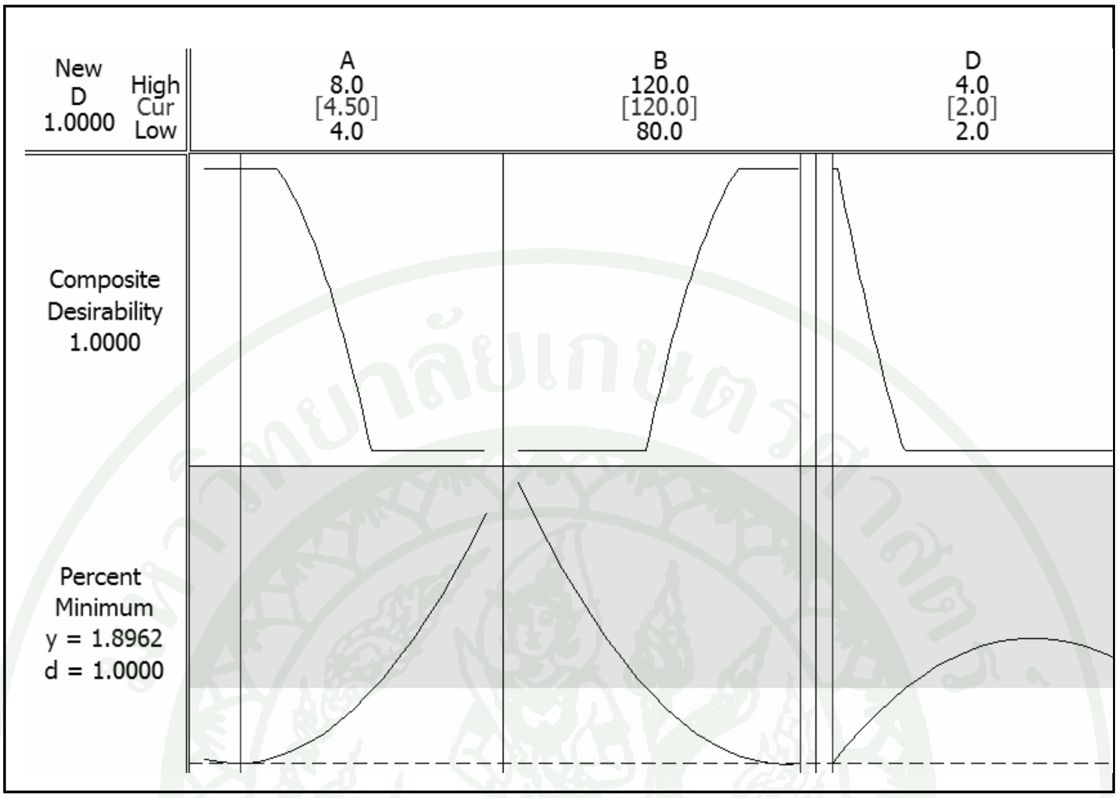
ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			Bubble	Total	Percent Bubble
	A	B	D			
27	8	100	4	4	48	8.333
28	4	100	2	1	48	2.083
29	6	120	4	2	48	4.167
30	6	120	2	1	48	2.083

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับหาระดับที่เหมาะสมด้วย Response Optimizer

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ค1 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับหาระดับที่เหมาะสม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ง

แสดงข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง1 ข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์การทดลอง 2^{4-1} แฟคทอเรียลบางส่วน

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			จำนวนตัวอย่าง	จำนวนชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน
	A	B	D		
1	6	100	3	48	3
2	6	100	3	48	3

ตารางผนวกที่ ง2 ข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์การทดลองบ๊อกซ์-เบห์นเคน

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			จำนวนตัวอย่าง	จำนวนชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน
	A	B	D		
1	4.5	120	2	48	1
2	4.5	120	2	48	2
3	4.5	120	2	48	1
4	4.5	120	2	48	1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ นายอภิสิทธิ์ มีพัฒน์

เกิดวันที่ 23 เมษายน 2528

สถานที่เกิด จังหวัดลพบุรี

ประวัติการศึกษา วท.บ. (สถิติ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตำแหน่งปัจจุบัน —

สถานที่ทำงานปัจจุบัน —

ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ —

ทุนการศึกษาที่ได้รับ ได้รับทุนผู้ช่วยสอนจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2552)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์