

การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ชนิดมีชา



นางสาววัลภา เตชะสุข

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MOLDING PROCESS IMPROVEMENT IN PERIPHERAL SEMICONDUCTOR INDUSTRY



MISS WALLAPA TECHASUK

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

521130

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรม
เซมิคอนดักเตอร์ชนิดมีชา

โดย

นางสาววัลภา เตชะสุข

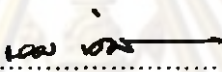
สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

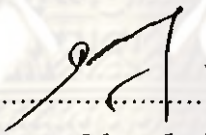
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

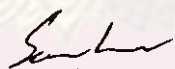
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

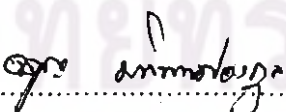

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนรินทร์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ จรุง มณีธาทองกุล)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัลภา เตชะสุข : การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ชนิดมีชา. (MOLDING PROCESS IMPROVEMENT IN PERIPHERAL SEMICONDUCTOR INDUSTRY) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ, 91 หน้า.

เซมิคอนดักเตอร์ (สารกึ่งตัวนำ) คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน เป็นวัสดุที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกศึกษาและแก้ไขงานมีชา (Peripheral) เนื่องจากพบปัญหาในกระบวนการขึ้นรูป (Mold process) ซึ่งทำให้เกิดงานเสียที่เรียกว่าเส้นทองสัมผัสกัน หรือ ระยะห่างระหว่างเส้นทองแต่ละเส้นใกล้กันเกินกว่าที่ข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์กำหนดไว้ คือ เส้นทองแต่ละเส้นต้องห่างกันมากกว่าหรือเท่ากับ 23 ไมครอน โดยงานวิจัยนี้ได้ระบุปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อการเกิดปัญหาโดยใช้แผนภูมิแกงปลา ซึ่งจากแผนภูมิตั้งกล่าวผู้วิจัยได้เลือกปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดปัญหา คือ เวลาฉีดเรซิน, เวลาให้ความร้อนเรซินและแรงฉีดเรซิน

งานวิจัยนี้ได้นำหลักการออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design: CCD) มาใช้ร่วมกับหลักการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 3 ที่มีผลให้เส้นทองที่อยู่ติดกันมีระยะห่างมากที่สุด ผลการทดลองพบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เส้นทองอยู่ห่างกันมากที่สุด คือ ที่ เวลาฉีดเรซิน 13 วินาที เวลาให้ความร้อนแก่เรซิน 9 วินาที และ แรงฉีดเรซิน 1.7 ดัน ซึ่งจะได้ค่าระยะห่างของเส้นทองเฉลี่ย 49.38 ไมครอน หลังจากการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์แล้ว ไม่พบงานที่มีเส้นทองสัมผัสกัน หรือใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อนิสิต.....วัลภา เตชะสุข.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2552.....

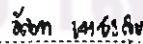
5071514321 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING


KEYWORDS : MOLD PROCESS / INJECTION TIME / TABLET PREHEATING TIME /
INJECTION PRESSURE / CENTRAL COMPOSITE DESIGN / RESPONSE SURFACE
ANALYSIS.

WALLAPA TECHASUK : MOLDING PROCESS IMPROVEMENT IN
PERIPHERAL SEMICONDUCTOR INDUSTRY. THESIS ADVISOR :
ASST.PROF.SOMKIAT TANGJITSITCHARON,D.Eng, 91 pp.

Semiconductor is the material that has properties of conductive stay between the conductor and the electric insulator. It is the main part of electrical appliances. This research was to study and solve the problem in peripheral product at the mold process. The problem of the wire touch or the gap between 2 gold wires was less than the standard rule of the product. The gap between gold wires must be wider than 23 micrometer. This research defined the potential factors of the wire touch or gap between the gold wires by utilizing the fish bone diagram. There were 3 factors which were considered to be the main factors of the problem. Those factor were the injection time, the tablet preheat time and the injection pressure.

Central Composite Design (CCD) was employed with the response surface analysis to explore the appropriate parameters which affected the maximum gap of the gold wires. The experimental result showed that the suitable parameters of the mold machine of the wire touch problem were the injection time of 13 sec , the tablet preheat time of 9 sec and the injection force of 1.7 ton, which result in the maximum wire gap of 49 micrometer. We had no problem of the wire touch or gap between gold wires less than 23 micrometer after implemented these factors.

Department : Industrial Engineering Student's Signature 

Field of Study : Industrial Engineering Advisor's Signature 

Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ และ รองศาสตราจารย์ จรูญ มหิทธิภาพองกุล กรรมการสอบ ที่กรุณาให้คำแนะนำข้อเสนอแนะสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านผู้ประสาขาวิชาแก่ผู้วิจัยให้ได้รับความรู้และมีความสามารถในการศึกษาและขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้ทุกสิ่งทุกอย่างแก่ผู้วิจัย ทั้งกำลังใจตลอดการศึกษา จนสำเร็จเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ศูนย์วิทย์ทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	10
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	11
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	12
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	13
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกลศาสตร์ของไหล.....	14
2.2 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนภูมิแกงปลา.....	19
2.3 การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม.....	20
2.4 แนวทางการออกแบบการทดลอง.....	22
2.5 การเลือกแบบการทดลอง.....	24
2.6 พื้นผิวผลตอบ.....	29
2.7 การวิเคราะห์ผล.....	43
2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	51
3.1 การแบ่งส่วนการวิจัย.....	51
3.2 การกำหนดปัจจัย ระดับปัจจัย.....	51
3.3 การออกแบบการทดลอง.....	55

บทที่	หน้า
3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	57
3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	59
3.6 การตรวจสอบคุณภาพด้วยกล้องไมโครสโคป.....	60
3.7 การตรวจสอบคุณสมบัติของเส้นทองด้วยเครื่อง X-ray.....	61
3.8 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	61
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	63
4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	63
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการวิเคราะห์ค่า P.....	67
4.3 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง.....	69
4.4 การหาสภาวะที่เหมาะสม.....	70
4.5 การทดสอบเพื่อยืนยันผล.....	71
4.6 การทดสอบความสัมพันธ์ที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง.....	72
4.7 การทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่.....	75
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	80
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	85
ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรมสำเร็จรูปต่างๆที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป.....	86
ภาคผนวก ข. ตารางค่าวิกฤตของการแจกแจงที.....	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	91

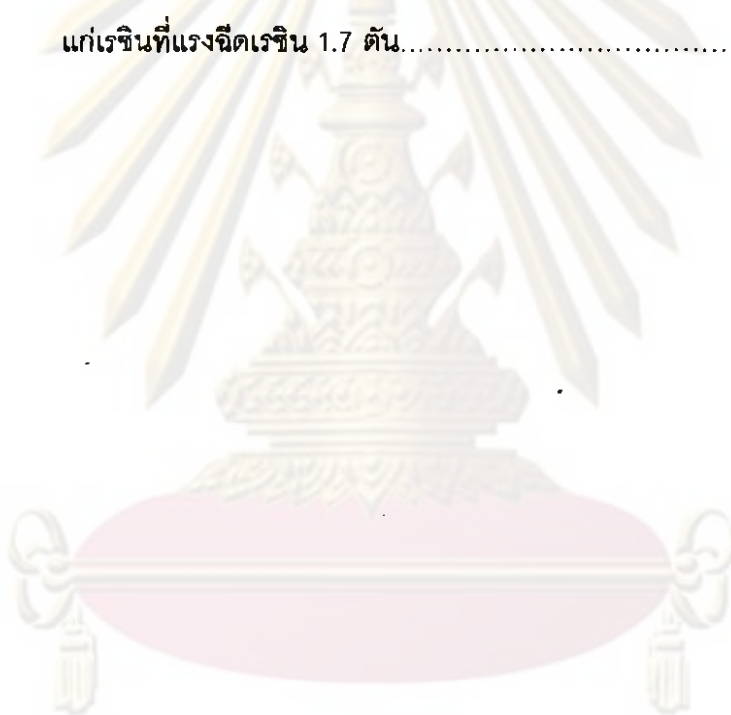
ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	แสดงส่วนประกอบหลักของเซมิคอนดักเตอร์.....	1
1.2	Wafer ซึ่งเมื่อตัดแล้วจะเรียกว่าชิพ (Chip)	2
1.3	เส้นทอง (Gold wire)	2
1.4	เรซิน (Resin)	3
1.5	งานเซมิคอนดักเตอร์ที่ทำการผลิตเรียบร้อยแล้ว.....	5
1.6	แผนภูมิพาเรโตแสดงปริมาณของปัญหาที่เกิดกับงานมีชา.....	5
1.7	แผนภูมิพาเรโตแสดงปริมาณปัญหาหลักที่พบในกระบวนการขึ้นรูป.....	6
1.8	แผนภาพก้างปลาของปัญหาการเกิดเส้นทองสัมผัสกันและใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน.....	7
2.1	ความหนืดสัมบูรณ์ μ ของของไหล.....	15
2.2	ความหนืดคิเนมาติก γ ของของไหล.....	16
2.3	ของไหลระหว่างเฟลต.....	16
2.4	Stream tube.....	19
2.5	แสดงแบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ.....	21
2.6	การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย (ไม่มีอันตรกิริยา)	26
2.7	การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย (มีอันตรกิริยา)	26
2.8	พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ.....	30
2.9	การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ $k=2$ และ $k=3$	34
2.10	การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับสามตัวแปร.....	38
2.11	การออกแบบ Face-Centered ส่วนประสมกลาง สำหรับ $k=3$	39
3.1	แสดงความสัมพันธ์ของความหนืด และเวลา.....	52
3.2	ภาพแสดงการอธิบายการทดลองแบบ CCD.....	55
3.3	เครื่องขึ้นรูป.....	57
3.4	แม่พิมพ์.....	57
3.5	เครื่องเอกซเรย์.....	58
3.6	กล้องไมโครสโคป.....	58
3.7	เทอร์โมมิเตอร์.....	59

ภาพที่		หน้า
4.1	Normal Probability Plot ของข้อมูลค่าระยะห่างของเส้นทอง.....	65
4.2	ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลค่าระยะห่างของเส้นทองกับลำดับการ ทดลอง.....	66
4.3	ค่า Residual กับ Fit value ของข้อมูลค่าระยะห่างของเส้นทอง.....	67
4.4	กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย.....	70
5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเส้นทอง และแรงจืดที่ 1.7 ตัน.....	81
5.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการจืดเรซินและเวลาในการให้ความร้อน แก่เรซินที่แรงจืดเรซิน 1.7 ตัน.....	81



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าของ code level ใน Central composite design (2 ปัจจัย) $\alpha=1.414$	34
2.2	ค่าของ code level ใน Central composite design (3 ปัจจัย) $\alpha=1.682$	35
2.3	การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนแบบสามตัวแปร.....	38
2.4	การออกแบบส่วนประสมกลาง ที่สามารถหมุดได้หรือเกือบหมุนได้ที่มีบล็อกแบบเชิงตั้งฉาก.....	41
2.5	ตารางแสดงการทดสอบแบบจับคู่.....	47
3.1	สรุประดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์.....	55
3.2	ตารางแสดงลำดับการทดลองและค่าของปัจจัยในการทดลอง.....	56
3.3	ตารางแสดงปัจจัยที่พิดในงานวิจัย.....	60
4.1	ตารางแสดงผลการทดลองกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์.....	63
4.2	ตารางแสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จากระยะห่างของเส้นทอง.....	68
4.3	ตารางแสดงสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง.....	69
4.4	สภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง.....	71
4.5	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์.....	71
4.6	ตารางเปรียบเทียบค่าระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่าระยะห่างของเส้นทองที่วัดได้จากเครื่อง X-ray.....	72
4.7	ตารางแสดงผลต่างระหว่างผลการทดลองและสมการ.....	75
4.8	แสดงผลการวิเคราะห์ Pair t-Test ระหว่างผลการทดลองและสมการ.....	77
4.9	ตารางแสดงผลต่างระหว่างการทดลองครั้งแรกและครั้งที่สอง.....	78
4.10	แสดงผลการวิเคราะห์ Pair t-Test ระหว่างการทดลองครั้งแรกและครั้งที่สอง.....	79

บทที่ 1

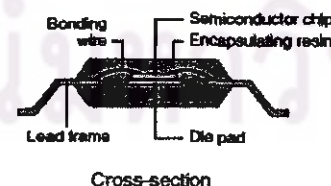
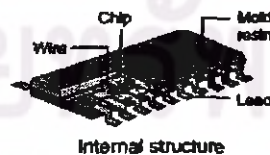
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เซมิคอนดักเตอร์ (สารกึ่งตัวนำ) คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน เป็นวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มักมีส่วนประกอบของ germanium, selenium หรือ silicon วัสดุเนื้อแข็งผลึกพวกหนึ่งที่มีสมบัติเป็นตัวนำ หรือสื่อไฟฟ้าก้ำกึ่งระหว่างโลหะกับอโลหะหรือฉนวน ความเป็นตัวนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสิ่งไม่บริสุทธิ์ที่มีเจือปนอยู่ในวัสดุพวกนี้ ซึ่งอาจเป็นธาตุหรือสารประกอบก็มี เช่น ธาตุเจอร์เมเนียม ซิลิคอน ซีลีเนียม และตะกั่วเทลลูไรด์ เป็นต้น วัสดุกึ่งตัวนำพวกนี้มีความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะตรงข้ามกับโลหะทั้งปวง

เซมิคอนดักเตอร์มีหลายประเภทด้วยกันเช่น งานมีขา (Peripheral) งานไม่มีขา (Non-Lead) งานที่มีจุดเชื่อมต่อเป็นลักษณะลูกบอลกลม ๆ เรียกว่า บอล และงานเรซินใส ซึ่งงานแต่ละประเภทออกแบบมาเพื่อใช้งานตามลักษณะงานที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาและแก้ไขงานมีขา (peripheral) ที่เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่

ส่วนประกอบหลักของเซมิคอนดักเตอร์ประเภทมีขา (Peripheral) ดังนี้



รูปที่ 1.1 แสดงส่วนประกอบหลักของเซมิคอนดักเตอร์

- Chip คือ แผงวงจรที่เป็นตัวรวบรวมประมวลผลให้เครื่องใช้ไฟฟ้าทำงานตามหน้าที่ที่กำหนดเอาไว้



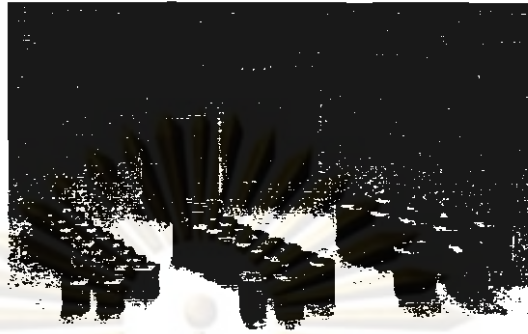
รูปที่ 1.2 Wafer ซึ่งเมื่อตัดแล้วจะเรียกว่าชิพ (Chip)

- Gold wire คือ เส้นทองที่เชื่อมระหว่าง Lead และ chip เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร



รูปที่ 1.3 เส้นทอง (Gold wire)

- Lead frame คือแผ่นโลหะนำไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นโครงแกนกลางของอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์
- Mold resin คือ thermoset plastic ทำหน้าที่ป้องกันวงจรภายในไม่ได้รับความเสียหาย



รูปที่ 1.4 เรซิน (Resin)

กระบวนการหลักในการผลิตเซมิคอนดักเตอร์

Dicing process



Die bonding process



Wire bonding process



UV process



Molding process



Post mold cure process



ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

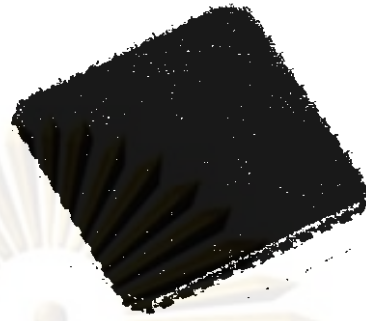
↓

Marking process

↓

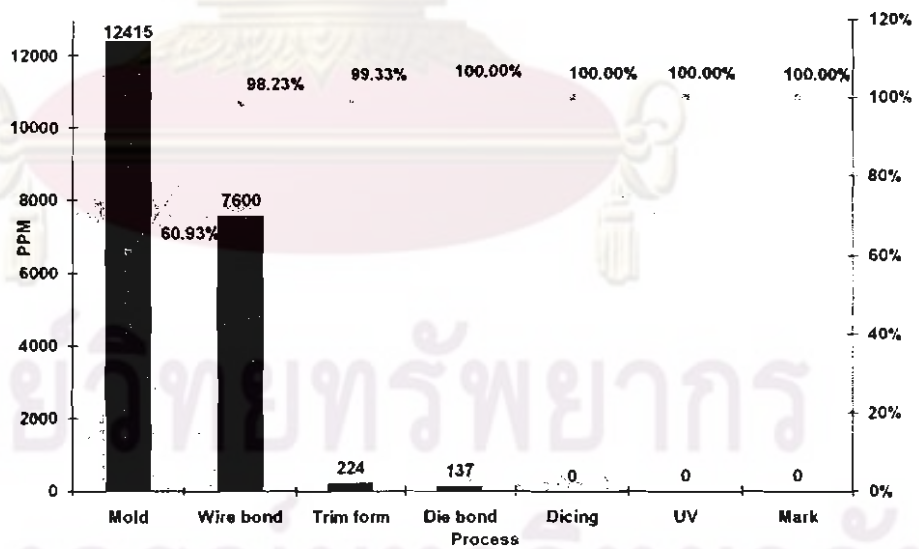
Trim forming process

1. Dicing process เป็นกระบวนการตัดแผ่น wafer ให้มีขนาดตามที่ผู้ออกแบบ (Designer) ได้ออกแบบไว้สำหรับผลิตภัณฑ์นั้นๆ ซึ่งเมื่อตัดแล้วจะเรียกว่า ชิพ (Chip)
2. Die bonding process เป็นกระบวนการวางชิพ (Chip) ลงบนแผ่นโลหะนำไฟฟ้า (Lead frame) โดยมีกาว (Paste) เป็นตัวประสาน
3. Wire bonding process เป็นกระบวนการเชื่อมเส้นทองจากขาแผ่นโลหะนำไฟฟ้า ไปยังชิพ (Chip) เพื่อให้ไฟฟ้าไหลผ่านครบวงจร
4. UV process เป็นกระบวนการนำงานผ่านรังสี UV ในระยะเวลาหนึ่งเพื่อทำความสะอาดหน้าชิพ (Chip) และด้านหลังของงานก่อนทำการฉีดขึ้นรูป เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการแยกชั้นระหว่างเรซิน (Resin) กับ ชิพ (Chip) และแผ่นโลหะนำไฟฟ้า (Lead frame)
5. Molding process เป็นกระบวนการฉีดเรซิน (Resin) เข้าไปยังแม่พิมพ์โดยมีชิพ (Chip) เส้นทอง (Gold wire) และส่วนของแผ่นโลหะนำไฟฟ้า (Lead frame) อยู่ภายใน เพื่อป้องกันไม่ให้ส่วนประกอบดังกล่าวได้รับความเสียหายขณะนำไปใช้งาน
6. Post mold cure process เป็นกระบวนการอบงานเพื่อเป็นการลดความเครียด (Strain) ของอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ เนื่องจากการใช้งาน
7. Marking process เป็นกระบวนการทำสัญลักษณ์บนตัวงานเพื่อบอกถึงชนิดของงาน วันเวลาและล็อตในการผลิต
8. Trim forming process เป็นกระบวนการตัดงานแยกออกมาจาก Lead frame ออกเป็นตัวและขึ้นรูปขาของงานให้พร้อมที่จะใช้งาน

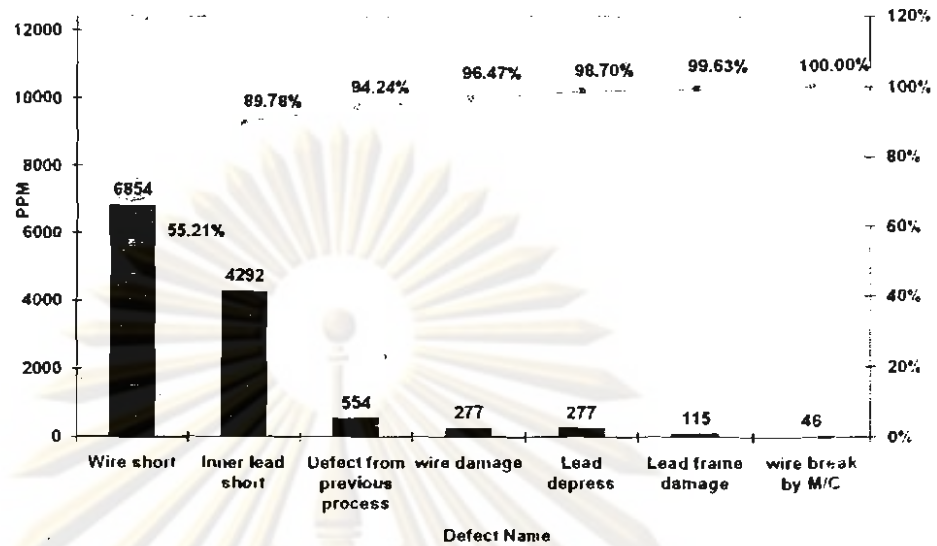


รูปที่ 1.5 งานเซมิคอนดักเตอร์ที่ทำการผลิตเรียบร้อยแล้ว

เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษาพบปัญหาในกระบวนการขึ้นรูป (Mold process) ในการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ซึ่งแตกต่างจากผลิตภัณฑ์เดิมโดยที่ขนาดของชิป (chip) มีขนาดเล็กลงซึ่งส่งผลให้ความยาวของเส้นทอง (Gold wire) เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการจัดเรซินเข้าไปในแม่พิมพ์ทำให้เกิดงานเสียที่เรียกว่าเส้นทองล้มผัดกัน หรือ เส้นทองแต่ละเส้นใกล้กันเกินกว่าที่ข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์กำหนดไว้ คือ เส้นทองแต่ละเส้นต้องห่างกันมากกว่าหรือเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นทอง ในที่นี้เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นทองเท่ากับ 23 ไมครอน ดังนั้นผลิตภัณฑ์ชิ้นนี้กำหนดให้เส้นทองแต่ละเส้นต้องอยู่ห่างกันมากกว่า 23 ไมครอน



รูปที่ 1.6 แผนภูมิพิฆาเรโตแสดงปริมาณของปัญหาที่เกิดกับงานมีชา



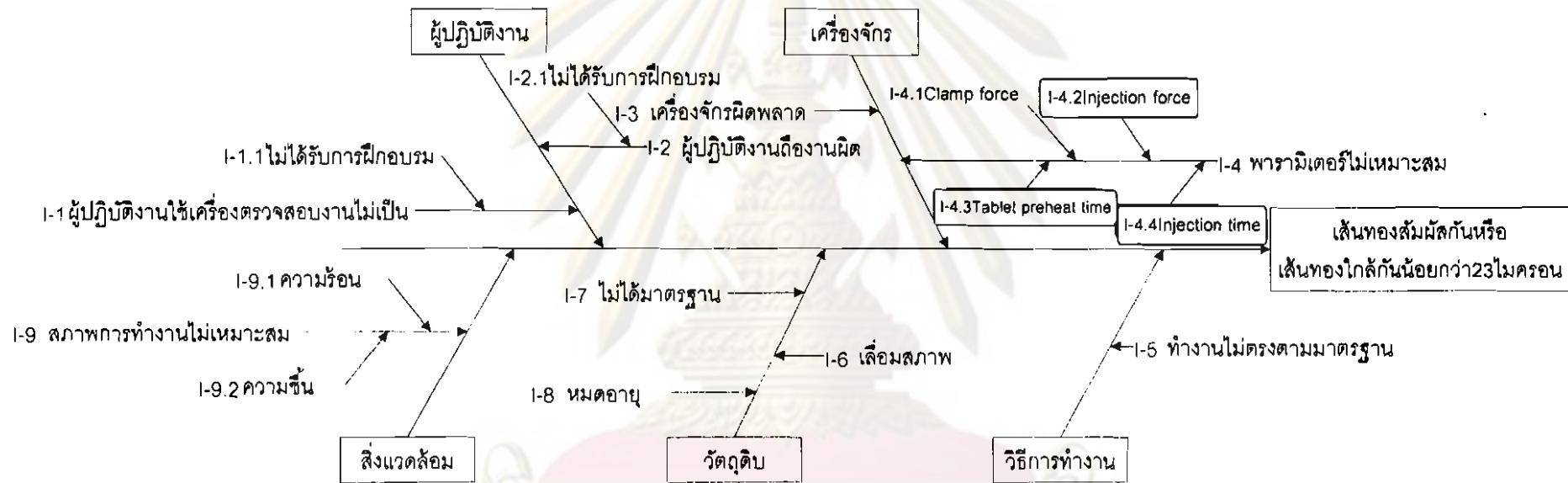
รูปที่ 1.7 แผนภูมิพาริตโตแสดงปริมาณปัญหาหลักที่พบในกระบวนการขึ้นรูป

แต่ปัญหาดังกล่าวไม่ได้ทำให้งานเสียหายเนื่องจากเมื่อตรวจสอบงานด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ในด้านบน เส้นทองมีลักษณะที่สัมผัสกัน แต่เมื่อเอ็กซเรย์ด้วยการตะแคงดูด้านข้างจะเห็นว่าเส้นทองไม่ได้สัมผัสกันเลย แต่เหตุที่บริษัทกรณีศึกษาต้องการให้แก้ปัญหานี้เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปเมื่อทำการขึ้นรูปงานแล้ว ผู้ปฏิบัติงานจะต้องนำงานมาเอ็กซเรย์จากด้านบนเพื่อตรวจสอบคุณภาพงานหลังการขึ้นรูป และเมื่อมีการพบเส้นทองสัมผัสกันผู้ปฏิบัติงานจะทำการตัดสินใจให้งานเป็นของเสีย เนื่องจากเป็นไปตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ จึงทำให้เกิดการสูญเสียงานที่ไม่ได้สูญเสียจริงขึ้นเป็นจำนวน 0.69% ของจำนวนงานที่ผลิตทั้งหมด

การวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดปัญหา

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะถูกนำมาวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยการระดมสมองจากผู้ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบนี้ได้แก่ ฝ่ายควบคุมคุณภาพ ฝ่ายวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และฝ่ายเทคนิค โดยการใช้แผนภาพก้างปลาเป็นเครื่องมือทางสถิติในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

เส้นทองสัมผัสกันหรือใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน



รูปที่ 1.8 แผนภาพก้างปลาของปัญหาการเกิดเส้นทองสัมผัสกันและเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน

จากแผนภูมิแก๊งปลาของปัญหาการเกิดเส้นทองส้มผัดกันและเส้นทองใกล้เคียงกันน้อยกว่า 23 ไมครอนเมื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้หลักการ Why-Why Analysis เพื่อค้นหาสาเหตุหลักและหาแนวทางแก้ไข สามารถสรุปผลการวิเคราะห์และสาเหตุหลักได้ดังนี้

ผู้ปฏิบัติงาน :

- I-1: พนักงานใช้เครื่องตรวจสอบงาน ซึ่งก็คือ เครื่อง X-ray เนื่องจากหน้าจอของเครื่องจักรเป็นภาษาอังกฤษทั้งหมด ซึ่งทำให้ยากต่อการทำความเข้าใจในเรื่องการใช้งาน ดังนั้น จึงได้มีการเขียนวิธีใช้งานหน้าเครื่องตรวจสอบงานหน้าทุกเครื่อง
- I-1.1: ไม่ได้รับการฝึกอบรม ดังนั้นต้องจัดให้มีการฝึกอบรมการใช้เครื่องตรวจสอบงาน
- I-2: การถืองานผิดเนื่องจากอุปกรณ์ช่วยในการนำงานเข้าสู่เครื่องจักรมีขนาดเล็กและยากต่อการใส่ชิ้นงานเข้าเครื่องจักร ถ้าวางตำแหน่งของมือผิดจากตำแหน่งที่ระบุในมาตรฐานการถืองาน ความเสี่ยงที่ทำให้เส้นทองส้มจะสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการถืองานได้ง่ายขึ้น เพื่อลดความเสี่ยงที่เส้นทองส้มก่อนเข้าสู่เครื่องขึ้นรูป
- I-2.1: ไม่ได้รับการฝึกอบรม ดังนั้นต้องจัดให้มีการฝึกอบรมการถืองาน

เครื่องจักร:

- I-3: เครื่องจักรฉีดพลาสติก หรือเครื่องจักรซึ่ดูด ได้รับการตรวจสอบทุกวันจากฝ่ายซ่อมบำรุง ซึ่งหากพบความผิดปกติหรือเครื่องจักรซึ่ดูด เครื่องจักรจะได้รับการแก้ไขทันที
 - I-4: พารามิเตอร์ไม่เหมาะสม เพราะงานมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างซึ่งมีความเสี่ยงที่จะมีการสัมผัสกันของเส้นทองสูงหากใช้พารามิเตอร์เดิม
 - I-4.1: Clamp force แรงกดมีผลต่องานในเรื่องของความสูงของงาน และการเปิดปิดทางเข้าออกของอากาศในตัวงานขณะทำการฉีดเรซิน ดังนั้น ค่าของแรงกดจึงต้องพิถีพิถัน
 - I-4.2: Injection Force แรงฉีด คือ แรงที่กระทำกับแกนฉีดเพื่อให้เรซินไหลเข้าไปในแม่พิมพ์อย่างสมบูรณ์ แรงฉีดมีผลให้เกิดเส้นทองส้มผัดกัน หรือ เส้นทองใกล้เคียงกันน้อยกว่า 23 ไมครอน เนื่องจากแรงดังกล่าวจะเป็นตัวผลักดันให้มวลของเรซินไปปะทะกับเส้นทองจึงทำให้เส้นทองเกิดการโค้งงอจนสัมผัสหรือใกล้เคียงกัน ซึ่งยังไม่สามารถหาแรงฉีดที่เหมาะสมได้
- สาเหตุหลัก**
- I-4.3: Tablet preheat time เวลาให้ความร้อนแก่เรซิน คือระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินก่อนทำการฉีด ระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินมีผลให้เกิดเส้นทองส้มผัดกัน

หรือ เส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน เนื่องจากความร้อนที่ให้ไปนั้นจะส่งผลต่อลักษณะของเรซินซึ่งมีอยู่ 3 ช่วง

ช่วงแรก คือช่วงที่เรซินมีสถานะเป็นของแข็งซึ่งเมื่อโดนความร้อน ความแข็งแรงของเรซินก็จะค่อยๆลดลงเรื่อยๆ

ช่วงที่สอง คือช่วงที่เรซินเป็นเจล (ช่วงที่เป็นของเหลว) สูงสุด ช่วงนี้ถือว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดที่จะฉีดเรซินเข้าไปยังแม่พิมพ์

ช่วงที่สาม คือช่วงที่เรซินจะค่อยๆเปลี่ยนสถานะจากการเป็นเจลกลับมาเป็นของแข็ง

ซึ่งยังไม่สามารถหาช่วงเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินที่เหมาะสมได้ **สาเหตุหลัก**

- I-4.4: Injection time เวลาในการฉีดเรซิน คือระยะเวลาในการฉีดเรซินเข้าไปในแม่พิมพ์ ระยะเวลาในการฉีดมีผลให้เกิดเส้นทองล้นผัดกัน หรือ เส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน เนื่องจาก

F คือ แรง, m คือมวล และ a คือความเร่ง

$$F = ma$$

$$a = v/t$$

$$F = m * (v/t)$$

$$t = mv / F$$

จากสูตรจะเห็นว่า $t \propto F$

ซึ่งหมายความว่าถ้าเวลาในการฉีดของเรซินมีน้อยจะส่งผลให้แรงของเรซินที่ฉีดเข้าไปยังแม่พิมพ์มีมากเช่นกัน ขณะนี้ยังไม่สามารถหาช่วงเวลาในการฉีดเรซินที่เหมาะสมได้ **สาเหตุหลัก**

วิธีการทำงาน :

- I-5: ทำงานไม่ตรงตามมาตรฐาน เนื่องจากไม่ได้รับความรู้หรือการฝึกอบรมก่อนการปฏิบัติงานจริง ดังนั้นมาตรฐานที่ระบุถึงวิธีการและข้อควรระวังซึ่งผู้ปฏิบัติงานทุกคนจะต้องศึกษา ผู้ปฏิบัติงานต้องทำความเข้าใจก่อนทำการปฏิบัติงานจริง

วัตถุดิบ:

- I-6: วัตถุดิบเสื่อมสภาพ เนื่องจากได้รับการดูแลที่ไม่ได้มาตรฐาน เช่น สภาพอุณหภูมิในที่เก็บมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงมีการควบคุมห้องเก็บหรือตู้เก็บเรซินอยู่เสมอ
- I-7: วัตถุดิบไม่ได้มาตรฐาน เนื่องจากมาตรฐานวัตถุดิบเกิดจากข้อตกลงระหว่างบริษัทและผู้ผลิต ซึ่งผู้ผลิตจะทำการตรวจสอบวัตถุดิบว่าตรงตามมาตรฐานหรือไม่ ก่อนส่งมาให้บริษัทซึ่งหากไม่ผ่านมาตรฐานก็ต้องทำการผลิตใหม่
- I-8: วัตถุดิบหมดอายุ มีผลต่อคุณภาพของเรซินอย่างมาก เนื่องจากเวลาผ่านไปคุณภาพของเรซินก็จะต่ำลงเรื่อยๆ ดังนั้นหน้ากล่องบรรจุเรซินต้องการระบุ วันที่ผลิต วันหมดอายุ รวมถึงล็อตเรซิน

สิ่งแวดล้อม :

- I-9: สภาพการทำงานไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงมีการควบคุมและบันทึกค่าต่างๆ อยู่เป็นประจำ
- I-9.1: ความร้อนมีผลต่อคุณภาพของงานและวัตถุดิบในการผลิต ดังนั้น จึงมีการควบคุมและบันทึกค่าภายในห้องปฏิบัติงาน อยู่เสมอ
- I-9.2: ความชื้นมีผลต่อคุณภาพของงานและวัตถุดิบในการผลิต ดังนั้น จึงมีการควบคุมและบันทึกค่าภายในห้องปฏิบัติงาน อยู่เสมอ

จากแผนภาพก้างปลาและวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างผู้ที่เกี่ยวข้อง พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดเส้นทองสัมผัสกันหรือใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน มีดังนี้

1. Injection force
2. Injection time
3. Tablet preheat time

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อปรับปรุงงานเคมีคอนดักเตอร์ที่มีขา (Peripheral) ไม่ให้เกิดปัญหาเส้นทองสัมผัสกันหรือเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอนซึ่งถือว่าเป็นของเสีย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการศึกษาเฉพาะปัญหาเส้นทองสัมผัสกันหรือเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอนในกระบวนการขึ้นรูปเท่านั้น

2. ทำการศึกษาและปรับปรุงค่าต่างๆของกระบวนการขึ้นรูปดังนี้

1. Injection force
2. Injection time
3. Tablet preheat time

3. กำหนดค่าคงที่ของกระบวนการขึ้นรูปดังนี้

1. Clamp force
2. Tablet position
3. Cure time
4. Die temperature

4. ทำการควบคุมคุณลักษณะของวัตถุดิบ

1. ลีตการผลิตและ ชนิดของเรซินต้องเป็นลีตและชนิดเดียวกันเท่านั้น
2. สภาพงานก่อนนำเข้ามาในกระบวนการขึ้นรูปต้องมีสภาพเหมือนกัน โดยกระบวนการก่อนหน้าต้องควบคุมค่าการผลิตให้เหมือนกันทุกครั้ง

3. เส้นทองทำจากทอง 99.99% มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ไมครอน

5. ทำการควบคุมเครื่องจักรโดยทดลองที่เครื่องจักรเครื่องเดียวเท่านั้น

6. ทำการควบคุมลักษณะของแม่พิมพ์โดยใช้แม่พิมพ์เดียวกันเท่านั้น

1. อายุของแม่พิมพ์อยู่ที่ 10,000-20,000 การรัน

2. อายุของกระบอกลีต (Pot) และ แกนลีด (Plunger) 20000-30000 การรัน

7. ทำการควบคุมสภาพแวดล้อมโดยทำการวิจัยในห้อง Cleanroom เท่านั้นโดย

1. ค่าอุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 22-26 องศาเซลเซียส
2. ค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 40 - 60 %RH
3. ห้อง Cleanroom ชนิด Class 1000
4. พื้นห้องป้องกันไฟฟ้าสถิต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถค้นพบสาเหตุของปัญหาเส้นทองสัมผัสกันหรือเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน และสามารถควบคุมไม่ให้เกิดขึ้นในการผลิตได้อีก
2. สามารถนำผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ไปใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปรับปรุงกระบวนการผลิตงานตัวอื่นให้ดียิ่งขึ้นรวมถึงนำไปใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาอื่นๆที่มีลักษณะปัญหาใกล้เคียงกัน
3. สามารถเพิ่มการยอมรับในความสามารถในการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่จะไม่ทำให้งานเกิดปัญหาได้อีก

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. สํารวจงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษากระบวนการขึ้นรูปของงานเซมิคอนดักเตอร์และปัญหาเส้นทองสัมผัสกันหรือเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน
3. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปที่ทำให้เกิดปัญหา
4. เลือกตัวแปรที่มีผลต่อปัญหา
5. เลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมกับปัญหา
6. ดำเนินการทดลองให้เป็นไปตามแผน
7. วิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ
8. นำผลการทดลองที่ได้มาใช้ในการปรับปรุงในกระบวนการทำงานขึ้นรูป
9. ติดตามผลและตรวจสอบผลหลังการปรับปรุง
10. สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ
11. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย											
	2551	2552										
	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	
1. ศึกษากระบวนการฟื้นฟูของงานเสริมคอนกรีตเคอร์และปัญหา												
2. ดำรงงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง												
3. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการฟื้นฟูที่ทำให้เกิดปัญหา												
4. เลือกตัวแปรที่มีผลต่อปัญหา												
5. เลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมกับปัญหา												
6. ดำเนินการทดลองให้เป็นไปตามแผน												
7. วิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ												
8. นำผลการทดลองที่ได้มาใช้ในการปรับปรุงในกระบวนการทำงานฟื้นฟู												
9. ติดตามผลและตรวจสอบหลังการปรับปรุง												
10. สรุปผลการออกแบบการทดลองและข้อเสนอแนะ												
11. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์												

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การแก้ปัญหาทางานโดยหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต จำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา และการออกแบบการทดลองด้วยหลักการทางสถิติ

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกลศาสตร์ของไหล

1. ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของของไหล ρ (rho) คือมวลต่อหน่วยปริมาตร ดังนั้น

$$\text{ความหนาแน่น} \quad \rho = \frac{m}{\text{vol}} \quad (2.1)$$

เมื่อ m เป็นมวลของของไหล มีหน่วยเป็น kg

vol เป็นปริมาตรของไหล มีหน่วยเป็น m^3

ดังนั้นหน่วยความหนาแน่น คือ kg/m^3

2. น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight)

น้ำหนักจำเพาะ γ (Gamma) คือแรงที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลกที่กระทำกับของไหลหนึ่งหน่วย ดังนั้นจึงมีหน่วยของแรงต่อปริมาตร นั่นคือ N/m^3

ความหนาแน่นและความหนาแน่นจำเพาะมีความสัมพันธ์กันดังต่อไปนี้ คือ

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad \text{หรือ} \quad \gamma = \rho g \quad (2.2)$$

3. ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume)

ปริมาตรจำเพาะคือปริมาตรของของไหลต่อหนึ่งหน่วยมวล มักใช้กับแก๊ส และมีหน่วยเป็น m^3/kg ดังนั้น

$$v^3 = \frac{1}{\rho} \quad (2.3)$$

เมื่อ ρ^3 เป็นปริมาตรจำเพาะ

4. ความหน่วงจำเพาะ (Specific gravity)

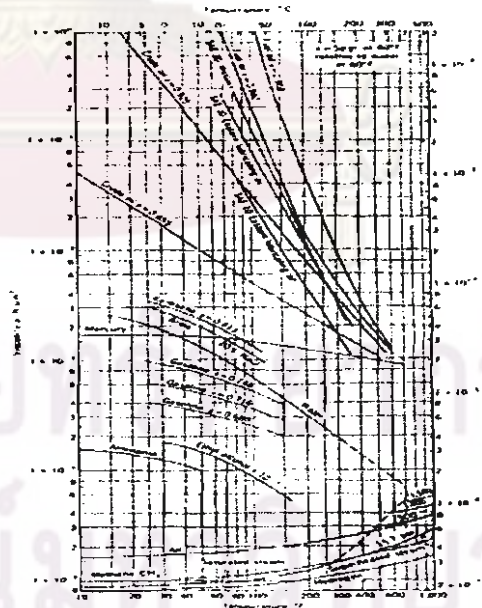
ความถ่วงจำเพาะ s ของของเหลว คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นของของเหลวต่อความหนาแน่นของ น้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิมาตรฐาน (1000 kg/m^3) ดังนั้น

$$S = \frac{\text{ความหนาแน่นของของเหลว}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์}} \quad (2.4)$$

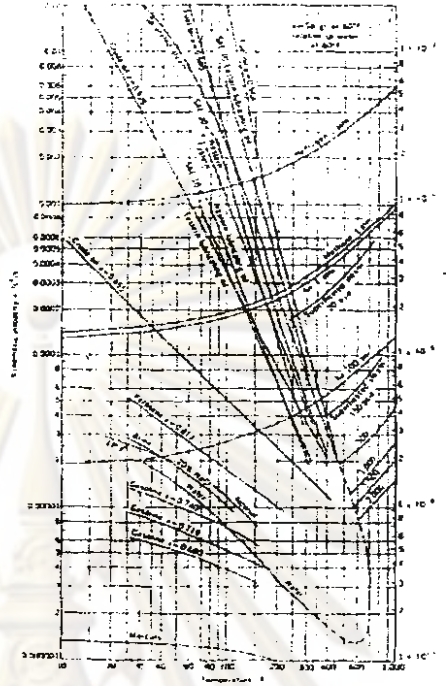
ความถ่วงจำเพาะไม่มีหน่วย. ความถ่วงจำเพาะบางครั้งอาจเรียกว่า ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density)

5. ความหนืด

ความหนืด (Viscosity) ของของไหลคือ ค่าความต้านทานต่อการเฉือนแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในของเหลวเป็นผลมาจากแรงดึงดูด ระหว่างโมเลกุล และการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมระหว่างโมเลกุลของของเหลว ค่าความหนืดสัมบูรณ์และค่าความหนืด คินเนมาติก ของของไหลบางชนิดแสดงไว้ในภาพที่ 2.1 และ 2.2.



รูปที่ 2.1 ความหนืดสัมบูรณ์ μ ของของไหล



รูปที่ 2.2 ความหนืดคิเนมาติก γ ของของไหล

พิจารณาเพลต (plate) ขนาด 2 แผ่นดังภาพที่ 2.3 ซึ่งมีขนาดใหญ่มากวางอยู่ห่างกันเป็นระยะ Y m , ช่องว่างระหว่างเพลตทั้ง 2 มีของไหลบรรจุอยู่ . สมมติว่าแผ่นล่างหยุดนิ่ง ส่วนแผ่นบนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v m/s ด้วยผลจากแรงภายนอก F N , เพลตมีพื้นที่ A

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.3 ของไหลระหว่างเพลต

จากการทดลองออกแรงดึงเพลตด้านบนให้เคลื่อนที่พบว่า

$$F \propto \frac{AV}{Y}$$

จากภาพที่ 2.3 พบว่า V/Y อาจแทนด้วย dv/dy ดังนั้น

$$F \propto A \frac{dv}{dy}$$

หรือ

$$\frac{F}{A} = \frac{dv}{dy}$$

กำหนดให้ความเค้นเฉือน (shear stress) $\tau = \frac{F}{A}$ และให้ μ (μ) เป็นค่าคงที่ของ
สัดส่วน จะได้ว่า

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \frac{V}{Y} \quad (2.5)$$

สมการนี้เรียกว่า สมการความหนืดของนิวตัน

ค่าคงที่ของสัดส่วน μ มีชื่อเรียกว่า สัมประสิทธิ์ความหนืด

หน่วยของความหนืดหาได้โดยการพิจารณาสมการที่ 1.7 ซึ่งพบว่าเป็นหน่วยของ
ความเค้นเฉือนหารด้วยหน่วยของ dv/dy นั่นคือ

$$\text{หน่วยของ } \mu = \frac{N/m^2}{m/s} = \frac{N \cdot s}{m^2} = Pa \cdot s$$

ในปัญหาบางประเภทอาจจะพบว่า การนำเอาค่าความหนืดของของไหลหาร
ด้วยความหนาแน่นของของไหลค่าที่ได้มีชื่อเรียกว่า ความหนืดคินเนมาติก

(Kinematic viscosity), ν (ν) ซึ่ง

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.6)$$

ของไหลประกอบไปด้วยอนุภาคของของไหลจำนวนมากเคลื่อนที่ในทิศทางที่ของ
ไหลเคลื่อนที่อนุภาคต่างๆเหล่านี้ไม่ได้เคลื่อนที่ขนานกันไปตลอดแต่เคลื่อนที่ไปอย่าง
อิสระ ความเร็วของอนุภาคเป็นปริมาณเวกเตอร์มีทั้งขนาด และทิศทางซึ่งเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

6. ประเภทของการไหล

การไหลของของไหลแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ

1. การไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ (Turbulent flow) เป็นการไหลที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ
2. การไหลแบบลามินาร์ (Laminar flow) เป็นการไหลที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบ

นอกจากนี้ยังมีคำที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหลอีก คือ

1. Uniform flow เป็นการไหลซึ่งขนาดและทิศทางของความเร็วของของไหลมีค่าเท่ากันทุกๆหน้าตัดของการไหล
2. Non uniform flow เป็นการไหลของความเร็ว ความดัน เปลี่ยนแปลงไปทุกๆหน้าตัดของการไหล
3. Steady flow เป็นการไหลซึ่งความเร็วของของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแต่อาจเปลี่ยนแปลงได้ทุกๆหน้าตัดของการไหล
4. Non-steady flow เป็นการไหลซึ่งความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

7. อัตราไหลและความเร็วเฉลี่ย

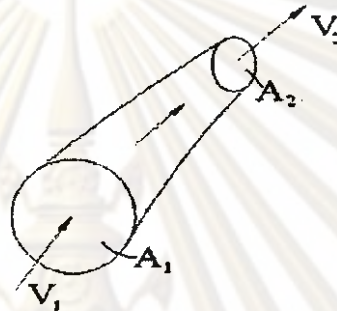
อัตราการไหล (flow rate) ของของไหล คือปริมาณของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดที่กำหนดในหนึ่งหน่วยเวลา

ความเร็วเฉลี่ย (mean velocity) บนหน้าตัดที่กำหนดคือ ค่าอัตราการไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดหารด้วย พื้นที่ หน้าตัด ถ้าให้ V เป็นความเร็วเฉลี่ย Q เป็นอัตราการไหล และ A เป็นพื้นที่หน้าตัด ดังนั้น

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.7)$$

8. สมการความต่อเนื่อง

สมการความต่อเนื่อง (Equation of continuity) พิจารณา Stream tube ดังภาพที่ 2.4 จากคุณสมบัติของ stream tube ทราบว่าของไหลไม่สามารถไหลข้ามออกมาจาก stream tube ได้ ดังนั้นของไหลที่ไหล เข้าทาง หน้าตัดจะไหลออกมาทางหน้าตัด ด้วยมวลเท่าเดิมเมื่อเป็นการไหลแบบ Steady flow มวลของของไหลไม่มีการ เปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลา ดังนั้นจึงเขียน สมการได้เป็น



ภาพที่ 2.4 Stream tube

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \text{ค่าคงที่} \quad (2.8)$$

หรือ

$$\gamma_1 A_1 V_1 = \gamma_2 A_2 V_2 \quad (2.9)$$

ถ้าเป็นของไหลชนิดที่อัดตัวไม่ได้ นั่นคือ $\rho_1 = \rho_2$ อาจเขียนได้ใหม่เป็น

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q \quad (2.10)$$

สมการ 2.8 ถึง 2.10 นี้มีชื่อเรียกว่าสมการความต่อเนื่อง

2.2 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนภูมิก้างปลา (Fishbone diagram)

แผนภูมิก้างปลา (Fishbone diagram) เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้ไข ปัญหาในงานอุตสาหกรรม หรือ ที่เรียกว่า Cause and Effect Diagram โดยปกติแล้วใน กระบวนการผลิตสามารถแบ่งสาเหตุของปัญหาได้เป็น 4 ประการ (4M) ได้แก่ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วิธีการ (Method) และวัสดุ (Material) แผนภูมิก้างปลาสามารถใช้ในการ

ค้นหาสาเหตุและผลกระทบทั้งในทางบวกและทางลบ วัตถุประสงค์หลักของวิธีการนี้คือ ช่วยในการแก้ไขปัญหาในองค์กรอย่างเป็นระบบ ปัญหาที่เรียกว่า Effect จะเขียนไว้ที่ หัวปลา และสาเหตุที่เป็นไปได้ ที่เรียกว่า Possible cause จะเขียนไว้บนก้างปลา

ขั้นตอนสำหรับสร้าง Cause and Effect Diagram มีดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดปัญหา หรือผลกระทบ (Effect) ที่พิจารณาเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

ขั้นที่ 2 กำหนดสาเหตุหลักๆ (Major cause) โดยใช้ 4M

ขั้นที่ 3 หาเหตุอื่นๆที่เป็นไปได้ (Possible cause)

ขั้นที่ 4 ให้เลือกสาเหตุที่สำคัญที่สุด ผ่านความคิดเห็นของกลุ่ม โดยอาจไม่ถูกต้องตามหลักการก็ได้ขึ้นอยู่กับกลุ่ม

ขั้นที่ 5 สาเหตุที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดจะต้องนำมาพิจารณาอีกครั้งจนแน่ใจแล้วแบ่งเข้ากลุ่มของสาเหตุหลัก

ขั้นที่ 6 สาเหตุที่ถูกเลือกจะต้องมีการทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่า เป็นสาเหตุที่แท้จริงหรือไม่ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาหรือไม่ ขึ้นอยู่กับชนิดของปัญหา

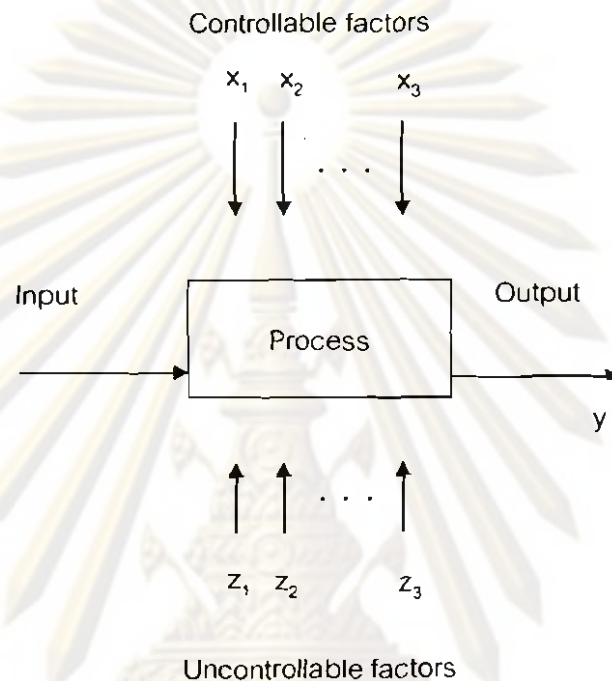
ในบางครั้งจะมีความยุ่งยากในการหาสาเหตุ ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ นิยมใช้วิธีวิเคราะห์แบบ 5M 1E คือ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วิธีการ (Method) วัสดุ (Material) และการวัด (Measurement) และสิ่งแวดล้อม (Environment) โดยวิธีการนี้จะทำให้สามารถหาสาเหตุของผลกระทบที่เกิดขึ้นได้อย่างครบถ้วนมากที่สุด

2.3 การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม

1. การออกแบบการทดลอง (Statistic design of Experiment)

หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีกึ่งสถิติ ซึ่งจะทำให้หาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ ในการทดลองใดๆก็ตาม ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บข้อมูล

ตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลองดังรูป



รูปที่ 2.5 แสดงแบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ

2. หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ

1. เรพลิคชัน (Replication) หมายถึงการทำการทดลองซ้ำซึ่งมีคุณสมบัติ 2 ประการคือ

1.1 เรพลิคชัน ทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาดนี้กลายเป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่

1.2 ถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ตัวนั้นเรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

2. แรนดอมไมเซชัน (Randomization) หมายถึงการทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม แรนดอมไมเซชันเป็นพื้นฐานหลักสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลองวิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การที่เราแรนดอมไมซ์การทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

3. บล็อกกิง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิง

2.4 แนวทางการออกแบบการทดลอง

การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ล่วงหน้า ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ดังนี้

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา ในขั้นตอนนี้จะต้องพยายามพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลองและหาข้อมูลอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ถ้อยแถลงของปัญหาที่มีความชัดเจนจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้นๆ ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบการทดลองทุกครั้งจะมีการทำงานเป็นทีม

2. เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดให้อย่างไร และจะวัดผลได้อย่างไร

ผู้ทดลองจำเป็นจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมาก ทั้งจากประสบการณ์และจากทางทฤษฎี

ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยควรที่จะเลือกขอบเขตให้กว้างมากๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้น ตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตให้แคบลงได้

3. เลือกตัวแปรผลตอบ ขั้นตอนนี้ควรแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการจะเป็นตัวแปรผลตอบ เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัวและมีความจำเป็นมากที่จำต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรได้อย่างไรก่อนจะเริ่มดำเนินการทดลอง

4. เลือกการออกแบบการทดลอง ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้อย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะขั้นตอนที่ง่ายมากซึ่งจะเกี่ยวข้องกับขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรพลีเคชัน) เราจำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองนั้นเราจะทราบแต่ต้นว่าปัจจัยบางตัวมีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

5. ทำการทดลอง ขั้นตอนนี้ต้องมีการติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมาก

6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติ ก็คือทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้าเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการและสามัญสำนึก จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนที่น่าเชื่อถือ

7. สรุปและข้อเสนอแนะ ในขั้นตอนนี้จะนำเอาวิธีทางกราฟเข้ามาช่วย นอกจากนี้แล้วการทำกรทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2.5 การเลือกแบบทดลอง

2.5.1 การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design)

การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียวจะต้องเก็บข้อมูลโดยระดับของปัจจัย เพื่อทดสอบว่าระดับของปัจจัยต่างๆมีผลต่อค่าตอบสนองหรือไม่ โดยการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

2.5.1.1 การออกแบบทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomized Design: CRD)

เป็นแผนการทดสอบที่ง่ายที่สุด เหมาะกับการทดลองที่ไม่สามารถแยกได้ว่าหน่วยทดลองที่นำมาใช้นั้นมีลักษณะแตกต่างกันอย่างไรก่อนการทดลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแผนการทดลองนี้จะแยกสาเหตุของความผันแปรของข้อมูลทั้งหมด เนื่องจากอิทธิพลของทรีทเมนต์แต่เพียงอย่างเดียวไม่มีสาเหตุจากปัจจัยอื่น จึงเรียกว่า ข้อมูลแบบแจกแจงทางเดียว (One-Way Classification)

ดังนั้นเพื่อให้แผนการทดลองนี้มีประสิทธิภาพสูงสุด หน่วยทดลองที่นำมาใช้จึงควรมีลักษณะที่สม่ำเสมอหรือคล้ายคลึงกันมากที่สุด (Homogenous) หรือมีความผันแปรระหว่างหน่วยทดลองที่น้อยที่สุด

หลักสำคัญของแผนการทดลองนี้คือ การจัดทรีทเมนต์ให้กับหน่วยทดลองหรือจัดหน่วยทดลองให้แก่ทรีทเมนต์จะต้องเป็นไปโดยสุ่ม ไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับการสุ่ม

ข้อดีของการวางแผนแบบCRD

1. คำนวณง่ายไม่สลับซับซ้อน
2. วางแผนการทดลองง่าย
3. ความแม่นยำสูงกว่าวิธีการอื่นๆ เพราะความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (mean square error) มีขนาดใหญ่
4. จำนวนครั้งหรือซ้ำ ที่เก็บข้อมูลของตัวแปร ค่าไม่จำเป็นต้องเท่ากัน

ข้อเสียของการวางแผนแบบสุ่มโดยสมบูรณ์

1. ต้องสามารถควบคุมปัจจัยอื่นๆได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ตัวอย่างที่ทำการศึกษาคือ ต้องไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลอื่นๆ (ปัจจัยภายนอก) ยกเว้นปัจจัยที่ทำการศึกษา หากไม่สามารถควบคุมปัจจัยภายนอกแล้วผลการวิเคราะห์จะมีความผิดพลาดมากกว่ารูปแบบการวิเคราะห์อื่น

2. ศึกษาได้เพียงปัจจัยเดียว เป็นแผนการทดลองที่มีลักษณะง่าย สะดวกในการปฏิบัติและวิเคราะห์ข้อมูล เหมาะสำหรับหน่วยทดลองที่มีความสม่ำเสมอมาก หน่วยทดลองมีโอกาสได้รับที่รบกวนใดที่รบกวนหนึ่งเท่านั้น แผนการทดลองเช่นนี้นิยมใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการหรือเรือนทดลอง

2.5.1.2 การออกแบบการทดลองแบบทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์

(Randomized Complete Block Design: RCB)

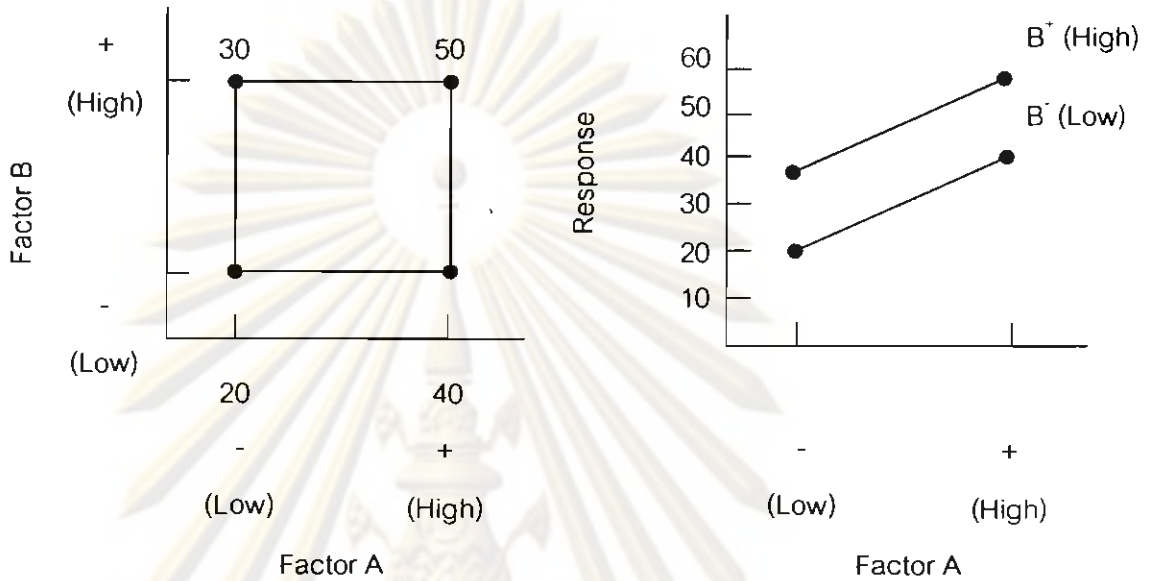
แผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกเป็นวิธีการหนึ่งในหลายๆ วิธีของการจำแนกแบบ 2 ทาง (Two-Way Classification) จะใช้เมื่อหน่วยทดลองมีความแตกต่างกัน 2 ลักษณะคือ ทางแนวนอน (Row) และแนวตั้ง (Column) มีหลักการคือ พยายามจัดหน่วยทดลองที่มีความคล้ายคลึงกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งเรียกว่า บล็อก ดังนั้นความแปรปรวนระหว่างหน่วยทดลองในบล็อกเดียวกันจึงมีค่าต่ำ และให้ความแตกต่างระหว่างบล็อกมีค่าสูง ในแต่ละบล็อกกระทำโดยสุ่ม กรณีนี้จะให้เราแตกแยกความแตกต่างระหว่างบล็อกออกมาจากยอดรวมของผลบวกของกำลังสองได้

2.5.2 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design)

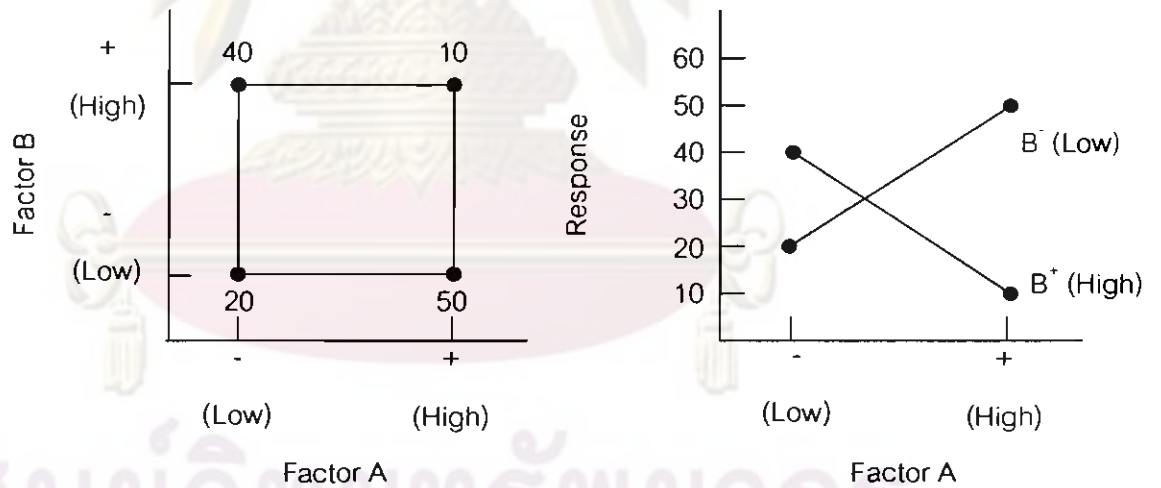
การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design) เป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ในกรณีที่มีปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยทุกๆ Treatment combination ของปัจจัยที่ศึกษา จะถูกพิจารณาไปพร้อมๆกัน

ผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัย หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก(Main Effect) ในการทดลองที่มีผลแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น ซึ่งหมายถึง ผลตอบของปัจจัยหนึ่งขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่นๆ นั่นเอง เรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยค่าที่จุดต่างๆคือตัวแปร

ตอบสนอง เมื่อมีปัจจัย 2 ตัวคือ A และ B โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับคือ - หรือ Low และ + หรือ High



รูปที่ 2.6 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย (ไม่มีอันตรกิริยา)



รูปที่ 2.7 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย (มีอันตรกิริยา)

ประโยชน์ของการทดลองแบบแฟคทอเรียล คือมีจำนวนการทดลองน้อยกว่าการทดลองแบบอื่นและยังให้ผลที่เกี่ยวกับ Interaction Effect ซึ่งมีความสำคัญมาก และไม่สามารถหาค่าได้จากการทดลองแบบเปรียบเทียบอย่างง่ายและการทดลองทีละปัจจัย ซึ่งหากมีการละเลยผลของ Interaction อาจทำให้ข้อสรุปผิดพลาด

แฟคทอเรียล รูปแบบของการออกแบบทดลองแบบแฟคทอเรียลที่สำคัญ ได้แก่

2.5.2.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k (2^k Factorial Design)

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีความสำคัญที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้จะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน เวลา หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน และใน 2 ระดับจะแทนด้วยระดับ "สูง" หรือ "ต่ำ" ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ "มี" หรือ "ไม่มี" ของปัจจัยนั้นๆก็ได้ เพลทเคทที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบ ประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล เรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k โดยสมมติว่า

1. ปัจจัยทั้งหมดมีค่าตายตัว
2. การออกแบบเป็นแบบเชิงสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized)
3. สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติเป็นที่ยอมรับได้

2.5.2.2 การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (Two-Level Fractional Factorial Design)

เมื่อจำนวนปัจจัยในการออกแบบ 2^k เพิ่มมากขึ้น โดยมากแล้วจำนวนการทดลองสำหรับเพลทเคทที่บริบูรณ์จะเพิ่มมากขึ้นเกินกว่าที่ทรัพยากรที่มีอยู่จะรองรับได้ ถ้าผู้ทดลองสามารถตั้งสมมติฐานอย่างมีเหตุผลได้ว่า อันตรกิริยาระดับสูงบางตัวสามารถละเลยได้ ในกรณีเช่นนี้ข่าวสารเกี่ยวกับปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระดับต่ำอาจจะหาได้โดยการทดลองเพียงแค่เศษส่วนของการทดลองเชิงแฟคทอเรียลอย่างบริบูรณ์

การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design) ถูกนำมาใช้กันมากในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผล กล่าวคือในการทดลองหนึ่งอาจจะมีปัจจัยมากมายที่กำลังอยู่ในความสนใจ สามารถใช้การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลเพื่อค้นหาว่าปัจจัยใดบ้างเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ การทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ส่วนมากจะใช้ในตอนเริ่มต้นโครงการ เนื่องจากโดยมากแล้วในขณะนั้นมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่มีแนวโน้มจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลต่อผลต่อผลตอบที่กำลังพิจารณาอยู่ หลังจากการทดลองเพื่อกรองปัจจัย

เสร็จสิ้นแล้วปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อไป ความสำเร็จของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลขึ้นอยู่กับแนวคิดที่สำคัญ 3 ประการคือ

1. หลักการที่ว่าปัจจัยจำนวนน้อยที่มีผล เมื่อมีตัวแปรหลายตัว การดำเนินการต่างๆ ของระบบหรือกระบวนการมีแนวโน้มที่จะถูกกำหนดโดยปัจจัยหลักและอันตรกิริยาขั้นต่ำเพียงบางตัวเท่านั้น
2. คุณสมบัติการฉายการออกแบบ การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลสามารถถูกฉายไปสู่การออกแบบที่ดีกว่าในเขตย่อยของปัจจัยที่มีผล
3. การทดลองต่อเนื่อง เป็นไปได้ที่จะรวมการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล 2^k การทดลองหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะทำการให้เกิดการทดลองอย่างต่อเนื่องที่มีการออกแบบที่ใหญ่กว่าและสามารถประมาณผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่อยู่ในความสนใจได้ดียิ่งขึ้น

2.5.3 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลเชิง 3^k

เป็นการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ ใช้กับการทดลองที่มีหลายปัจจัย ระดับของปัจจัย 3 ระดับ ใน k ปัจจัย คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์ 0 และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลเชิง 3^k เหมาะสมกับผู้ทดลองที่สนใจกับผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

2.5.4 การออกแบบการทดลองแบบอื่นๆ

- 1) การออกแบบการทดลองแบบเนสต์เต็ด (Nested Design)
- 2) การออกแบบการทดลองแบบสปลิตพล็อต (Split-Plot Design)
- 3) การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 พื้นผิวผลตอบ

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยผลที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนั้น

สมการ

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon$$

ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลจากการทดลอง

ถ้าเรากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการของพื้นผิวคือ

$$\eta = f(x_1, x_2)$$

เราจะเรียกว่า "สมการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface)"

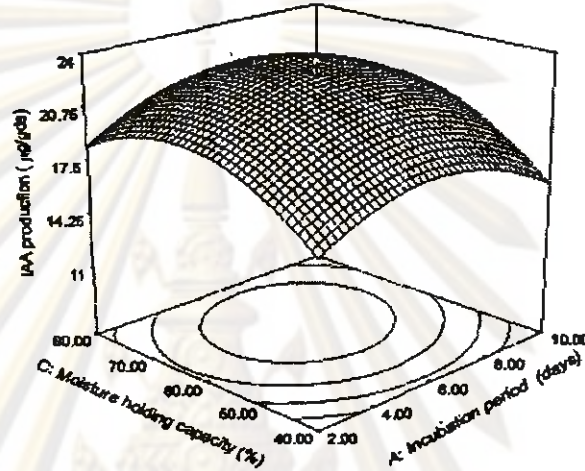
พื้นผิวผลตอบในรูปแบบของกราฟฟิก โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งปกติจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบดังแสดงรูปที่ 2.8 ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวส่วนมากจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นตอนแรกคือ ต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งปกติจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ เราจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$



รูปที่ 2.8 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากจะใช้แบบจำลองหนึ่งในสองแบบนี้ แต่แบบจำลองพหุนามที่กล่าวมานี้ไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระใด แต่ถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็ก แบบจำลองเหล่านี้สามารถใช้ได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) เป็นวิธีการที่ใช้มากในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ ซึ่งถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้น ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบได้อย่างดีพอ ดังนั้นการวิเคราะห์พื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นมานี้จะสามารถประมาณค่าได้เหมือนการวิเคราะห์ระบบจริงซึ่งการออกแบบการสร้างพื้นผิวผลตอบเรียกว่า การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

การวิเคราะห์พื้นผิวเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์พื้นผิวคือการนำการทำลองไปตามแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุดและอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อที่จะให้ใกล้จุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว เราจะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้นมาใช้ในการวิเคราะห์การทดลอง เพื่อให้ได้จุดที่ดีที่สุด จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบคือ การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยที่ก่อให้เกิดการทำงานอย่างน่าพอใจ

2.6.1 การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบกำลังสอง

เมื่อทำการทดลองอยู่ที่จุดใกล้เคียงกับจุดที่ดีที่สุด แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งได้นำมาใช้ในการประมาณค่าของผลตอบ ส่วนมากแบบจำลองกำลังสองจะมีรูปแบบดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

2.6.2 ตำแหน่งของจุดหยุดนิ่ง

สมมติว่าต้องการหาระดับของ x_1, x_2, \dots, x_k ที่จะทำให้ผลตอบมีค่าดีที่สุด ซึ่งจุดนี้ถ้ามีอยู่จริงจะหมายถึงเซตของจุด x_1, x_2, \dots, x_k ที่มีค่าของอนุพันธ์แบบบางส่วน (Partial Derivative)

$$\partial \hat{y} / \partial x_1 = \partial \hat{y} / \partial x_2 = \dots = \partial \hat{y} / \partial x_k = 0$$

และจะเรียกจุดเหล่านี้ว่า $x_{1,S}, x_{2,S}, \dots, x_{k,S}$ ว่าจุดหยุดนิ่ง (Stationary Point) จุดหยุดนิ่งนี้สามารถใช้ในการแทน

- (1) จุดที่มีค่าตอบสูงสุด
- (2) จุดที่มีค่าตอบต่ำสุด
- (3) จุดอานม้า (Saddle Point)

กราฟโครงร่าง (Contour Plot) มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ การใช้ซอฟต์แวร์สำหรับสร้างกราฟโครงร่างของพื้นผิวผลตอบขึ้นมาจะทำให้ทราบถึงรูปร่างของพื้นผิวและตำแหน่งของจุดที่ดีที่สุดได้ค่อนข้างแม่นยำ ซึ่งเราอาจหาคำตอบทั่วไปทางคณิตศาสตร์

สำหรับหาตำแหน่งของจุดหยุดนิ่ง (Stationary Point) ได้โดยการเขียนแบบจำลองกำลังสองในรูปเมทริกซ์ได้คือ

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + x'b + x'Bx$$

โดยที่

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} \quad \text{และ } B = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 & \dots & \hat{\beta}_{1k}/2 \\ & \hat{\beta}_{22} & \dots & \hat{\beta}_{2k}/2 \\ & & \ddots & \\ \text{sym.} & & & \hat{\beta}_{kk} \end{bmatrix}$$

ซึ่ง b คือเวกเตอร์ขนาด $(k \times 1)$ ของสัมประสิทธิ์การถดถอยกำลังหนึ่ง และ B คือเมทริกซ์แบบสมมาตรขนาด $(k \times k)$ ซึ่งมีส่วนประกอบในแนวเส้นทแยงมุมหลักเป็นสัมประสิทธิ์ของกำลังสองบริสุทธิ์ ($\hat{\beta}_{ii}$) และ ส่วนประกอบที่ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นทแยงมุมเป็นครึ่งหนึ่งของสัมประสิทธิ์กำลังสองผสม ($\hat{\beta}_{jj}, i \neq j$) ค่าอนุพันธ์ของ \hat{y} เทียบกับส่วนประกอบของเวกเตอร์ x มีค่าเท่ากับ 0 คือ

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x} = b + 2Bx$$

จุดหยุดนิ่งคือคำตอบของสมการ

$$x_s = -\frac{1}{2}B^{-1}b$$

เมื่อแทนค่าในสมการ จะพบว่าคำตอบที่คาดหมายที่จุดหยุดนิ่ง

$$\hat{y}_s = \hat{\beta}_0 + \frac{1}{2}x_s'b$$

2.6.3 การออกแบบการทดลองสำหรับพิตพื้นผิวผลตอบ

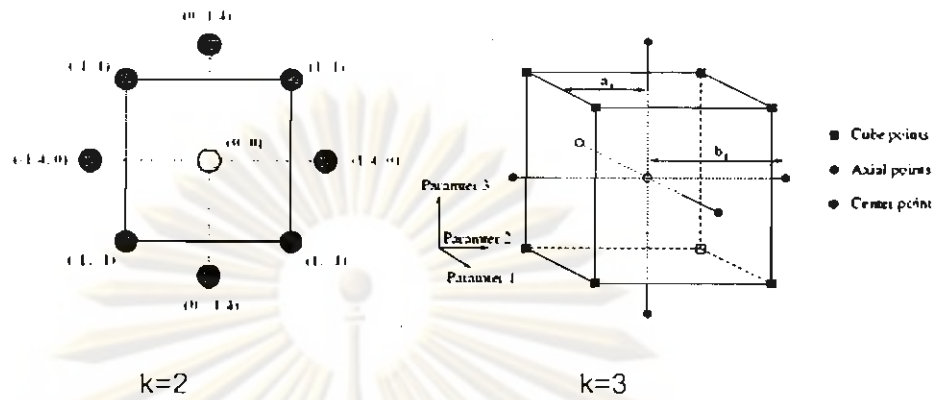
การพิตและวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะทำได้ง่ายขึ้น ถ้าเราเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม ลักษณะของการออกแบบที่ต้องการบางประการที่ควรพิจารณาคือ

1. ทำให้เกิดการแจกแจงหรือการกระจายที่เหมาะสมของจุดของข้อมูลตลอดบริเวณที่อยู่ในความสนใจ
2. ทำให้สามารถตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง และ Lack of Fit ได้
3. ทำให้การทดลองสามารถเกิดขึ้นได้ในบล็อก
4. ทำให้การออกแบบที่มีอันดับ (Order) สูงขึ้นสามารถสร้างขึ้นได้ตามลำดับ
5. ให้ค่าประมาณภายในของความผิดพลาด
6. ไม่ต้องรันการทดลองเป็นจำนวนมาก
7. ไม่ต้องมีหลายระดับของตัวแบบอิสระ
8. คำนวณพารามิเตอร์ในแบบจำลองได้ง่าย

ลักษณะสมบัติที่ต้องการเหล่านี้ในบางครั้งอาจจะขัดแย้งกันได้ ดังนั้นจะต้องมีการไตร่ตรองอย่างดีก่อนที่จะเลือกการออกแบบที่จะนำมาใช้งาน

2.6.4 การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สอง

โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย 2^k แฟคทอเรียลที่มี n_c รัน, 2^k รันในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว (Star) และ n_c รันที่จุดศูนย์กลาง การพัฒนาของ CCD ในทางปฏิบัติส่วนมากจะเกิดขึ้นจากการทดลองแบบเป็นอันดับ นั่นคือ การออกแบบ 2^k ถูกนำมาใช้เพื่อพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง แล้วพบว่าแบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้ข้อมูลนี้ ดังนั้นจึงได้มีการรันการทดลองเพิ่มในแนวแกนเพื่อทำให้สามารถใส่พจน์ ควอดราติก ลงในแบบจำลองได้ CCD เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง มีพารามิเตอร์อยู่ 2 ตัวในการออกแบบที่จะต้องถูกกำหนด นั่นคือ ระยะเวลา α ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบและจำนวนของจุดศูนย์กลาง n_c



รูปที่ 2.9 การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ k=2 และ k=3

ตารางที่ 2.1 ค่าของ code level ใน Central composite design (2ปัจจัย) $\alpha=1.414$

สิ่งทดลอง (Run no.)	Code level	
	ปัจจัย x_1	ปัจจัย x_2
1	+1	+1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	-1	+1
5	$+\alpha=+1.414$	0
6	0	$+\alpha=+1.414$
7	$-\alpha=-1.414$	0
8	0	$-\alpha=-1.414$
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

ตารางที่ 2.2 ค่าของ code level ใน Central composite design (3 ปัจจัย) $\alpha=1.682$

สิ่งทดลอง (Run no.)	Code level		
	ปัจจัย x_1	ปัจจัย x_2	ปัจจัย x_3
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	1
3	-1	1	-1
4	-1	1	1
5	1	-1	-1
6	1	-1	1
7	1	1	-1
8	1	1	1
9	$-\alpha = -1.682$	0	0
10	$+\alpha = +1.682$	0	0
11	0	$-\alpha = -1.682$	0
12	0	$+\alpha = +1.682$	0
13	0	0	$-\alpha = -1.682$
14	0	0	$+\alpha = +1.682$
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6.5' ความสามารถในการหมุน

เป็นความสำคัญอย่างหนึ่งของแบบจำลองอันดับที่สอง ที่จะต้องมีความสามารถในการพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณที่สนใจอยู่ วิธีการหนึ่งที่จะบอกว่า แบบจำลองนี้ดีก็คือแบบจำลองนี้จะต้องอยู่กับร่องกับรอยอย่างมีเหตุผล และมีความแปรปรวนที่มีเสถียรภาพของผลตอบแทนที่จุด x ซึ่งอยู่ในความสนใจ ความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์ที่บางจุด x คือ

$$V[\hat{y}(x)] = \sigma^2 x'(X'X)x$$

ซึ่งถูกแนะนำว่า การออกแบบพื้นผิวผลตอบอันดับที่สองควรจะสามารถในการหมุน (Rotatable) ซึ่งหมายความว่า $V[\hat{y}(x)]$ คือจุด x ทุกจุดที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน นั่นคือค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าทรงตัวบนรูปทรงกลม

การออกแบบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้จะทำให้ค่าความแปรปรวนของ \hat{y} ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อการออกแบบถูกหมุนรอบจุดศูนย์กลาง $(0, 0, \dots, 0)$ ดังนั้นทำให้เราเรียกการออกแบบนี้ว่า การออกแบบที่สามารถหมุนได้ (Rotatable Design)

ความสามารถในการหมุนเป็นพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการเลือกการออกแบบพื้นผิวผลตอบเพราะว่าวัตถุประสงค์ของ RSM คือการหาค่าที่ดีที่สุด และเราไม่ถือว่าตำแหน่งใดเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดก่อนที่จะทำการทดลอง ดังนั้นจะมีเหตุผลที่ดีกว่าที่จะใช้การออกแบบที่ทำให้เกิดตัวประมาณที่มีความเที่ยงตรงเท่ากันในทุกทิศทาง

การออกแบบส่วนประสมกลาง สามารถทำให้หมุนได้โดยการเลือกค่าของ α ค่าของ α สำหรับความสามารถหมุนได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดในส่วนของแฟกทอเรียลของการออกแบบ ความจริงแล้ว $\alpha = (n_f)^{1/4}$ จะทำให้เกิดการออกแบบส่วนประสมกลาง ที่สามารถหมุนได้ โดยที่ n_f คือจำนวนของจุดที่ถูกใช้ในส่วนแฟกทอเรียลของการออกแบบ

2.6.6 CCD รูปทรงกลม

ความสามารถในการหมุนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรูปทรงกลม (Sphere) นั่นคือ จะเป็นการดีมากถ้าจะใช้เกณฑ์ในการออกแบบเช่นนี้เมื่อบริเวณที่เรากำลังสนใจอยู่มีรูปทรงกลม อย่างไรก็ตามการออกแบบที่ดีไม่จำเป็นว่าจะต้องทำให้เกิดความสามารถในการหมุนได้อย่างถูกต้องร้อยเปอร์เซ็นต์ ในความเป็นจริงแล้ว สำหรับบริเวณของทรงกลมที่เรากำลังสนใจนั้น ทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ α หาได้จากการพยากรณ์ความแปรปรวนสำหรับ CCD ซึ่งกำหนดให้ $\alpha = \sqrt{k}$ การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า CCD รูปทรงกลม (Spherical CCD) ซึ่งจะกำหนดให้ทุกจุดที่อยู่ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล และการออกแบบในแนวแกน ให้อยู่บนพื้นผิวของรูปทรงกลมซึ่งมีรัศมี \sqrt{k}

2.6.7 จุดศูนย์กลางของการรันใน CCD

การเลือก α ใน CCD จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่เราสนใจ เมื่อบริเวณนี้เป็นรูปทรงกลม การออกแบบจะต้องรวมเอาจุดศูนย์กลางของการรันเข้าไว้ด้วย ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่พยากรณ์ได้มีเสถียรภาพอย่างที่เป็นที่ยอมรับได้ ตามปกติแล้ว ขอแนะนำให้ใช้ 3-5 รัน

2.6.8 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

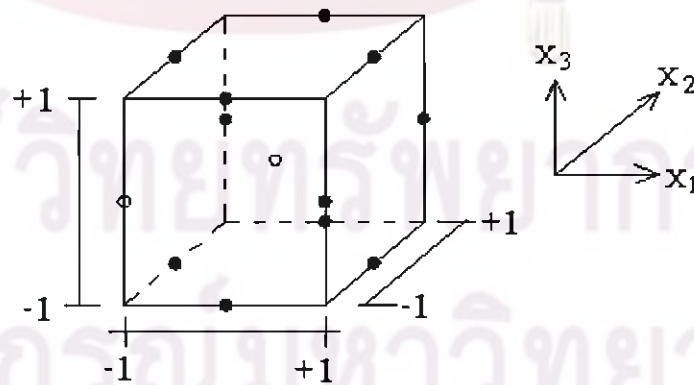
การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบตามระดับสำหรับพิตพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบสามตัวแปร

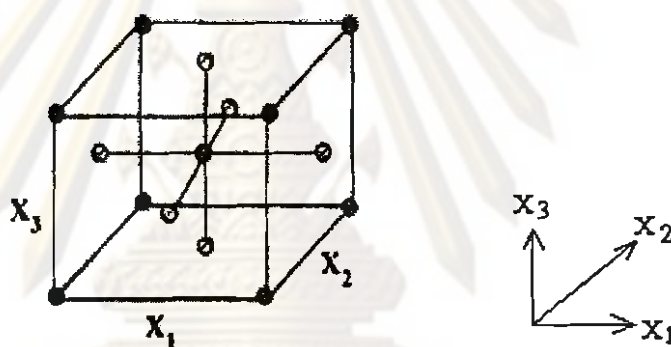
Run	x1	x2	x3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



รูปที่ 2.10 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับสามตัวแปร

2.6.9 บริเวณที่สนใจแบบคิวบอยด์ล

มีเหตุการณ์มากมายที่บริเวณที่อยู่ในความสนใจเป็นแบบคิวบอยด์ล (Cuboidal) แทนที่จะเป็นรูปทรงกลม ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบนี้เรียกว่า Face-Centered Central Composite หรือ Face-Center Cube ที่มี $\alpha = 1$ ซึ่งมีพัฒนาการมาจากส่วนประสมกลาง จะเป็นการออกแบบที่มีประโยชน์อย่างมาก การออกแบบนี้วางจุดดาว (Star) หรือจุดในแนวแกน (Axial) อยู่บนจุดศูนย์กลางของหน้าของรูปลูกบาศก์ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 สำหรับ $k=3$ การออกแบบนี้ได้ถูกนำมาใช้เนื่องจากการออกแบบนี้ต้องการเพียง 3 ระดับของแต่ละปัจจัยเท่านั้น และการเปลี่ยนระดับของปัจจัยทำได้ยากในทางปฏิบัติด้วย อย่างไรก็ตามจะต้องจำไว้ว่า การออกแบบนี้ไม่สามารถหมุนได้



รูปที่ 2.11 การออกแบบ Face-Centered ส่วนประสมกลาง สำหรับ $k=3$

การออกแบบ Face-Centered Cube ไม่ต้องการใช้จุดศูนย์กลางเป็นจำนวนมาก เหมือนกับ CCD รูปทรงกลม ในทางปฏิบัติ $n_c=2$ จะพอเพียงที่จะทำให้เกิดความแปรปรวนของการพยากรณ์อยู่ในระดับที่ตีตลอดบริเวณของการออกแบบ ให้จำไว้ว่า บางครั้งการที่เราต้องรันที่จุดศูนย์กลางเป็นจำนวนมากขึ้น เนื่องจากต้องการให้ค่าประมาณของความผิดพลาดของการทดลองเป็นที่ยอมรับได้

2.6.10 การบล็อกในการออกแบบพื้นผิวผลตอบ

เมื่อใช้การออกแบบพื้นผิวผลตอบ บ่อยครั้งที่มีความจำเป็นที่เราจะต้องพิจารณาถึงการบล็อกเพื่อกำจัดตัวแปรรบกวน ซึ่งเราเรียกการออกแบบพื้นผิวผลตอบว่า เฉิงตั้งจากแบบบล็อก (Block Orthogonal)

สำหรับการออกแบบอันดับที่สองที่จะมีคุณสมบัติเป็นแบบเชิงตั้งฉากแบบบล็อก จะต้องประกอบด้วยเงื่อนไข 2 ข้อ ถ้ามีค่าสังเกต n_b ค่าในบล็อกที่ b เงื่อนไขทั้งสองคือ

1. ในแต่ละบล็อกจะต้องมีการออกแบบอันดับที่หนึ่งเชิงตั้งฉาก นั่นคือ

$$\sum_{u=1}^{n_b} x_{iu}x_{ju} = 0 \quad i \neq j = 0, 1, \dots, k \text{ for all}$$

โดยที่ x_{iu} และ x_{ju} เป็นระดับของตัวแปรที่ i และ j ในวันที่ u ของการทดลองที่มี $x_{0u} = 1$ สำหรับทุก u

2. เศษส่วนของผลรวมทั้งหมดของกำลังสองสำหรับแต่ละตัวแปรที่เกิดขึ้นจากทุกบล็อกจะต้องเท่ากับเศษส่วนของค่าสังเกตทั้งหมดที่เกิดขึ้นในบล็อก นั่นคือ

$$\frac{\sum_{u=1}^{n_b} x_{iu}^2}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2} = \frac{n_b}{N} \quad i = 0, 1, \dots, k \text{ for all}$$

โดยที่ N คือจำนวนของการรันในการออกแบบ

ตามปกติการออกแบบส่วนประสมกลาง จะถูกสร้างให้บล็อกแบบเชิงตั้งฉากใน 2 บล็อกได้เสมอ โดยบล็อกแรกประกอบด้วย n_f จุดแฟกเรียล รวมกับ n_{ca} จุดศูนย์กลาง และบล็อกที่สองประกอบด้วย $n_b = 2k$ จุดในแนวแกนรวมกับ n_{cf} จุดศูนย์กลาง เงื่อนไขแรกสำหรับบล็อกแบบเชิงตั้งฉากจะต้องถูกคงไว้ ไม่ว่า α ที่ใช้ในการทดลองจะเป็นเท่าใดก็ตาม เพื่อคงไว้ซึ่งเงื่อนไขที่สอง

$$\frac{\sum_{u=1}^{n_b} x_{iu}^2}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2} = \frac{n_a + n_{ca}}{n_f + n_{cf}}$$

ด้านซ้ายมือของสมการ คือ $2\alpha^2/n_f$ และหลังจากแทนค่านี้ลงในสมการ เราจะสามารถแก้สมการเพื่อหาค่า α ที่จะทำให้เราได้การบล็อกแบบเชิงตั้งฉากได้คือ

$$\alpha = \left[\frac{n_f(n_a + n_{ca})}{2(n_f + n_{cf})} \right]^2$$

ค่าของ α นี้ไม่ได้ทำให้เกิดการออกแบบที่สามารถหมุนได้ หรือการออกแบบรูปทรงกลม แต่ถ้าต้องการให้การออกแบบนี้สามารถหมุนได้ ดังนั้น $\alpha = (n_f)^{1/4}$ และ

$$(n_f)^{1/2} = \frac{n_f(n_a + n_{ca})}{2(n_f + n_{cf})}$$

ยากมากที่จะหาการออกแบบที่เป็นไปตามสมการตรงๆ

ดังนั้น การออกแบบจะเกือบถูกล็อกอย่างแข็งตั้งฉาก ในทางปฏิบัติ เราอาจผ่อนปรนเงื่อนไขบางประการของการหมุนได้หรือการบล็อกแบบแข็งตั้งฉากโดยไม่ทำให้ข้อมูลสำคัญสูญเสียแต่ประการใด

การออกแบบ Central composite เป็นการออกแบบที่มีความยืดหยุ่นมากในด้านความสามารถในการทำให้เกิดบล็อก ถ้า k มีค่าใหญ่พอ ส่วนของแฟกทอเรียลของการออกแบบจะสามารถถูกแบ่งออกเป็น 2 บล็อกหรือมากกว่าได้ (จำนวนของบล็อกแฟกทอเรียลจะต้องมีค่าเป็นกำลังสองโดยที่ส่วนในแนวแกนจะทำให้เกิดบล็อกขึ้นหนึ่งบล็อก) ตารางที่ 2.4 แสดงการจัดการบล็อกที่น่าสนใจสำหรับการออกแบบส่วนประสมกลาง

ตารางที่ 2.4 การออกแบบส่วนประสมกลาง ที่สามารถหมุนได้หรือเกือบหมุนได้ที่มีบล็อกแบบแข็งตั้งฉาก

k	2	3	4	5
Factorial Block(s)				
n_f	4	8	16	32
Number of blocks	1	2	2	4
Number of points in each block	4	4	8	8
Number of center points in each block	3	2	2	2
Total number of point in each block	7	6	10	10
Axial Block				
n_a	4	6	8	10
n_{ca}	3	2	2	4

ตารางที่ 2.4 การออกแบบส่วนประสมกลาง ที่สามารถหมุนได้หรือเกือบหมุนได้ที่มีบล็อกแบบเชิงตั้งฉาก (ต่อ)

k	2	3	4	5
Total number of points in the axial block	7	8	10	14
Total number of points N in the design	14	20	30	54
Values of α				
Orthogonal blocking	1.4142	1.6330	2.0000	2.3664
Rotatability	1.4142	1.6818	2.0000	2.3784

มีสองประเด็นที่สำคัญเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อการออกแบบพื้นผิวผลตอบดูกรันในบล็อก

ประเด็นที่หนึ่งเกี่ยวกับการใช้จุดศูนย์กลางเพื่อคำนวณตัวประมาณค่าของความผิดพลาดบริสุทธิ์เฉพาะจุดศูนย์กลางที่ดูกรันในบล็อกเดียวกันเท่านั้นที่สามารถถูกนำมาพิจารณาว่าเป็นเรพลิเคชันได้ ดังนั้นพจน์ของความผิดพลาดบริสุทธิ์จะถูกคำนวณได้ภายในแต่ละบล็อกเท่านั้น ถ้าความแปรปรวนมีความอยู่กับร่องกับรอยทั้งบล็อกแล้ว ตัวประมาณค่าผิดพลาดบริสุทธิ์เหล่านี้จะสามารถถูกนำมารวมกลุ่ม (Pooled) กันได้

ประเด็นที่สองเกี่ยวกับผลของบล็อก ถ้าการออกแบบมีการบล็อกอย่างเชิงตั้งฉากใน m บล็อกแล้ว ผลรวมกำลังสองสำหรับบล็อกจะมีค่าเท่ากับ

$$SS_{\text{Blocks}} = \sum_{b=1}^m \frac{B_b^2}{n_b} - \frac{G^2}{N}$$

โดย B_b คือ ผลรวมทั้งหมดของ n_b ค่าสังเกตในบล็อกที่ b และ G คือค่าผลรวมทั้งหมดของ N ค่าสังเกต m บล็อกทั้งหมด เมื่อบล็อกไม่ได้เป็นแบบเชิงตั้งฉากตรงๆแล้ว เราสามารถนำเอาการทดสอบความมีนัยสำคัญของการทดลองแบบทั่วไปมาใช้ได้

2.7 การวิเคราะห์ผล

2.7.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

เทคนิคในการจัดสรรความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในกลุ่มของข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ตามแหล่งที่ทำให้เกิดความแปรปรวน สมการเบื้องต้นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ

ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล

สมการดังกล่าว ได้จากข้อคิดที่ว่าความแตกต่างกันของข้อมูลอาจมีมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล (หรือความผิดพลาดแบบสุ่ม) เพียงอย่างเดียว หรืออาจมาจากการที่ปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลาย ๆ ปัจจัยทำให้เกิดความแปรผัน ทำให้สามารถสร้างสมการได้ 4 ลักษณะ

- (1) ถ้าความแปรผันในข้อมูลนั้น เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ จะได้สมการ

$$Y_i = \mu + \varepsilon_i$$

ค่า Y_i จะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของประชากร μ ด้วยค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม ε_i

- (2) ถ้าจากการทดลองหรือการเก็บรวบรวมข้อมูล พบว่าความแปรผันของข้อมูลมาจากปัจจัยตัวหนึ่ง จะได้สมการ

$$Y_{ij} = \mu + T_j + \varepsilon_{ij}$$

ค่า Y_i จะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของประชากร μ ด้วยความแปรผันจากปัจจัย T และค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม ε_i

- (3) ถ้าจากการทดลองพบว่า ความแปรผันของข้อมูลเกิดจากปัจจัย n ตัวที่ทำให้เกิดความแปรผันในข้อมูลจะได้สมการ

$$Y_{ijk} = \mu + T_j + N_k + \dots + \varepsilon_{ijk}$$

(4) ถ้าความแปรผันของข้อมูล เนื่องมาจากปัจจัย 2 ปัจจัยและอิทธิพลร่วมกันของปัจจัยจะได้สมการ

$$Y_{ijk} = \mu + T_j + N_k + TN_{jk} \dots + \varepsilon_{ijk}$$

สมการ Y เป็น รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการทดลองซึ่งได้จากการจัดสรรความแปรผันออกเป็น ส่วน ๆ ตามที่มาของแหล่งที่ทำให้เกิดความแปรผัน

จากรูปแบบของ Y การวิเคราะห์กระทำโดยการหาขนาดของความแปรผันของปัจจัยในรูปของผลบวกกำลังสอง (Sum of Square) เทียบกับขนาดของความผิดพลาดแบบสุ่มในรูปของผลบวกกำลังสอง เพื่อพิจารณาว่าขนาดของความแปรผันของปัจจัยนั้น ๆ มีนัยสำคัญทางสถิติที่จะยอมรับว่าปัจจัยนั้น ๆ มีอิทธิพลที่ทำให้เกิดความแปรผันในข้อมูลจริง ๆ โดยใช้สถิติในการทดสอบคือ ตัวสถิติ F โดยที่

$$F = \frac{\text{ผลบวกกำลังสองของปัจจัย} / \text{องศาความอิสระของปัจจัย}}$$

ผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม/องศาความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

เปรียบเทียบค่า F ที่คำนวณได้กับค่า $F_{\alpha, a, b}$ จากตารางการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ F โดยที่

$$\alpha = \text{ระดับนัยสำคัญ}$$

$$a = \text{องศาความอิสระของปัจจัย}$$

$$b = \text{องศาความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม}$$

ถ้า $F > F_{\alpha, a, b}$ ยอมรับอิทธิพลของปัจจัย และถ้า $F \leq F_{\alpha, a, b}$ ปฏิเสธอิทธิพลของปัจจัย

2.7.2 การค่า P (P value)

โดยทั่วไป เมื่อต้องการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานนั้น สิ่งที่น่าสนใจ คือ สมมติฐานหลัก(Null hypothesis) จะถูกยอมรับหรือปฏิเสธ ถ้าถูกยอมรับ หมายถึง สมมติฐานเป็นจริง และถ้าถูกปฏิเสธ หมายถึง สมมติฐานนั้นไม่เป็นจริง จึงมีการกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ เพื่อที่จะบอกยอมรับหรือปฏิเสธ Null hypothesis เราเรียกว่า Probability Value (P-Value) ค่า P - Value นี้จะอ้างอิงอยู่กับ α โดยที่ P-Value คือค่าจริง(Actual)ของprobability ซึ่งได้จากการคำนวณ ส่วน α คือเส้นกำหนดหรือจุดแบ่งระหว่างการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก ซึ่งก็คือ Probability เหมือนกัน โดยจะยอมรับสมมติฐานหลัก ถ้า P-Value มากกว่า α และปฏิเสธ ถ้า P-Value เท่าหรือน้อยกว่า

2.7.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบสมมติฐานทางสถิติในการทดลองที่มีปัจจัยที่เราสนใจ ศึกษา 2 ตัว คือ A และ B เราต้องการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ 3 อย่าง คือ

1) การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลหลักของปัจจัย A คือ

$$H_0: T_1 = T_2 = \dots = T_g = 0$$

$$H_1: T_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2) การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลหลักของปัจจัย B คือ

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1: \beta_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

3) การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย คือ

$$H_0: (T\beta)_{ij} = 0 \text{ ทุก } i, j$$

$$H_1: (T\beta)_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2.7.4 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Residual Analysis)

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของปัจจัย 2 ปัจจัย และผลจากการทดสอบอิทธิพลร่วมพบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยนั้น จึงเขียนตัวแบบสถิติของการทดลองนี้ที่ไม่มีอิทธิพลร่วม คือ

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk}$$

เมื่อ

y_{ijk} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

T_i คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของปัจจัย

ε_i คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

ก่อนที่จะสรุปผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ควรตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบสถิตินี้ก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบก็คือการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน ขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนคือ การคำนวณค่าประมาณของความคลาดเคลื่อนของตัวแบบการทดลองแฟคทอเรียลที่มี 2 ปัจจัย และ 2 ปัจจัยนั้นไม่มีอิทธิพลร่วมกัน คือ

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \hat{y}_{ijk} \quad \text{เมื่อ} \quad \hat{y}_{ijk} = \bar{y}_{i..} + \bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...}$$

2.7.5 การทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests หรือ Paired t-Test)

การทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests หรือ Paired t-Test) เป็นการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างตัวอย่าง 2 กลุ่มเมื่อข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวเกิดจากหน่วยทดลอง (Experimental unit) เดียวกัน แต่มีการวัดค่าของข้อมูล 2 ครั้ง เช่น การเปรียบเทียบวิธีหรือภาวะการทดสอบที่ต่างกัน

จากแผนภาพแสดงการทดสอบแบบจับคู่ โดยสัญลักษณ์ที่ใช้มีความหมายดังนี้

x_i = ค่าที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 ของตัวอย่างที่ i

y_i = ค่าที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 2 ของตัวอย่างที่ i

d_i = ค่าที่ได้จากผลต่างระหว่างตัวอย่างที่ i ของการทดลองครั้งที่ 1 กับตัวอย่างที่ i ของการ

ทดลองครั้งที่ 2 คือ $x_i - y_i$ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงการทดสอบแบบจับคู่

ตัวอย่างที่	1	2	i	n	ค่าเฉลี่ย
การทดลองครั้งที่ 1	x_1	x_2	x_i	x_n	\bar{x}_1
การทดลองครั้งที่ 2	y_1	y_2	y_i	y_n	\bar{y}_1
ผลต่างระหว่างตัวอย่างคู่ใดๆ	$x_1 - y_1$ d_1	$x_2 - y_2$ d_2	$x_i - y_i$ d_i	$x_n - y_n$ d_n	\bar{d}

การหาค่าสถิติคำนวณได้จากสมการดังนี้

สมมติฐานของการทดสอบ

H_0 : ค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรไม่แตกต่างกัน หรือ $H_0: \mu_d = 0$

เทียบกับ H_1 : ค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรแตกต่างกัน $H_1: \mu_d \neq 0$

สถิติทดสอบ $t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{S_d / \sqrt{n}}$ โดยที่ $v = n - 1$

เขตปฏิเสธ $t < -\alpha_{\frac{t}{2}}$ หรือ $t > \alpha_{\frac{t}{2}}$

เมื่อ \bar{d} เป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่าง 2 กลุ่มทดลองของข้อมูลที่ได้จากตัวอย่าง

μ_d เป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่าง 2 กลุ่มทดลองของข้อมูลที่ได้จากประชากร

S_c เป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างของข้อมูลที่ได้จากตัวอย่าง

n เป็นขนาดของตัวอย่าง

นำค่า t ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับค่า t จากตาราง หากค่าที่คำนวณได้มากกว่าค่าจากตาราง แสดงว่าค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หรือพิจารณาจากค่า P-value ถ้าค่า P-value มีค่าน้อยกว่า α จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก แสดงว่าค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรแตกต่างกัน นอกจากนี้สามารถพิจารณาได้จากช่วงความเชื่อมั่น โดยหากช่วงความเชื่อมั่นไม่ครอบคลุม 0 จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก แสดงว่าค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรแตกต่างกัน

2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุชาติ แซ่แต้ (2548)

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการปรับปรุงกระบวนการผลิตของกล่องกระดาษลูกฟูกเพื่อปรับปรุงแรงเสียดทานของกล่องกระดาษลูกฟูกให้ดีขึ้นและลดการสูญเสียแรงเสียดทานให้น้อยที่สุด โดยใช้แนวทางของการออกแบบการทดลองอันเนื่องมาจากมีปัจจัยที่มีผลกระทบต่อแรงเสียดทานหลายปัจจัย ดังนั้นจึงได้มีการนำหลักการทางสถิติและการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงเสียดทานของกล่องกระดาษลูกฟูก ผลลัพธ์ของการทดลอง คือ สามารถกำหนดค่าของระดับของแต่ละปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าแรงเสียดทานของกล่องกระดาษลูกฟูก โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ 2^{k-p} Fraction Factorial design Resolution IV และหลังจากการปรับปรุงกระบวนการผลิต มีปริมาณของเสียเกิดขึ้นเพียง 11.20 DPPM และความสามารถของกระบวนการ (Cpk) มีค่าเท่ากับ 1.34

ชาญณรงค์ สายแก้วและนิพนธ์ ชิลพัฒน์ (2549)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องย่อยขวดแก้วและประเมินปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเศษแก้วของเครื่องย่อยขวดแก้วซึ่งการประเมินการทำงานของเครื่องนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องจักร การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง 2^k

แพคทอเรียลถูกนำมาใช้ในการเก็บข้อมูลและทำการสร้างเข้ากับรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของพื้นผิวผลตอบสนอง ค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดเศษแล้วที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงและสามารถลอดผ่านได้เป็นค่าที่ถูกบันทึกไว้เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ความแปรปรวนและการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อขนาดของเศษแก้ว ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยขวดแก้วให้ได้ขนาดและปริมาณที่มากคือความเร็วรอบและอัตราการป้อนขวดแก้ว นอกจากนี้ความเร็วรอบประมาณ 450 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนขวดแก้ว 15 ขวดต่อนาทีเป็นการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องเพื่อให้ได้ขนาดของเศษแก้วตามที่ตลาดต้องการและได้ปริมาณมากที่สุดโดยเฉลี่ย

วิชา วิชาภัย บุนนาค (2543)

งานวิจัยออกแบบการทดลองแปรสภาวะในการบ่มสารเคลือบผิวโดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิทโรเตทาบิล (Central Composite Rotatable, CCR) และเลือกใช้การวิเคราะห์ผลโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง(Response Surface Methodology, RSM) ทำให้ได้สมการพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการบ่มกับสมบัติเชิงกลตอบสนองของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอีพอกซีเรซิน ผลจากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการบ่มซึ่งได้แก่ อุณหภูมิการบ่ม ระยะเวลาในการบ่ม และปริมาณทรายที่ใช้เป็นสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติเชิงกลพบว่าของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอีพอกซีเรซินที่บ่ม ณ อุณหภูมิต่ำ (31°C) จะมีความสามารถในการรับแรงกระแทก (impact strength) และค่าความเหนียวเมื่อแตก (fracture toughness) สูง ในขณะที่ความสามารถในการรับแรงกด (compressive strength) ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการเมื่อเทียบกับการรับแรงกดตันของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่ง ที่บ่ม ณ อุณหภูมิสูง (99°C) การเพิ่มเวลาในการบ่มจะช่วยให้คุณสมบัติในการรับแรงกดดีขึ้น ส่วนการใส่ทรายเพื่อเป็นสารเติมแต่งไม่ได้มีผลต่อการรับแรงกดเท่าใดนัก แต่กลับช่วยให้พลังงานการแตก (fracture energy) ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอีพอกซีเรซินสูงขึ้นมากแต่ขณะเดียวกันก็ทำให้สมบัติในการรับแรงกดและแรงกระแทกลดลงเล็กน้อย ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แต่ละสมบัติเชิงกลจะมีสภาวะที่เหมาะสมในการบ่มจะแตกต่างกันออกไป ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอีพอกซีเรซินจะมีคุณสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุดเมื่อบ่มที่ 31 OC นาน 56.2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาบ่มที่นานที่สุดในงานวิจัย โดยใส่ทราย 23-25% สมบัติเชิงกลที่ลดลงมากที่สุด ณ สภาวะการบ่มนี้ ได้แก่ ความสามารถในการรับแรงกด ซึ่งลดลง 24.2% อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของความสามารถในการรับแรงกดจะเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มออกไปอีก

วรพงศ์ นาวาวรรกุล (2546)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความแปรปรวนของน้ำหนักกระดาษเกรด 75 g/m² โดยก่อนการปรับปรุงของน้ำหนักมาตรฐานกระดาษคือ 1.98 g/m² และดัชนีสมรรถนะรวมของกระบวนการคือ 0.71 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัย 2 ปัจจัย (Two Factor Analysis of Variance) ผลที่ได้พบว่าความแตกต่างของน้ำหนักมาตรฐานในแนวตามยาวเครื่องและในแนวตามขวางเครื่องอย่างมีนัยสำคัญ คือปัจจัยทางด้านแนวตามขวางเครื่องมีผลกระทบต่อน้ำหนักมาตรฐานมากกว่า และผลของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยในแนวตามยาวและแนวตามขวางไม่มีผลต่อน้ำหนักมาตรฐาน

A.L.D. Skury, G.S. bobrovnitchii, S.N. Monteiro (2004)

บทความกล่าวถึงการใช้การวิเคราะห์การประยุกต์ใช้การหลอมละลายของต่างในการทำเพชรให้บริสุทธิ์ที่เหมาะสม เพื่อแก้ปัญหาสิ่งเจือปนในเพชร โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Experiment factorial design) และวิธีการพื้นผิวตอบ (Response surface methodology) โดยมีปัจจัยที่ศึกษา 4 ปัจจัยด้วยกัน คือ โปแตสเซียมไนเตรต (KNO₃) โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) อุณหภูมิและเวลา มีผิวเพชรเป็นตัวแปรผลตอบ ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองคือ ที่อุณหภูมิ 475 °C เวลา 70 นาที จำนวนโปแตสเซียมไนเตรต (KNO₃) เท่ากับ 142.5 กรัม และจำนวนโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เท่ากับ 244 กรัม

ลัดดา เรียงเลิศ (2546)

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการพิมพ์สีในโรงงานผลิตพื้นยางนีโอไลท์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยคือ เครื่องพิมพ์ระบบกราเวียร์และเครื่องวัดการสะท้อนแสงของสี โดยมีการปรับแต่งค่าของเครื่องพิมพ์แบบคงที่ โดยการทดสอบปัจจัยที่สำคัญของเครื่องพิมพ์ที่คาดว่าจะมีผลต่อการปรับตั้งเครื่อง ผลการวิจัยหลังการปรับปรุงกระบวนการพิมพ์ทำให้เวลาที่ใช้ในการปรับตั้งกระบวนการลดลงจากเดิม 74.70 % จากผลสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเมื่อวัดจากปริมาณผลผลิตที่ได้หลังการปรับปรุง มีค่าเพิ่มมากขึ้น 74.08% และเกรด A ของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น 13.6%

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

เนื่องจากจุดประสงค์ในการวิจัยครั้งนี้คือ เพื่อปรับปรุงงานเซมิคอนดักเตอร์ที่มีขา (Peripheral) ไม่ให้เกิดปัญหาเส้นทองสัมผัสกันหรือเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอนซึ่งถือว่าเป็นของเสีย ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำให้เส้นทองสัมผัสกันในงานเซมิคอนดักเตอร์ ดำเนินการเปรียบเทียบปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อการทำให้เส้นทองสัมผัสกันในงานเซมิคอนดักเตอร์ และกำหนดค่าตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อให้ไม่มีของเสียที่เกิดจากเส้นทองสัมผัสกันเกิดขึ้นอีก ดังนั้นในการทดลองต้องออกแบบการทดลอง แล้วปรับค่าตัวแปรสำหรับเครื่องจักรที่กำหนดไว้ตามแบบการทดลองแล้วจึงทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

3.1 การแบ่งส่วนการวิจัย

3.1.1 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) ที่ส่งผลต่อปัญหาเส้นทองสัมผัสกันหรือเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน โดยการออกแบบการทดลองแบบ Response Surface เพื่อนำปัจจัยหลักที่มีนัยสำคัญไปศึกษาเพื่อหา ระดับที่เหมาะสม

3.1.2 การทดลองเพื่อค้นหาระดับค่าตัวแปรที่เหมาะสม (Response Optimizer) และศึกษาพื้นผิวตอบสนองของ ตัวแปร (Response Surface Methodology)

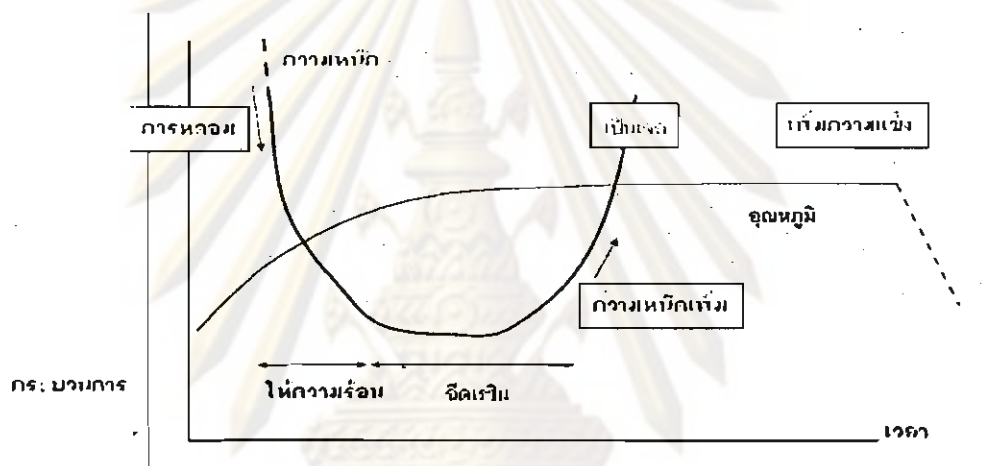
3.2 การกำหนดปัจจัย ระดับปัจจัย

การกำหนดปัจจัยที่จะนำมาพิจารณาในการออกแบบการทดลอง ผู้วิจัยได้มาจากการรวบรวมข้อมูลจากการประชุมกับบุคลากรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ซึ่งมีการใช้แผ่นภูมิ崗งปลาเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์

ในส่วนของระดับของปัจจัยต่างๆที่จะนำมาพิจารณาในการออกแบบการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้มาจากการรวบรวมข้อมูลจากการประชุมกับบุคลากรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์เช่นกัน ซึ่งมีดังนี้

3.2.1 ปัจจัยที่จะศึกษา

เนื่องจากเวลาในการฉีดเรซินและเวลาให้ความร้อนแก่เรซิน มีความสัมพันธ์กับความหนืด (Viscosity) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการขึ้นรูป ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของความหนืด และเวลา

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อเวลาเปลี่ยนไปความหนืดของเรซินก็เปลี่ยนไป ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปต้องการให้เรซินมีความหนืดที่น้อยที่สุด เพื่อให้แรงไปกระทำกับเส้นทองน้อยที่สุด ดังนั้นค่าของ เวลาในการฉีดและเวลาให้ความร้อนแก่เรซินต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่สุดซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินด้วย โดยเรซินที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้มีค่าความเป็นเจลอยู่ที่ 32 วินาที

3.2.1.1. เวลาในการฉีดเรซิน คือระยะเวลาในการฉีดเรซินเข้าไปในแม่พิมพ์ ระยะเวลาในการฉีดมีผลให้เกิดเส้นทองสัมพันธ์กัน หรือ เส้นทองใกล้เคียงกันน้อยกว่า 23 ไมครอน เนื่องจาก

F คือ แรง, m คือมวล และ a คือความเร่ง

$$F = ma$$

$$a = v/t$$

$$F = m \times (v/t)$$

$$t = mv / F$$

จากสูตรจะเห็นว่า $t \propto F$

ซึ่งหมายความว่าถ้าเวลาในการฉีดของเรซินมีน้อยจะส่งผลให้แรงของเรซินที่ฉีดเข้าไปยังแม่พิมพ์มีมากเช่นกัน

เนื่องจากคุณสมบัติของเรซินเมื่อเวลาผ่านไป เรซินจะเปลี่ยนสถานะจากการเป็นเจลเป็นของแข็ง ซึ่งก็หมายความว่าเรซินจะมีความหนืดสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นเมื่อเวลาในการฉีดเรซินมากเกินไปจะส่งผลให้เรซินที่มีความหนืดสูงมีแรงกระทำต่อเส้นทองเพิ่มมากขึ้น

ดังนั้น จึงต้องมีการกำหนดเวลาในการฉีดเรซินให้เหมาะสม ผู้วิจัยได้กำหนดเวลาในการฉีดเรซินในการทดลอง ดังนี้

- ระดับต่ำ เวลาในการฉีดเรซิน 7 วินาที
- ระดับสูง เวลาในการฉีดเรซิน 13 วินาที

3.2.1.2. เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน คือระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินก่อนทำการฉีด ระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินมีผลให้เกิดเส้นทองสัมผัสกันหรือ เส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน เนื่องจากความร้อนที่ให้ไปนั้นจะส่งผลต่อคุณสมบัติของเรซินซึ่งมีอยู่ 3 ช่วง

ช่วงแรก คือช่วงที่เรซินมีสถานะเป็นของแข็งซึ่งเมื่อโดนความร้อน ความแข็งแรงของเรซินก็จะค่อยๆลดลงเรื่อยๆ

ช่วงที่สอง คือช่วงที่เรซินเป็นเจล (ช่วงที่เป็นของเหลว) สูงสุด ช่วงนี้ถือว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดที่จะฉีดเรซินเข้าไปยังแม่พิมพ์

ช่วงที่สาม คือช่วงที่เรซินจะค่อยๆเปลี่ยนสถานะจากการเป็นเจลกลับมาเป็นของแข็ง

กล่าวได้ว่าหากกำหนดให้ระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินสั้นเกินไป เรซินในช่วงนี้จะมีความหนืดสูงเนื่องจากเป็นช่วงที่กำลังกึ่งระหว่างสภาวะที่แข็งและเป็นเจล จึงส่งผลให้เรซินมีแรงกระทำต่อเส้นทองมาก และหากระยะเวลาการให้ความร้อนแก่เรซินมีมากเกินไปจะเข้าสู่ช่วงที่สามของเรซินคือเปลี่ยนสถานะจากของเจลเป็นของแข็ง ซึ่งทำให้เรซินมีความหนืดสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้เรซินมีแรงกระทำต่อเส้นทองมากเช่นกัน

ดังนั้น จึงต้องมีการกำหนดเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินให้เหมาะสม ผู้วิจัยได้กำหนดเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินในการทดลอง ดังนี้

- ระดับต่ำ เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน 9 วินาที
- ระดับสูง เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน 15 วินาที

3.2.1.3.แรงฉีดเรซิน คือ แรงที่กระทำกับแกนฉีด (Plunger) เพื่อให้เรซินไหลเข้าไปในแม่พิมพ์อย่างสมบูรณ์ แรงฉีดมีผลให้เกิดเส้นทองสัมผัสกัน หรือ เส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน เนื่องจากแรงดังกล่าวจะเป็นตัวผลักดันให้มวลของเรซินไปปะทะกับเส้นทองจึงทำให้เส้นทองเกิดการโค้งงอจนสัมผัสหรือใกล้กัน

ในงานวิจัยนี้สามารถเทียบค่าแรงฉีด 1 ตันเท่ากับแรงดัน 92.80 kgf/cm^2 ที่แกนฉีด (Plunger) ขนาด 14 มิลลิเมตรจำนวน 7 ชิ้น

ดังนั้น จึงต้องมีการกำหนดแรงฉีดเรซินที่ใช้ในการฉีดเรซินให้เหมาะสม ผู้วิจัยได้กำหนดแรงฉีดที่ใช้ในการฉีดเรซินในการทดลอง ดังนี้

- ระดับต่ำ แรงฉีดที่ใช้ในการฉีดเรซิน 16 ตัน
- ระดับสูง แรงฉีดที่ใช้ในการฉีดเรซิน 18 ตัน

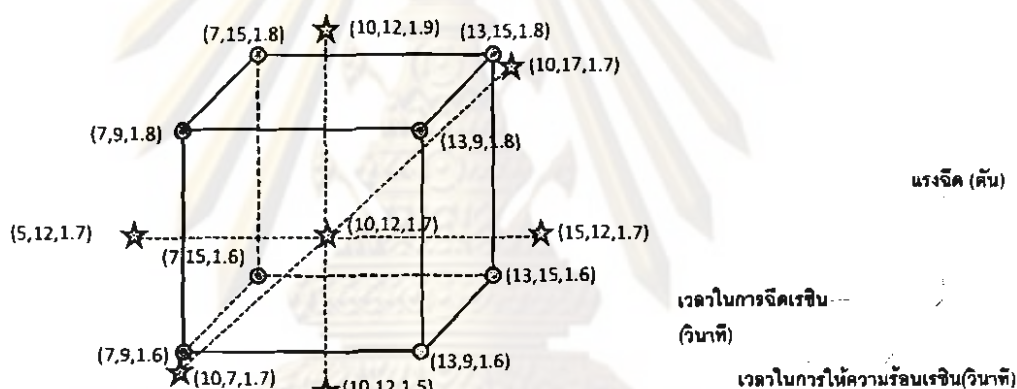
โดยอ้างอิงจากงานเซมิคอนดักเตอร์ชนิดมีขาที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกัน

3.2.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ ในการทดลอง

ระดับปัจจัยจะใช้ค่าที่ใช้งานในปัจจุบันโดยมีค่าคลาดเคลื่อนที่เพิ่มหรือลดลง ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สรุประดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์

ปัจจัย	ระดับ					หน่วย
	$(-\alpha)$	(-1)	0	$(+1)$	$(+\alpha)$	
เวลาในการฉีด (Injection time)	5	7	10	13	15	วินาที
เวลาในการให้ความร้อนเรซิน (Tablet preheat time)	7	9	12	15	17	วินาที
แรงฉีด (Injection force)	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	ตัน



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงการอธิบายการทดลองแบบ CCD

3.3 การออกแบบการทดลอง

เมื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษาลแล้ว นำไปออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ช่วยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งได้รูปแบบของการทดลองดังนี้

การออกแบบการทดลองในกระบวนการขัดเตรียมผิวชิ้นงาน โดย

ปัจจัย A คือ เวลาในการฉีด (วินาที)

ปัจจัย B คือ เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน (วินาที)

ปัจจัย C คือ แรงฉีดเรซิน (ตัน)

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงลำดับการทดลองและค่าของปัจจัยในการทดลอง

Run	Injection time	Tablet preheat time	Injection force
	A	B	C
	วินาที	วินาที	ตัน
1	7	9	1.6
2	13	9	1.6
3	7	15	1.6
4	13	15	1.6
5	7	9	1.8
6	13	9	1.8
7	7	15	1.8
8	13	15	1.8
9	5	12	1.7
10	15	12	1.7
11	10	7	1.7
12	10	17	1.7
13	10	12	1.5
14	10	12	1.9
15	10	12	1.7
16	10	12	1.7
17	10	12	1.7
18	10	12	1.7
19	10	12	1.7
20	10	12	1.7

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

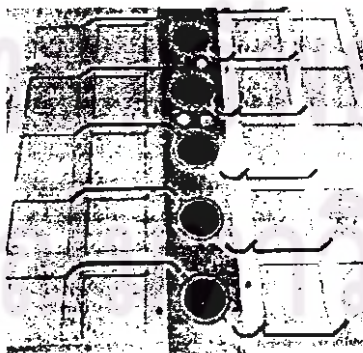
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

1. เครื่องขึ้นรูป เป็นเครื่องจักรที่ทำงานด้วยระบบไฮดรอลิก ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งภายในของเครื่องขึ้นรูปจะมีแม่พิมพ์ เป็นแม่แบบในการขึ้นรูปงานเซมิคอนดักเตอร์



รูปที่ 3.3 เครื่องขึ้นรูป

2. แม่พิมพ์ ทำจากเหล็กซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แม่พิมพ์ที่ผลิตงานได้ทั้งหมด 28 ชิ้นในการขึ้นรูป 1 ครั้ง โดยมีกระบอกฉีด(Pot)ทั้งหมด 7 อัน ขนาด 14.6 มิลลิเมตร และมีแกนฉีด (Plunger) ทั้งหมด 7 อัน ขนาด 14 มิลลิเมตรดังรูป



รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์

3. เครื่องเอกซเรย์ เครื่องเอกซเรย์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดระยะห่างของเส้นทองที่อยู่ภายในเรซิน เนื่องจากหลังจากเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปแล้ว งานเซมิคอนดักเตอร์จะถูกปกคลุมด้วยเรซิน จึงไม่สามารถมองเห็นเส้นทองภายในได้ ซึ่งระยะที่วัดได้จะมีหน่วยเป็น ไมครอน



รูปที่ 3.5 เครื่องเอกซเรย์

4. กล้องไมโครสโคป(Microscope) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณลักษณะภาพด้วยสายตา ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้ในการตรวจสอบเส้นทองก่อนทำการขึ้นรูปงานเซมิคอนดักเตอร์ และตรวจสอบรูปลักษณะของงานหลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว



รูปที่ 3.6 กล้องไมโครสโคป

5. เทอร์โมมิเตอร์(Thermometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ เนื่องจากงานวิจัยนี้ควบคุมอุณหภูมิที่ 175 ± 5 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องมีการวัดอุณหภูมิในแต่ละจุดของแม่พิมพ์ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ เพื่อตรวจสอบว่าแม่พิมพ์อยู่ในสภาพที่เหมาะสมหรือไม่



รูปที่ 3.7 เทอร์โมมิเตอร์

3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

1. นำงานผ่านเครื่อง UV เพื่อทำความสะอาดหน้าชิป(Chip) โดยทำความสะอาดเฉพาะผิวบนของชิป (Chip)
2. ตรวจสอบคุณภาพของงานหลังถูกวางเส้นทองแล้วด้วยกล้องไมโครสโคป
3. ตั้งค่าและตรวจสอบอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้อยู่ในช่วง 175 ± 5 องศาเซลเซียส
4. กำหนดค่า เวลาในการฉีด(Injection time), เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน (Tablet preheat time) และแรงฉีดเรซิน(Injection pressure) ตามตารางที่ 3.2
5. กำหนดค่าปัจจัยที่พิดไว้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงปัจจัยที่พิดในงานวิจัย

ปัจจัย	หน่วย	ค่าพารามิเตอร์
แรงกด (Clamp force)	ตัน	75
ตำแหน่งวางเรซิน (Tablet position)	mm	17
เวลาในการอบ (Cure time)	วินาที	50
อุณหภูมิ	องศา	175

6. ทำการผลิตงานโดยใช้พารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.2 และ 3.3
7. นำชิ้นงานออกจากเครื่องขึ้นรูป
8. ตรวจสอบงานด้วยกล้องไมโครสโคป
9. ตรวจสอบคุณภาพเส้นทองภายในด้วยเครื่องเอกซเรย์

3.6 การตรวจสอบคุณภาพงานด้วยกล้องไมโครสโคป

1. ทำการตรวจสอบคุณภาพงานก่อนเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปด้วยกล้องไมโครสโคป ด้วยกำลังขยาย 20 เท่า โดยพิจารณาคุณสมบัติดังนี้
 - 1.1 ลักษณะของเส้นทองที่ดูกว้างแล้วต้องมีลักษณะตรง
 - 1.2 คุณภาพของการวางเส้นทอง พิจารณาจากสภาพการยึดเกาะต่อผิวหน้าชิป (Chip) คือเส้นทองต้องไม่หลุดจากผิวหน้าชิปหรือจากขา และต้องไม่มีเศษสิ่งสกปรกอยู่ชั้นกลางระหว่างเส้นทองและชิปหรือขา
2. ทำการตรวจสอบคุณภาพงานก่อนหลังเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปด้วยกล้องไมโครสโคป ด้วยกำลังขยาย 20 เท่า โดยพิจารณาคุณสมบัติดังนี้
 - 2.1 รูปทรงของงานต้องมีรูปร่างและขนาดตรงกับแม่พิมพ์
 - 2.2 คุณภาพของผิวงาน พิจารณาผิวของงานดังนี้

- 2.2.1 ผิวงานต้องมีความเรียบ สม่ำเสมอ ไม่มีหลุม ฟองอากาศ หรือ รอยแตกบนผิวงาน
- 2.2.2 ผิวงานต้องเป็นสีเดียวกันทั้งหมด ไม่มีสีแปลกปลอมปะปนอยู่บน ผิวงาน
- 2.2.3 ผิวงานต้องสะอาด ไม่มีเศษสกปรกหรือคราบมันติดบนผิวงาน

3.7 การตรวจสอบคุณภาพเส้นทองด้วยเครื่อง X-ray

ทำการตรวจสอบคุณภาพเส้นทองภายในด้วยเครื่อง X-ray โดยพิจารณาคูณสมบัติดังนี้

1. เส้นทองที่อยู่ติดกันต้องมีระยะห่างมากกว่า 1 เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นทอง กล่าวคือในงานวิจัยนี้ใช้เส้นทองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 ไมครอน เพราะฉะนั้นระยะห่างของเส้นทองที่อยู่ติดกันต้องมีค่ามากกว่า 23 ไมครอน
2. เส้นทองต้องไม่หลุดจากผิวหน้าซีป หรือ ขางาน

3.8 การวิเคราะห์ข้อมูล

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูล

โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลมีด้วยหลายผลิตภัณฑ์ สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีวิธีการออกแบบการทดลองโดยวิธีพื้นผิวผลตอบ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ โปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งสามารถตอบสนองต่อการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของ การทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบจะพิจารณาค่า P ที่ได้จากการทดลอง ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลในกระบวนการขึ้นรูป ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้กำหนดให้ระดับความเชื่อมั่น มีค่าเท่ากับ 95% ที่ความเชื่อมั่นระดับนี้ให้ความถูกต้องและมีความเหมาะสมสำหรับการลงทุนของบริษัท

โดยที่ถ้าค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นๆมีผลกระทบต่อระยะห่างของเส้นทองที่อยู่ติดกัน

ถ้าค่า P มากกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นๆไม่มีผลกระทบต่อระยะห่างของเส้นทองที่อยู่ติดกัน

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลอง

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีการทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดลองที่ได้ สามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงมีการนำผลการทดลองที่ได้มาตรวจสอบถึงความสัมพันธ์กัน โดยใช้เทคนิคการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests หรือ Paired t-Test) ซึ่งเป็นการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างตัวอย่าง 2 กลุ่มเมื่อข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวเกิดจากหน่วยทดลอง (experimental unit) เดียวกัน แต่มีการวัดค่าของข้อมูล 2 ครั้ง โดยพิจารณาจากค่า P -value ถ้าค่า P -value มีค่าน้อยกว่า α จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก แสดงว่าค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรแตกต่างกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ทำการทดลองกระบวนการขึ้นรูป โดยปรับค่าของปัจจัยตามที่ออกแบบการทดลองไว้

4.1.1 ผลการทดลองของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ โดยแสดงค่าระยะห่างของเส้นที่อยู่ติดกันดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดลองของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์

Run	Injection time	Tablet preheat time	Injection force	ระยะห่างของเส้นทอง	
	A	B	C	Y_1	Y_2
	วินาที	วินาที	ตัน	ไมครอน	ไมครอน
1	7	9	1.6	15	10
2	13	9	1.6	49	56
3	7	15	1.6	5	7
4	13	15	1.6	31	27
5	7	9	1.8	7	11
6	13	9	1.8	45	43
7	7	15	1.8	3	2
8	13	15	1.8	27	25
9	5	12	1.7	2	1
10	15	12	1.7	37	35
11	10	7	1.7	31	36

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดลองของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ (ต่อ)

Run	Injection time	Tablet preheat time	Injection force	ระยะห่างของเส้นทอง	
	A	B	C	Y_1	Y_2
	วินาที	วินาที	ตัน	ไมครอน	ไมครอน
12	10	17	1.7	7	5
13	10	12	1.5	35	28
14	10	12	1.9	23	29
15	10	12	1.7	33	35
16	10	12	1.7	38	42
17	10	12	1.7	24	32
18	10	12	1.7	35	41
19	10	12	1.7	43	45
20	10	12	1.7	44	47

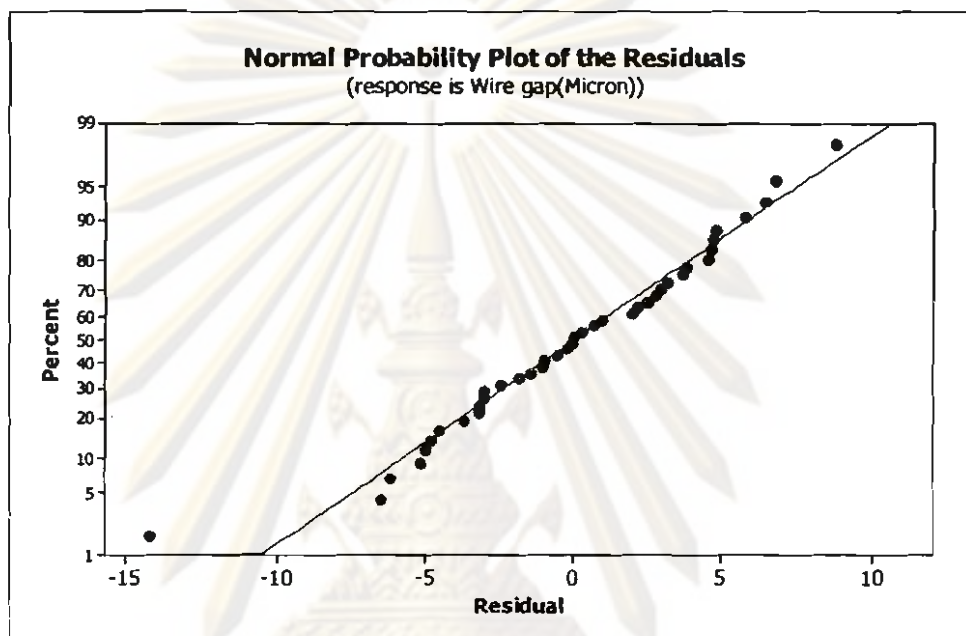
4.1.2 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและเชื่อถือได้ของข้อมูล โดยพิจารณาจาก

1. การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality)

นำ Residual ของข้อมูลมาพล็อตกราฟ เพื่อตรวจสอบการกระจายของข้อมูลว่าเป็นแบบปกติหรือไม่ โดยกราฟที่ได้จากการพล็อตมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือประมาณเกือบเป็นเส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือได้

Normal Probability Plot ของข้อมูลค่าระยะห่างของเส้นทอง ดังรูปที่ 4.1

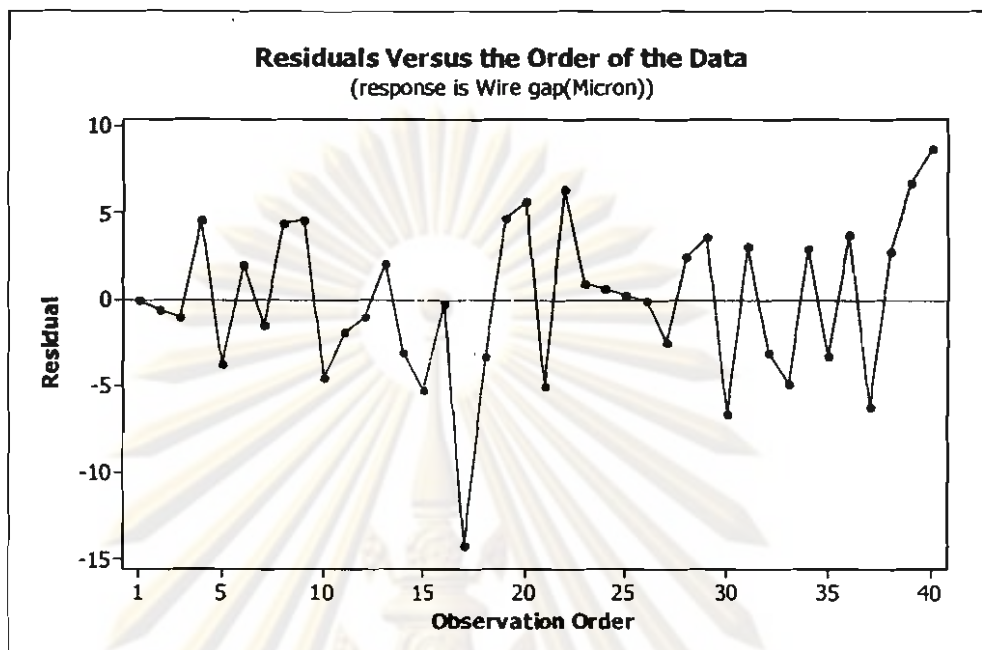


รูปที่ 4.1 Normal Probability Plot ของข้อมูลค่าระยะห่างของเส้นทอง

จากรูปที่ 4.1 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลค่าระยะห่างของเส้นทอง มีลักษณะประมาณเกือบเป็นเส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้

2. การทดสอบความเป็นอิสระแก่กัน

นำ Residual ของข้อมูลพล็อตกับลำดับการทดลอง เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่าง Residual โดยความสัมพันธ์ของ Residual ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือการจัดกระจาย แสดงว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลค่าระยะห่างของเส้นทอง กับลำดับการทดลอง ดังรูปที่ 4.2



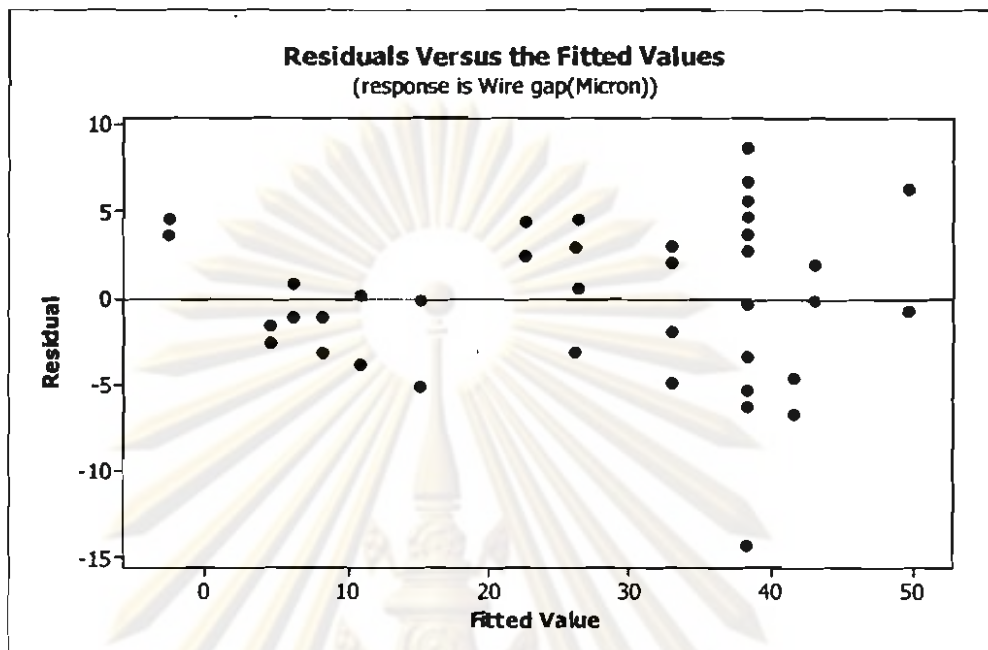
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลค่าระยะห่างของเส้นทองกับลำดับการทดลอง

จากรูปจะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจายตัว แสดงว่า ข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

3. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล

นำ Residual ของข้อมูลพล็อตกับ Fit value เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่าง Residual โดยความสัมพันธ์ของ Residual ไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่า ข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล ดังรูปที่ 4.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 ค่า Residual กับ Fit value ของข้อมูลค่าระยะห่างของเส้นทอง

ในการทดลองกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์

จากรูปที่ 4.3 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่า ข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการวิเคราะห์ค่า P

1. วิเคราะห์จากระยะห่างของเส้นทองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ในการวิเคราะห์หาค่า P ของปัจจัยต่างๆ ค่า P ที่ได้ จากโปรแกรมสำเร็จรูป แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จากระยะห่างของเส้นทอง

ปัจจัย	Coef	SE Coef	ค่า T	ค่า P
Constant	38.2102	1.4920	25.610	0.000
A	13.1452	0.9899	13.279	0.000
B	-7.3772	0.9899	-7.452	0.000
C	-2.0319	0.9899	-2.053	0.049

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จากระยะห่างของเส้นทอง (ต่อ)

ปัจจัย	Coef	SE Coef	ค่า T	ค่า P
A*A	-6.6345	0.9637	-6.885	0.000
B*B	-6.2809	0.9637	-6.518	0.000
C*C	-3.0989	0.9637	-3.216	0.003
A*B	-3.5625	1.2934	-2.754	0.010
A*C	-0.5625	1.2934	-0.435	0.667
B*C	0.6875	1.2934	0.532	0.599

จากตารางที่ 4.2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อระยะห่างของเส้นทอง ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระยะห่างของเส้นทอง คือ

1. เวลาฉีดเรซิน
2. เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน
3. แรงฉีดเรซิน
4. อันตรกิริยาระหว่างเวลาในการฉีดกับเวลาในการฉีด
5. อันตรกิริยาระหว่างเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินกับเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน
6. อันตรกิริยาระหว่างแรงฉีดเรซินกับแรงฉีดเรซิน
7. อันตรกิริยาระหว่างเวลาฉีดเรซินกับเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน

ปัจจัยที่เหลือไม่มีผลพอที่จะสรุปว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีผลกระทบต่อระยะห่างของเส้นทอง เนื่องจากค่า P ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งประกอบด้วย ปัจจัยต่างๆดังนี้

1. อันตรกิริยาระหว่างเวลาฉีดเรซินกับแรงฉีดเรซิน

2. อันตรกิริยาระหว่างเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินกับแรงฉีดเรซิน

4.3 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง

ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยวิเคราะห์จากปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยทุกตัวที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเข้มข้น 95% จะได้สัมประสิทธิ์ของปัจจัยต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง

ปัจจัย	สัมประสิทธิ์
ค่าคงที่	-1058.86
A	23.875
B	18.2484
C	1033.32
A*A	-0.737162
B*B	-0.697879
C*C	-309.893
A*B	-0.395833
A*C	-
B*C	-

ความสัมพันธ์ที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง

$$Y_{\text{gap}} = -1058.86 + 23.875A + 18.2484B + 1033.32C - 0.737162(A*A) - 0.697879(B*B) -$$

$$309.893(C*C) - 0.395833(A*B)$$

(1)

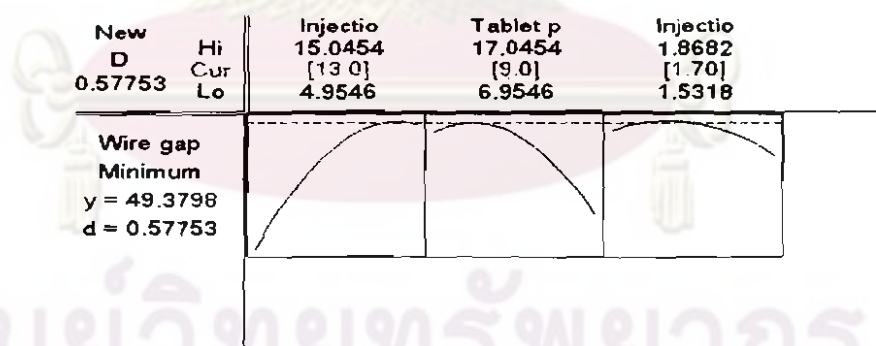
เมื่อ Y_{gap} คือ ระยะห่างของเส้นทอง (ไมครอน)

- A คือ เวลาฉีดเรซิน (วินาที)
- B คือ เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน (วินาที)
- C คือ แรงฉีดเรซิน (ตัน)

4.4 การหาสภาวะที่เหมาะสม

กระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์

หาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ โดยพิจารณา ค่าระยะห่างของเส้นทองตั้งแต่ 23 ไมครอนขึ้นไป โดยไม่มีข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพ จากการวิเคราะห์โดยใช้ response optimizer (เครื่องมือหาค่าที่ดีที่สุด) ในโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าสามารถนำผลตามรูปที่ 4.4 มาใช้ในการประเมินค่าระยะห่างของเส้นทอง ณ พารามิเตอร์ค่าต่างๆ ได้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

จากรูปกราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยซึ่งแสดงออกเป็นกราฟพาราโบลา สามารถกล่าวได้ว่าเมื่อปรับค่าของพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งลงหรือเพิ่มขึ้น จะมีผลให้ระยะห่างของเส้นทองแคบลง

ดังนั้นจึงได้ค่าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ค่าที่เหมาะสม
เวลาในการฉีดเรซิน (วินาที)	A	13
เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน (วินาที)	B	9
แรงฉีดเรซิน (ตัน)	C	1.7

4.5 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์แล้ว นำไปทดสอบเพื่อยืนยันผล จำนวน 20 ล็อต ล็อตละ 30 ข้อมูลโดยกำหนดค่าของปัจจัยตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์

Lot ที่	ระยะห่างของเส้นทองเฉลี่ย (ไมครอน)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	45.39	2.614
2	45.70	2.973
3	45.47	2.688
4	45.90	3.144
5	45.20	3.224
6	46.21	4.559
7	44.88	4.867
8	44.98	3.437
9	44.39	3.305
10	45.00	3.833
11	45.01	3.265
12	45.32	3.926
13	43.56	3.515
14	45.54	4.062

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ (ต่อ)

Lot ที่	ระยะห่างของเส้นทองเฉลี่ย (ไมครอน)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
15	45.62	4.498
16	44.74	3.788
17	44.60	4.125
18	46.08	3.539
19	45.41	4.255
20	44.24	4.515
เฉลี่ย	45.16	3.707

จากการทดสอบผลของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ จะได้ค่าระยะห่างของเส้นทองเฉลี่ยเท่ากับ 45.16 ไมครอน มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 3.707 ไมครอนและไม่พบข้อบกพร่องใดๆที่ทำให้งานเป็นของเสีย

4.6 ทดสอบความสัมพันธ์ที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง

ทำการตรวจสอบความแม่นยำของสมการความสัมพันธ์ที่หาได้ โดยเปรียบเทียบค่าระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่าระยะห่างของเส้นทองที่วัดได้จากเครื่อง X-ray

ตารางที่ 4.6 ตารางเปรียบเทียบค่าระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่าระยะห่างของเส้นทองที่วัดได้จากเครื่อง X-ray

การทดลอง	ระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากการวัด (ไมครอน)	ระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากสมการ (ไมครอน)	ค่าความคลาดเคลื่อน (ไมครอน)	% ความคลาดเคลื่อน
1	15.0	14.9	0.1	0.672
2	49.0	48.3	0.7	1.417
3	5.0	7.3	2.3	31.231

ตารางที่ 4.6 ตารางเปรียบเทียบค่าระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากสมการ
ความสัมพันธ์กับค่าระยะห่างของเส้นทองที่วัดได้จากเครื่อง X-ray (ต่อ)

การทดลอง	ระยะห่างของ เส้นทองที่ได้จาก การวัด (ไมครอน)	ระยะห่างของ เส้นทองที่ได้จาก สมการ (ไมครอน)	ค่าความคลาด เคลื่อน (ไมครอน)	% ความคลาด เคลื่อน
4	31.0	26.4	4.6	17.263
5	7.0	10.8	3.8	35.404
6	45.0	44.3	0.7	1.690
7	3.0	3.2	0.2	6.470
8	27.0	22.4	4.6	20.601
9	2.0	-2.7	4.7	174.074
10	37.0	41.6	4.6	10.963
11	31.0	32.9	1.9	5.645
12	7	6	1.0	12.949
13	35	38.2	2.1	6.497
14	23	38.2	3.0	11.645
15	33	38.2	5.2	13.643
16	38	38.2	0.2	0.558
17	24	38.2	14.2	37.195
18	35	38.2	3.2	8.409
19	43	38.2	4.8	12.526
20	44	38.2	5.8	15.143
21	10.0	14.9	4.9	32.885
22	56.0	48.3	7.7	15.905
23	7.0	7.3	0.3	3.724
24	27.0	26.4	0.6	2.132
25	11.0	10.8	0.2	1.507

ตารางที่ 4.6 ตารางเปรียบเทียบค่าระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่าระยะห่างของเส้นทองที่วัดได้จากเครื่อง X-ray (ต่อ)

การทดลอง	ระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากการวัด (ไมครอน)	ระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากสมการ (ไมครอน)	ค่าความคลาดเคลื่อน (ไมครอน)	% ความคลาดเคลื่อน
26	43.0	44.3	1.3	2.830
27	2.0	3.2	1.2	37.646
28	25.0	22.4	2.6	11.741
29	1.0	-2.7	3.7	137.037
30	35.0	41.6	6.6	15.776
31	36.0	32.9	3.1	9.573
32	5.0	8	3.0	37.821
33	28.0	38.2	4.9	14.803
34	29.0	38.2	3.0	11.404
35	35.0	38.2	3.2	8.409
36	42.0	38.2	3.8	9.909
37	32.0	38.2	6.2	16.260
38	41.0	38.2	2.8	7.293
39	45.0	38.2	6.8	17.760
40	47.0	38.2	8.8	22.994
		เฉลี่ย	3.6	21.037

* ผลจากสมการติดลบ (-) หมายความว่าเส้นทองสัมผัสกัน

จากการตรวจสอบความแม่นยำของสมการความสัมพันธ์ พบว่า ค่าระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากสมการความสัมพันธ์มีความคลาดเคลื่อนจากค่าระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง X-ray ประมาณ 21.037% ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

4.7 การทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests หรือ Paired t-Test)

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างตัวอย่าง 2 กลุ่มเมื่อข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีความสัมพันธ์กัน ดังนี้

4.7.1 การทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ระหว่างผลการทดลองและสมการ

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงผลต่างระหว่างผลการทดลองและสมการ

การทดลอง	ระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากการวัด (ไมครอน)(x)	ระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากสมการ (ไมครอน)(y)	ค่าผลต่าง (ไมครอน) $d_i = x_i - y_i$
1	15.0	14.9	0.1
2	49.0	48.3	0.7
3	5.0	7.3	-2.3
4	31.0	26.4	4.6
5	7.0	10.8	-3.8
6	45.0	44.3	0.7
7	3.0	3.2	-0.2
8	27.0	22.4	4.6
9	2.0	-2.7*	4.7
10	37.0	41.6	-4.6
11	31.0	32.9	-1.9
12	7	6	1.0
13	35	38.2	-3.2
14	23	38.2	-15.2
15	33	38.2	-5.2
16	38	38.2	-0.2
17	24	38.2	-14.2
18	35	38.2	-3.2
19	43	38.2	4.8

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงผลต่างระหว่างผลการทดลองและสมการ (ต่อ)

การทดลอง	ระยะห่างของเส้นทองที่ ได้จากการวัด (ไมครอน)(x_i)	ระยะห่างของเส้นทอง ที่ได้จากสมการ (ไมครอน)(y_i)	ค่าผลต่าง (ไมครอน) $d_i = x_i - y_i$
20	44	38.2	5.8
21	10.0	14.9	-4.9
22	56.0	48.3	7.7
23	7.0	7.3	-0.3
24	27.0	26.4	0.6
25	11.0	10.8	0.2
26	43.0	44.3	-1.3
27	2.0	3.2	-1.2
28	25.0	22.4	2.6
29	1.0	-2.7*	3.7
30	35.0	41.6	-6.6
31	36.0	32.9	3.1
32	5.0	8	-3.0
33	28.0	38.2	-10.2
34	29.0	38.2	-9.2
35	35.0	38.2	-3.2
36	42.0	38.2	3.8
37	32.0	38.2	-6.2
38	41.0	38.2	2.8
39	45.0	38.2	6.8
40	47.0	38.2	8.8
เฉลี่ย	27.275	28.1	-0.825

* ผลจากสมการติดลบ (-) หมายความว่าเส้นทองสัมพันธ์กัน

สมมติฐาน

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \text{ หรือ } \mu_D = 0$$

$$H_1: H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \text{ หรือ } \mu_D \neq 0$$

โดยให้ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ได้ผลตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์ Pair t-Test

	Run	Mean	StDev	SE Mean
ผลต่าง ($d_i = x_i - y_i$)	40	-0.825000	5.485400	0.867318

ค่าวิกฤติคือ $-t_{0.025} = -2.023$ และ $t_{0.025} = 2.023$

ดังนั้น บริเวณวิกฤติคือ $t < -2.023$ หรือ $t > 2.776$

ช่วงความเชื่อมั่น 95% สำหรับ μ_D (-2.579316, 0.929316)

T-Value จากการคำนวณ = -0.95

P-Value = 0.347

ผลการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ระหว่างผลการทดลองและสมการ

1. พิจารณา P-Value จากผลการทดสอบพบว่าค่า P-Value เท่ากับ 0.347 ซึ่งมากกว่า α (0.05) จึงยอมรับสมมติฐาน $H_0: \mu_1 = \mu_2$ ซึ่งหมายความว่าค่าเฉลี่ยของผลการทดลองเท่ากับค่าเฉลี่ยของผลจากสมการ

2. พิจารณابริเวณวิกฤติ จากผลการทดสอบพบว่า T-Value ที่ได้จากการคำนวณไม่อยู่ในบริเวณวิกฤติ จึงยอมรับสมมติฐาน $H_0: \mu_1 = \mu_2$ ซึ่งหมายความว่าค่าเฉลี่ยของผลการทดลองเท่ากับค่าเฉลี่ยของผลจากสมการ

3. พิจารณาคู่ความเชื่อมั่น จากผลการทดสอบพบช่วงความเชื่อมั่น 95% สำหรับ μ_D อยู่ในช่วงที่ครอบคลุม 0 จึงยอมรับสมมติฐาน $H_0: \mu_1 = \mu_2$ หรือ $\mu_D = 0$ ซึ่งหมายความว่าค่าเฉลี่ยของผลการทดลองเท่ากับค่าเฉลี่ยของผลจากสมการ

4.7.2 การทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 และ 2

เนื่องจากการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งต่อ 1 หัวข้อการทดลอง ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 และ 2

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงผลต่างระหว่างการทดลองครั้งแรกและครั้งที่สอง

Run	การทดลองครั้งที่ 1 (ไมครอน)(x_i)	การทดลองครั้งที่ 2 (ไมครอน)(y_i)	ค่าผลต่าง (ไมครอน) $d_i = x_i - y_i$
1	15	10	5
2	49	56	-7
3	5	7	-2
4	31	27	4
5	7	11	-4
6	45	43	2
7	3	2	1
8	27	25	2
9	2	1	1
10	37	35	2
11	31	36	-5
12	7	5	2
13	35	28	7
14	23	29	-6
15	33	35	-2
16	38	42	-4
17	24	32	-8
18	35	41	-6
19	43	45	-2
20	44	47	-3
เฉลี่ย	26.7	27.85	-1.15

สมมติฐาน

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \text{ หรือ } \mu_D = 0$$

$$H_1: H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \text{ หรือ } \mu_D \neq 0$$

โดยให้ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ได้ผลตามตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์ Pair t-Test

	Run	Mean	StDev	SE Mean
ผลต่าง ($d_i = x_i - y_i$)	20	-1.1500	4.25843	0.95221

ค่าวิกฤตคือ $-t_{0.025} = -2.098$ อ และ $t_{0.025} = 2.098$

ดังนั้น บริเวณวิกฤตคือ $t < -2.023$ หรือ $t > 2.776$

ช่วงความเชื่อมั่น 95% สำหรับ μ_D (-3.14301, 0.84301)

T-Value จากการคำนวณ = -1.21

P-Value = 0.242

ผลการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ระหว่างผลการทดลองและสมการ

1. พิจารณา P-Value จากผลการทดสอบพบว่าค่า P-Value เท่ากับ 0.242 ซึ่งมากกว่า α (0.05) จึงยอมรับสมมติฐาน $H_0: \mu_1 = \mu_2$ ซึ่งหมายความว่าค่าเฉลี่ยของผลการทดลองเท่ากับค่าเฉลี่ยของผลจากสมการ

2. พิจารณابริเวณวิกฤต จากผลการทดสอบพบว่า T-Value ที่ได้จากการคำนวณไม่อยู่ในบริเวณวิกฤต จึงยอมรับสมมติฐาน $H_0: \mu_1 = \mu_2$ ซึ่งหมายความว่าค่าเฉลี่ยของผลการทดลองเท่ากับค่าเฉลี่ยของผลจากสมการ

3. พิจารณาคงความเชื่อมั่น จากผลการทดสอบพบช่วงความเชื่อมั่น 95% สำหรับ μ_D อยู่ในช่วงที่ครอบคลุม 0 จึงยอมรับสมมติฐาน $H_0: \mu_1 = \mu_2$ หรือ $\mu_D = 0$ ซึ่งหมายความว่าค่าเฉลี่ยของผลการทดลองเท่ากับค่าเฉลี่ยของผลจากสมการ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

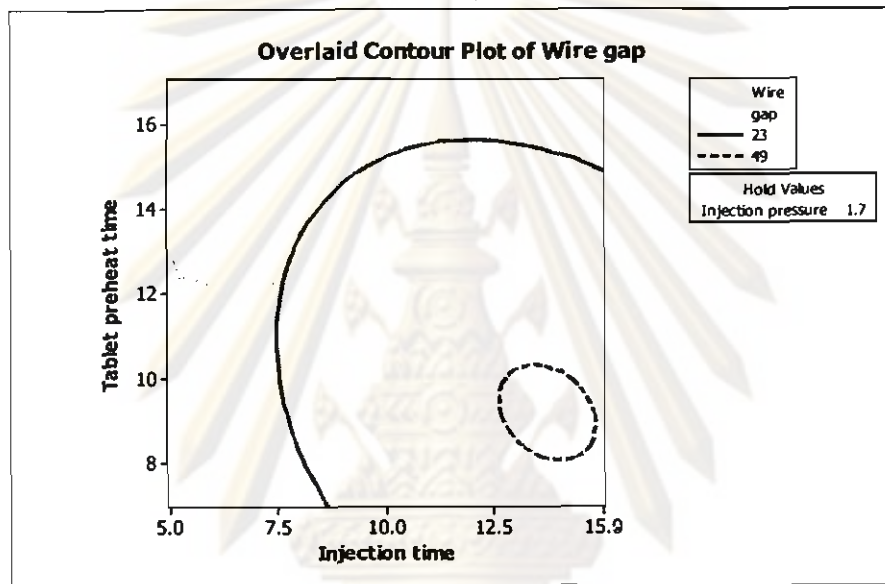
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงงานเซมิคอนดักเตอร์ที่มีขา (Peripheral) ไม่ให้เกิดปัญหาเส้นทองสัมผัสกันหรือเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอนซึ่งถือว่าเป็นของเสีย โดยการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปเซมิคอนดักเตอร์ เพื่อควบคุมระยะห่างของเส้นทองให้ได้ตามที่เป้าหมายกำหนด และหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทองโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองในกระบวนการขึ้นรูปเซมิคอนดักเตอร์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทองแต่ละเส้น โดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล และเลือกปัจจัยที่น่าจะมีผลในกระบวนการขึ้นรูปมาออกแบบการทดลอง เมื่อทราบปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการขึ้นรูปแล้วจึงทำการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปและหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปเพื่อควบคุมระยะห่างของเส้นทองที่ได้จากกระบวนการผลิต

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการประยุกต์ใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล สามารถค้นหาปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปเซมิคอนดักเตอร์ โดยปัจจัยที่เลือกมาออกแบบการทดลองได้แก่ เวลาในการฉีดเรซิน, เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน และแรงในการฉีดเรซิน

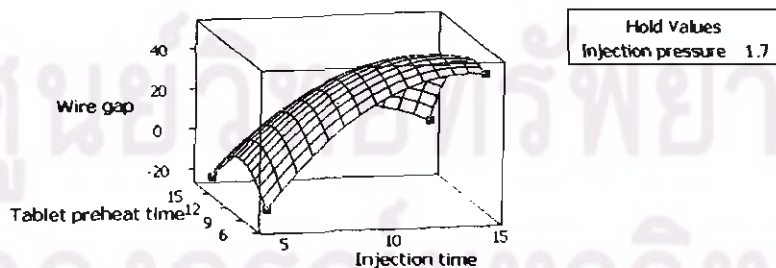
1. ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ ผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า เวลาในการฉีดเรซิน, เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน และแรงในการฉีดเรซิน เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบบต่อค่าระยะห่างของเส้นทอง โดยค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ระยะห่างของเส้นทองตามเป้าหมายคือ มากกว่า 23 ไมครอนซึ่งจากสมการความสัมพันธ์ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ 49 ไมครอน โดยไม่มีข้อบกพร่องทางด้านคุณภาพอื่นๆ ซึ่งได้พารามิเตอร์ที่เป็นปัจจัยหลัก คือ เวลาในการฉีดเรซิน 13 วินาที และ เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน 9 วินาที โดยควบคุมแรงในการฉีดเรซิน 1.7 ตัน

2. ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปเซมิคอนดักเตอร์ในด้านการปรับปรุงกำลังการผลิต โดยการลดเวลาในกระบวนการขึ้นรูป สามารถใช้สมการความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทองเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปเซมิคอนดักเตอร์ โดยการกำหนดค่าของปัจจัยต่างๆของกระบวนการขึ้นรูปได้จากสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยที่หาได้จากการทดลองนี้ เพื่อควบคุมระยะห่างของเส้นทองให้ได้ตามเป้าหมายที่กำหนด



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเส้นทอง และแรงฉีดที่ 1.7 ตัน

Surface Plot of Wire gap vs Tablet preheat time, Injection time



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉีดเรซินและเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน ที่แรงฉีดขึ้น 1.7 ตัน

จากรูปที่ 5.1 และ รูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าสามารถลดเวลาในการฉีดเรซินได้ถึง 7.5 วินาที ซึ่งเป็นการลดเวลาในการการผลิตและสามารถได้งานที่มีคุณภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้พิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรที่มีผลให้เส้นทองสัมผัสดกกัน ซึ่งได้มีการควบคุมปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบ เช่น ลีตเรซิน อายุของเรซิน ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อคุณสมบัติของเรซิน ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้งานเซมิคอนดักเตอร์เกิดปัญหาเส้นทองสัมผัสดกกันอีก จึงควรมีการควบคุมคุณสมบัติของเรซินในกระบวนการผลิตอยู่เสมอ ถึงแม้ว่าลีตเรซินจะต่างกัน

2. จากการทำวิจัยทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปัญหาเส้นทองสัมผัสดกกัน คือ เวลาในการฉีดเรซิน เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินและ แรงในการฉีดเรซิน ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยนี้เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรโดยตรง ดังนั้นควรมีการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรอย่างสม่ำเสมอ

3. งานวิจัยนี้มีการควบคุมระดับความสูงในการวางเส้นทองไว้ที่ 120 ไมครอน ซึ่งเป็นค่ากึ่งกลางของข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ ซึ่งในทางปฏิบัติจริงแล้ว ค่าระดับความสูงของเส้นทองจะมีค่าเผื่อที่กว้างคือ 120 ± 30 ไมครอน ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้งานเซมิคอนดักเตอร์เกิดปัญหาเส้นทองสัมผัสดกกันอีก จึงควรมีการลดค่าข้อกำหนดของระดับความสูงของเส้นทองลง เป็น 120 ± 10 ไมครอน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. สถิติสำหรับงานวิศวกรรมเล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), 2545.

กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. สถิติสำหรับงานวิศวกรรมเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), 2545.

คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ความน่าจะเป็นและสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์. สถิติพื้นฐานพร้อมตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MINITAB SPSS และ SAS. พิมพ์ครั้งที่ 5. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2543.

ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ไพโรจน์ วิริยจารี. การออกแบบพื้นที่การตอบสนอง Response surface design. พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2544.

ลัดดา เรียงเลิศ. การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการพิมพ์สี ในโรงงานผลิตพื้นยางนีโอไลท์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

วรพงศ์ นาวาวรรกุล. การลดความแปรปรวนของกระบวนการผลิตกระดาษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

วรุฒม์ บุญภักดี. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ SOLVENT RECOVERY โดยวิธีการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม กรณีศึกษา บริษัท ยูเนียนไทย-นิปปัน จำกัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.

วิชา วิทยาภัย บุนนาค. อิทธิพลของปัจจัยในการบ่มต่อสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซินเสริมเส้นใย
แก้วสำหรับเคลือบคอนกรีตและมอร์ตาร์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชา
 วิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
 2543.

วีรเทพ เจริญสมิทธิชัย. การศึกษาปริมาณธาตุที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กดิบ
โดยวิธีการออกแบบการทดลอง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต,
 สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.

ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ และ จันทนา จันทโร. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร :
 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

สมศักดิ์ แก้วพลอย. 2550. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบชุบเหล็กกล้าผสมด้วยความร้อน.
 ใน การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหการ, หน้า 814-818. 24-26 ตุลาคม 2550
 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2550.

สุชาติ แซ่แต้. การปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อแรงเสียดทานของ
กล่องกระดาษลูกฟูก, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

โสภิตา ท่วมมี และ อรรถกร เก่งพล. 2551. การลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติก
 แผ่นโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง : กรณีศึกษา บริษัทในอุตสาหกรรมผลิต
 พลาสติก. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 18, 3 (ก.ย. - ธ.ค. 2551): 80-89.

ภาษาอังกฤษ

Montgomery. 2000. Design and Analysis of Experiment. 5th edition (n.p.): John Wiley and
 Sons.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรมสำเร็จรูป รวมถึงกราฟต่างๆที่ได้จาก
โปรแกรมสำเร็จรูป

ภาคผนวก ก-1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลระยะห่างของเส้นทอง

Response Surface Regression: Wire gap versus Injection time, Tablet preheat time and Injection pressure

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Wire gap

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	38.2102	1.4920	25.610	0.000
Injection time	13.1452	0.9899	13.279	0.000
Tablet preheat time	-7.3772	0.9899	-7.452	0.000
Injection pressure	-2.0319	0.9899	-2.053	0.049
Injection time*Injection time	-6.6345	0.9637	-6.885	0.000
Tablet preheat time*	-6.2809	0.9637	-6.518	0.000
Tablet preheat time				
Injection pressure*	-3.0989	0.9637	-3.216	0.003
Injection pressure				
Injection time*Tablet preheat time	-3.5625	1.2934	-2.754	0.010
Injection time*Injection pressure	-0.5625	1.2934	-0.435	0.667
Tablet preheat time*	0.6875	1.2934	0.532	0.599
Injection pressure				

S = 5.174 R-Sq = 91.7% R-Sq(adj) = 89.2%

Analysis of Variance for Wire gap

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	8833.0	8833.0	981.44	36.67	0.000
Linear	3	6319.0	6319.0	2106.32	78.69	0.000
Square	3	2298.4	2298.4	766.12	28.62	0.000
Interaction	3	215.7	215.7	71.90	2.69	0.064
Residual Error	30	803.0	803.0	26.77		
Lack-of-Fit	5	193.7	193.7	38.74	1.59	0.199
Pure Error	25	609.3	609.3	24.37		
Total	39	9636.0				

The analysis was done using coded unit.

Estimated Regression Coefficients for Wire gap

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	38.210	1.4559	26.244	0.000
Injection time	13.145	0.9660	13.608	0.000
Tablet preheat time	-7.377	0.9660	-7.637	0.000
Injection pressure	-2.032	0.9660	-2.103	0.043
Injection time*Injection time	-6.634	0.9404	-7.055	0.000
Tablet preheat time*	-6.281	0.9404	-6.679	0.000
Tablet preheat time				
Injection pressure*	-3.099	0.9404	-3.295	0.002
Injection pressure				
Injection time*Tablet preheat time	-3.563	1.2621	-2.823	0.008

S = 5.049 R-Sq = 91.5% R-Sq(adj) = 89.7%

Estimated Regression Coefficients for Wire gap using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-1058.86
Injection time	23.8750
Tablet preheat time	18.2484
Injection pressure	1033.32
Injection time*Injection time	-0.737162
Tablet preheat time*	-0.697879
Tablet preheat time	
Injection pressure*	-309.893
Injection pressure	
Injection time*Tablet preheat time	-0.395833

**ภาคผนวก ก-2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลระยะห่างของเส้นทองระหว่างผลการทดลองและ
สมการ**

ผลการวิเคราะห์ Paired-T Test

Paired T-Test and CI: 1st time, 2nd time

Paired T for 1st time - 2nd time

	N	Mean	StDev	SE Mean
1st time	20	26.7000	15.2561	3.4114
2nd time	20	27.8500	16.5443	3.6994
Difference	20	-1.15000	4.25843	0.95221

95% CI for mean difference: (-3.14301, 0.84301)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -1.21 P-Value = 0.2

ภาคผนวก ก-3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลระยะห่างของเส้นทองระหว่างการทดลองครั้งที่ 1
และ 2

ผลการวิเคราะห์ Paired-T Test

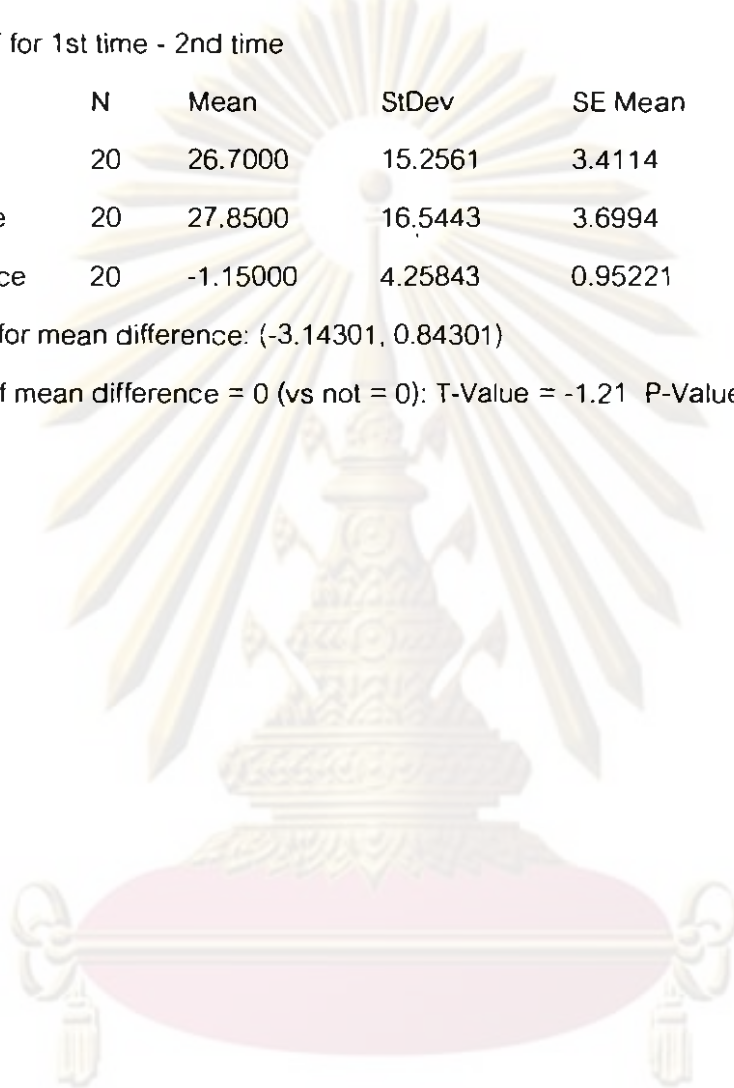
Paired T-Test and CI: 1st time, 2nd time

Paired T for 1st time - 2nd time

	N	Mean	StDev	SE Mean
1st time	20	26.7000	15.2561	3.4114
2nd time	20	27.8500	16.5443	3.6994
Difference	20	-1.15000	4.25843	0.95221

95% CI for mean difference: (-3.14301, 0.84301)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -1.21 P-Value = 0.2



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตารางสถิติ

ภาคผนวก ข-1 ตารางค่าวิกฤตของการแจกแจงที

	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05	0.04	0.02	0.01	0.005	0.002	0.001	One-tailed
df	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05	0.025	0.02	0.01	0.005	0.0025	0.001	0.0005	Two-tailed
1	1	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	15.89	31.82	63.66	127.3	318.3	636.6	
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.92	4.303	4.849	6.965	9.925	14.09	22.33	31.6	
3	0.765	0.978	1.25	1.638	2.353	3.182	3.482	4.541	5.841	7.453	10.21	12.92	
4	0.741	0.941	1.19	1.533	2.132	2.776	2.999	3.747	4.604	5.598	7.173	8.61	
5	0.727	0.92	1.156	1.476	2.015	2.571	2.757	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869	
6	0.718	0.906	1.134	1.44	1.943	2.447	2.612	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959	
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.896	2.365	2.517	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408	
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.86	2.306	2.449	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041	
9	0.703	0.883	1.1	1.383	1.833	2.262	2.398	2.821	3.25	3.69	4.297	4.781	
10	0.7	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.359	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587	
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.328	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437	
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.303	2.681	3.055	3.428	3.93	4.318	
13	0.694	0.87	1.079	1.35	1.771	2.16	2.282	2.65	3.012	3.372	3.852	4.221	
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.264	2.624	2.977	3.326	3.767	4.14	
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.249	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073	
16	0.69	0.865	1.071	1.337	1.746	2.12	2.235	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015	
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.74	2.11	2.224	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965	
18	0.688	0.862	1.067	1.33	1.734	2.101	2.214	2.552	2.878	3.197	3.611	3.922	
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.205	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883	
20	0.687	0.86	1.064	1.325	1.725	2.086	2.197	2.528	2.845	3.153	3.552	3.85	
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.08	2.189	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819	
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.183	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792	
23	0.685	0.858	1.06	1.319	1.714	2.069	2.177	2.5	2.807	3.104	3.485	3.768	
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.172	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745	
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.06	2.167	2.485	2.787	3.078	3.45	3.725	
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.162	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707	
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.15	2.473	2.771	3.057	3.421	3.69	
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.154	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674	
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.15	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659	
30	0.683	0.854	1.055	1.31	1.697	2.042	2.147	2.457	2.75	3.03	3.385	3.646	
40	0.681	0.851	1.05	1.303	1.684	2.021	2.123	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551	
50	0.679	0.849	1.047	1.295	1.676	2.009	2.109	2.403	2.678	2.937	3.261	3.496	
60	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2	2.099	2.39	2.66	2.915	3.232	3.46	
80	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.99	2.088	2.374	2.639	2.887	3.195	3.416	
100	0.677	0.845	1.042	1.29	1.66	1.984	2.081	2.364	2.626	2.871	3.174	3.39	
1000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.952	2.056	2.33	2.581	2.813	3.098	3.3	
inf.	0.674	0.841	1.036	1.282	1.64	1.95	2.054	2.326	2.576	2.807	3.091	3.291	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววัลภา เตชะสุข เกิดวันที่ 13 มกราคม 2526 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จ
 การศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2548 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่ง
 วิศวกร บริษัทแห่งหนึ่ง ในปี 2550 ได้เข้าศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอุต
 สสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย