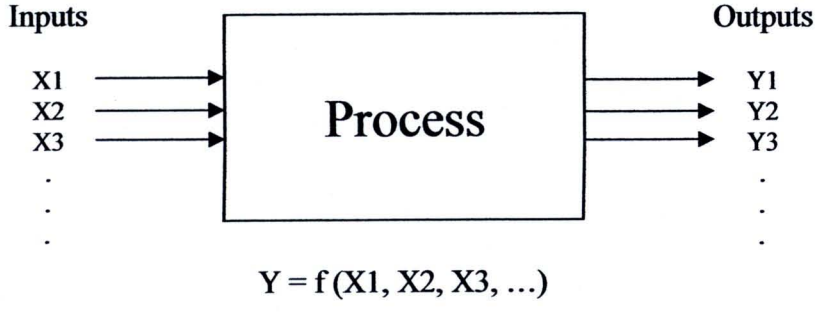
บทที่ 2

แนวคิดทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การลดของเสียในกระบวนการประกอบฟิลเตอร์เชื่อมกับใยแก้วนำแสง มีการศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาอ้างอิงเป็นพื้นฐานในการศึกษาวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบที่มีวัตถุประสงค์ที่จะเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยที่นำเข้าของกระบวนการทดสอบ โดยเฝ้าสังเกต และติดตามผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยนำออกของกระบวนการ ซึ่งอาจจะเรียกว่าผลตอบ (Response) ตามรูปที่ 2.1 โดยกำหนดให้ปัจจัย $x_1, x_2, x_3,\ldots$ เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Variable) ในขณะที่ $z_1, z_2, z_3,\ldots$ เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) และในบางครั้งเรียกว่า ปัจจัยรบกวน (Noise) ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการทดลองคือ การหาค่าปัจจัยที่มีผลมากที่สุดต่อผลตอบ หาวิธีการตั้งปัจจัยที่ควบคุมได้ (x) ที่มีผลต่อค่าผลตอบเพื่อทำให้ได้ค่าที่ต้องการ หาวิธีการตั้งค่าปัจจัยที่ควบคุมได้ (x) ที่มีผลต่อค่าผลตอบเพื่อทำให้ได้ค่าของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (z) มีค่าต่ำสุดดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ

2.2 การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (Fractional Factorial Design)

เมื่อจำนวนปัจจัยในการทดลองแบบ 2^k เพิ่มขึ้น โดยมากแล้วจำนวนการทดลองสำหรับเรพลิเคตที่บริบูรณ์จะเพิ่มขึ้นมากเกินกว่าทรัพยากร เช่น เวลา ค่าใช้จ่าย เป็นต้น ที่มีอยู่จะรองรับได้ ตัวอย่างเช่น ใน 1 เรพลิเคตที่สมบูรณ์ของการออกแบบ 2^6 จะต้องมีการทดลองทั้งหมด 64 ครั้ง ในการทดลองแบบนี้แค่ 6 ตัวจากระดับความเสรี 63 ตัวเท่านั้นที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลัก ระดับความ

เสรี 15 ตัวจะเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาแบบสองปัจจัย และระดับขั้นเสรีที่เหลืออีก 42 ตัวจะเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาแบบสามปัจจัย และมากกว่า ถ้าผู้ทดลองสามารถตั้งสมมติฐานอย่างมีเหตุผลได้ว่าอันตรกิริยาขั้นสูงบางตัวสามารถละเลยได้ ในกรณีเช่นนี้ข่าวสารเกี่ยวกับปัจจัย และอันตรกิริยาขั้นต่ำอาจจะหาได้โดยการทดลองเพียงแค่เศษส่วนของการทดลองเชิงแฟคทรอเรียลอย่างบริบูรณ์เท่านั้น การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (Fractional Factorial Design) จัดได้ว่าเป็นการออกแบบที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการ นอกจากนั้นแล้วยังใช้ช่วยในการหาแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการอีกด้วย

การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลถูกนำมาใช้มากในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผล กล่าวคือ ในการทดลองหนึ่งอาจจะมีปัจจัยมากมายที่กำลังอยู่ในความสนใจ เราจะใช้การออกแบบเช่นนี้เพื่อค้นหาว่าปัจจัยตัวใดบ้าง (ถ้ามี) เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ การทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ส่วนมากจะใช้ในตอนเริ่มต้นโครงการ เนื่องจากโดยมากแล้วในขณะนั้นจะมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลต่อผลตอบที่กำลังพิจารณาอยู่ หลังจากทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเสร็จสิ้นแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อๆไปที่จะตามมาในอนาคต

ความสำเร็จของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลขึ้นอยู่กับแนวคิดที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. หลักการที่ว่ามีปัจจัยจำนวนน้อยที่มีผล เมื่อมีตัวแปรหลายตัว การดำเนินต่างๆ ของระบบหรือกระบวนการมีแนวโน้มที่จะถูกกำหนดโดยปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาขั้นต่ำเพียงบางตัวเท่านั้น
2. คุณสมบัติการฉายการออกแบบ การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลสามารถถูกฉายไปสู่การออกแบบที่ดีกว่า (ใหญ่กว่า) ในเซตย่อยของปัจจัยที่มีผล
3. การรทดลองต่อเนื่อง เป็นไปได้ที่จะรวมการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล 2 การทดลองหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะทำให้เกิดการทดลองอย่างต่อเนื่องที่มีการออกแบบที่ใหญ่กว่า และสามารถประมาณผลของปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาที่อยู่ในความสนใจได้

สมมติว่าเรากำลังสนใจที่จะทดสอบผลของปัจจัย 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แต่ปรากฏว่าเราไม่สามารถทำการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด $2^3 = 8$ การทดลองได้ ทรัพยากรที่มีอยู่ยอมให้เราทดลองได้เพียง 4 การทดลองเท่านั้น เพราะว่าการออกแบบประกอบด้วยการ

ทดลองร่วมปัจจัยจำนวน $2^{3-1} = 4$ การทดลอง ซึ่งก็คือ $\frac{1}{2}$ ของการออกแบบ 2^3 หรือเราอาจจะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเป็นการออกแบบ 2^{3-1} (ปารเมศ ชุติมา, 2545)

2.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k (Factorial Design)

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งเราต้องการที่จะศึกษาถึงผลร่วมที่มีผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้นการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลมีความสำคัญอย่างมากในการปฏิบัติสำหรับการทำงานวิจัย และใช้เป็นรากฐานของการออกแบบชนิดอื่นๆ กรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดันหรือเวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ "สูง" หรือ "ต่ำ" ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ "มี" หรือ "ไม่มี" ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เรพลิเคตที่สมบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \ldots \times 2 = 2^k$ ข้อมูลเราจะเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k โดยสมมติว่า ปัจจัยทั้งหมดมีค่าตายตัว การออกแบบเป็นแบบเชิงสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomized) และสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติเป็นที่ยอมรับได้

การออกแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างสมบูรณ์โดยใช้การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล ดังนั้น จึงไม่น่าแปลกใจที่การออกแบบ 2^k จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการออกแบบ 2^k ประกอบไปด้วย 2 ระดับ เราขอสมมติว่าผลตอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานเช่นนี้เป็นสิ่งที่ยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเมื่อเราเพิ่งเริ่มต้นทำการศึกษาระบบ (ปารเมศ ชุติมา, 2545)

ผู้ทำการทดลองไม่ต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย เนื่องจากจะมีจำนวน Run มากจนเกินไปจนไม่สามารถดำเนินการได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดบางประการ แน่นอนว่าความแม่นยำของผลก็ไม่เท่ากับฟูลแฟคทอเรียล (Full Factorial) ในเชิงทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติถึงเราจะสามารถดำเนินการทดลองด้วยวิธีฟูลแฟคทอเรียล (Full Factorial) แต่อาจจะได้ผลที่แย่กว่าแฟคชันนอลแฟคทอเรียล (Fractional Factorial) ก็ได้ เนื่องจากยิ่งมากปัจจัย (Factor) ยิ่งมากรัน (Run) เราก็ยิ่งควบคุมการทดลองได้ยาก ความผิดพลาดก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงไม่มีประโยชน์ที่เราจะดงยืนยันใช้การทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล (Full Factorial)

มีปัจจัย (Factor) หลายตัว นักสถิติประยุกต์ในยุคแรกๆ ได้ค้นพบว่าในความเป็นจริงเมื่อดำเนินการทดลองจะมีเพียงบางปัจจัยหลัก (Main Effects) และบางความสัมพันธ์ร่วมกัน (Interaction) เท่านั้นที่มีความสำคัญ ยิ่งลำดับของความสัมพันธ์ร่วมกัน (Interaction) สูงขึ้นก็ยิ่งมีโอกาสจะมีนัยสำคัญน้อยลง จึงได้นำเอาหลักการนี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อลดขนาดของการทดลองลง

ตาราง 2-1 อัตราส่วนของผลจากปัจจัยหลัก (Main Effects) ต่อจำนวน Effects รวมทั้งหมดในการทดลอง

จำนวน Main Effects	จำนวน Interaction Effects	จำนวนรวม Effects	อัตราร้อยละของ Main Effects
1	0	1	100
2	1	3	66.7
3	4	7	42.9
4	11	15	26.7
5	26	31	16.1
6	57	63	9.5
7	120	127	5.5
8	247	255	3.1
9	502	511	1.8
10	1013	1023	1

จากตารางที่ 2-1 จะพบว่าสัดส่วนของปัจจัยหลัก (Main Effects) ต่อ Effects ทั้งหมดจะยิ่งลดลงเรื่อยๆ เมื่อการทดลองนั้นมี Factor มากขึ้น เช่น หากการทดลองนั้นมี 6 ปัจจัย สัดส่วนผลที่มาจากปัจจัยหลัก (Main Effects) จะมีเพียงแค่ 9.5% ของจำนวน Effects รวม ที่เหลืออีก 90.5% เป็น Interaction Effects ซึ่งส่วนใหญ่ก็ไม่มีนัยสำคัญเชิงสถิติต่อการทดลองนั้นด้วย

2.4 แฟรคชันนอลแฟคทอเรียล Fractional Factorial แบบ 2^{k-1} Design

การทดลองจะได้จำนวน Run เท่ากับการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล (Full factorial design) ของการออกแบบเมื่อจำนวน Factor น้อยกว่าอยู่ 1 ตัว (k-1) หรือจำนวน Run จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล (Full Factorial Design) นั่นเอง เรานำหลักการที่ว่ายิ่งอันดับ Interaction สูงเท่าใดก็จะมีความสำคัญน้อยเท่านั้น และจะเอาปัจจัยหลัก (Main Effects) บางตัวเข้าแทนที่ความสัมพันธ์ร่วมกันของปัจจัย (Interaction)

ดังกล่าว ตัวอย่าง มีปัจจัย 4 ตัวคือ A, B, C, D ถ้าออกแบบโดยใช้วิธี 2^k ฟูลแฟคทอเรียล (Full Factorial) จะมีจำนวนรอบการทดลองทั้งหมด 16 รัน ดังตารางที่ 2-2

ตาราง 2-2 การออกแบบการทดลอง 2^k แบบ 4 ปัจจัย

Run	A	B	C	D
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1
15	-1	+1	+1	+1
16	+1	+1	+1	+1

หากต้องการทำการทดลองแบบแฟคชั่นนอลแฟคทอเรียล (Fractional Factorial) โดยให้เหลือจำนวน 8 รัน เริ่มจากการ เขียนปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย และความสัมพันธ์ร่วมกันของปัจจัย (Interaction) ทั้งหมดในตารางที่ 2-3 เราจะเรียก 3 ปัจจัยหลัก (Main Effects) นี้ว่าตัวให้กำเนิด (Generator) ของปัจจัย (Factor D)

ตาราง 2-3 ตารางแสดงตัวแปรหลัก (Main Effecs) และความสัมพันธ์ร่วมกันของปัจจัย (Interaction) ของปัจจัย 3 Factor

A	B	C	AB	AC	BC	ABC
-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

จากนั้นให้ใช้ค่าของความสัมพันธ์ร่วมกันของปัจจัย (Interaction) ที่มีอันดับสูงสุด เป็นค่าของ Main Effect ตัวที่เหลือ จากตารางที่ 2-3 ความสัมพันธ์ร่วมกันของปัจจัย (Interaction) ที่มีอันดับสูงสุดคือ ABC เราจะใช้เป็นค่าของ D จึงได้ตารางเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design) ของ 4 ปัจจัยตามตารางที่ 2-4

ตาราง 2-4 ตารางออกแบบการทดลองแบบฟลูแฟคชันนอลแฟคทอเรียล (Full Fractional Factorial) ของ 4 ปัจจัย

Run	A	B	C	D
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1

จากตารางที่ 2-2 เมื่อเทียบกับตารางที่ 2-4 วิธีการออกแบบเช่นนี้ จะได้จำนวนรันครึ่งหนึ่งของ ฟูลแฟคทอเรียล (Full Factorial) เสมอหรือ 1/2 Fraction จึงเรียกวิธีการออกแบบการทดลอง เมื่อทำการทดลองตามที่ออกแบบนี้ ก็จะเรียกว่า Half Factorial Experiment ด้วยเช่นกัน

Alias / Confound Fractional Factorial Design ประโยชน์ที่ได้คือจำนวน Run ที่ลดลงได้อย่างน้อยครึ่งหนึ่ง แต่ก็ต้องแลกด้วยความสงสัยที่ว่าความถูกต้องจะเหมือนกับ การออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล (Full Factorial Design) หรือไม่ อีกสิ่งหนึ่งที่จะต้องสูญเสียไปคือ ความสามารถในการแยกแยะผลกระทบของ Effects ที่ตอนนี้มีบางตัวที่แยกแยะไม่ออก จากตารางที่ 2-4 เราทราบแล้วว่าตอนนี้ D=ABC นั่นคือถ้าสมมติพบว่า D เป็น Mian Effects ที่มีนัยสำคัญทางสถิติหลังจากการวิเคราะห์แล้ว เป็นความสัมพันธ์ร่วมกันของปัจจัย (Interaction) ของตัวปัจจัย ABC หรือว่า D กันแน่ กรณีเช่นนี้เรียกว่า D มี Alias คือ ABC หรืออีกนัยหนึ่ง ABC คือ Alias ของ D ได้เช่นกัน กรณีเช่นนี้เรียกว่า D และABC เกิด Confound กันด้วย ทำการทดลองตามตารางที่ 2-4 แล้ว จะมี Alias เกิดขึ้นหลายคู่ ดังตารางที่ 2-5 คู่ Alias ที่เกิดขึ้น ลักษณะเช่นนี้ จะเรียกว่า Alias Structure

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ตาราง 2-5 ตารางแสดง Alias Structure ของปัจจัย 4 ปัจจัย

A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

สามารถเขียน Alias Structure ได้ดังนี้

$$A = BCD$$
$$B = ACD$$
$$C = ABD$$
$$D = ABC$$
$$AB = CD$$
$$AC = BD$$
$$AD = BC$$
$$I = ABCD$$

Defining Word ถ้าเอาแต่ละ Column คูณตัวเอง (ยกกำลังสอง) จะได้เท่ากับ (+1) ทุกตัวเสมอ เรียก Column ที่ได้ใหม่นี้ว่า Identity หรือ I

จากตาราง 2-5 $D = ABC$

ดังนั้น ถ้าเอา D คูณทั้งสองฝั่ง จะได้เป็น $DD = ABCD$

หรือ $I = ABCD$

เรียก I=ABCD นี้ว่า Defining Relation ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการหา Alias ได้ โดยนำ Effect ที่อยากทราบ Alias คูณทั้งสองฝั่งของสมการ Defining relation เช่น ถ้าอยากทราบว่า AB และAlias อยู่กับ Effect หาได้จาก

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

AB Alias อยู่กับ CD

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชา
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ - 7 ม.ค. 2555
เลขทะเบียน 250669

Vertical Balance ทดสอบความเท่ากันของจำนวน Code (+1) และ (-1) ของแต่ละ Column ทั้งของปัจจัยหลัก (Main Effects) และความสัมพันธ์ร่วมกันของปัจจัย (Interaction) มีผลในตารางหลังจากการออกแบบการทดลอง โดยเงื่อนไขคือผลรวมของแต่ละคอลัมจะต้องเท่ากับ 0 นั่นหมายความว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าของ ปัจจัย (Factor) นั้นให้เป็นระดับสูง (High) และระดับต่ำ (Low) ในจำนวนครั้งที่เท่ากัน ผู้ออกแบบจะต้องทำการทดสอบทุกครั้ง

ออโทโกนอล (Orthogonal) เมื่อนำ Code (+1) หรือ (-1) ของ 2 คอลัมน์ (Column) ที่อยู่ติดกัน และอยู่แนวแถว (Row) เดียวกัน คูณกันทุกๆ แถวของ 2 คอลัมน์ดังกล่าว แล้วนำผลลัพธ์ดังกล่าวรวมกัน จะต้องได้เท่ากับ 0 เสมอ นั่นหมายความว่าเมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองแล้วจะไม่ปรากฏเหตุการณ์ที่ปัจจัย (Factor) หนึ่งแปรเปลี่ยนตามอีกปัจจัย (Factor) หนึ่ง (Dependency Test) ถ้าสมมติว่า ไม่เป็นออโทโกนอล (Orthogonal) แล้วเป็นไปได้ว่าจะต้องเปลี่ยนค่าของปัจจัย (Factor) มากกว่า 1 ตัว ระดับสูง (High) หรือ ระดับต่ำ (Low) พร้อมกัน อาจจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดแยกแยะไม่ออกว่าผลตอบ แปรค่าตาม ปัจจัย (Factor) ใดกันแน่ การออกแบบที่ดีจะต้องได้ตารางที่ 2-5 เป็นออโทโกนอล จะต้องทำการทดสอบทุกครั้งเช่นเดียวกับความสมดุลแนวตั้ง (Vertical Balance) และทำให้ครบทุกคอลัมน์ แต่ครั้งละ 1 คู่เท่านั้น

2.5 แฟคชันนอล (Fractional Factorial) แบบ 2^{k-p} Design

เมื่อมีปัจจัย (Factor) อยู่ 3-5 ตัว อาจจะสามารถใช้วิธีครึ่งแฟคทอเรียล (Half Factorial Design) หรือ 2^{k-1} Design ได้ แต่ถ้าจำนวน ปัจจัย (Factor) เพิ่มมากขึ้นกว่านั้นอีก ก็ยากที่จะสามารถทำการทดลองตามแบบที่ออกแบบไว้ได้ เพราะจำนวนรันก็เยอะเกินกว่าจะทำได้

ตาราง 2-6 ตารางแสดงจำนวนรัน (Run) เทียบกับจำนวนปัจจัย (Factor) ของแต่ละการออกแบบการทดลอง

จำนวน Factor	จำนวนRun Full Factorial Design	จำนวนRun 2^{k-1} design	จำนวนRun 2^{k-2} design	จำนวนRun 2^{k-3} design
3	8	4	N/A	N/A
4	16	8	N/A	N/A
5	32	16	8	N/A
6	64	32	16	8
7	128	64	32	16
8	256	128	64	32
9	512	256	128	64

Resolution มากกว่า ย่อมให้ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์มากกว่า นั่นเพราะได้เฉพาะความสัมพันธ์ร่วมกันของปัจจัย (Interaction) ระดับสูงๆ แทนปัจจัยหลักในการออกแบบ ทำให้โอกาสที่ Confond ที่พบในการวิเคราะห์มีโอกาสเป็นของปัจจัยหลักมากกว่า ความสัมพันธ์ร่วมกันของปัจจัย (Interaction) นั่นเอง การเลือกระดับ Resolution ต่ำหมายความว่าคนออกแบบใช้ค่า p ที่มาก เข้าใกล้ k มาก ทำให้ลดจำนวน Run ลงได้มาก และต้องใช้ ความสัมพันธ์ร่วมกันของปัจจัย (Interaction) ระดับต่ำในการแทน Main Efect บางตัว

(R_{III}) เป็นระดับที่ต่ำที่สุดที่ผู้ออกแบบจะเลือกใช้ เหมาะสำหรับการเริ่มต้น (Screenning) กรณีที่มีจำนวนปัจจัย (Factor) มากๆ ไม่ควรนำ Model ใดๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ และจะต้องมีการคัดกรองเอา ปัจจัยหลักที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติบางตัวออก และควรมีการออกแบบการทดลองอีกรอบ ที่มี Resolution มากกว่า R_{III}

(R_{IV}) เป็นระดับที่ดีปานกลางที่คนออกแบบควรจะเลือกใช้ สามารถนำ Model ที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ในการพยากรณ์ หรือเปลี่ยนแปลงกระบวนการตามผลการวิเคราะห์ได้

(R_V) เป็นระดับที่ดีที่สุดที่คนออกแบบควรจะเลือกใช้ แต่ก็ต้องใช้ทรัพยากรมากกว่าระดับอื่นๆ ทั้งนี้เพราะ จะมีจำนวน Run มากนั่นเอง (ฉลอง สีแก้วสิ่ว)

ตาราง 2-7 ตารางแสดงระดับ Resolution ที่เป็นไปได้ เมื่อกำหนดการ Run และ จำนวนปัจจัย (Factor)

Available Factorial Designs (with Resolution)

	Factors													
Runs	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Full	III												
8		Full	IV	III	III	III								
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

2.6 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD)

การออกแบบส่วนประสมกลางเป็นการออกแบบการทดลองที่เป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design) ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองสำหรับฟิตแบบจำลองกำลังสอง (Second-Order Model) และนำไปสู่การแปรผลพื้นผิวผลตอบที่ต้องการศึกษาหลักการพื้นฐานของการออกแบบส่วนประสมกลางนั้นเป็นการขยายการออกแบบ 2^k Factorial Design โดยทั่วไปแล้ว CCD จะประกอบด้วย 2^k Factorial ที่มี n_F Runs และ 2^k Runs ในแนวแกน (Axial Point) ที่เรียกว่า Star Runs และ Center Runs (n_C) ที่จุดศูนย์กลาง และค่า α นี้จะเป็นตัวบอกให้ทราบถึงระยะปลายสุดของระดับของปัจจัยที่สนใจศึกษาทั้งทางด้านต่ำ

(Low) และด้านสูง (High) ทั้งนี้เพื่อให้สามารถพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณตามระยะทางจากจุดกึ่งกลางของการออกแบบซึ่งคุณสมบัตินี้เรียกว่า Rotatable Design นั่นคือค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าคงตัวบนรูปทรงกลมซึ่งเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่ใช้ในแบบจำลองกำลังสองเพื่อหาพื้นผิวผลตอบ

จากหลักการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) ค่าของระดับของปัจจัยที่นำมาใช้ปกติจะไม่ใช่ค่าต่ำสุดหรือสูงสุดของการออกแบบเมื่อมี Axial Points เพราะปกติ Axial Points จะอยู่นอก Cube ของการออกแบบ (ยกเว้นกำหนดค่า α มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1) ซึ่งถ้าไม่ระมัดระวังแล้วอาจจะทำให้ไม่สามารถทำการ Runs การทดลองได้เพราะว่า Axial Runs อยู่นอกเหนือจากจุดที่ใช้ทดลองดังนั้นจึงทำการออกแบบส่วนประสมกลางเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะได้ระดับของปัจจัย

ปัจจุบันมีความสนใจในการออกแบบเพื่อหาความสอดคล้องกับพื้นที่ของการตอบสนองและประเมินความเหมาะสมในสภาวะของการทดลองการออกแบบที่เรียกว่า Response Surface Design (RSD) และการวิเคราะห์ได้ถูกนำมาใช้เพื่อค้นหาคำตอบของการทดลองที่ประกอบด้วยจำนวนปัจจัยร่วมการทดลองหลายปัจจัย ซึ่งนำทางสู่การค้นพบการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด การตอบสนองที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้ใน 2 ลักษณะ คือ การตอบสนองมากที่สุด (Maximum) หรือการตอบสนองต่ำสุด (Minimum) ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของการทดลอง

วิธีการของพื้นที่ตอบสนองประกอบด้วยกลุ่มของเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาจากค่าสังเกตเพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนอง (Response Variable) ที่วัดได้ 1 หรือ 2 ค่า เช่น ผลผลิต ดัชนีค่าสี และความหนืด กับตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง (Input Variables) เช่น เวลา อุณหภูมิ ความดัน และความเข้ม อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ ได้ใช้เพื่อให้คำตอบต่างๆ เช่น

1. ค่าตอบสนองได้รับผลกระทบจากชุดสิ่งทดลองบนพื้นที่เฉพาะที่น่าสนใจบางอย่างได้อย่างไร

2. ถ้าจำเป็นชุดของสิ่งทดลองอะไรที่จะให้ผลิตภัณฑ์หนึ่งเป็นที่น่าพอใจตรงตามข้อกำหนดจำเพาะพร้อมๆ กัน

3. ค่าอะไรของสิ่งทดลองที่จะให้ผลผลิตในจุดที่สูงที่สุดของพื้นที่เฉพาะหนึ่ง ๆ และพื้นที่การตอบสนองอะไรที่ใกล้กับค่าสูงสุดนี้ได้

การศึกษาค่าตัวแปรเพื่อให้ได้คำตอบต่าง ๆ อยู่ในรูปของสมการ

$$Y = \int(X_1, X_2, \ldots, Xn) + \varepsilon \qquad (2.1)$$

เมื่อ y = ค่าตอบสนองที่สังเกตได้ ซึ่งมักรู้จักกันในชื่อ Dependent Variable

$\int$ = ฟังก์ชั่นของการตอบสนองของ $X_1, X_2, ..., Xn$ ซึ่งเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ มักรู้จักกันในชื่อ Independent Variable

ε = เทอมของความคลาดเคลื่อนสุ่ม

แม้ว่ารูปแบบความเที่ยงตรงของฟังก์ชั่นการตอบสนอง $\int$ มักจะไม่ทราบเสมอ มักจะให้เห็นว่าโดยทั่วไปสามารถประมาณการได้โดยฟังก์ชั่นเชิงเส้นตรงหรือเส้นโค้งของตัวแปรเชิงปริมาณ ความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear Regression Relationship) เป็นดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_n X_n + \varepsilon \qquad (2.2)$$

ซึ่งสมการดังกล่าวเป็นสมการพื้นฐานง่ายสุด ที่มักรู้จักกันว่าเป็นรูปแบบหรือสมการลำดับที่หนึ่ง (First-order Model or Equation) ส่วนรูปแบบลำดับที่สอง (Second-order Model) เป็นความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นโค้ง (Quadratic Regression Relationship)

$$\begin{aligned} Y = {} & \beta_0 + \beta_1 X_1 + \ldots + \beta_n X_n \\ & + \beta_{11} X_1^2 + \ldots + \beta_{nn} X_n^2 \\ & + \beta_{12} X_1 X_2 + \ldots + \beta_{n-1,\, n} X_{n-1} X_n + \varepsilon \end{aligned} \qquad (2.3)$$

พารามิเตอร์ของสมการนี้โดยทั่วไปมักไม่ทราบ ดังนั้นจะต้องถูกประมาณจากผลการทดลอง ความหมายในเชิงกายภาพของพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นดังนี้

β_0 = จุดตัด (Intercept) หรือ Grand Mean

β_I = เป็นผลเชิงเส้นตรง (Linear Effect) ของ X_i เมื่อ i =1,...,n

β_{ii} = เป็นผลเชิงเส้นโค้ง (Quadratic Effect) ของ X_iเมื่อ i =1,...,n

β_{Ij} = เป็นผลของปฏิกิริยาสัมพันธ์ (Interaction Effect) ของ X_i และ X_j เมื่อ $i < j$ และ $i = 1,\ldots,n-1$ ส่วน $j=1,\ldots,n-1$

ในเทอมของความคลาดเคลื่อนโดยปกติจะถูกกำหนดให้มีการกระจายตัวเทียบกับค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีค่าความแปรปรวนเป็น σ^2 ความแปรปรวนในเชิงปริมาณ σ^2 ในการกระจายตัวของค่าตอบสนองเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างจุดต่าง ๆ ที่ออกแบบกับความคลาดเคลื่อนในการทดลองที่ไม่สามารถควบคุมได้ ความแปรปรวนเนื่องจากความแตกต่างระหว่างจุดต่าง ๆ ที่ออกแบบสามารถอธิบายโดยฟังก์ชั่นของการตอบสนองถ้าเกิดทราบความแปรปรวนดังกล่าว แต่โดยปกติฟังก์ชั่นของการตอบสนองที่เป็นจริงไม่ค่อยทราบมาก่อน ดังนั้นจึงมักจะต้องประมาณการ

ของค่าดังกล่าว เป็นผลให้การกระจายตัวของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนไม่เฉพาะแต่เกิดเนื่องจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลองเพียงอย่างเดียวแต่เกิดเนื่องจากการขาดความสอดคล้องของรูปแบบหุ่นที่ประมาณการขึ้นมาหรือเรียกว่า Lack of Fit of Estimate Model ถ้ารูปแบบหุ่นที่ประมาณขึ้นมามีความสอดคล้องในการตอบสนองที่กำลังคาดคะเนแล้วค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of Square) ของความคลาดเคลื่อน จะเกิดเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการทดลองเพื่อประเมินความเหมาะสมของรูปแบบหุ่นที่ประมาณ ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนจึงถูกแบ่งเป็น ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการทดลอง และผลรวมกำลังสองอันเนื่องมาจากการขาดความสอดคล้องของรูปแบบหุ่น

หลักการทางสถิติของกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square) ถูกนำมาใช้ในการประมาณพารามิเตอร์ของฟังก์ชั่นการตอบสนองของสมการถดถอยที่ตั้งสมมุติฐานขึ้น เมื่อพารามิเตอร์ของฟังก์ชั่นการตอบสนองที่ถูกตั้งสมมติฐานขึ้นถูกแทนด้วยค่าประมาณของมันผลลัพธ์ คือฟังก์ชั่นของการตอบสนองจะถูกทำให้สอดคล้องขึ้น และค่า Y จึงเป็นดังนี้

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + \ldots\ldots + b_n X_n \qquad (2.4)$$

สมการดังกล่าวเป็นฟังก์ชั่นการตอบสนองเชิงเส้นตรงที่ถูกทำให้สอดคล้องซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคาดคะเนการตอบสนองสำหรับค่าที่ต้องการของตัวแปรเชิงปริมาณ (Independent Variables) เมื่อฟังก์ชั่นการตอบสนองที่ถูกทำให้สอดคล้อง (Y) ได้นำมาสร้างกราฟในลักษณะของฟังก์ชั่นของตัวแปรเชิงปริมาณ ผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างกราฟนี้เรียกว่า Response Surface Plots หรือ Contour Maps

2.7 การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design, RSM)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \qquad (2.5)$$

ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(x_1, x_2) \qquad (2.6)$$

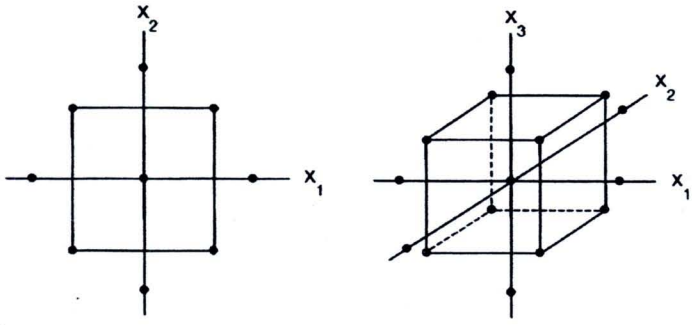
ซึ่งจะเรียกว่า พื้นผิวผลตอบ (Response Surface) โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟฟิก โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ χ_1 และ χ_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบ โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบ และตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซ็ตของตัวแปรอิสระอาจจะเป็น แบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้เป็นแบบจำลองกำลังหนึ่ง ดังสมการ 2.7

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ... + \beta_k x_k + \varepsilon \qquad (2.7)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดังสมการ 2.8

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad (2.8)$$

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากจะใช้แบบจำลองกำลังหนึ่งหรือแบบจำลองกำลังสองในการหาผลตอบ แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่มีขนาดใหญ่ การออกแบบพื้นผิวผลตอบมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีการกำลังสองน้อยสุด การปีนด้วยทางชัน การออกแบบสำหรับฟิตแบบจำลองอับดับที่หนึ่ง และการออกแบบสำหรับฟิตแบบจำลองอับดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับฟิตแบบจำลองอับดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดราติกของผลตอบ คือ การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการฟิตแบบจำลองอันดับที่สอง มีพารามิเตอร์อยู่ 2 ตัวในการออกแบบที่จะต้องถูกกำหนดนั่นคือ ระยะทางของ α การรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง n_c โดยทั่วไปการออกแบบนี้จะประกอบด้วย 2^k แฟคทอเรียลที่มี n_f รัน 2^k รันในแนวแกนหรือในรูปดาว และ n_c รันที่จุดศูนย์กลาง การเลือก α ใน CCD จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่เราสนใจ เมื่อบริเวณนี้เป็นรูปทรงกลม การออกแบบจะต้องรวมเอาจุดศูนย์กลางของการรันเข้าไว้ด้วยดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการออกแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ k=2 และ k=3

2.8 แบบจำลองการถดถอย (Regression Model)

แบบจำลองการถดถอยเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบ ซึ่งจะทำให้สามารถหาผลตอบที่จุดใดๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองนี้ส่วนใหญ่คือ วิธีกำลังสองน้อยสุด

วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) เป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (β) เพื่อทำให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด (ε^2) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งบางครั้งเราเรียก β เหล่านี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยมีขั้นตอนในการประมาณค่าดังนี้

1. สร้างผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาด โดยการฟิตผลตอบ
2. ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยในเทอมต่างๆ ที่ทำให้ผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด
3. นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้ไปเขียนสมการทำนายค่าของผลตอบตามกรณีเป็นแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพื้นผิวผลตอบ

2.9 แบบจำลองการถดถอยสำหรับการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design)

เนื่องจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีแบบส่วรประสมกลาง (Central Composite Design) มีการทำการทดลองไม่พอเพียงที่จะทำให้เกิด Cubic Model ได้ (ปารเมศ ชุติมา 2545) ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยจึงมีทั้งหมด 3 แบบ ดังนี้

1. Linear Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{p} \beta_i X_i \qquad (2.9)$$

2. 2FI (two-factor interaction)Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{p} \beta_i X_i + \sum \sum_{i<j}^{p} \beta_{ij} X_i X_j \qquad (2.10)$$

3. Quadratic Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{p} \beta_i X_i + \sum \sum_{i<j}^{p} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^{p} \beta_{ii} X_i^2 \qquad (2.11)$$

(L.M.M. Tijskens, M.L.A.T.M. Herto and B. Nicolai, 2001)

2.10 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยจะทำตามรูปแบบ และข้อสมมติของรูปแบบการถดถอยที่กำหนดไว้ หากข้อสมมติของรูปแบบเป็นจริง ผลการวิเคราะห์จะเป็นไปอย่างถูกต้อง แต่ถ้าข้อสมมติไม่เป็นจริงการนำผลการวิเคราะห์ไปใช้จะไม่ถูกต้อง หากพบว่าข้อสมมติของรูปแบบไม่เป็นจริงควรเปลี่ยนแปลงวิธีการวิเคราะห์ให้เหมาะสมหรือใช้วิธีการวิเคราะห์เดิมกับข้อมูลที่แปลงให้เป็นไปตามข้อสมมติของรูปแบบแล้ว

ข้อสมมติของรูปแบบการถดถอยที่เกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อน ได้แก่ ความคลาดเคลื่อน ε_i ต่างก็มีการแจกแจงที่เป็นอิสระกันแบบปกติมีค่าเฉลี่ย 0 และค่าความแปรปรวน σ^2 หรือ $\varepsilon_i \sim Nid\left(0, \sigma^2\right)$ มีความจำเป็นยิ่งต่อการทดสอบสมมติฐานและการประมาณค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบ หากข้อสมมติข้อใดข้อหนึ่งไม่เป็นจริงจะมีผลทำให้ตัวประมาณที่ได้ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวประมาณที่ดี การสรุปผลจากการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับพารามิเตอร์จะไม่ถูกต้อง นอกจากการวิเคราะห์การถดถอยจะมีปัญหาข้อสมมติที่เกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนไม่เป็นจริงแล้วยังมีปัญหาที่สำคัญอื่นๆ อีก ได้แก่ รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ และตัวแปรตามไม่เป็นไปตามที่กำหนด ไม่ได้รวมตัวแปรอิสระที่สำคัญบางตัวแปรไว้ในรูปแบบ ตัวแปรอิสระในรูปแบบไม่เป็นอิสระกัน มีค่าผิดปกติ และค่าที่มีอิทธิพล ดังนั้นก่อนการนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ควรตรวจสอบข้อมูลที่ทำการศึกษาก่อนว่ามีคุณสมบัติตามข้อสมมติของรูปแบบหรือไม่ การตรวจสอบส่วนใหญ่ทำกับค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณที่เรียกว่า การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน โดยการตรวจสอบมีดังต่อไปนี้

1. การพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน ได้แก่ การพล็อตแบบ Dot แบบ Box แบบ Stem และ Leaf และแบบ NP เป็นการพล็อตเพื่อพิจารณาลักษณะการแจกแจงของข้อมูล และพิจารณาค่าผิดปกติ การพล็อต e กับ $\hat{Y}$ หรือกับ X เป็นการพล็อตเพื่อพิจารณาความเป็นอิสระของความ

คลาดเคลื่อน เอกภาพของความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อน ความเหมาะสมของรูปแบบ ค่าผิดปกติ และค่าที่มีอิทธิพล ส่วนการพล็อตการถดถอยบางส่วนเป็นการพล็อตเพื่อพิจารณาตัวแปรอิสระที่ควรนำมาใช้ในรูปแบบ

2. การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ เพื่อทดสอบว่าความคลาดเคลื่อนมาจากประชากรที่มีการแจกแจงแบบปกติ

3. การทดสอบสหสัมพันธ์ต่อเนื่อง เพื่อทดสอบว่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณมีการแจกแจงที่เป็นอิสระกัน

4. การทดสอบเอกภาพของความแปรปรวน เพื่อทดสอบว่าความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่

5. การทดสอบว่าตัวแปรอิสระในรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุมีความเป็นอิสระกัน

6. การทดสอบว่ารูปแบบการถดถอยที่กำหนดอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามได้เหมาะสม

7. การทดสอบว่าขาดตัวแปรอิสระที่สำคัญบางตัวแปรในรูปแบบการถดถอย

8. การทดสอบว่ามีค่าผิดปกติเนื่องจากค่าตัวแปรอิสระหรือค่าของตัวแปรตาม และมีค่าที่มีอิทธิพลในข้อมูล

โดยหลังจากการตรวจสอบด้วยวิธีการต่างๆ แล้ว หากพบว่าเกิดปัญหาในการวิเคราะห์การถดถอยอย่างใดอย่างหนึ่ง ตัวอย่างเช่น ตัวแปรอิสระไม่เป็นอิสระกัน การแจกแจงของความคลาดเคลื่อนไม่เป็นแบบปกติ ค่าความคลาดเคลื่อนมีสหสัมพันธ์ต่อเนื่อง หรือความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนไม่คงที่ หากยังคงใช้ผลการวิเคราะห์การถดถอยเดิมอยู่จะทำให้การสรุปผลการวิเคราะห์ไม่ถูกต้อง การแก้ไขทำได้โดยการเปลี่ยนวิธีการวิเคราะห์ใหม่หรือแปลงข้อมูล

2.11 พื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \qquad (2.12)$$

ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(x_1, x_2) \tag{2.13}$$

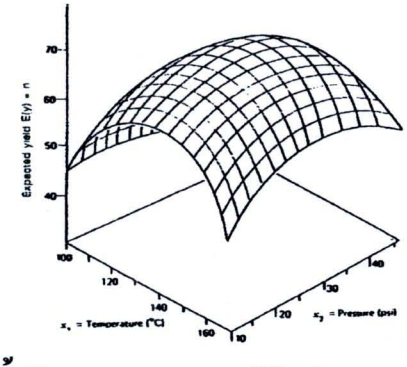
ซึ่งจะเรียกว่า พื้นผิวผลตอบ (Response Surface) โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟฟิก ดังรูปที่ 2.3 โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบของ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบ และตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรก จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซ็ตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_k x_k + \varepsilon \tag{2.14}$$

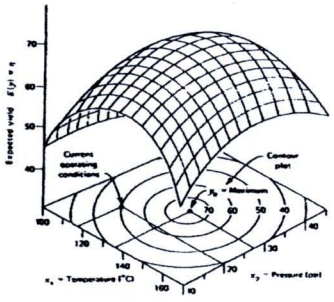
แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดังสมการ

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum\sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \tag{2.15}$$



รูปที่ 2.3 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ (ปารเมศ ชุติมา, 2545)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



รูปที่ 2.4 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ (ปารเมศ ชุติมา, 2545)

การศึกษาโดยใช้วิธีการแสดงพื้นผิวผลตอบจำเป็นต้องค้นหาฟังก์ชันที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตามหรือค่าผลตอบ ต่อตัวแปรอิสระต่างๆ เป็นลำดับแรก ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง (First Order) ตัวอย่างดังรูปที่ 2.5

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ... + \beta_k x_k \qquad (2.16)$$

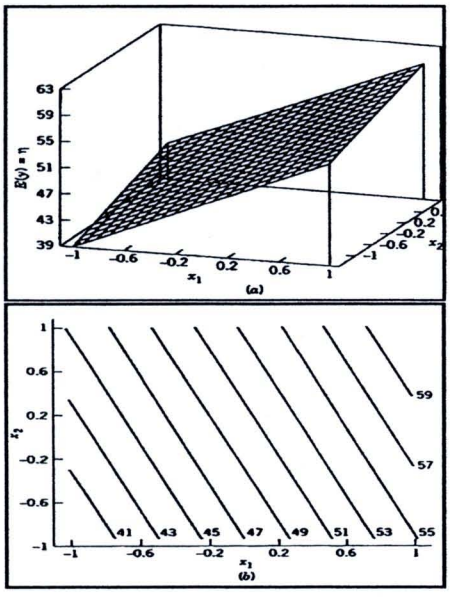
หากตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันระหว่างกัน ต้องทำการเพิ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกันเข้าไปอีกหนึ่งตัวแปร (First Order with Interaction) ตัวอย่างดังรูปที่ 2.6

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j + \sum \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j \qquad (2.17)$$

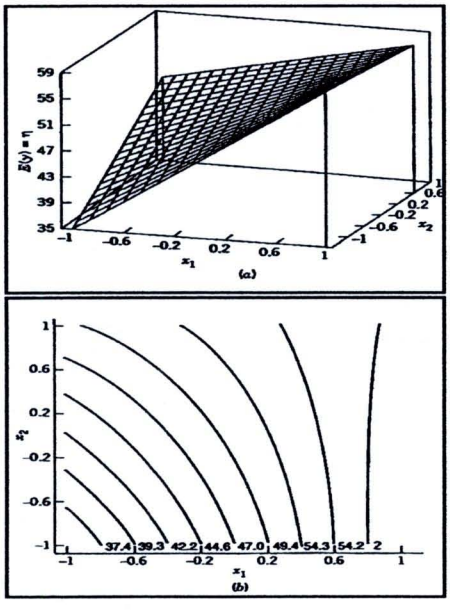
สำหรับระบบที่มีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ต้องใช้แบบจำลองที่มีลำดับสูงขึ้น เช่น ลำดับสอง (Second Order) ตัวอย่างดังรูปที่ 2.7 นอกจากนี้ แบบจำลองลำดับสอง ยังมีรูปแบบพื้นผิวผลตอบที่มีความหลากหลาย ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.8

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j + \sum_{j=1}^{k} \beta_{jj} x_j^2 + \sum \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j \qquad (2.18)$$

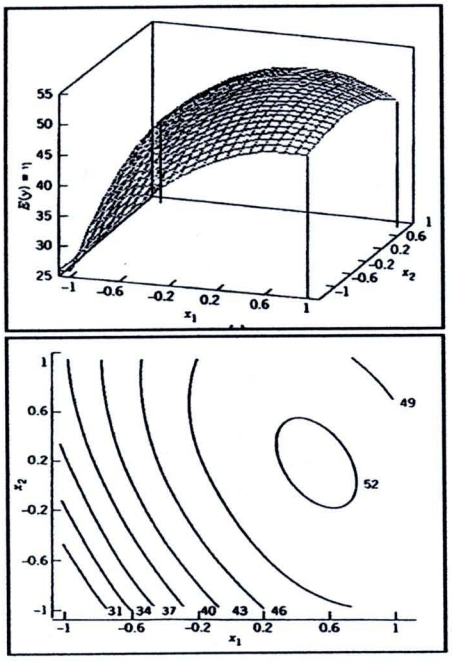
การได้มาของฟังก์ชันต่างๆ มักได้มาจากสมการถดถอย



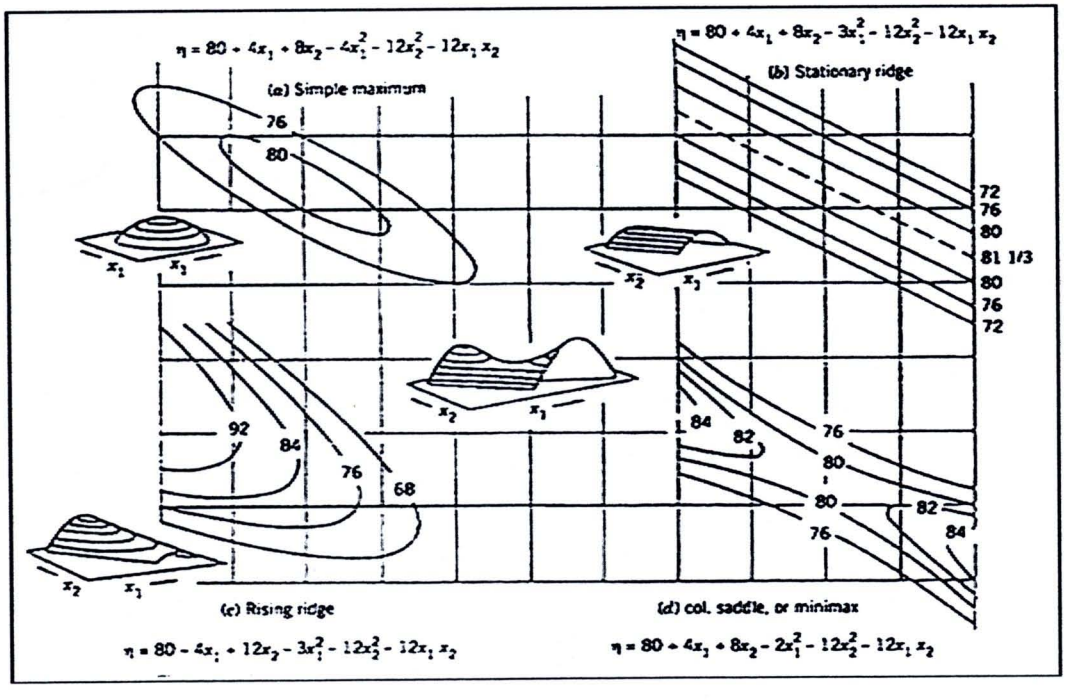
รูปที่ 2.5 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ First Order Model (Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery, 1995)



รูปที่ 2.6 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ First Order with Interaction (Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery, 1995)



รูปที่ 2.7 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ Second Order (Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery, 1995)

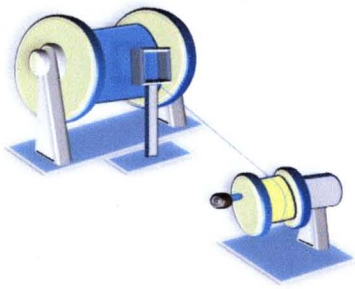


รูปที่ 2.8 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบในลักษณะหลากหลายแบบของ Second Order (Raymond H. Myers และ Douglas C. Montgomery, 1995)

2.12 กระบวนการประกอบฟิลเตอร์เชื่อมกับใยแก้วนำแสง

ในการประกอบผลิตภัณฑ์ฟิลเตอร์ (Filter Product Assembly) ของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีกระบวนการผลิตดังนี้

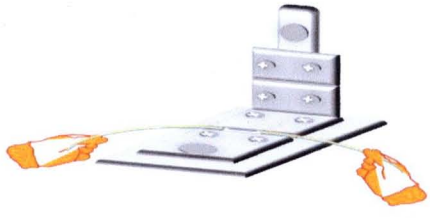
2.12.1 การม้วนไฟเบอร์ (Winding Process) เป็นการม้วนความยาวของไฟเบอร์ขนาดตามความต้องการของลูกค้า ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ และทำการขีดตำแหน่งความยาวเพื่อบอกระยะความยาวที่สามารถสั้นสุดเพื่อเป็นการบอกตำแหน่งความยาวของชิ้นงานได้ ดังรูปที่ 2.9 และ 2.10



รูปที่ 2.9 ลักษณะการม้วนไฟเบอร์ (Winding Process)

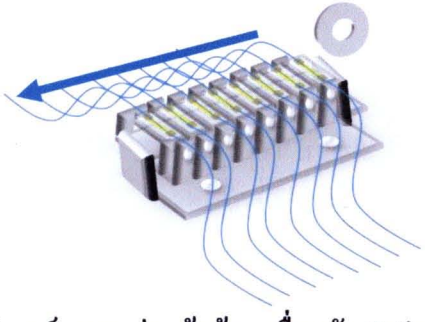
รูปที่ 2.10 ลักษณะการบอกตำแหน่งของระยะการม้วนไฟเบอร์ (Fiber Marking)

2.12.2 การเซ็ตไฟเบอร์ลงบนฐานแท่งแก้ว (Mounting Process) เป็นการปอกไฟเบอร์ (Fiber Stripper) โดยเอาพลาสติก (UV Coating) ที่ห่อหุ้มไฟเบอร์ออก โดยใช้เครื่องมือสำหรับปอกโดยเฉพาะ (Coating Stripper Tool) และทำการเซ็ตไฟเบอร์ลงในร่องตัววี (V Groove) ดังรูปที่ 2.11 โดยใช้กาว Epo-Tek353ND เป็นตัวยึดไฟเบอร์ และฐานของแท่งแก้ว



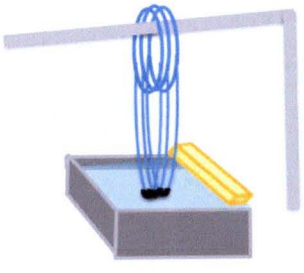
รูปที่ 2.11 การเซ็ตไฟเบอร์ลงในร่องตัววี (V Groove)

2.12.3 การตัดไฟเบอร์ และแท่งแก้วด้วยความเอียง 8 องศาเพื่อให้แสงสามารถเดินทางได้ดีที่สุด และหักเห สะท้อนกลับภายในคอร์ของไฟเบอร์ (Fiber Core) ภายใต้ดัชนีหักเหของแสง 1.46 เพื่อให้แสงมีค่าการสูญเสียของแสงขาเข้า (Insertion Loss) และการสูญเสียของแสงเมื่อสะท้อนกลับ (Return Loss) ที่ดีที่สุด ดังรูปที่ 2.12



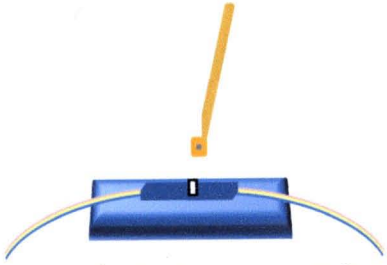
รูปที่ 2.12 การตัดไฟเบอร์ และแท่งแก้วด้วยเครื่องตัด (Microgrinder Slicer Machine)

2.12.4 การทำความสะอาดชิ้นงาน ด้วยเครื่องความถี่สูงใต้ความเร็วแสง (Ultra Sonic) ด้วยความถี่ 40 Hz. เป็นระยะเวลา 35 นาทีด้วยน้ำบริสุทธิ์ (RO Water) โดยจะล้างทำความสะอาดชิ้นงาน 3 รอบ ดังรูปที่ 2.13



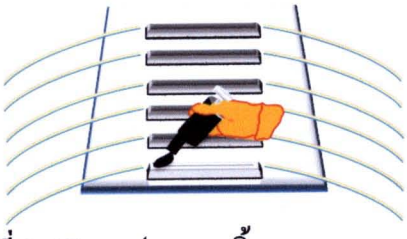
รูปที่ 2.13 การทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (Ultra Sonic Tank)

2.12.5 การสอดแผ่นฟิลเตอร์ลงในร่องจากการตัดไฟเบอร์ และแท่งแก้วเพื่อให้ค่าการสูญเสียของแสงเป็นไปตามความต้องการของลูกค้าขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ และทำการอบชิ้นงานด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.14



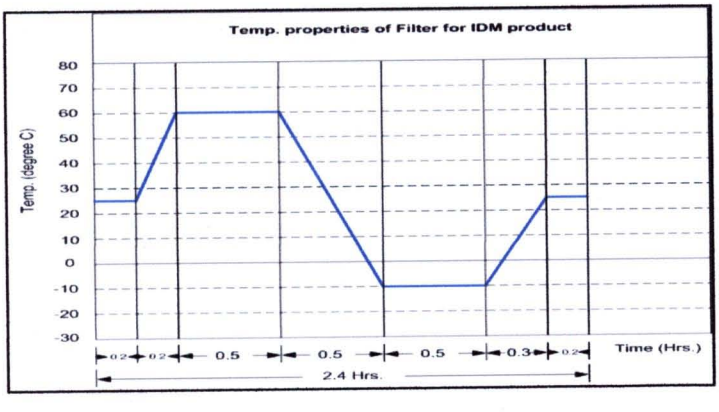
รูปที่ 2.14 การสอดแผ่นฟิลเตอร์ลงในร่องจากการตัดไฟเบอร์ (Fiber) และแท่งแก้ว (Glass Groove)

2.12.6 การประกอบชิ้นงานลงฐานของชิ้นงานเพื่อเป็นการป้องกันแผ่นฟิลเตอร์และชิ้นงานไม่ให้กระทบกระเทือน โดยใช้กาวเป็นตัวยึด (Stycast) ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การประกอบชิ้นงานลงฐานของชิ้นงาน

2.12.7 กระบวนการตรวจสอบค่าการสูญเสียของแสงข้าเข้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอณหภูมิ (Temperature Cycling Test) ตามเงื่อนไขของอุณหภูมิ ((-10) – 60 องศาเซลเซียส) ค่าการเปลี่ยนแปลงของแสงต้องไม่ต่างกัน $\pm$0.15 dB.ดังรูปที่ 2.16 และทำการวัดค่าการสูญเสียของแสงในขณะนั้นๆ



รูปที่ 2.16 เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Condition)

2.12.8 กระบวนการตรวจสอบค่าการสูญเสียของแสงสะท้อนกลับ (Return Loss Inspection) เป็นการสะท้อนกลับของแสงในช่วงความยาวคลื่น1310, 1550 และ 1650nm. เพื่อทำการตรวจสอบระบบการปล่อยสัญญาณว่าทีการชำรุดหรือมีการสูญเสียของสัญญาณแสงที่ระยะทางเท่าไร โดยสามารถคำนวณได้จากการส่งสัญญาณแสงไปทำการตรวจสอบสัญญาณได้เพื่อให้สามารถซ่อมแซมได้ถูกต้องแม่นยำ

ตาราง 2-8 ค่าการสูญเสียของแสงสะท้อนกลับที่ควบคุม (Return Loss)

ค่าการสูญเสีย (dB.)	ความยาวคลื่น (nm.)		
	1310	1550	1650
สะท้อนกลับ (RL)	> 40	> 40	> 35

2.12.9 กระบวนการตรวจสอบค่าการสูญเสียของแสงขาเข้า (Insertion Loss Inspection) เป็นการสะท้อนกลับของแสงในช่วงความยาวคลื่น 1310 1550 และ 1650 nm. เพื่อทำการตรวจสอบระบบการปล่อยสัญญาณ เพื่อให้แสงเดินทางได้ดีที่สุดได้เพื่อให้สามารถซ่อมแซมได้ถูกต้องแม่นยำ

ตาราง 2-9 ค่าการสูญเสียของแสงขาเข้าที่ควบคุม (Insertion Loss Specification)

ค่าการสูญเสีย (dB.)	ความยาวคลื่น (nm.)		
	1310	1550	1650
ขาเข้า(IL)	< 0.8	< 0.8	> 53

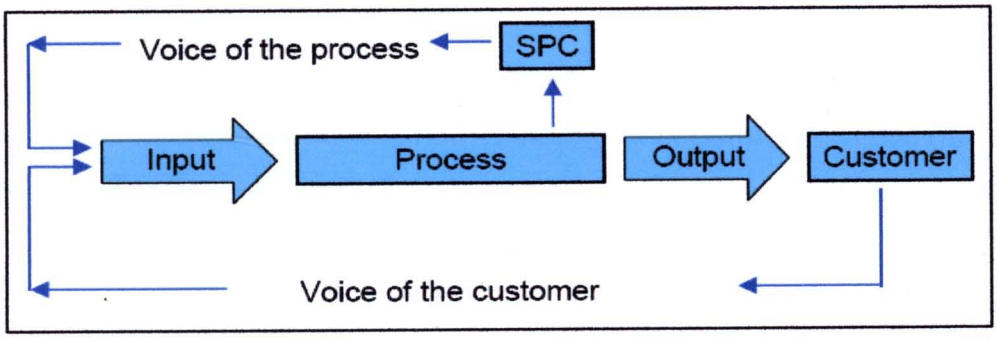
2.12.10 กระบวนการตรวจสอบชิ้นงานภายนอก (Appearance Inspection) เป็นการตรวจสอบความสวยงามของชิ้นงาน โดยมีการตรวจสอบ ตำแหน่งของ Boot ไม่สลับด้าน Stycast Adhesive ไม่เลอะติดบนตัวเคส (Case) คราบกาวไม่ติดบนไฟเบอร์ และทำการวัดความยาวของไฟเบอร์ (Length Checking) ก่อนทำการส่งให้ Quality Assurance (QA) เพื่อทำการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่อไปก่อนส่งสิ้นค้าให้ลูกค้า

2.13 การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการทางสถิติ (Statistical Process Control; SPC)

การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการทางสถิติถูกนำมาใช้เพื่อการควบคุมกระบวนการผลิต ไม่ใช่นำมาใช่เพื่อควบคุมผลิตภัณฑ์ โดยผลที่ได้จากการควบคุมจะนำมาเป็นสิ่งที่ใช่ในการ

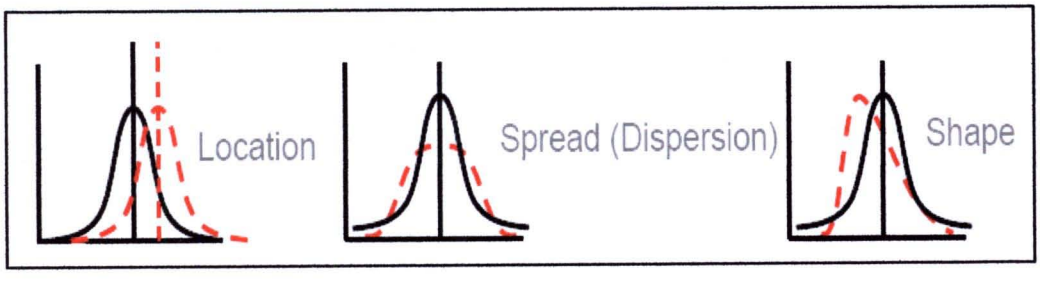
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

เปลี่ยนแปลงปรับปรุงให้กระบวนการพัฒนาขึ้นต่อไปเรื่อยๆส่งผลสุดท้ายในเรื่องของการลดต้นทุน เป็นเครื่องมือในการป้องกัน และเป็นสิ่งที่ทำให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงแผนภูมิการไหลการควบคุมกระบวนการผลิตด้วยวิธีการทางสถิติ (ขจรวิทย์อุตวัฒน์ทียูวีไรน์แลนด์ ประเทศไทย)

ความแปรผัน (Variation) เป็นสิ่งที่ต้องเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาในกระบวนการผลิต หมายความว่าเป็นความต่างที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ของผลลัพธ์ที่เกิดจากกระบวนการใดๆโดยสาเหตุของความแปรผันนั้นมาจากสองแหล่งคือสาเหตุธรรมดา (Common Cause) และสาเหตุพิเศษ (Special Cause) โดยทั่วไปสาเหตุธรรมดาจะส่งผลกระทบต่อความแปรผันของกระบวนการมากกว่าสาเหตุพิเศษดังนั้นต้องใช้ทรัพยากรรวมทั้งการสนับสนุนจากผู้บริหารในการลดความแปรผันของสาเหตุธรรมดาดังกล่าวดังรูปที่ 2.18

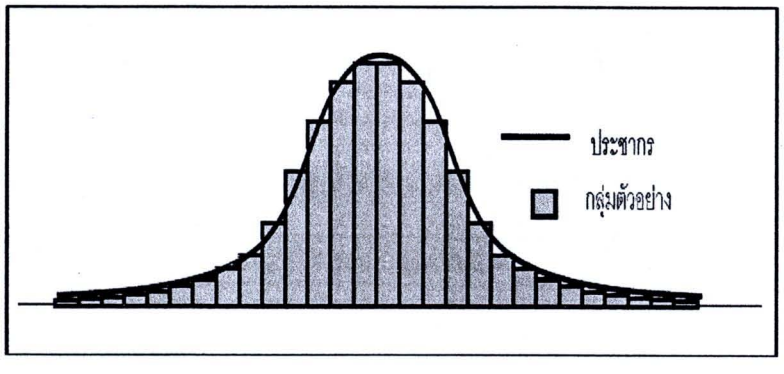


รูปที่ 2.18 แสดงความแปรผัน (Variation)

คำว่าเสถียร (Stable) ในส่วนของ SPC นั้นโดยทั่วไปหมายถึงกระบวนการที่พบว่ามีความแปรผันโดยมีสาเหตุเป็นสาเหตุธรรมดาสามารถคาดการณ์ได้ว่าน่าจะเกิดอะไรขึ้นในอนาคต และเป็นกระบวนการที่อยู่ในการควบคุมในทางสถิติส่วนคำว่าไม่สถียร (Unstable) เป็นสิ่งที่ตรงกัน

ข้ามโดยมีสาเหตุเป็นแบบพิเศษไม่สามารถคาดการณผลลัพธ์ของกระบวนการได้อีกทั้งยังไม่เรียกว่าอยู่ในการควบคุมอีกด้วยลักษณะของความแปรผันโดยทั่วไปจะก่อตัวหรือรวมตัวกันเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำโดยจะมีลักษณะการก่อตัวสามแบบใหญ่ๆได้แก่การก่อตัวต่างจุดที่อยู่กัน (Location) การก่อตัวที่มีความกว้างต่างกัน (Spread) และการก่อตัวที่มีรูปทรงที่ต่างกัน (Shape) อย่างไรก็ตามสำหรับการควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการทางสถิตินั้นจุด (หรือตำแหน่ง) ที่อยู่ และความกว้างจะถูกกล่าวถึงพร้อมกันเสมอเพราะนั่นคือสิ่งที่สามารถบ่งบอกได้ว่ากระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมด้วยวิธีทางสถิติหรือไม่

ประชากร (Population) กับกลุ่มตัวอย่าง (Sample) เป็นอีกสองคำที่ควรกล่าวถึงสำหรับความเข้าใจพื้นฐานโดยประชากรคือสิ่งที่กำหนด และต้องการทั้งหมดในการวัดผลของกระบวนการใดๆส่วนกลุ่มตัวอย่างคือสัดส่วนสุ่มที่เล็กลงจากประชากรที่จะนำมาวัดด้วยเหตุผลด้านความจำกัดของทรัพยากรกลุ่มตัวอย่างจึงถูกนำมาใช้แทนประชากรดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงการกระจายตัวของประชากร

ส่วนสัญลักษณ์ และสูตรในการคำนวณที่สำคัญในเชิงประชากรประกอบด้วยค่ากลาง (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ดังนี้

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{n} Xi}{n} \qquad (2.19)$$

$$\sigma = S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Xi - \mu)^2}{n}} \qquad (2.20)$$

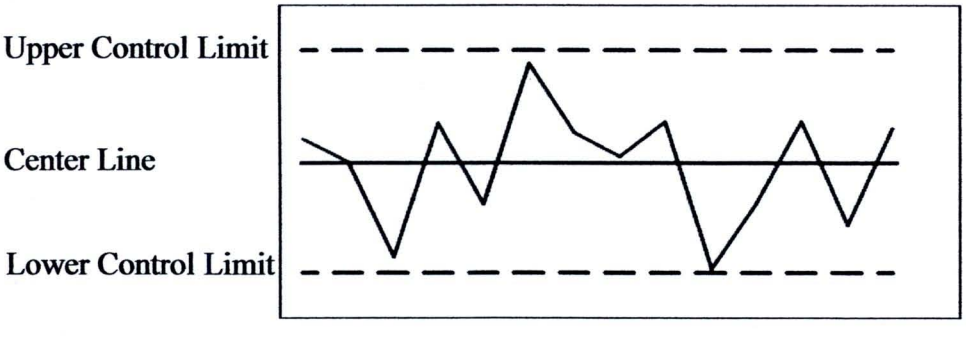
สำหรับการควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการทางสถิตินั้นตำแหน่งที่อยู่ (หรือค่ากลาง) และความกว้าง (หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) จะถูกกล่าวถึงพร้อมกันเสมอในทำนองเดียวกัน สัญลักษณ์ และสูตรในการคำนวณ ที่สำคัญของกลุ่มตัวอย่างคือ

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Xi}{n} \tag{2.21}$$

$$\hat{\sigma} = S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Xi - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{2.22}$$

เครื่องมือในการควบคุมกระบวนการด้วยวิธีทางสถิตินั้นมีอยู่สองอย่างคือผังควบคุม (Control Chart) หรือผังควบคุมชิวฮาร์ท (Shewhart Control Chart) โดยตั้งตามชื่อผู้นำผังมาใช้ในช่วงต้นคริสตศตวรรษที่สิบเก้า และอีกอย่างของเครื่องมือคือตัววัดความสามารถของกระบวนการ (Process Capability)

ผังควบคุมคือแผนภูมิที่แสดงคุณลักษณะของกระบวนการจากข้อมูลที่พล็อตลงไปเพื่อประเมินว่ากระบวนการอยู่ภายใต้สภาวะควบคุมทางสถิติหรือไม่ และช่วยในการรักษาสภาวะที่ควบคุมได้ทางสถิติดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงแผนภูมิที่แสดงคุณลักษณะของกระบวนการจากข้อมูล

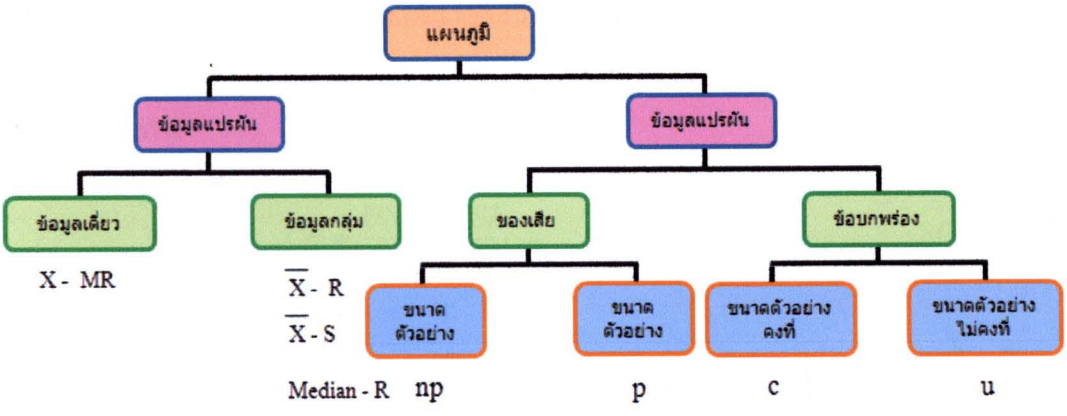
UCL = Upper Control Limit (พิกัดควบคุมด้านบน)

CL = Center Line (เส้นกลางหรือค่าเฉลี่ย)

LCL = Lower Control Limit (พิกัดควบคุมด้านล่าง)

ผังควบคุมนั้นจะต้องมีเส้นควบคุม (Control Limit) ซึ่งเกิดจากการเก็บข้อมูล และการคำนวณจึงจะเรียกว่าเป็นผังควบคุมส่วนตัววัดความสามารถของกระบวนการเป็นผลเกี่ยวเนื่อง และสัมพันธ์กับการใช้ผังควบคุมตัววัดความสามารถของกระบวนการเป็นตัวที่ชี้ว่ากระบวนการมีสิ่งที่ผิดปกติมากน้อยแค่ไหน

การเลือกใช้ผังควบคุม และตัววัดความสามารถของกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะข้อมูลที่จัดให้มี และหาได้อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับขนาดตัวอย่างอีกด้วยดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงผังควบคุมควบคุมกระบวนการ

ในส่วนการแปลความหมายของผังควบคุมที่นำมาใช้ควบคุมกระบวนการนั้นตัวอย่างลักษณะที่บอกได้ว่ากระบวนการกำลังไม่อยู่ในการควบคุมได้แก่

1. มีจุดอยู่นอกเส้นขอบเขตควบคุมสามารถสันนิษฐานได้ว่ามีความผันแปรพิเศษเกิดขึ้นณจุดนั้นต้องทำการวิเคราะห์หาสาเหตุ และดำเนินการแก้ไข

2. ข้อมูลมีรูปแบบ (Pattern) หรือมีแนวโน้ม (Trend) ผิดปกติแต่ยังอยู่ในเส้นควบคุม

3. Runs ยกตัวอย่างได้ว่ามีจุด 7 จุดอยู่ในแนวเดียวกันต่ำหรือสูงกว่าช่วงเส้นควบคุมบนหรือล่างกับเส้นกลางหรือมีจุด 7 จุดอยู่ในแนวเดียวกัน และมีแนวโน้มที่กำลังขึ้นหรือลงอย่างต่อเนื่อง

นอกจากนั้นรูปแบบการกระจายของข้อมูลมีลักษณะไม่สุ่ม (Non-Random) อย่างชัดเจนโดยปกติ 2 ใน 3 ของข้อมูลจะอยู่ในพื้นที่ 1 ใน 3 ของเส้นควบคุมกลางเป็นอีกตัวอย่างหนึ่งที่มีการพิจารณากันว่ากระบวนการไม่อย่ในการควบคุมได้

ลักษณะข้างบนเป็นการเตือนให้ทราบล่วงหน้าว่ามีการเปลี่ยนแปลงระดับสมรรถนะของกระบวนการควรรีบทำการศึกษาเพื่อหาทางป้องกัน และแก้ไขถ้าไม่ดำเนินการแก้ไขอาจทำให้เกิด

ข้อมูลที่ออกนอกเส้นควบคุมได้ และส่งผลให้เกิดเสียหายเช่นของเสียจำนวนมากขึ้นตามสาเหตุของความแปรผันแบบพิเศษนั้น

ถ้าต้องการทราบว่ากระบวนการใดดีสามารถบอกได้จากดัชนีชี้วัดซึ่งเป็นตัววัดว่ากระบวนการนั้นอยู่ภายใต้การควบคุมตามข้อกำหนด (Specification) หรือเป็นตัววัดว่ากระบวนการดีอย่างไรเมื่อเทียบกับข้อกำหนด

ดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการที่สำคัญได้แก่ Cp, Pp, Cp_U, Cp_L, Cp_k และ Pp_k โดยตัววัดผลประเภท Cp คือดัชนีที่แสดงถึงความสามารถของกระบวนการซึ่งพิจารณาจากความแปรผันภายในของกระบวนการเมื่อเทียบกับข้อกำหนด (Specification) โดยไม่คำนึงถึงค่ากลางของกระบวนการ

$$Cp = \frac{USL - LSL}{6\hat{\sigma}_{R/2d}} \tag{2.23}$$

USL: Upper Specification Limit หรือขอบเขตกำหนดด้านบน

LSL: Lower Specification Limit หรือขอบเขตกำหนดล่าง

Pp คือดัชนีที่แสดงถึงสมรรถนะของกระบวนการซึ่งพิจารณาจากความผันแปรทั้งหมดของกระบวนการเมื่อเทียบกับข้อกำหนด (Specification) โดยไม่คำนึงถึงค่ากลางของกระบวนการ Ppใช้ในกรณี Trial Run (หรือช่วง Pre-Launch)

$$Pp = \frac{USL - LSL}{6\hat{\sigma}S} \tag{2.24}$$

Cp_U คือดัชนีที่แสดงถึงความสามารถค่าสูงของกระบวนการซึ่งพิจารณาจากความผันแปรภายในของกระบวนการ และค่ากลางเมื่อเทียบกับข้อกำหนด (Specification)

$$Cp_U = \frac{USL - \overline{\overline{X}}}{3\hat{\sigma}_{R/2d}} \tag{2.25}$$

Cp_L คือดัชนีที่แสดงถึงความสามารถค่าต่ำของกระบวนการซึ่งพิจารณาจากความผันแปรภายในของกระบวนการ และค่ากลางเมื่อเทียบกับข้อกำหนด (Specification)

$$Cp_L = \frac{\overline{\overline{X}} - USL}{3\hat{\sigma}_{R/2d}} \qquad (2.26)$$

Cp_k คือดัชนีที่แสดงถึงความสามารถของกระบวนการซึ่งพิจารณาจากค่าที่ต่ำที่สุดระหว่าง Cp_L และ Cp_k ที่ได้จากสูตรในการคำนวณข้างบนส่วน Pp_k ก็ใช้วิธีการทำนองเดียวกันในส่วนของสูตร และวิธีการคำนวณแต่กลุ่มตัวอย่างที่ได้มาในการคำนวณค่า Pp_k ยังไม่สามารถบอกได้ว่าอยู่ในการควบคุมทางสถิติหรือไม่ (ยังมีสาเหตุของความแปรผันประเภทธรรมดา และพิเศษปะปนกันอยู่) ตรงข้ามกับ Cp_k ที่ทราบได้แน่นอนจากการใช้ผังควบคุม และการแปลความหมายว่ากระบวนการนั้นเสถียรแล้ว (มีเฉพาะสาเหตุความแปรผันแบบธรรมดาเท่านั้นที่เกิดขึ้น)

นอกจากนั้นค่า Cp_k ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดของเสียในรูป PPM (Part Per Million) ด้วย ยกตัวอย่างเช่น Cp_k ที่มีค่าเท่ากับ 1.33 จะมีสัดส่วนของเสียในล้านชิ้นเท่ากับ 64 และ Cp_k ที่มีค่าเท่ากับ 1.67 จะมี PPM อยู่ที่ 1 เป็นต้น

การปรับปรุงความสามารถของกระบวนการสามารถทำได้โดยการลดค่าความเบี่ยงเบนที่เกิดจากความแปรผันที่เกิดขึ้นเองตามปกติ (แบบธรรมดา) โดยการแก้ไขที่ระบบ (Actions on the System) ซึ่งเป็นหน้าที่ของผู้บริหารที่จะต้องเข้ามามีส่วนร่วมสั่งการ และช่วยเหลือ

ความไม่เข้าใจพื้นฐานทางสถิติของผู้ปฏิบัติงานหรือผู้ที่ใช้เครื่องมือทางสถิตินั้นๆเป็นผลให้เกิดความไม่มีประสิทธิผลของการใช้ SPC การเลือกใช้เครื่องมือของ SPC ผิดประเภทก็อาจส่งผลให้การควบคุมกระบวนการไม่ได้ผลเช่นใช้เครื่องมือที่ไม่ไวพอต่อการตอบสนองของบางกระบวนการที่วิ่ง (ดำเนินการ) เร็วกล่าวคือกว่าจะทราบผลโดยการแปลความหมายจากเครื่องมือนั้นๆผลกระทบที่เสียหายก็เกิดขึ้นไปมากเกินตามทันแล้ว

การใช้เครื่องมือต่างๆของ SPC ไม่ต่อเนื่องเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำของการควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการทางสถิติรวมถึงการไม่ติดตามเฝ้าติดตามผังควบคุมอย่างใกล้ชิด

ผู้ปฏิบัติงานหรือผู้ใช้เครื่องมือไม่มีการวิเคราะห์ และแก้ไขเมื่อพบความผิดปกติบนแผนภูมิควบคุม รวมถึงไม่มีฐานข้อมูลที่บันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น และไม่ใช้ R-Chart ในการควบคุมกระบวนการล้วนแล้วแต่ทำให้การใช้การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการทางสถิติไม่เกิดประสิทธิผลทั้งสิ้น

จัดทำการสำรวจความต้องการลูกค้า (Customer Specific Requirement Survey) ในส่วนของความ ต้องการใช้การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการทางสถิติจะสามารถเพิ่มความชัดเจนในการทำระบบการทำงาน เพื่อทำให้ลูกค้าเกิดความพอใจ และป้องกันความสับสนหรือหลงทาง

วางแผนธุรกิจ (Business Plan) โดยนำการควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการทางสถิติมาเป็นส่วนหนึ่งของตัววัดผลกระบวนการ หรือ KPI จะทำให้ทุกคนในองค์กรสนใจโดยเฉพระผู้บริหารที่จะต้องใส่ใจกับการควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการทางสถิติมากขึ้นอาจจะตั้งเงื่อนไขในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการจูงใจ (Motivation) เพื่อให้เกิดการปรับปรุงในเรื่องคุณภาพไว้ด้วย

การใช้เทคโนโลยีเช่นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการที่จะลงข้อมูลให้ทันสมัยอยู่เสมอรวมถึงการแปลความหมายผังควบคุมหรือตัววัดความสามารถของกระบวนการเป็นส่วนหนึ่งที่จะสนับสนุนให้การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการทางสถิติประสบความสำเร็จ (ขจรวิทย์ อุตวัฒน์ทียูวีไรน์แลนด์ ประเทศไทย จำกัด)

2.14 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความต้องการของลูกค้าที่แท้จริงคือการได้รับสินค้าได้ตรงตามเวลาความต้องการ รวมถึงกระบวนการผลิตที่ดี มีคุณภาพในกระบวนการผลิตค้าคุณภาพสูง และมีต้นทุนการผลิตต่ำหรือราคาถูก รวมถึงปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตต่ำ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการผลิตทั้งสิ้น การวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมืออย่างหนึ่งที่สามารถนำมาช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น และลดของเสียในกระบวนการผลิต และเพื่อพัฒนาอายุของเครื่องมือโดยการคาดคะเนโดยการออกแบบการทดลองของการกัดเหล็กกล้า (290 BHN) ด้วยปัจจัยของ ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) อัตราการป้อน (Feed) ความลึกของการตัด (Depth of Cut) โดยใช้พื้นผิวตอบ (Response Surface Method) เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยของอายุการใช้งานของเครื่องมือจาก Dual Contour และทำนายอายุการใช้งานของเครื่องมือความเร็วในการตัด (Cutting Speed) การเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อน (Feed) ความลึกในการตัด (Depth of Cutting) มีผลทำให้อายุการใช้งานลดลง เพื่อต้องการหาค่าที่ดีที่สุดในการใช้งานของเครื่องมือ I.A Choudhury และ M.A EI-Baradie (1999) ศึกษาปฏิกิริยาร่วมกันทำให้เกิดน้ำร่วมของถ่านหินXinwen และกากชานอ้อยของประเทศจีน ผลกระทบของความสัมพันธ์ของการเกิดปฏิกิริยาของอุณหภูมิ (Reaction Temperature) เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Time) และแรงดันของไฮโดรเจนเย็น (Cold Hydrogen Pressure) โดยกระบวนการคนให้แตกตัวอัตโนมัติ (Stirred Auto Clave) ทำการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล (Full Factorial Design) สองระดับ (Two Level) 3 ปัจจัย 8 การทดลองวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression) และความสัมพันธ์ของปัจจัยร่วมกันโดยวิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface) และทำการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ค่า Oil Yield และปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลง (Conversion) ของค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยทั้ง 3 คืออุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส แรงดันไฮโดรเจนเย็น 670 psig และเวลาการ

เกิดปฏิกิริยา 40 นาที มีความคาดเคลื่อนจากการคำนวน และการปฏิบัติจริง 5% ปฏิกิริยาการกลายเป็นน้ำของถ่านหิน และกากชานอ้อยสามารถทำให้ได้ค่าที่ดีที่สุดในกระบวนการผลิต ลดจำนวนการของปัจจัยในกระบวนการผลิตลงได้ รวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในส่วนของเวลา พลังงาน และทำให้ค่าใช้จ่ายลดลงได้ Islam Rafiqual *et al* (2000)

การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต สามารถออกแบบการทดลองด้วยระดับปัจจัยสองระดับ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัย 2 ชนิดในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของแบบ และการออกแบบกระบวนการเพื่อเพิ่มผลผลิต (Productivity) รวมทั้งเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์โดยอาศัยวิธีการ 4 ขั้นตอน คือ การวางแผนเพื่อพัฒนาปัญหาของการปฏิบัติงาน (Planning) ลดจำนวนปัจจัยด้วยการคัดกรองที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Screening) หาค่าที่ดีที่สุดจากสมการความสัมพันธ์ของตัวแปร (Optimization) และตรวจสอบผลที่ได้สามารถทำได้จริงหรือไม่ (Verification) จากกราฟความสัมพันธ์ 2 ปัจจัย (Two-way Interaction) ของเวลาที่ต่างกัน (Δ t) และ ค่ากำลังไฟสูง (Pmax) สามารถตัดตัวแปรที่ไม่สำคัญ และมีผลน้อยได้ โดยตั้งเส้นส่วนย่อยผ่านศูนย์กลางรองของตัววิ่ง(Sub-runner Diameter) ที่ 45 มม. และตำแหน่งของช่องทางรองตั้งไว้ที่ 40 มม. จากสมการความสัมพันธ์โดยอาศัยการคำนวณหาค่าที่ดีที่สุดสามารถลดเวลาการหล่อเย็นลง 50% แรงดันการฉีดลดลง 30% และเวลาในการทำลดลง 38% เพิ่มความสามารถของกระบวนการผลิต (Increasing Productivity) ในการลดเวลาในการเตรียม Moldingในกระบวนการผลิตได้ Keun Park และ Jong-Ho Ahn (2004) ออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในกระบวนการเชื่อมด้วยลวดอะลูมินัมกับผิวสัมผัสทองคำ โดยทำการออกแบบการทดลองด้วยปัจจัยควบคุม 4 ปัจจัย (2 ระดับ 3 ปัจจัย และ 3 ระดับ 1 ปัจจัย) คือ แรงกด (Force) เวลา (Time) กำลังในการสั่นขยี้ (Power) และอุณหภูมิ (Temperature) ทำการทดสอบความแม่นยำในการเชื่อมด้วยการตรวจสอบด้วยสายตาว่ามีอาการเสียตาม Code ที่ตั้งทั้ง 8 Codes หรือไม่ ทำการทดสอบ Reliability Test โดยทำการดึงเส้นลวดอะลูมินัมหลังจากเชื่อม เพื่อยืนยันค่าแรงดึงในเส้นลวดที่ได้หลังการทดลอง และทำการแสดงลักษณะของวัสดุหลังจากการเชื่อมโดยวิธีการ SEM ซึ่งผลที่ได้จากเชื่อมด้วยการออกแบบการทดลองมีคุณภาพที่ดี และผลจากการทดสอบให้ความน่าเชื่อถือ มีความแม่นยำในการเชื่อมอยู่ที่ 100% การแสดงลักษณะของวัสดุหลังจากการเชื่อมโดยวิธีการ SEM ให้ผลว่า PCB มีอาการเสียเกิดขึ้นส่งผลให้ค่าในการดึงลวดลดลง เป็นหนึ่งในแนวทางที่จะประยุกต์ในการทดลองกับลวดทองคำ โดยอาศัยปัจจัยควบคุมแบบเดียวกันกับลวดอะลูมินัมนำมาออกแบบการทดลองแบบแฟคข้นนอลแฟคทอเรียล(Fractional Factorial) เพื่อยืนยันว่าปัจจัยควบคุมตัวใดจากอะลูมินัมที่มีผลต่อการเชื่อมลวดทองคำ Daniel T. Rooney (2005) ทำการประเมินผลจากการเชื่อมลวดทองบน Substrate ของวัสดุที่ทำมาจาก

Palladium (Pd) ทองเคลือบนิเกิล และเงิน เพื่อทำการตรวจสอบว่า Substrate ใดมีค่าแรงดึงในเส้นลวด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน อาการเสีย และจำนวนการเชื่อมติดที่ดี โดยทำการออกแบบการลองระหว่างของปัจจัย 3 ปัจจัย คือ กำลังในการสั่นขยี้ (Power) 4 ระดับ แรงกด (Force) 4 ระดับ และเวลา (Time) 2 ระดับโดยทำการกำหนดที่อุณหภูมิ (Temperature) คงที่ที่ 150 องศาเซลเซส ซึ่งจากประเมินผลจากการเชื่อมลวดทองบน Substrate ของวัสดุที่ทำมาจาก Palladium (Pd) ให้ค่าที่ดีที่สุด R.Waye Johnson (2002) กรณีศึกษาถึงคุณสมบัติในการเชื่อมด้วยลวดทองแดงเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25.4 μm และผลต่างระหว่าง Electronic Flame-off (EFO) ปัจจุบันและการปรับค่า Firing Time ด้วย Forming Gas (5%H2 and 95%N2) โดยทำการหาค่าที่ดีที่สุดในการเชื่อมด้วยการออกแบบการทดลองซึ่งมีปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัยคือ Ultrasonic Generator (USG) 5 ระดับ Current Setting ระดับ Contact Velocity (CV) และBond Force (BF) 4 ระดับ ผลตอบที่พิจารณามี 3 ผลตอบ คือ Mashed Ball Diameter (MBD) Ball Height และ Ball Shear ผลที่ได้คือ Ultrasonic Generator (USG) เป็นปัจจัยที่มีผลที่สุดในการเชื่อม Z.W. Zhong (2007)

การนำการออกแบบการทดลอง (DOE) ไปใช้ในขบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดเรซิ่น (Plastic Injection Molding Process) นำการออกแบบการทดลองเข้ามาแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในขบวนการการฉีดพลาสติก (Plastic Injection Molding) โดยการต้องลดระยะเวลาในการทำงานของขบวนการ โดยเลือกปัจจัยทั้งหมด 6 ปัจจัยได้แก่ 1) ความดันในการฉีดเรซิ่น (Injection Pressure) 2) ความเร็วในการฉีดเรซิ่น (Injection Velocity) 3) อุณหภูมิในการอบ (Cure Time) 4) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold Temperature) 5) อุณหภูมิการหลอมเหลวของเรซิ่น (Resin Melting Point Temperature) 6) จำนวนเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมของเรซิ่น (The Percentage of Regrind Material) โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน 2^k เพื่อคัดเลือกหาปัจจัยที่มีผลต่อระยะในการทำงานของขบวนการ โดยสามารถหาปัจจัยที่มีผลได้แก่ 1) จำนวนเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมของเรซิ่น (The Percentage of Regrind material to be used) 2) ความดันในการฉีดเรซิ่น (Injection Pressure) 3) ความเร็วในการฉีดเรซิ่น (Injection Velocity) 4) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold Temperature) และพบว่าปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบได้แก่ อุณหภูมิการหลอมเหลวของเรซิ่น (Resin Melting Point) และอุณหภูมิในการอบ (Cure Time) หลังจากนั้นจึงนำปัจจัยที่มีผลกระทบทั้งสี่ปัจจัยไปทำการหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยอีกครั้ง สรุปได้ว่าการใช้การออกแบบการทดลองสามารถเข้ามาแก้ไขปัญหา และลดระยะเวลาการทำงานของขบวนการฉีดพลาสติกได้ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความถูกต้อง และแม่นยำ Shad (2004) การศึกษาการลดของเสียจากกกระบวนการล้างฟิล์มป้องกันการชุบทองของ

แผงวงจรแบบอ่อนด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง เพื่อดำเนินการปรับปรุงแก้ไข และติดตามควบคุมกระบวนการเกิดของเสียจากกระบวนการล้างฟิล์มป้องกันการชุบทองของแผงวงจรแบบอ่อน มีปัจจัยตั้งต้นทั้งหมด 6 ปัจจัย สามารถคัดกรองปัจจัยออกได้ 3 ปัจจัยด้วยการออกแบบการทดลองแบบ 2 ระดับ ที่ระดับนัยสำคัญ 95% มีผลกระทบหลักคือ ความดันหัวฉีดเคมี ความเข้มข้นเคมี และระยะเวลาในการล้าง ผลกระทบทางปฏิกิริยา คือระยะเวลาในการล้าง กับความเข้มข้นเคมี และความดันหัวฉีดเคมีกับความเข้มข้นเคมี โดยสมการพยากรณ์สามารถหาปัจจัยที่ดีที่สุดซึ่งสามารถลดของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตได้จาก 1.63% ลงเหลือ 1.33% ซึ่งยืนยันความแตกต่างโดยการเปรียบเทียบ 2 สัดส่วนที่ระดับนัยสำคัญ 95% ยรรยงค์ เตชะวิจิตร์ (2550)

การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการพ่นสีเฟอร์นิเจอร์ไม้โดยการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ โดยเห็นว่าจากสภาพปัญหาในการทำสีของกระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ พบว่าไม้ของเสียที่เกิดจากการพ่นสีไม่ได้มาตรฐานเป็นจำนวนมาก ซึ่งปัญหาของเสียที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาเป็นผิวส้ม ดังนั้นจึงต้องการศึกษาเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของการพ่นสีที่ทำให้เกิดของเสียสีเป็นผิวส้มน้อยที่สุดโดยใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง เมื่อวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา พบว่ามีปัจจัย 5 ปัจจัย คือ ความสูงของหัวปืนพ่นสี (ระยะห่างระหว่างงานกับหัวปืนพ่นสี) ความเร็วของหัวปืนพ่นสี ความเร็วของสายพาน แรงดันลม และความหนืดสีที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าว ดังนั้นจึงนำปัจจัยดังกล่าวมาออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองของทากูชิ พบว่า ความหนืด และแรงดันลมมีอิทธิพลต่อปัญหาสีเป็นผิวส้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนความสูงของหัวปืนพ่นสี ความเร็วของหัวปืนพ่นสี และความเร็วของสายพาน ตามมาตรฐานการทำงานปัจจัยไม่มีนัยสำคัญต่อการเกิดปัญหานี้ และเมื่อนำปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดลองมาทำการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3 ระดับ เมื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง พบว่า ระดับของปัจจัยที่เหมาะสมของความหนืดสีคือ 10-10.5 วินาที และค่าแรงดันลมที่เหมาะสมคือ 4 บาร์ และจากการนำผลการวิจัยไปใช้ในการทำงานจริง พบว่า จำนวนของสีเป็นผิวส้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากเดิมมีงานเสียเฉลี่ย 532 ชิ้น/เดือน ลดลงเหลือ 210 ชิ้น/เดือน จากปริมาณการผลิต 10,000 ชิ้น/เดือน คิดเป็นจำนวนงานเสียลดลงร้อยละ 60.49 และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการแก้ไขงานเดิม 306,432 บาท/ปี เหลือเพียง 120,960 บาท/ปี หรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายในการแก้ไขงานลดลงร้อยละ 60.53 เปมิกา สุวรรณมณี (2548)