

บทที่ 2

การทบทวนความรู้ ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE)

การออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiment ; DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่เราต้องการ ซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบ ลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time, OFAT) จะให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่ต้องการได้ช้ามาก และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมากและยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยตนเอง

2.2.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีการเก็บข้อมูลตลอดจนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา ซึ่งขั้นตอนของการออกแบบการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การนิยามปัญหา (Statement of the Problem) เป็นการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. การเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัย (Choice of Factors, Levels, and Ranges) เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎี และประสบการณ์จากงานวิจัยต่างๆ เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร (Range) การกำหนดระดับของปัจจัยสามารถแบ่งได้ 3 แบบดังนี้

- แบบกำหนด (Fixed Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอนโดยผู้ทดลองกำหนดเอง

- แบบสุ่ม (Random Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะเป็นตัวแทนของทั้งปัจจัยที่ได้เป็นตัวแทนของระดับใดระดับหนึ่ง
- แบบผสม (Mixed Effect) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดและแบบสุ่มรวมกัน

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of the Response Variable) ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้วิจัยจะต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาและการวัดค่านั้นจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้อง ซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้องด้วย

4. การเลือกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) เมื่อกำหนดทรีทเมนต์ (Treatment) และตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) แล้ว ต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลองซึ่งหมายถึง จำนวนซ้ำของการทดลอง (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับในการทดลองข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง

5. การดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment) ในระหว่างการดำเนินการทดลอง ผู้วิจัยจะต้องศึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด ปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้ ข้อควรระวังในขณะทำการทดลอง คือ ความถูกต้องของเครื่องมือวัดและความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งจะมีเทคนิคแตกต่างกันไปในแต่ละสาขาวิจัย

6. การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of Data) ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์ และสรุปผลรวมทั้งตัดสินใจความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้นก่อนที่จะตีความข้อมูลและวิธีการทางสถิติไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยมีผล (Effect) เท่าใดแน่นอน แต่เป็นเพียงเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ช่วงของความเชื่อมั่นในการสรุปผล

7. การสรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and recommendations) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูป กราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ และให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น เมื่อสรุปผลแล้วควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

2.1.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของการทดลอง

1. วิธีปฏิบัติหรือทรีทเมนต์ (Treatment) คือ สิ่งหรือวิธีที่ผู้ดำเนินการทดลองปฏิบัติต่อสิ่งทดลองเพื่อวัดผลเปรียบเทียบตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

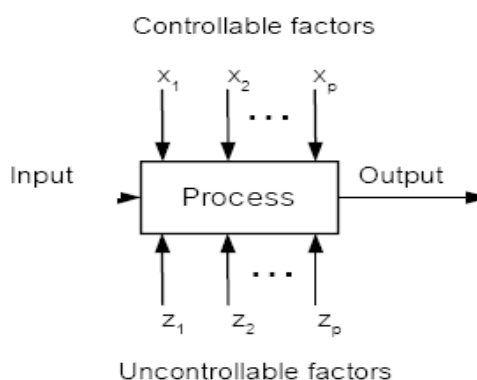
2. ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่งที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองและนำมาพิจารณาในการทดลอง ปัจจัยอาจมีลักษณะเป็นเชิงคุณภาพหรือเชิงปริมาณก็ได้ กลุ่มของทรีทเมนต์ทั้งหลายที่มีความเกี่ยวข้องกัน (A Particular Class of Related Treatment) อาจใช้คำว่าตัวแปรอิสระแทนก็ได้ โดยปัจจัยดังแสดงในภาพที่ 2.1 สามารถแบ่งออกได้เป็น

2.1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนด ค่าของปัจจัยนั้นได้ในการดำเนินการทดลอง ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่างๆ ที่คิดว่ามีผลตอบสนองที่สนใจ

2.2. ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ อาจจะเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุน ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แบ่งออกเป็น

2.2.1 ตัวแปรรบกวน (Noise Variable หรือ Background Variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ในการทดลองแต่ไม่ใช่ปัจจัยที่เรา กำลังทำการศึกษาล้วนใหญ่ได้แก่ เวลาหรือเครื่องมืออุปกรณ์ เป็นต้น

2.2.2 Nuisance Variable คือ ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่เราไม่ทราบมาก่อน สามารถกำจัดอิทธิพลของ Nuisance Variable ได้โดยการสุ่ม



ภาพที่ 2.1

ปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการ

3. ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) คือ ตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าตัวแปรตาม ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระนั่นเอง ในการทดลองหนึ่งๆ อาจวัดค่าตัวแปรตามมากกว่า 1 ก็ได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (Sensitivity) ความเชื่อถือได้ (Reliability) การแจ่มแจ้งของตัวแปรนั้นและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ในการเลือกตัวแปรตามจะต้องพิจารณาว่า ค่าสังเกตที่ได้จากทรีทเมนต์หนึ่งๆ ควรมีการแจ่มแจ้งแบบปกติโดยประมาณ ซึ่งข้อสมมติในเรื่องความเป็นปกติ (Normality) นี้เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบการทดลอง ซึ่งอาจจะใช้การแปลงข้อมูล (Transformation) ค่าสังเกตที่มีการแจ่มแจ้งไม่ปกติเป็นแบบปกติได้

2.1.3 หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง คือ

1. การทดลองซ้ำ (Replication) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ทำให้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งการทดลองเรพลิเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

2. การทำแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นปัจจัยแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การที่เราสุ่มการทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้ วัตถุประสงค์ของการสุ่มมีดังนี้

1. เพื่อขจัดอคติ หรือความเอนเอียงของผู้ทดลอง และเพื่อให้แน่ใจได้ว่าทรีทเมนต์ต่างๆ จะไม่ได้เปรียบและเสียเปรียบกันในเรื่องที่เกี่ยวกับการทดลอง การสุ่มจึงเป็นการประกันว่าจะไม่มีอคติใดๆ เกิดขึ้นใน การทดลอง

2. การวิเคราะห์และทดสอบทางสถิติ นั้นมีข้อกำหนดว่าความคลาดเคลื่อน (Error) จะต้องเกิดขึ้นโดยสุ่มเป็นอิสระต่อกัน การสุ่มจึงเป็นการทำให้ข้อมูลเป็นไปตามข้อกำหนดเหล่านี้ ทั้งนี้การสุ่มจะช่วยขจัดหรือเฉลี่ยความผันแปรภายนอกที่ควบคุมไม่ได้ให้เกิดขึ้นกับหน่วยทดลองด้วยโอกาสเท่าๆ กันการทำแบบสุ่มยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ

- การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)
- การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)
- การทำแบบสุ่มแบบสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization)

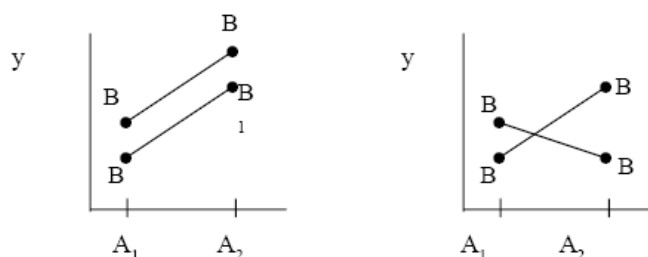
3.บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

2.2. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ที่ต้องการจะศึกษาถึงผลรวมที่มีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การทดลองแบบแฟกทอเรียลเป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบอิทธิพลของหลายๆ ปัจจัย (Factor) พร้อมกัน คำว่าแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่สมบูรณ์ในแต่ละครั้งหรือแต่ละซ้ำของการทดลองนั้น กล่าวคือ มีการใช้ระดับของปัจจัยต่างๆ ร่วมกันจึงสามารถตรวจสอบอิทธิพลต่างๆ ในการทดลองครั้งหนึ่งๆ ได้พร้อมกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.2 เช่น ถ้าปัจจัย A มีปัจจัย B มี b ระดับ แต่ละซ้ำจะมี AB รูปแบบการทดลอง (Treatment Combination) แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. อิทธิพลหลัก (Main Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้น
2. อิทธิพลร่วม (Interaction Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกัน

(1) อิทธิพลของปัจจัยร่วมไม่มีผล (2) อิทธิพลของปัจจัยร่วมมีผล



ภาพที่ 2.2

อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล และมีผล

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ได้แก่

(1) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุด จะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย A และปัจจัย B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ ส่วนปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งในแต่ละการทำซ้ำของการทดลองจะประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ $a \times b$ การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนเรพลีเคตทั้งหมด n ครั้ง

(2) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้ในกรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงาน และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนด้วยระดับสูงและต่ำของปัจจัยหนึ่ง ๆ ใน 1 การทำซ้ำที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบ เช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น 2^k ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบนี้มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ โดยปกติในการออกแบบจะแทนระดับสูงด้วยเครื่องหมาย “+” และระดับต่ำด้วยเครื่องหมาย “-”

(3) การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล แบบ 2 ระดับ หรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองที่ผู้ทดลองสามารถละเลยอันตรกิริยาขั้นสูงบางตัวได้ เนื่องจากถ้าการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k แบบเต็มมีจำนวนปัจจัยมาก จำนวนการทดลองอาจจะเพิ่มขึ้นมากเกินไปกว่าทรัพยากรที่มีอยู่จะรองรับได้ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างครบกรณี การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลจึงถูกนำมาใช้ในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบ กล่าวคือ ในการทดลองหนึ่งอาจจะมีปัจจัยมากมายที่กำลังอยู่ในความสนใจของผู้ทดลอง จึงใช้การออกแบบเช่นนี้เพื่อค้นหาว่ามีปัจจัยใดบ้างเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบ การทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ส่วนมากจะใช้ในตอนเริ่มต้นการทดลองเนื่องจากโดยมากแล้ว ในขณะนั้นจะมีปัจจัยจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลต่อผลตอบที่กำลังพิจารณาอยู่ หลังจากทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเสร็จสิ้นแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อไป

(4) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ หรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3^k หมายถึงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ และระดับทั้งสามของแต่ละปัจจัยมีค่าเป็น ต่ำ ปานกลางและสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามเป็นตัวเลข -1, 0 และ 1

ตามลำดับ สังเกตว่าการทดลองแบบนี้จะมีระดับที่สามของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง ซึ่งทำให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบที่สนใจ และปัจจัยที่สนใจในลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติกได้ การออกแบบ 3^k จะเหมาะสม เมื่อผู้ทดลองกำลังสนใจกับผลตอบที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง แต่การออกแบบนี้ไม่ได้เป็นการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดใน การสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์แบบพหุนามกำลังสอง โดยการออกแบบการทดลองที่เป็นทางเลือกที่ดีกว่า คือ การออกแบบพื้นผิวผลตอบ

การทดลองชนิดแฟกทอเรียลมีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

ข้อดี

1. เป็นการใช้น้อยหน่วยทดลองทั้งหมด เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของทรีทเมนต์หลายทรีทเมนต์พร้อมกันได้ จึงเป็นการประหยัดและเสียเวลาน้อยลงกว่าการทดสอบครั้งละ 1 ปัจจัย
2. ทำให้สามารถตรวจสอบอิทธิพลของปฏิกริยาร่วมระหว่างปัจจัยได้ จึงช่วยในการสรุปผลได้กว้างขวางกว่าการทดลองครั้งละ 1 ปัจจัย

ข้อเสีย

1. เนื่องจากมีรูปแบบการทดลอง (Treatment Combination) จึงต้องใช้หน่วยทดลองมากขึ้น จึงอาจมีข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนหน่วยทดลอง
2. ในกรณีที่มิกรีการ่วมเกิดขึ้น อาจทำให้การสรุปผลเป็นภาษาที่เข้าใจง่ายได้ยาก
3. ถ้าจำนวนปัจจัยมีมากขนาดของการทดลองก็จะใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นการเสียค่าใช้จ่ายสูง และการหาวัตถุทดลองที่มีความสม่ำเสมอจำนวนมากก็เป็นไปได้ยาก

2.3 ออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบบางส่วน (Fractional Factorial Designs)

ความหมายและหลักการ

ออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบบางส่วนหมายถึง วิธีที่ผู้ทำการทดลองไม่ต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย เนื่องจากจะมีจำนวน Run มากจนเกินไปจนไม่สามารถดำเนินการได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดบางประการ แนนอนว่าความแม่นยำของผลก็ไม่เท่ากับ Full factorial ในเชิงทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติถึงเราจะสามารถดำเนินการทดลองด้วยวิธี Full factorial แต่อาจจะได้ผลที่แย่กว่า Fractional factorial ก็ได้ เนื่องจากยิ่งมากปัจจัย (Factor) ยิ่งมาก Run เราก็ยิ่ง

ควบคุมการทดลองได้ยาก ความผิดพลาดก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงไม่มีประโยชน์ที่เราจะคงยืนยัน
ใช้การทดลองแบบ Full factorial เมื่อเรามี ปัจจัย (Factor) หลายตัว

นักสถิติประยุกต์ในยุคแรกๆ ได้ค้นพบว่าในความเป็นจริงเมื่อเราดำเนินการทดลองจะมี
เพียงบาง Main effects และบาง Interaction เท่านั้นที่มีความสำคัญ ยิ่งลำดับของ Interaction สูงขึ้น
ก็ยิ่งมีโอกาสจะมีนัยสำคัญน้อยลง จึงได้นำเอาหลักการนี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อลดขนาดของการทดลอง
ลง

ตารางที่ 2.1

อัตราส่วนของผลจาก 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 1 จะพบว่าสัดส่วนของ Main Effects ต่อ Effects ทั้งหมดจะยิ่งลดลงเรื่อยๆ
เมื่อการทดลองนั้นมี Factor มากขึ้น เช่น หากการทดลองนั้นมี 6 Factor สัดส่วนผลที่มาจาก Main
Effects จะมีเพียงแค่ 9.5% ของจำนวน Effects รวม ที่เหลืออีก 90.5% เป็น Interaction Effects ซึ่ง
ส่วนใหญ่ก็ไม่นับสำคัญเชิงสถิติต่อการทดลองนั้นด้วย

วิธีการสร้าง Fractional Factorial แบบ 2^{k-1} Design

ความหมายคือ เมื่อออกแบบเสร็จจะได้จำนวน Run เท่ากับ Full Factorial Design ของการออกแบบเมื่อจำนวน Factor น้อยกว่าอยู่ 1 ตัว ($k-1$) หรือจำนวน Run จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design นั่นเอง เราเอาหลักการที่ว่ายิ่งอันดับ Interaction สูงเท่าใดก็จะมีคามสำคัญน้อยเท่านั้น และจะเอา Main Effects บางตัวเข้าแทนที่ Interaction ดังกล่าว ตัวอย่างที่ 1 มี Factor 4 ตัวคือ A, B, C, D ถ้าออกแบบโดยใช้วิธี 2^k Full Factorial Design จะมีจำนวนรอบการทดลองหรือ Run ทั้งหมด 16 Run ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2.2

Full Factorial สำหรับ 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

เมื่อต้องการทำการทดลองแบบ Fractional Factorial Design โดยให้เหลือจำนวน 8 Run เท่ากับจำนวน Run ของ 3 ปัจจัย เราเริ่มด้วยการ เขียน 3 Main Effects และ Interaction ทั้งหมดในตาราง เราจะเรียก 3 Main Effects นี้ว่าตัวให้กำเนิด (Generator) ของ Factor D

ตารางที่ 2.3

Main Effects และ Interaction ของ 3 ปัจจัย

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

จากนั้นให้ใช้ค่าของ Interaction ที่มีอันดับสูงสุด เป็นค่าของ Main Effect ตัวที่เหลือจากตารางที่ 3 Interaction ที่มีอันดับสูงสุดคือ ABC เราจะใช้เป็นค่าของ D จึงได้ตาราง Fractional Factorial Design ของ 4 Factor ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 2.4
Fractional Factorial Design 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 4 เมื่อเทียบกับตารางที่ 2 คือ แถวที่พื้นสีเหลืองนั่นเอง วิธีการออกแบบเช่นนี้ จะได้จำนวน Run ครึ่งหนึ่งของ Full Factorial Design เสมอหรือ $1/2$ Fraction Factorial Design ดังนั้นจึงเรียกวิธีการออกแบบการทดลองนี้ว่า Half Factorial Design ซึ่งบางครั้งก็เรียกว่า 2^{k-1} Factorial Design เมื่อทำการทดลองตามที่ออกแบบนี้ก็จะเรียกว่า Half Factorial Experiment ด้วยเช่นกัน

2.4 Alias / Confound

เมื่อเราเลือกใช้วิธี Fractional Factorial Design ประโยชน์ที่เราได้คือจำนวน Run ที่ลดลงได้อย่างน้อยก็ครึ่งหนึ่ง แต่ก็ต้องแลกด้วยความสงสัยที่ว่าความถูกต้องจะเหมือนกับ Full Factorial Design หรือไม่ อีกสิ่งหนึ่งที่เราจะต้องสูญเสียไปคือ ความสามารถในการแยกแยะผลกระทบของ Effects ที่ตอนนี้มีบางตัวที่แยกแยะกันไม่ออก จากตารางที่ 4 เราทราบแล้วว่าตอนนี้ $D=ABC$ นั่นคือ ถ้าสมมติเราพบว่า D เป็น Main Effects ที่มีนัยสำคัญทางสถิติหลังจากการวิเคราะห์แล้ว คำถามอยู่ที่ว่าเป็น Interaction ของตัวปัจจัย ABC หรือว่า D กันแน่ กรณีเช่นนี้เราเรียกว่า D มี Alias คือ ABC

หรืออีกนัยหนึ่ง ABC คือ Alias ของ D ได้เช่นกัน กรณีเช่นนี้เราจะเรียกว่า D และ ABC เกิด Confound กันด้วยเช่นกัน ใช่เพียงแค่นี้หากเราทำการทดลองตามตารางที่ 4 แล้ว จะมี Alias เกิดขึ้นหลายคู่ ดังตารางที่ 5 (ขออภัยผู้อ่านอาจจะลายตาจากสีที่หลากหลาย โปรดดูตามสีเดียวกัน) นี่ก็คือ Alias ที่เกิดขึ้น ลักษณะเช่นนี้เราจะเรียกว่า Alias structure

ตารางที่ 2.5

Alias structure ของ 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

และอาจจะเขียน Alias structure ได้ดังนี้

A=BCD

B=ACD

C=ABD

D=ABC

AB=CD

AC=BD

AD=BC

I = ABCD

2.5 Defining Word

ถ้านำรหัสของแต่ละ Column คูณตัวเอง (ยกกำลังสอง) จะได้รหัสที่เท่ากับ (+1) ทุกตัวเสมอ และจะเรียก Column ที่ได้ใหม่นี้ว่า Identity หรือ I

จากตารางที่ 4 เมื่อ $D = ABC$

ดังนั้น ถ้าเอา D คูณทั้งสองฝั่ง จะได้เป็น $DD = ABCD$

หรือ $I = ABCD$

และจะเรียก $I=ABCD$ นี้ว่า Defining relation ซึ่งเราสามารถนำไปใช้ในการหา Alias ได้ โดยนำ Effect ที่เราอยากทราบ Alias คูณทั้งสองฝั่งของสมการ Defining Relation เช่น ถ้าอยากทราบว่า AB จากตารางที่ 4 Alias อยู่กับ Effect อะไร ก็หาได้จาก

$$I(AB) = ABCD(AB)$$

$$AB = A^2B^2CD$$

$$AB = IICD = CD$$

นั่นคือ AB alias อยู่กับ CD นั่นเอง

2.6 Vertical Balance

Vertical Balance หมายถึง การทดสอบความเท่ากันของจำนวน Code (+1) และ (-1) ของแต่ละ Column ทั้งของ Main Effects และ Interaction Effects ในตารางหลังจากการออกแบบการทดลอง โดยเงื่อนไขคือผลรวมของแต่ละ Column จะต้องเท่ากับ 0 นั่นหมายความว่าเรามีการเปลี่ยนแปลงค่าของ Factor นั้นให้เป็น High และ Low ในจำนวนครั้งที่เท่ากัน ผู้ออกแบบจะต้องทำการทดสอบทุกครั้ง

2.7 Orthogonal

เมื่อนำ Code (+1) หรือ (-1) ของ 2 Column ที่อยู่ติดกัน และอยู่แนว Row เดียวกันคูณกัน ทุกๆ Row ของ 2 Column ดังกล่าวแล้วนำผลลัพธ์ดังกล่าวรวมกันจะต้องได้เท่ากับ 0 เสมอ นั่นหมายความว่าเมื่อเราทำการวิเคราะห์ผลการทดลองแล้วจะไม่ปรากฏเหตุการณ์ที่ปัจจัย (Factor)

หนึ่งแปรเปลี่ยนตามอีกปัจจัย (Factor) หนึ่ง (Dependency test) ถ้าสมมติว่า ไม่เป็น orthogonal แล้ว เป็นไปได้ว่าจะต้องเปลี่ยนค่าของปัจจัย (Factor) มากกว่า 1 ตัว เป็น High หรือ Low พร้อมกัน อาจจะส่งผลให้เราตีความผิดพลาดแยกแยะไม่ออกว่า Response แปรค่าตามปัจจัย (Factor) ใดกันแน่ การออกแบบที่ดีจะต้องได้ตารางเป็น Orthogonal ผู้ออกแบบจะต้องทำการทดสอบทุกครั้ง เช่นเดียวกับ Vertical Balance และทำให้ครบทุก Column แต่ครั้งละ 1 คู่เท่านั้น

2.8 วิธีการสร้าง Fractional Factorial Design แบบ 2^{k-p} Design

เมื่อมีปัจจัย (Factor) อยู่ 3-5 ตัว อาจจะสามารถใช้วิธี Half Factorial Design หรือ 2^{k-1} Factorial Design ได้ แต่ถ้าจำนวนปัจจัย (Factor) เพิ่มมากขึ้นกว่านั้นอีก ก็ยากที่เราจะสามารถทำการทดลองตามแบบที่ออกแบบไว้ได้ เพราะจำนวน Run ก็ยังเยอะเกินกว่าจะทำตามได้

ตารางที่ 2.6

จำนวน Run เทียบกับจำนวน Factor ของแต่ละ Design

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

จากตารางที่ 6 จะพบว่าผู้ออกแบบการทดลองจำเป็นต้องใช้ค่า p ที่มากกว่า 1 ในการออกแบบเมื่อมีปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 6 ตัวขึ้นไป โดยข้อกำหนดง่ายๆ คือ เมื่อมีการออกแบบ ควรจะให้จำนวน Run เริ่มต้นที่ 8 และไม่ควรเกิน 32 (ความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนเอง)

ตัวอย่าง 2 มีปัจจัย (Factor) ทั้งหมด 7 ตัว (A,B,C,D,E,F,G) และในการทดลองแต่ละปัจจัย (Factor) ปรับได้ 2 ค่า (Level) จากตารางที่ 6 หากเราออกแบบโดยใช้วิธี Full Factorial Design จะมีจำนวน Run เท่ากับ $2^7=128$ ซึ่งเป็นไปไม่ได้เลยที่เราจะทำการทดลองให้ได้ตามนั้น แม้แต่ Half Factorial Design ก็ยังมีถึง 64 Run ซึ่งก็ยิ่งถือว่ามากอยู่ดี ถ้าต้องการออกแบบการทดลองโดยให้เหลือจำนวน Run เพียง 16 เท่ากับ Full factorial ของ 4 ปัจจัย (Factor) นั่นคือ $2^4 = 16$ ดังนั้น $p=3$ นั่นคือเราเลือกการออกแบบ 2^{7-3} นั่นเอง

ขั้นตอนก็คล้ายกับวิธี 2^{k-1} เริ่มจากการเขียน Full Factorial Design ของ Main Effect A, B, C, D และใช้เป็นตัวกำเนิด Main Effect E, F, G ที่เหลือ โดยในที่นี้จะเลือก $E=ABC$, $F=BCD$, $G=ABD$

ตารางที่ 2.7

ผลการออกแบบโดยวิธี 2^{7-3}

Run	A	B	C	D	E=ABC	F=BCD	G=ABD
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	-1	1	-1	-1
3	1	1	-1	1	-1	-1	1
4	1	1	-1	-1	-1	1	-1
5	1	-1	1	1	-1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1	1	1
7	1	-1	-1	1	1	1	-1
8	1	-1	-1	-1	1	-1	1
9	-1	1	1	1	-1	1	-1
10	-1	1	1	-1	-1	-1	1

11	-1	1	-1	1	1	-1	-1
12	-1	1	-1	-1	1	1	1
13	-1	-1	1	1	1	-1	1
14	-1	-1	1	-1	1	1	-1
15	-1	-1	-1	1	-1	1	1
16	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

ในการศึกษาถึงสาเหตุของการเลือก $E=ABC$, $F=BCD$, $G=ABD$ จะเป็น $E=AB$, $F=BC$, $G=CD$ เนื่องจากข้อสมมติฐานที่ว่า Interaction ระดับที่สูงกว่า มีโอกาสมีนัยสำคัญทางสถิติน้อยกว่า Interaction ที่มีระดับต่ำกว่า นั่นคือ Interaction ของ 3 Main Effect ย่อมมีโอกาสนัยสำคัญทางสถิติน้อยกว่า Interaction ของ 2 Main Effects เมื่อเวลาวิเคราะห์โอกาสตีความ Confounding ก็จะมีคติน้อยลง จึงต้องเลือก 3 Main Effect แทนตัว Factor ที่เหลือ ถ้าเหตุผลเป็นเช่นนี้ก็ควรใช้ 4 main effect แทนน่าจะดีที่สุด แต่ที่ไม่ใช้เพราะ 4 Main Effect ในการออกแบบด้วยวิธี 2^{7-3} มีเพียง 1 เดียวเท่านั้นไม่พอที่จะใช้แทน 3 Main Effect ที่เหลือได้ โดยที่ข้อกำหนดพื้นฐานคือ ต้องใช้ระดับ Interaction เดียวกันแทน main effects ที่เหลือทุกตัว

จากการที่ต้องใช้ $E=ABC$, $F=BCD$, $G=ABD$ ในการออกแบบ ถ้าเอาตัว Main Effect คู่ไหนทั้งสองด้านจะได้

$$EE = I = ABCE$$

$$FF = I = BCDF$$

$$GG = I = ABDG$$

นั่นคือจะได้ Defining Word เริ่มต้น 3 ตัวคือ $I = ABCE = BCDF = ABDG$

เมื่อนำ Defining word มาคูณกันเอง ที่ละคู่และคูณกันเองทั้งหมดจะได้เป็น

$$I^2 = ABCE(BCDF) \text{ จะได้เป็น } I = AB^2C^2DEF \text{ หรือ } I = ADEF$$

$$I^2 = ABCE(ABDG) \text{ จะได้เป็น } I = A^2B^2CDEG \text{ หรือ } I = CDEG$$

$$I^2 = ABDG(BCDF) \text{ จะได้เป็น } I = AB^2D^2CFG \text{ หรือ } I = ACFG$$

$$I^3 = (ABCE)(ABDG)(BCDF) \text{ จะได้เป็น } I = A^2B^3D^2C^2EFG \text{ หรือ } I = BEFG$$

ดังนั้น Defining Word คือ $I = BCE=BCDF=ABDG=ADEF=CDEG=ACFG=BEFG$ สามารถหา Alias ทั้งหมดได้โดยการนำ Effect ที่เราต้องการทราบว่า มี Alias อะไรบ้างคูณเข้ากับ Defining word ดังตัวอย่างต่อไปนี้

Alias ของ A หาได้จาก

$$I(A) = ABCE(A)=BCDF(A)=ABDG(A)=ADEF(A)=CDEG(A)=ACFG(A)=BEFG(A)$$

$$A = BCE=ABCDF=BDG=DEF=ACDEG=CFG=ABEFG$$

Alias ของ BCD หาได้จาก

$$I(BCD) =$$

$$ABCE(BCD)=BCDF(BCD)=ABDG(BCD)=ADEF(BCD)=CDEG(BCD)=ACFG(BCD)=BEFG(BCD)$$

$$BCD = ADE = F = ACG = ABCEF = BEG = ABDFG = CDEFG$$

2.9 Resolution (R)

Resolution คือ ระดับความละเอียดในผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ หาได้จากความยาวของ Alias ที่สั้นที่สุดจาก Defining Relation หมายความว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากแค่ไหน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2 (R_{II}) จนถึง 5 (R_V) เช่นตัวอย่าง

$I = ACG = ABCEF = BEG = ABDFG = CDEFG$ ได้ R_{III} เพราะ Alias สั้นที่สุด คือ 3 Main Effect Interaction

$I = ABCEG = BCDF = ABDG$ ได้ R_{IV} เพราะ Alias สั้นที่สุด คือ 4

Resolution มากกว่าย่อมให้ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์มากกว่า นั่นเพราะเราได้เฉพาะ Interaction ระดับสูงๆ แทน Main Effect ในการออกแบบ ทำให้โอกาสที่ Confound ที่พบในการวิเคราะห์มีโอกาสเป็นของ Main Effect มากกว่า Interaction นั่นเอง การเลือกระดับ Resolution ต่ำ หมายความว่าคนออกแบบใช้ค่า p ที่มาก เข้าใกล้ k มาก ทำให้ลดจำนวน Run ลงได้มาก และต้องใช้ Interaction ระดับต่ำในการแทน Main effects บางตัว

(R_{III}) เป็นระดับที่ต่ำที่สุดที่คนออกแบบจะเลือกใช้ เหมาะสำหรับการเริ่มต้น (Screening) กรณีที่มีจำนวน Factor มากๆ ไม่ควรนำ Model ใดๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ และจะต้องมีการคัด

กรองเอา Main effect ที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติบางตัวออก และควรมีการออกแบบการทดลองอีกรอบ ที่มี Resolution มากกว่า R_{III}

(R_{IV}) เป็นระดับที่ดีปานกลางที่คนออกแบบควรจะใช้ สามารถนำ Model ที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ในการพยากรณ์ หรือเปลี่ยนแปลงกระบวนการตามผลการวิเคราะห์ได้

(R_V) เป็นระดับที่ดีที่สุดที่คนออกแบบควรจะใช้ แต่ก็ต้องใช้ทรัพยากรมากกว่าระดับอื่นๆ ทั้งนี้เพราะ จะมีจำนวน Run มาก นั่นเอง

ตารางที่ 2.8

ระดับ Resolution ที่เป็นไปได้ เมื่อกำหนด Run และจำนวน 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

2.10 วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ เป็นวิธีการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติ ที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และผู้ทดลองมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่เหมาะสมของผลตอบสนองนี้ เช่น ผลตอบสนอง y เป็นฟังก์ชันของ x_1 และ x_2 ดังนั้นจะสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ดังนี้

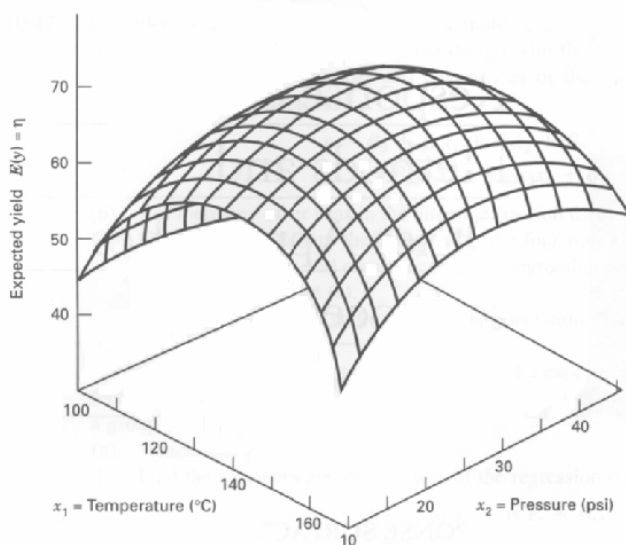
$$y = f(X_1, X_2) + \varepsilon$$

เมื่อ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่มีผลมาจากการทดลอง ถ้าเรากำหนดว่า

$E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการพื้นผิวได้ คือ

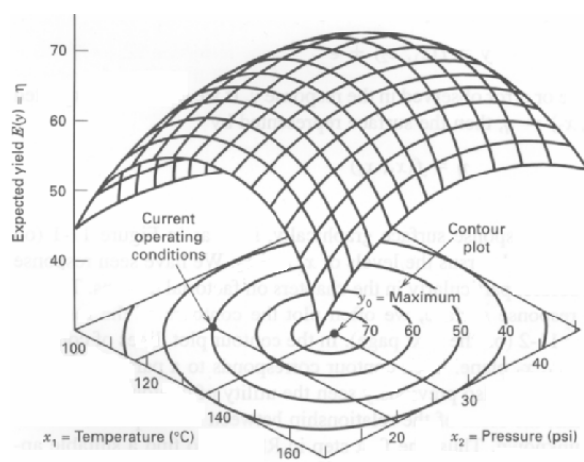
$$\eta = f(x_1, x_2)$$

โดยมากแล้วจะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟฟิก ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ซึ่ง η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้นโดยมากแล้วเราจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบดังแสดงในภาพ ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง



ภาพที่ 2.3

พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ



ภาพที่ 2.4

เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบแทน

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบแทนส่วนมากมักจะไม่นิยามความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นแรก คือ ผู้ทดลองต้องหาตัวแปรที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และกลุ่มของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำ ๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบแทนมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ คือแบบจำลองพหุนามกำลังหนึ่ง

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จึงใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

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

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบแทนส่วนมาก จะใช้แบบจำลองพหุนามกำลังหนึ่งหรือกำลังสองในการหาผลตอบแทน แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นผิวที่สนใจอยู่มีขนาดใหญ่ การออกแบบพื้นผิวผลตอบแทนมีวิธีการที่นำมาใช้ใน

การหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent) ดังภาพที่ 2.12 การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และอันดับที่สอง

2.11 วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method)

จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบได้อย่างดีเพียงพอ ดังนั้นการวิเคราะห์พื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นมานี้จะสามารถประมาณได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริง พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองสามารถที่จะถูกประมาณได้เป็นอย่างดี ถ้าเราทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวผลตอบเรียกว่า การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

2.12 วิธีการของทาคุชิ (Taguchi's Method)

2.12.1 แนวคิดและแบบแผนของวิธีการทาคุชิ (Taguchi Methodology)

Dr. Gennichi Taguchi เป็นผู้ค้นพบและวางรากฐานแนวทางทฤษฎีซึ่งเป็นที่ประจักษ์และทราบกันโดยทั่วไปในเรื่อง “Quality Engineering”, “Robust Design” และ “Robust Engineering” ซึ่งทฤษฎีเหล่านี้ ดร.ทาคุชิ ได้ประกาศให้สังคมทั่วไปได้รับทราบในปี 1950 ในขณะนั้น ดร. ทาคุชิ ยังทำงานให้กับหน่วยงานของรัฐบาลประเทศญี่ปุ่น ซึ่งรับผิดชอบในการปรับปรุงและพัฒนาระบบโทรศัพท์ ซึ่งในขณะนั้นประสิทธิภาพในการสื่อสารที่ย่ำแย่และไม่เหมาะสม ซึ่งทิศทางที่ ดร. ทาคุชิ เริ่มพัฒนาปรับปรุงนั้น จะมุ่งเน้นไปที่การลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองและการทดสอบ ซึ่งในขณะนั้น ผลตอบแทนที่ได้จากการทดลองมีระดับต่ำ ซึ่ง ดร. ทาคุชิ มีแนวความคิดจะใช้ทรัพยากรที่มีอยู่น้อยที่สุดและเกิดประโยชน์สูงสุด จากแนวคิดดังกล่าวนี้ ช่วยกระตุ้นให้ ดร. ทาคุชิ ได้ตระหนักถึงแนวทางแบบใหม่ โดยมุ่งเน้นที่ประสิทธิภาพและการควบคุมคุณภาพ ซึ่งกล่าวโดยสรุปได้ว่า แนวคิดพื้นฐานของหลักทฤษฎี “ทาคุชิ” นั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

2.12.1.1 คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีนั้นต้องมาจากการรวมกันของชิ้นส่วนหลาย ๆ ชิ้นที่มีคุณภาพดี โดยให้นำแนวคิดนี้มาทดแทนแนวคิดแบบเก่าที่ว่า การตรวจสอบสามารถบรรลุได้ถึงระดับคุณภาพที่ดีของผลิตภัณฑ์

2.12.1.2 การที่จะบรรลุถึงคุณภาพที่ดีนั้น ทำได้โดยการทำให้เกิดความเบี่ยงเบนจากเป้าหมายให้น้อยที่สุด ซึ่งจากการนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่มีความอ่อนไหวต่อปัจจัย หรือสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมไม่ได้

2.12.1.3 ความเบี่ยงเบนที่เกิดจากการออกแบบตัวแปร จะต้องสามารถวัดได้ในหน่วยของต้นทุนหรือราคาของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

2.12.2 แนวทางปฏิบัติของทฤษฎี “ทาคุชิ”

ในปัจจุบัน ทฤษฎีหรือแนวทางปฏิบัติของ “ทาคุชิ” ได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นลักษณะงานหรือลักษณะปัญหาเชิงเดี่ยวหรือไม่ซับซ้อน จนถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับงานหรือลักษณะปัญหาที่มีความยุ่งยากซับซ้อน และรวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานด้านบริหารจัดการรวมถึงหลักเศรษฐศาสตร์และการบริหารธุรกิจ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อจะค้นหาวิธีการหรือคำตอบที่ดีที่สุด แต่ในขณะเดียวกันก็ไม่ลืมที่จะพิจารณาวิธีการหรือทางออกอื่น ๆ หรือทางเลือกอื่นซึ่งมีความได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ทฤษฎีอื่นๆ ในการแก้ปัญหาซึ่งหลักการหรือแนวทางของ “ทาคุชิ” นั้น สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ 4 ขั้นตอนดังนี้

2.12.2.1 การระดมความคิด คือการที่บุคลากรในหน่วยงานซึ่งมีความรับผิดชอบในแต่ละด้านและรวมไปถึงผู้ที่ดูแล และรับผิดชอบในด้านการตลาดมานั่งปรึกษาและออกความคิดเห็นเพื่อที่จะค้นหาลักษณะทางด้านคุณภาพที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อลูกค้ารวมถึงการช่วยกันออกแบบปัจจัย หรือตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ

2.12.2.2 ทำการออกแบบการทดลอง และทำการทดลองจริง

2.12.2.3 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองรวมถึงการกำหนดค่าที่ดีที่สุดของตัวแปร

2.12.2.4 ทำการผลิตจริงหรือปฏิบัติจริงเพื่อพิสูจน์ว่าตัวแปรที่เรากำหนดค่าที่ดีที่สุดนั้นสามารถนำมาซึ่งการแก้ไขปัญหาที่แท้จริงได้หรือไม่

ในต้นปี 1980 ดร.เจนอิชิ ทากูชิ ได้นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาแบบต่าง ๆ ซึ่งได้รวบรวมและอ้างถึงในมุมมองเฉพาะที่เรียกว่า ปัญหาการออกแบบพารามิเตอร์ที่คงทน (Robust Parameter Design Problem, RPD Problem) โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. การออกแบบระบบ (ผลิตภัณฑ์ หรือ กระบวนการ) ที่ไม่ตอบสนองต่อปัจจัยแวดล้อมที่เปลี่ยนไป แต่สามารถส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพของระบบ ตัวอย่างเช่น การผสมสูตรของสีทาพื้นผิวภายนอกนั้นควรมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ไม่ว่าสภาพอากาศจะมีลักษณะเช่นใด แต่เนื่องจากสภาวะอากาศนั้นไม่สามารถคาดเดาได้ล่วงหน้า ทั้งแปรปรวน และ ไม่คงที่ ดังนั้นผู้ผลิตสูตรของสีทาพื้นผิวภายนอกนั้น จึงต้องการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทนทานต่ออุณหภูมิในช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิค่อนข้างกว้าง ทนต่อความชื้น และปัจจัยในเรื่องการตกตะกอน ซึ่งที่กล่าวมาส่งผลต่อความสึกหรอ และ ผิวสัมผัสของสี

2. การออกแบบผลิตภัณฑ์ ที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของระบบ ตัวอย่างเช่น การออกแบบเครื่องขยายสัญญาณไฟฟ้า เพื่อให้ขนาดของความต่างศักย์ที่ได้ (Output Voltage) ใกล้เคียงค่าที่ต้องการมากที่สุด โดยไม่รับผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของลวดต้านทาน (Resistors), ทรานซิสเตอร์ (Transistors) และ ตัวจ่ายไฟฟ้า (Power Supplies) ที่เป็นองค์ประกอบของอุปกรณ์ขยายสัญญาณไฟฟ้า

3. ออกแบบกระบวนการ เพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ตามเป้าหมายที่ต้องการให้ได้มากที่สุด ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการ (เช่น อุณหภูมิ) หรือลักษณะประจำตัวของวัตถุดิบต่าง ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้

4. การกำหนดเงื่อนไขในการปฏิบัติการสำหรับกระบวนการ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะที่มีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ตั้งไว้ และความผันแปรของสิ่งแวดล้อมมีผลกระทบต่อค่าเป้าหมายที่ต้องการน้อยที่สุด ตัวอย่าง การลดความถี่ของปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อย ๆ ให้น้อยลง เช่น การผลิตเซมิคอนดักเตอร์ต้องทำให้ค่าความหนาของออกไซด์ที่อยู่บนเวเฟอร์ (Wafer) มีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาเป้าหมายมากที่สุด หรือต้องการให้มีความผันแปรของความหนาน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

2.13 การออกแบบการทดลอง

Orthogonal Arrays (OA's) เป็นเทคนิคหลักที่มีความสำคัญและมีประสิทธิภาพซึ่งเป็นแนวทางปฏิบัติของ “ทากูชิ” OA's คือตารางมาตรฐานของการออกแบบการทดลองตามแนวทางของ “ทากูชิ” ซึ่งมีจำนวนครั้งในการทดลองที่น้อยครั้งและมีความเหมาะสมสำหรับการทดลองนั้น ๆ

ตัวอย่างเช่น การออกแบบการทดลองที่มีตัวแปรหรือปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ 5 ตัวแปร ตัวแปรหรือปัจจัยแต่ละตัวสามารถกำหนดค่าระดับความแตกต่างได้ถึง 3 ระดับ เมื่อนำเอาข้อกำหนดในข้างต้นมาพิจารณาแล้ว เราสามารถทำการทดลองได้ทั้งหมด $3^5 = 243$ การทดลอง โดยที่ไม่ซ้ำกัน ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ เราเรียกว่าการทดลองแบบ การทดลองแบบสมบูรณ์ (Full Factorial) แต่ในขณะเดียวกันหากใช้วิธีการออกแบบการทดลองตามวิธีการของทากูชิโดยใช้หลักการ OA's ในการออกแบบการทดลองซึ่งผลที่ได้คือ L27 (35) ซึ่งหมายถึงจำนวนครั้งในการทดลองจะมีเพียง 27 การทดลองเท่านั้น โดยตารางที่ 2.1 จะแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นระหว่างการออกแบบการทดลองแบบสมบูรณ์ (Full Factorial) กับการออกแบบการทดลองตามแนวทางทากูชิและตารางที่ 2.14 ถึง 2.17 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างตารางการออกแบบการทดลองแบบ L4, L9 และ L27

ตารางที่ 2.9

การเปรียบเทียบจำนวนการทดลองระหว่างการออกแบบการทดลองแบบสมบูรณ์และการออกแบบการทดลองตามแนวทางทากูชิ

OA	Factors	Level	Full Factorial
L ₄	3	2	8
L ₈	7	2	128
L ₉	4	3	81
L ₁₂	11	2	2,048
L ₁₇	13	3	1,594,323
L ₂₄	21	4	4.4×10^{12}
L ₃₂	40	4	1.2×10^{15}

ตารางที่ 2.10
การออกแบบการทดลองชนิด L4 (2^3)

Run	Factor		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

หมายเหตุ L4 (2^3) หมายถึง การออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย 3 ปัจจัยและแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ

ตารางที่ 2.11
แสดงตารางการออกแบบการทดลองชนิด L9 (3^4)

Run	Factor			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

หมายเหตุ L9 (3^4) การออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย 4 ปัจจัยและแต่ละปัจจัยกำหนดให้มี 3 ระดับ

ตารางที่ 2.12
แสดงการออกแบบการทดลองชนิด L16 (4^5)

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

หมายเหตุ L16 (4^5) หมายถึง การออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย 5 ปัจจัยและแต่ละปัจจัยกำหนดให้มี 4 ระดับ

2.14 Signal-to-Noise Ratio (S/N) และการวิเคราะห์

โดยทั่วไปผลของการทดลองจากการออกแบบการทดลองใดๆ มักจะแทนด้วยสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์คือ Y_{ij} ซึ่งก็คือค่าของตัวแปรตาม (Response Variable) ที่เราสนใจนั่นเอง ซึ่งในแง่ของการออกแบบการทดลองโดยทั่วไปมักจะให้ความสนใจกับ Y_{ij} หรือค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม ($\bar{Y}_{ij}$) ก่อนข้างสูงว่าสอดคล้องกับความต้องการหรือไม่ โดยบางครั้งล้มพิจารณาถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองนั้นๆ ว่ามีมากน้อยเพียงใด

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำของตัวแปรตามใดๆ หรือของขบวนการใดเป็นสิ่งบ่งบอกถึง
 ความมีคุณภาพสูงและการออกแบบที่ดีมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณภาพที่ดีและการออกแบบที่
 มีประสิทธิภาพ ดร. ทากูชิ ได้พัฒนาวิธีการคำนวณหาค่า Signal-to-Noise ratio ของผลการทดลอง
 ใดๆ เพื่อบ่งชี้ว่าการทดลองนั้นให้ผลตามเป้าหมายที่เราต้องการหรือไม่โดยพิจารณาทั้งค่าเฉลี่ย และ
 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง โดยคำนวณค่า Signal-to Noise (S/N) ซึ่งคือ อัตราส่วนหรือ
 ผลหารของค่าเฉลี่ย (Signal) กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Noise) ดังแสดงในสมการที่ 2.4.3

MSD (Mean Square Deviation) เป็นตัวแปรค่าหนึ่งที่ได้มาจากการคำนวณตามแนวทาง
 ของ “ทากูชิ” ซึ่งวิธีการคำนวณจะแสดงอยู่ในสมการที่ 2.4.4 ถึงสมการที่ 2.4.6 ซึ่งการเลือกคำนวณค่า
 MSD ในแนวทางของ “ทากูชิ” นั้นมีได้ 3 ภาพแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์หรือบรรทัดฐานของตัวแปร
 ตาม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งขึ้นอยู่กับบรรทัดฐานทางด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นที่เราจะทำการ
 ออกแบบการทดลอง และทำการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของข้อกำหนดหรือมาตรฐานทางด้าน
 คุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ค่า Signal-to-Noise Ratios (S/N) ที่มีค่าสูง ๆ นั้น โดยส่วนใหญ่แล้วจะ
 บ่งบอกถึงผลที่ดีของสมการที่จะได้มาซึ่งค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามที่เราต้องการ (Optimum) และมีค่า
 เบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำ

สมการ: Mean Value

$$\mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{i,j}$$

สมการ: Standard Deviation

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \mu_i)^2}$$

สมการ: Signal to Noise Ratio

$$(S / N)_i = -10 \log_{10}(MSD_i)$$

สมการ: MSD Smaller is Better

$$MSD_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{i,j}^2$$

สมการ: MSD Nominal is best

$$MSD_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - m)^2 \quad : m = \text{Target value}$$

สมการ: MSD Greater is Better

$$MSD_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{i,j}^2}$$

2.15 ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function)

วิธีการฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) นี้เป็นหนึ่งในวิธีการที่เป็นที่นิยมมากที่สุดในการทำ optimization ของ multi-response surface สมมติให้มีผลลัพธ์ที่ต้องการ p ตัว ในวิธีนี้สำหรับทุก transfer function $y_i(x) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k)$ โดยที่ $i = 1, \dots, p$ ฟังก์ชันความพึงพอใจ $d_i = d_i(y_i) = d_i(y_i(x))$ จะกำหนดค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับค่าที่เป็นไปได้ของ y_i โดยที่ $d_i(y_i) = 0$ สำหรับ “ค่าที่ไม่ต้องการมากที่สุด” ของ y_i และ $d_i(y_i) = 1$ สำหรับ “ค่าที่ต้องการมากที่สุด” ของ y_i เมื่อ $d_i(y_i)$ เป็น ฟังก์ชันความพึงพอใจของผลลัพธ์ที่ต้องการ y_i ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตจากความพึงพอใจ D ทุกตัว จะถูกใช้แทนความพึงพอใจรวม สำหรับทั้ง Multiple-response problem: $D = \left(d_1(y_1) d_2(y_2) \dots d_p(y_p) \right)^{\frac{1}{p}}$

อาจกล่าวได้ว่า ความพึงพอใจ D ทั้งหมด (Overall Desirability D) ที่มากกว่าควรแสดงถึงความพึงพอใจที่สูงกว่าสำหรับผลลัพธ์ทั้งหมด (Overall satisfaction for all responses)

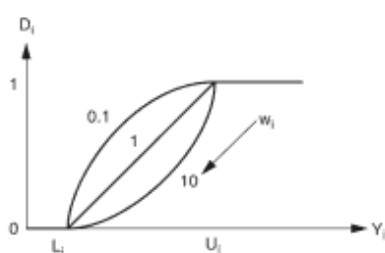
สำหรับแต่ละฟังก์ชันความพึงพอใจ $d_i(y_i)$ นิยามของมันจะขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับแต่ละ y_i ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ประเภทคือ

1. ยิ่งมากยิ่งขึ้นดี (The larger, the better) ในกรณีนี้ การทำให้มากที่สุด (Maximization) ของ y_i เป็นผลลัพธ์ที่ต้องการมากที่สุด และ $d_i(y_i)$ ถูกนิยามดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} d_i(y_i) &= 0 & y_i &\leq L_i \\ d_i(y_i) &= \left(\frac{y_i - L_i}{U_i - L_i} \right)^{x_i} & L_i &\leq y_i \leq U_i \\ d_i(y_i) &= 1 & y_i &\geq U_i \end{aligned}$$

เมื่อ L_i คือขอบเขตด้านล่างสำหรับ y_i , U_i เป็นขอบเขตด้านบนสำหรับ y_i และ W_i เป็นน้ำหนัก สำหรับ y_i ค่า W_i ยิ่งมากเมื่อเทียบกับตัวแปรน้ำหนักอื่นๆ ก็แสดงว่าบทบาทของ $d_i(y_i)$ ยิ่งมีความสำคัญในความพึงพอใจรวม (Overall Desirability D)

รูปต่อไปนี้จะแสดงถึงรูปร่างของฟังก์ชัน $d_i(y_i)$ สำหรับกรณีนี้ กล่าวคือ สำหรับค่าน้ำหนัก W_i ที่แตกต่างกัน รูปร่างของเส้นโค้งของฟังก์ชันจะแตกต่างกัน



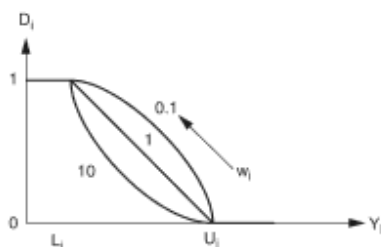
2. ยิ่งน้อยยิ่งดี (The smaller, the better) ในกรณีนี้การทำให้ให้น้อยที่สุด (Minimization) ของ y_i เป็นผลลัพธ์ที่ต้องการมากที่สุด ฟังก์ชัน $d_i(y_i)$ ถูกกำหนดดังต่อไปนี้

$$d_i(y_i) = 1 \quad ; y_i \leq L_i$$

$$d_i(y_i) = \left(\frac{U_i - y_i}{U_i - L_i} \right)^{x_i} \quad ; L_i \leq y_i \leq U_i$$

$$d_i(y_i) = 0 \quad ; y_i \geq U_i$$

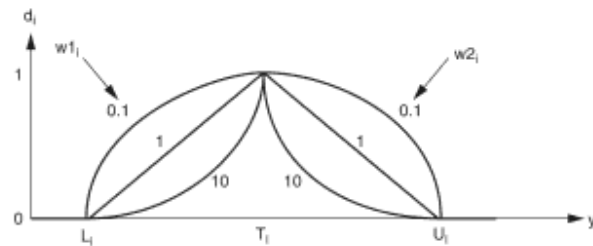
เมื่อ L_i คือขอบเขตด้านล่างสำหรับ y_i , U_i เป็นขอบเขตด้านบนสำหรับ y_i และ W_i เป็นน้ำหนัก สำหรับ y_i รูปต่อไปนี้จะแสดงรูปร่างของ $d_i(y_i)$ สำหรับกรณีนี้



3. ค่ากลางคือค่าที่ดีที่สุด (Nominal-the-best) ในกรณีนี้ มีค่าเป้าหมาย T_i สำหรับ y_i ค่าผลลัพธ์ที่ต้องการมากที่สุดคือ $y_i = T_i$ ฟังก์ชัน $d_i(y_i)$ ถูกนิยามดังนี้

$$\begin{aligned}
 d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \leq L_i \\
 d_i(y_i) &= \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i} \right)^{x_i} && ; L_i \leq y_i \leq T_i \\
 d_i(y_i) &= \left(\frac{y_i - U_i}{T_i - U_i} \right)^{x_i} && ; T_i \leq y_i \leq U_i \\
 d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \geq U_i
 \end{aligned}$$

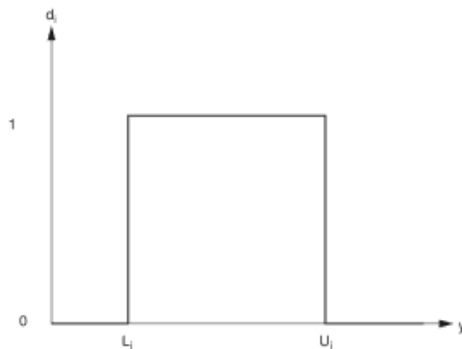
เมื่อ L_i คือขอบเขตด้านล่างสำหรับ y_i , U_i เป็นขอบเขตด้านบนสำหรับ y_i และ W_i เป็นน้ำหนัก สำหรับ y_i รูปต่อไปนี้จะแสดงถึงรูปร่างของ $d_i(y_i)$ สำหรับกรณีนี้



4. แบบมีข้อจำกัด (Constraint) ในกรณีนี้ มันจะเป็นที่พึงพอใจตรงเท่าที่ y_i อยู่ภายในข้อจำกัดหรือขอบเขต constraint $L_i \leq y_i \leq U_i$ ฟังก์ชัน $d_i(y_i)$ จะถูกกำหนดดังนี้

$$\begin{aligned}
 d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \leq L_i \\
 d_i(y_i) &= 1 && ; L_i \leq y_i \leq U_i \\
 d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \geq U_i
 \end{aligned}$$

เมื่อ L_i คือขอบเขตด้านล่างสำหรับ y_i , U_i เป็นขอบเขตด้านบนสำหรับ y_i รูปร่างของฟังก์ชันความพึงพอใจเป็นดังนี้



2.16 การควบคุมคุณภาพทางวิศวกรรมโดยใช้แผนภูมิควบคุม (Control Chart)

การผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำการผลิตมีจำนวนมาก โดยที่คุณสมบัติของ ผลิตภัณฑ์มักเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเรียกว่ากระบวนการผลิต เกิดการแปรผันหากความแปรผันที่เกิดขึ้นมีค่ามากจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยตรงแผนภูมิควบคุม (Control Chart) หรือ Shewhart Control Chart คือแผนภูมิที่เขียนขึ้น โดยใช้หลักการทางด้านสถิติเพื่อเป็นเครื่องมือตรวจจับและควบคุมกระบวนการผลิต ให้สามารถป้องกันและแก้ไข ปัญหาด้านคุณภาพได้ทันทั่วทั้ง และ ไม่เกิด ปัญหาด้านคุณภาพในปริมาณที่มาก

แผนภูมิควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ถ้าคุณสมบัติคุณภาพสามารถวัดและแทนด้วยตัวเลข ต่อเนื่องก็จะเรียกว่า Variable ในกรณีดังกล่าวจะสะดวกในการอธิบายคุณสมบัติคุณภาพด้วยการวัด Central tendency และวัดการกระจาย แผนภูมิควบคุมสำหรับวัด Central tendency และวัดการกระจาย ถูกเรียกว่า แผนภูมิควบคุมเชิงแปรผัน (Control Charts for Variables) ซึ่งเป็นแผนภูมิที่นิยมใช้มากที่สุด สำหรับควบคุม Central tendency ในขณะที่แผนภูมิที่ใช้ค่าพิสัยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง จะถูกใช้เพื่อควบคุมการกระจายของกระบวนการ มีหลายคุณสมบัติคุณภาพที่ไม่ได้วัดค่าแบบต่อเนื่อง ในกรณีนี้เราอาจตัดสินใจแต่ละหน่วยของสินค้าในลักษณะ เป็นไปตามข้อกำหนด (Conforming) หรือไม่ไปตามข้อกำหนด (Nonconforming) บนพื้นฐานที่ว่า การวัดเป็นแบบดีหรือเสีย (Attribute) หรืออาจนับจำนวนของข้อบกพร่อง (Nonconformities หรือ Defects) ที่ปรากฏบนสินค้าแต่ละหน่วย แผนภูมิควบคุมสำหรับคุณสมบัติคุณภาพดังกล่าว เรียกแผนภูมิควบคุมเชิงลักษณะ (Control Charts for Attributes)

2.16.1 หลักการสร้างแผนภูมิควบคุม

แผนภูมิควบคุมมี 2 ประเภท คือ แผนภูมิควบคุมเชิงแปรผัน (Control Charts for Variables) และแผนภูมิควบคุมเชิงลักษณะ (Control Charts for Attributes) โดยแผนภูมิแต่ละประเภทจะแบ่งออกเป็นหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีหลักการสร้างเหมือนกัน โดยแผนภูมิควบคุมจะประกอบด้วยเส้นควบคุม 3 เส้น ได้แก่ ขีดจำกัดควบคุมบน (Upper Control Limit : UCL) ขีดจำกัดควบคุมล่าง (Lower Control Limit : LCL) เส้นกลาง (Center line : CL) ระยะห่างจากเส้นกลางถึงขีดจำกัดควบคุมบนจะเท่ากับระยะห่างจากเส้นกลางถึงขีดจำกัดควบคุมล่าง คือเท่ากับ 3 ซิกมา (3)

ในกรณีไม่ทราบค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากรจากกระบวนการผลิตทั้งหมด จะแทนด้วยค่า S คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลตัวอย่างจากกระบวนการผลิต

2.16.2 ประเภทของแผนภูมิควบคุม

แผนภูมิควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท โดยแยกตามคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการควบคุม

2.16.2.1 แผนภูมิควบคุมชนิดแปรผัน (Variable Control Chart) แผนภูมิควบคุม ชนิดแปรผัน (Variable Control Chart) เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมกระบวนการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติที่ต้องการควบคุมสามารถวัดค่าได้ด้วยการ ชั่ง ตวง วัด เช่น ปริมาณการบรรจุน้ำผลไม้ในขวด อายุการใช้งานของหลอดไฟ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนลูกสูบ เป็นต้น ได้แก่

2.16.2.2 แผนภูมิ X-Chart เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติที่วัดได้จากผลิตภัณฑ์ในเชิงปริมาณ ซึ่งค่าที่ได้จะอยู่ในเทอมของความยาว อายุการใช้งาน น้ำหนัก ปริมาณ เป็นต้น

2.16.2.3 แผนภูมิ R Chart แผนภูมิ R-Chart เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมค่าความแปรผันหรือค่าการกระจายของคุณสมบัติที่วัดได้จากผลิตภัณฑ์โดยใช้พิสัยเป็นค่าวัด โดยแผนภูมิ R จะใช้ควบคู่กับแผนภูมิ X เสมอ

2.16.2.4 แผนภูมิ S Chart แผนภูมิ S-Chart เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมค่าความแปรผันหรือค่าการกระจายของคุณสมบัติที่วัดได้จากผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับแผนภูมิ R แต่จะคำนวณค่าวัดการกระจายด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งจะมีประสิทธิภาพดีกว่าแผนภูมิ R เมื่อตัวอย่างของกลุ่มย่อยมีขนาดใหญ่

2.16.2.5 แผนภูมิ MR Chart แผนภูมิ MR-Chart หรือแผนภูมิควบคุมพิสัยเคลื่อนที่ เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคู่กับแผนภูมิ X โดยแผนภูมิ MR-Chart เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมค่าการกระจายของคุณสมบัติที่วัดได้ด้วยค่าพิสัยเมื่อขนาดของตัวอย่างย่อยเท่ากับ 1 หน่วย

2.16.2.6 แผนภูมิ CU-SUM Chart แผนภูมิ CU-SUM Chart เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติที่วัดได้จากผลิตภัณฑ์ในเชิงปริมาณเช่นเดียวกับแผนภูมิ X

แต่จะมีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ดีกว่าแผนภูมิ X เมื่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และใช้ได้เมื่อขนาดตัวอย่างย่อยเท่ากับ 1 หน่วย

2.16.2.7 แผนภูมิควบคุมเชิงลักษณะ (Attribute Control Chart) แผนภูมิควบคุมเชิงลักษณะ (Attribute Control Chart) เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมกระบวนการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติที่ต้องการควบคุมหาได้จากการนับ เช่น ผลิตภัณฑ์ดีหรือเสีย ผลิตภัณฑ์ชำรุดหรือไม่ชำรุด ผลิตภัณฑ์ที่มี รอยตำหนิหรือไม่มีรอยตำหนิ ผลิตภัณฑ์บกพร่องหรือไม่บกพร่อง เป็นต้น ซึ่งการพิจารณาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ เช่น ดีหรือเสีย นั้น จะทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานหรือขีดจำกัดข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์ หรืออาจพิจารณา ด้วยการมองด้วยสายตาอย่างคร่าว ๆ แผนภูมิควบคุมประเภทนี้ได้แก่

2.16.2.8 แผนภูมิ p (p-Chart) แผนภูมิ p เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมสัดส่วนผลิตภัณฑ์เสียในกระบวนการผลิต เช่น สัดส่วนชิ้นงานที่แตกหัก สัดส่วนหลอดไฟเสีย เป็นต้น

2.16.2.9 แผนภูมิ pn (pn-Chart) แผนภูมิ pn เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมจำนวนของผลิตภัณฑ์เสียในกระบวนการผลิต ซึ่งมีหลักการเช่นเดียวกับแผนภูมิ p

2.16.2.10 แผนภูมิ c (c-Chart) แผนภูมิ c เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมจำนวนรอยตำหนิหรือข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์เมื่อกลุ่มตัวอย่างย่อยมี ขนาด 1 หน่วย เช่น รอยตำหนิบนผิวชิ้นงาน 1 ชิ้น รอยตำหนิบนผ้า 1 เมตร

2.16.2.11 แผนภูมิ u (u-Chart) แผนภูมิ u เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมจำนวนรอยตำหนิหรือข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับแผนภูมิ c โดยเป็นแผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิต่อหน่วย แต่จะใช้ในกรณีที่จำนวนหน่วยตัวอย่างของกลุ่มย่อยในการ ตรวจสอบแต่ละครั้งไม่เท่ากัน หรือขนาดตัวอย่างที่ตรวจสอบแต่ละครั้งไม่ใช่ 1 หน่วย

2.17 ความถี่และขนาดตัวอย่างในการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างแผนภูมิควบคุม

ในการออกแบบแผนภูมิควบคุมจะต้องกำหนดทั้งขนาดตัวอย่างและความถี่ของการสุ่มตัวอย่าง โดยปกติขนาดตัวอย่างที่โตกว่าจะตรวจจับ Small Shift ได้ง่ายกว่า ซึ่งจะต้องทำการเก็บข้อมูลจากกระบวนการผลิตมาจำนวนหนึ่งเพื่อสร้างแผนภูมิควบคุม ขนาดตัวอย่างที่ใช้เก็บข้อมูลแต่ละครั้งและความถี่ในการเก็บข้อมูลเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องเลือก เช่น ถ้าใช้แผนภูมิ $\bar{X}$ ควบคุมค่าเฉลี่ยของกระบวนการผลิต เมื่อกระบวนการผลิตดำเนินไปในแต่ละวันค่าเฉลี่ยของกระบวนการ ผลิตอาจไม่คงที่โดยอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงไปมากบ้างน้อยบ้าง ค่าความน่าจะเป็นที่จุดต่าง ๆ ใน แผนภูมิจะตกอยู่นอก

ขีดจำกัดควบคุมจะต่างกันเมื่อขนาดตัวอย่างต่างกัน โดยจะมีค่าแปรเปลี่ยนตามขนาดตัวอย่าง แสดงว่าเมื่อขนาดตัวอย่างใหญ่ขึ้นจะสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยได้ดีขึ้น ดังนั้นการเลือกขนาด ตัวอย่างต้องพิจารณาว่าถ้ากระบวนการผลิตเกิดการเปลี่ยนแปลงมาก ต้องพยายามตรวจจับการเปลี่ยนแปลงโดยการ เพิ่มขนาดตัวอย่าง แต่ถ้าความเปลี่ยนแปลงลดลงแล้วก็สามารถลดขนาดตัวอย่างลงได้ เป็นต้น

การกำหนดความถี่ของการสุ่มตัวอย่างจากการตรวจจับ Shift คือการสุ่มตัวอย่างขนาดโตด้วยความถี่สูง แต่การกำหนดการสุ่มตัวอย่าง อาจจะหมายถึงการสุ่มตัวอย่างขนาดเล็กในช่วงสั้น ๆ หรือขนาดตัวอย่าง โตในช่วงที่ยาวกว่า ปัจจุบันอุตสาหกรรมจะนิยมขนาดตัวอย่างเล็กในความถี่ที่สูงกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน กระบวนการผลิตสินค้าปริมาณสูง โดยปกติถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในกระบวนการผลิต ก็จะทำให้การสุ่ม ตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความถี่ในการเก็บข้อมูลสูง แต่อาจจะมีปัญหาทางด้านค่าใช้จ่ายที่จะสูงตามมา ดังนั้น ทางเลือกที่ดีอีกทางเลือกหนึ่งคือ เมื่อขนาดตัวอย่างเล็ก ความถี่ในการเก็บข้อมูลควรจะสูง แต่ถ้าขนาดตัวอย่างใหญ่ ความถี่ในการเก็บข้อมูลควรจะต่ำ นั่นคือเหตุผลที่ว่าในโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้วิธีการเก็บข้อมูลด้วยขนาด ตัวอย่างเล็กแต่เก็บบ่อย ๆ ดังนั้นการกำหนดขนาดตัวอย่างและความถี่ในการเก็บข้อมูล อาจต้องพิจารณา ทั้งในแง่ของการประหยัดแต่เชื่อถือได้ในแง่ของหลักวิชาการทางด้านสถิติ

2.18 วัตถุประสงค์ของการสร้างแผนภูมิควบคุม

วัตถุประสงค์ของการสร้างแผนภูมิควบคุม มีดังต่อไปนี้

2.18.1 แผนภูมิควบคุมเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับปรับปรุงผลผลิต การใช้แผนภูมิควบคุมที่ประสบความสำเร็จจะลด Rework และ Scrap ซึ่งทั้งสองนี้เป็น Productivity-killers ในกระบวนการผลิตใด ๆ ถ้าลด Rework และ Scrap จะทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นและค่าใช้จ่ายลดลงและทำให้สมรรถภาพในการผลิตสินค้าเพิ่มขึ้น (วัดจำนวนชิ้นดีต่อชั่วโมง เพิ่มขึ้น)

2.18.2 แผนภูมิควบคุมช่วยทำให้ทราบสภาพของกระบวนการผลิตที่ผ่านมาว่าเป็นอย่างไร ในกรณีที่ใช้แผนภูมิควบคุม กับการผลิตอย่างสม่ำเสมอจะทำให้ทราบว่ากระบวนการผลิตดำเนินไปในลักษณะใด ลักษณะคงที่หรือด้อยคุณภาพ ลง หรือเมื่อได้ทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตแล้วสภาพ

หลังจากปรับปรุงกระบวนการผลิตเป็นอย่างไร เป็นต้น ซึ่งแผนภูมิควบคุมจะบ่งบอกสิ่งเหล่านี้ได้เมื่อนำแผนภูมิควบคุมของแต่ละช่วงเวลามาเปรียบเทียบกัน

2.18.3 แผนภูมิควบคุมมีประสิทธิภาพในการป้องกันข้อบกพร่อง แผนภูมิควบคุมช่วยให้กระบวนการ in-control ทำให้สามารถรักษาระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ และทำให้ผลิตผลิตภัณฑ์ได้ตามจำนวนที่ต้องการ

2.18.4 ค่าจากแผนภูมิควบคุมทำให้สามารถตรวจสอบได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ มีคุณภาพตรงตามมาตรฐานหรือขีดจำกัด ข้อกำหนดเฉพาะหรือไม่ เนื่องจากมาตรฐานที่กระบวนการผลิตทำได้ อาจไม่ตรงกับมาตรฐานหรือขีดจำกัดข้อ กำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์ ค่าจากแผนภูมิควบคุมจะสามารถนำไปเปรียบเทียบกับขีดจำกัดข้อกำหนดเฉพาะของ ผลิตภัณฑ์ เพื่อตรวจสอบว่ากระบวนการผลิตมีความสามารถในการผลิตหรือไม่

2.18.5 ใช้ในการหาสาเหตุของความผิดปกติที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ในกรณีที่อ่านแผนภูมิแล้วพบว่ามีจุดผิดปกติเกิดขึ้นในแผนภูมิ จะรู้ได้ทันทีว่ากระบวนการผลิตเกิดปัญหา ซึ่งจำเป็นต้องไปสู่การค้นหาสาเหตุ

2.19 วิธีการสร้างแผนภูมิควบคุม

วิธีการสร้างแผนภูมิควบคุม โดยทั่วไปมีหลักการสร้างดังนี้

2.19.1 กำหนดคุณสมบัติที่ต้องการควบคุม เช่น การควบคุมชิ้นงานลูกสูบมาตรฐานอาจมีคุณสมบัติที่ต้องการ ควบคุมทั้งความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน ตลอดจนความยาวของชิ้นงานด้วย หรือการควบคุม บรรจุอาหารกระป๋อง อาจจะมีคุณสมบัติที่ต้องควบคุมทั้งปริมาณการบรรจุสุทธิและปริมาณการบรรจุของส่วน ประกอบอื่นๆในกระป๋องด้วย เป็นต้น แต่โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์บางชนิดอาจจะไม่ต้องการควบคุมทุกคุณสมบัติของ ผลิตภัณฑ์ควรเลือกเฉพาะคุณสมบัติที่สำคัญ โดยแผนภูมิหนึ่งแผนภูมิจะใช้ควบคุมคุณสมบัติเพียงหนึ่งคุณสมบัติ เท่านั้น

2.19.2 เลือกชนิดของแผนภูมิควบคุม ว่าเป็นแผนภูมิควบคุมแบบใดระหว่างแผนภูมิควบคุมชนิดแปรผัน (Variable Control Chart) แผนภูมิควบคุมเชิงลักษณะ (Attribute Control Chart)

2.19.3 เก็บข้อมูลจากกระบวนการผลิต กำหนดจำนวนตัวอย่าง และกำหนดความถี่ในการเก็บข้อมูลระยะเวลา ในการเก็บข้อมูล ต้องคำนึงถึงต้นทุนในการเก็บข้อมูลและตรวจสอบ อัตราการผลิต ปริมาณการผลิต

2.19.4 บันทึกและเก็บรวบรวมข้อมูลในใบตรวจสอบหรือ Check lists ตามแบบฟอร์มที่ได้ออกแบบไว้

2.19.5 คำนวณขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ ได้แก่ ขีดจำกัดควบคุมบน (Upper Control Limit : UCL) ขีดจำกัดควบคุมล่าง (Lower Control Limit : LCL) เส้นกลาง (Center line : CL)

2.19.6 วิเคราะห์ผลจากลักษณะของจุดที่ปรากฏบนแผนภูมิ ถ้ามีลักษณะจุดที่ปรากฏความผิดปกติเกิดขึ้น ในแผนภูมิที่ บ่งชี้ว่าเกิดความแปรผันที่มีสาเหตุระบุได้เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เช่น มีจุดตกอยู่ภายนอกขีดจำกัดควบคุมบน หรือล่าง แสดงว่ากระบวนการผลิต ไม่อยู่ภายใต้การควบคุม ต้องค้นหาสาเหตุและปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยการกำจัดสาเหตุแห่งความแปรผันนี้ที่ระบุสาเหตุได้ออกไป แล้วทำการคำนวณขีดจำกัดควบคุมของ แผนภูมิใหม่ จากข้อมูลที่เหลืออยู่ ทำซ้ำ ๆ จนไม่เกิดจุดผิดปกติในแผนภูมิ

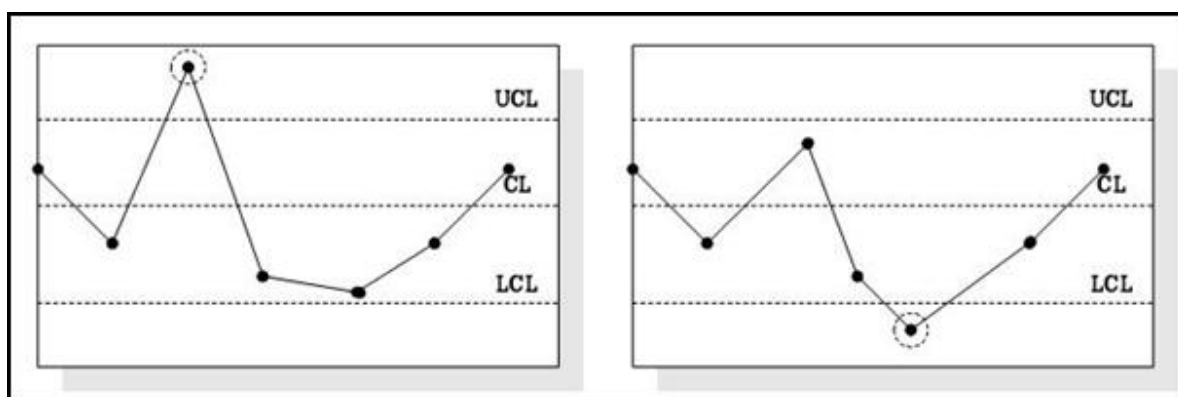
2.19.7 เมื่อกระบวนการผลิตอยู่ภายใต้การควบคุมแล้ว แสดงว่าสามารถควบคุมความผันแปรของการผลิตให้อยู่ใน ระดับที่เหมาะสมตามค่าในเส้นกลางของแผนภูมิควบคุม โดยถือว่าค่าที่เส้นกลางของแผนภูมิควบคุมคือค่าเฉลี่ยของ คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่กระบวนการผลิตนี้ทำได้ ส่วนการประมาณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของคุณสมบัติของ ผลิตภัณฑ์ที่กระบวนการผลิตนี้ก็สามารถคำนวณได้จากแผนภูมิควบคุมนี้เช่นกัน และสามารถนำเอาแผนภูมิควบคุมที่ได้ไป ใช้ในการควบคุมการผลิตในอนาคต

2.20 การวิเคราะห์ลักษณะของจุดในแผนภูมิควบคุม

การวิเคราะห์ลักษณะของจุดในแผนภูมิควบคุม เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการใช้แผนภูมิควบคุมเพื่อควบคุม กระบวนการผลิตเพราะจุดต่าง ๆ ในแผนภูมิควบคุมจะเป็นสิ่งบอกให้ทราบว่า กระบวนการผลิตเป็นอย่างไรในขณะ นั้น การอ่านหรือตีความหมายจากภาพที่ปรากฏบนแผนภูมิ เพื่อโยงเหตุผลไปที่สภาวะของกระบวนการผลิต ซึ่งได้นำข้อมูลที่ได้จากกระบวนการผลิตนำมาเขียนเป็นแผนภูมิควบคุม ซึ่งจะแสดงให้เห็นในแผนภูมิควบคุมนี้และ เมื่อตรวจพบความผิดปกติของ

กระบวนการผลิต เพราะจากความผิดปกติในกระบวนการผลิตจะมีผลต่อคุณภาพ ของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้กระบวนการผลิตนั้นปรับสภาพการผลิต กลับสู่สภาวะที่อยู่ในควบคุม (in - controlled) ได้ต่อไป ลักษณะจุดที่เกิดขึ้นในแผนภูมิควบคุมที่บ่งบอกถึงการเกิดสิ่งผิดปกติในกระบวนการผลิตมีดังต่อไปนี้

2.20.1 มีจุดพิกัดตกอยู่นอกขีดจำกัดควบคุมบนหรือล่าง เรียกว่า จุดอยู่นอกควบคุม (Out of Control) ดังภาพที่ 1.1

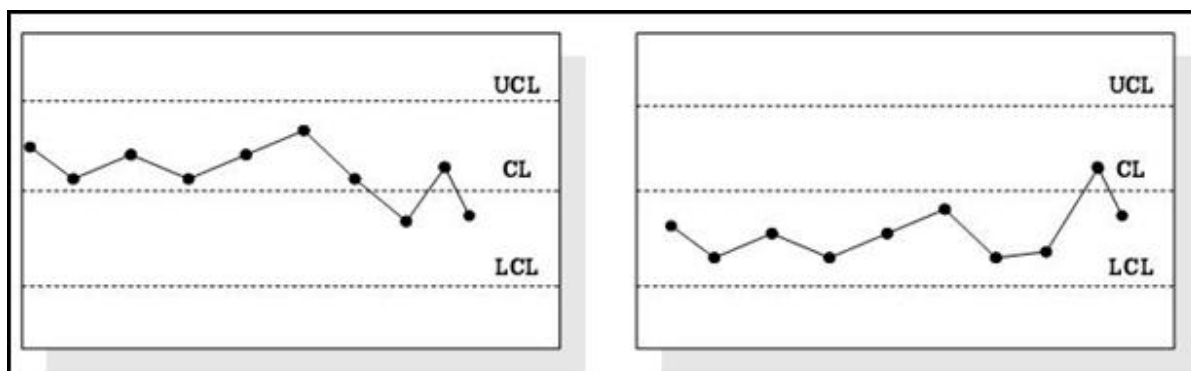


ภาพที่ 2.5

จุดพิกัดบนแผนภูมิควบคุมที่ตกอยู่นอกขีดจำกัดควบคุมบนและล่างตามลำดับ

2.20.2 เมื่อมีจุดพิกัด 2 จุดติดกันและอยู่ใกล้ขีดจำกัดควบคุมบนหรือล่าง ดังรูป 1.2 ภาพที่ 1.2 แสดงจุดพิกัด 2 จุดติดกันและอยู่ใกล้ขีดจำกัดควบคุมบนและล่างตามลำดับ

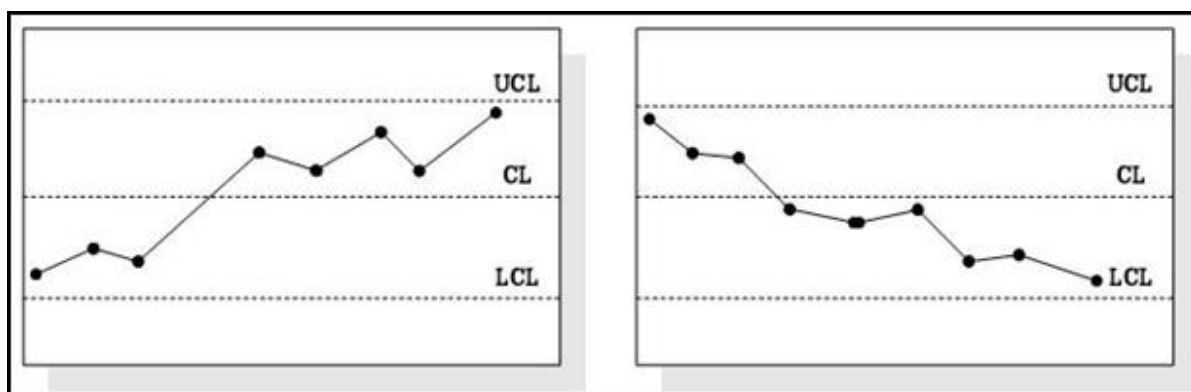
2.20.3 เมื่อมีจุดพิกัดอย่างน้อย 7 จุดปรากฏติดต่อกันอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของแผนภูมิดังภาพที่ 1.3



ภาพที่ 2.6

จุดพิคตอย่างน้อย 7 จุดปรากฏติดต่อกันอยู่ใกล้ขีดจำกัดควบคุมบนและล่างตามลำดับ

2.20.4 เมื่อมีจุดพิคตแสดงแนวโน้มไปทางด้านใดด้านหนึ่งของแผนภูมิ ดังภาพที่ 1.4



ภาพที่ 2.7

จุดพิคตมีแนวโน้มไปทางด้านใดด้านหนึ่งของแผนภูมิ

2.21 กฎความไวของแผนภูมิควบคุม Shewhart

Standard Action Signal สำหรับแผนภูมิควบคุมของ Shewhart มีข้อสังเกตดังต่อไปนี้

2.21.1 คะแนนมากกว่าหนึ่งที่อยู่นอกการควบคุมวงเงิน. 1.7.1 คะแนนมากกว่าหนึ่งที่อยู่
นอกการควบคุมวงเงิน

2.21.2 สองสามจุดนอกชิกมาเตือน 2-วงเงินแต่ยังภายในวงเงินควบคุม.

2.21.3 การทำงานของเนื่องแปดจุดหนึ่งในด้านของศูนย์บรรทัด.

2.21.4 สี่ห้าจุดเนื่องเกิน 1 วงเงินชิกมา

2.21.5 สิบห้าจุดในแถวในโซน C (ทั้งด้านบนและด้านล่างของศูนย์บรรทัด).

2.21.6 จุดหกเป็นแถวเป็นแนวหยุดหย่อนเพิ่มหรือลดลง.

2.21.7 สิบสี่จุดในแถวสลับหมุนเวียนขึ้นและลง.

2.21.8 แปดจุดในแถวทั้งในด้านของศูนย์บรรทัดที่ไม่มีอยู่ในโซน C

2.21.9 การผิดปกติหรือ nonrandom ในรูปแบบข้อมูล

2.21.10 หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งจุดใกล้ค่าเตือนหรือควบคุมจำกัด

2.22 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ปัจจุบันเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และได้มีการประดิษฐ์
คิดค้นวิธีการมากมายและประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความจุในการเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้สูงขึ้น แต่
อย่างไรก็ตามส่วนประกอบหลักของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยังคงประกอบได้ด้วยชิ้นส่วนหลักๆ ดังต่อไปนี้

2.22.1 แผ่นดิสก์ (Disk) ทำหน้าที่เก็บสนามแม่เหล็กของข้อมูล

2.22.2 มอเตอร์หมุนแผ่นดิสก์ (Spindle) ทำหน้าที่หมุนจานเพื่อให้เกิดช่องว่าง
อากาศบนจานข้อมูล ที่ใช้สำหรับการบินของหัวอ่าน

2.22.3 ชุดประกอบหัวอ่านเขียน (HGA) ทำหน้าที่อ่านสนามแม่เหล็กและเปลี่ยนให้เป็น
สัญญาณไฟฟ้า และเขียนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสัญญาณไฟฟ้า HGA ยังคงรักษาระดับความสูง
การบินระหว่างหัวอ่านและจาน

2.22.4 ชุดประกอบหัวอ่านและวอยส์คอยล์ (Head Stack Assembly) ทำหน้าที่ยึด HGA และทำให้ HGA สามารถอ่านและเขียนข้อมูลได้ทั้ง 2 ด้านของจานข้อมูล

2.22.5 แผ่นแผงวงจร (PCB) ทำหน้าที่ส่งและรับสัญญาณจากหัวอ่าน และส่งไปยัง คอมพิวเตอร์ในรูปแบบของข้อมูล

2.22.6 ชุดประกอบหัวอ่านและตัวขับเคลื่อน (Actuator) ทำหน้าที่เพื่อเคลื่อน Stacker และหัวอ่านไปยังช่องอื่นๆ บนจานข้อมูล

ซึ่งในงานวิจัยนี้ ให้ความสำคัญกับชิ้นส่วน ชุดประกอบหัวอ่านเขียน (HGA) ซึ่งจะได้กล่าวถึงส่วนประกอบและกระบวนการประกอบต่อไป

2.23 การประกอบหัวอ่านข้อมูล: Head Gimbal Assembly (HGA)

การประกอบหัวอ่านคือ กระบวนการที่ประกอบชิ้นส่วนระหว่างหัวอ่านข้อมูล (Slider) และ ชิ้นแขวนหัวอ่าน (Suspension) พื้นที่ที่ทำการประกอบ จะเรียกว่า Gimbal (Flexure) โดยชิ้นประกอบ หัวอ่านเขียน (HGA) ดังแสดงในภาพที่ 2.18 เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพราะชิ้นประกอบ หัวอ่านเขียน (HGA) จะต้องมีการบินให้ใกล้กับจานข้อมูลให้มากที่สุด ดังนั้นในส่วน of ชิ้นประกอบ หัวอ่านเขียน (HGA) เองจะต้องมีการควบคุมหลายๆ ปัจจัยในการผลิตเช่นกัน

2.23.1 หัวอ่านข้อมูล: (Head or Slider)

หัวอ่านข้อมูลคืออุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนสนามแม่เหล็กไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งตัวหัวอ่านข้อมูลประกอบด้วย ขดลวดสำหรับอ่านข้อมูล (Reader Coil) ขดลวดสำหรับเขียนข้อมูล (Writer Coil) และ Air Bearing Surface สำหรับผลิตภักดิ์ใหม่ๆ จะมีการเพิ่มเติมในส่วน of Heater และ Micro Actuator ไว้ภายในด้วย

หัวอ่าน-เขียนข้อมูล (Slider) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำมาจาก อะลูมิเนียมไททาเนียมคาร์ไบด์ (AlTiC) ผิวด้านบนของสไลเดอร์จะเรียกว่า Air Bearing Surface (ABS) และด้านปลายของสไลเดอร์เรียกว่า Trailing Edge จะเป็นลักษณะฟิล์มบาง ๆ ประกอบด้วย ส่วนประกอบด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญในการอ่านและส่งสัญญาณไปยังตัวฮาร์ดดิสก์



ภาพที่ 2.8

หัวอ่าน-เขียนข้อมูล

2.23.1.1 หลักการทำงานของหัวอ่าน-เขียนข้อมูล

2.23.1.2 การเขียนข้อมูล ลงบนแผ่น มีเดีย อาศัยหลักการทำงานของแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งได้จากการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำแล้วสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมา ซึ่งสนามแม่เหล็กจะไหลในแกนแม่เหล็กที่มีขดลวดพันอยู่ ในขณะเดียวกันแกนแม่เหล็กจะมีสนามแม่เหล็กออกมาที่ช่องว่างระหว่างขั้ว เพื่อให้สนามแม่เหล็ก กระจายออกไปทำให้เกิดการบันทึกข้อมูลลงบนแผ่นมีเดีย ข้อมูลที่เก็บอยู่ในแผ่น มีเดียจะอยู่ในรูปของเส้นแรงแม่เหล็ก และมีการกลับทิศทางไปมาตามทิศทางของ รหัสข้อมูล (Data code 0, 1)

2.23.1.3 การอ่านข้อมูลจากแผ่นมีเดีย อาศัยหลักการที่แรงดันไฟฟ้าซึ่งจะเกิดขึ้นบนขดลวด มีการปลดปล่อยของสนามแม่เหล็กอย่างรวดเร็วใน 1 รอบการหมุนของแผ่นมีเดีย ดังนั้นข้อมูลที่เคยถูกเก็บไว้จะสามารถอ่านกลับมาได้ในรูปของแรงดันไฟฟ้า

2.23.2.ชั้นแขวนหัวอ่าน (Suspension)

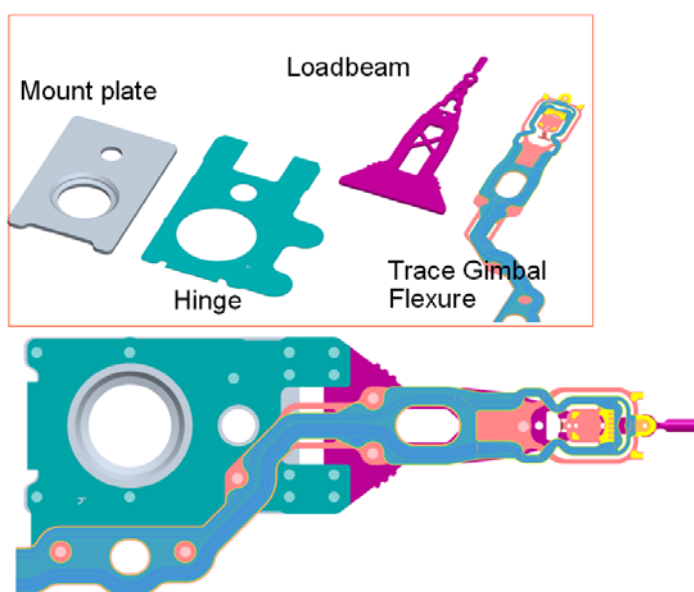
ชั้นแขวนหัวอ่าน (Suspension) มีลักษณะดังภาพที่ 2.19 ทำหน้าที่รักษาตำแหน่งมุมของหัวอ่าน แรงที่เกิด (Load Force) และความสูงของหัวอ่าน (Z-Height) ขณะที่กำลังหมุนอยู่บนจานข้อมูล ชั้นส่วนหลักๆ ของชั้นแขวนหัวอ่าน (Suspension) ประกอบด้วย

2.23.2.1 ชั้นแขวนหัวอ่านส่วนหัว (Trace Gimbal) : ชั้นที่ประกอบด้วย Flexure และวงจรไฟฟ้า (Circuit)

2.23.2.2 ชั้นแขวนหัวอ่านส่วนโครงสร้างรับแรง (Load Beam) ชั้นที่ทำหน้าที่รักษาผลกระทบจากสั่น เนื่องจากความถี่สูง

2.23.2.3 ชั้นสปริงบานพับ (Hinge) ชั้นส่วนนี้ทำหน้าที่รักษาค่าแรงกด (Load Force Value) และมุมของ สภาวะอิสระ (Free State Angle) ในบางผลิตภัณฑ์จะรวมส่วนนี้เข้ากับ Load Beam

2.23.2.4 ชั้นตัวประกอบ (Mount Plate) ชั้นส่วนนี้ใช้เพื่อติดกับชุดประกอบหัวอ่านและ วอยส์คอยล์ (Head Stack Assembly)



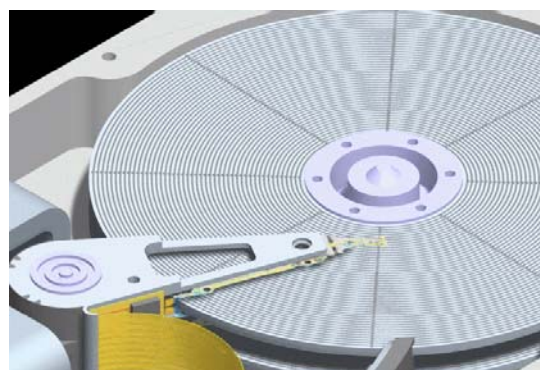
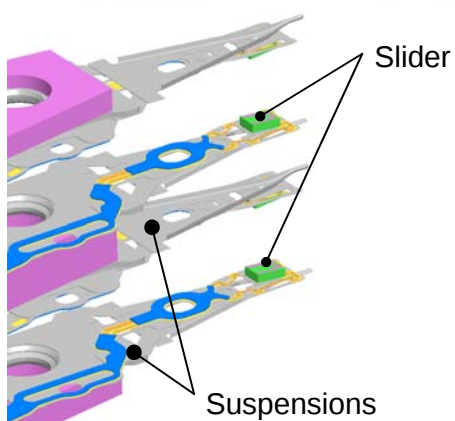
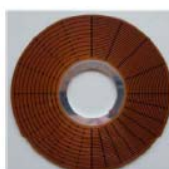
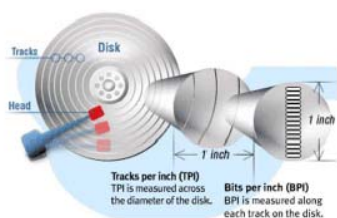
ภาพที่ 2.9

ชั้นแขวนหัวอ่าน (Suspension)



ภาพที่ 2.10

ชุดประกอบหัวอ่านข้อมูล : Head Gimbal Assembly (HGA)



ภาพที่ 2.11

ชุดประกอบหัวอ่านข้อมูล: Head Gimbal Assembly (HGA)

2.24 สายการผลิตการประกอบหัวอ่านข้อมูล (Head Gimbal Assembly Line)

วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการประกอบหัวอ่านข้อมูลคือการประกอบหัวอ่านข้อมูล (Head) เข้ากับ ชิ้นแขวนหัวอ่าน (Suspension) บริเวณส่วนหัว Gimbal Area ซึ่งในปัจจุบันชิ้นงานจะถูกใส่ไว้ในที่วางงาน (Pallet) แล้วผ่านกระบวนการดังต่อไปนี้

2.24.1 กระบวนการหยิบชิ้นงานเข้า (Suspension Load) เป็นกระบวนการที่หยิบชิ้นแขวนหัวอ่าน (Suspension) เข้าที่วางงาน (Pallet)

2.24.2 กระบวนการหยอดกาว (Auto Adhesive Dispensing) เป็นกระบวนการหยอดกาว บริเวณที่จะทำการติดหัวอ่าน

2.24.3 กระบวนการติดหัวอ่าน (Auto Slider Bonder) เป็นกระบวนการที่ทำการติดหัวอ่านเข้ากับชิ้นแขวนหัวอ่าน (Suspension)

2.24.4 กระบวนการอบกาวด้วยความร้อน (Infrared Oven) เป็นกระบวนการที่ทำการอบให้กาวแห้ง

2.24.5 กระบวนการเชื่อมต่อวงจร (Gold Ball Bonding/Solder Jet Bonding) เป็นกระบวนการที่ทำการเชื่อมวงจรระหว่างหัวอ่านกับชิ้นแขวนหัวอ่าน (Suspension)

2.24.6 กระบวนการตรวจสอบด้วยกำลังขยายต่ำ (Low Assembly Inspection) เป็นกระบวนการที่ทำการตรวจสอบชิ้นงานจากกระบวนการก่อนหน้านี้ว่ามีชิ้นงานเสียหรือไม่ โดยใช้กล้องกำลังขยาย 10 – 30 เท่า

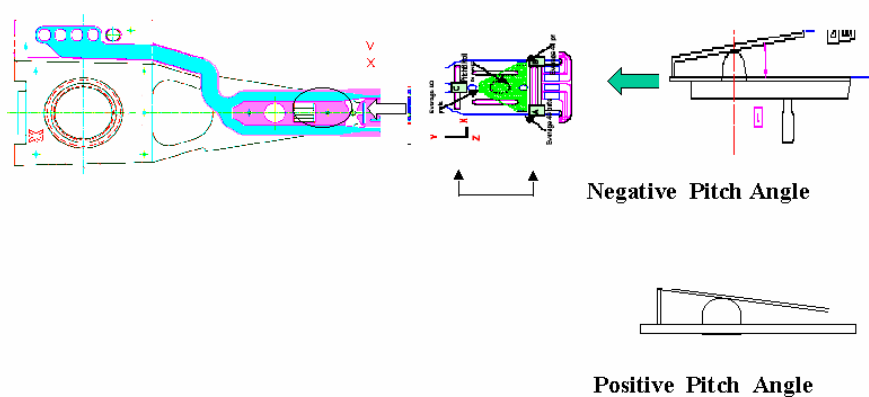
2.24.7 กระบวนการตรวจสอบตำแหน่งเชิงมุมของชุดประกอบหัวอ่าน (Pitch Static Attitude and Roll Static Attitude) เป็นกระบวนการที่ทำการวัดมุมของหัวอ่านว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์หรือไม่

2.24.8 กระบวนการตรวจสอบด้วยกำลังขยายสูง (High Power Inspection) เป็นกระบวนการที่ทำการตรวจสอบชิ้นงานว่ามีชิ้นงานเสียหายบริเวณหน้าแอร์แบริง (Air Bearing Surface) ของหัวอ่าน และบริเวณ โพลทิป (Pole Tip) โดยใช้กล้องกำลังขยาย 100 เท่า

2.24.9 กระบวนการนำชิ้นงานออกและอ่านหมายเลข (Auto Unload & OCR Reading) เป็นกระบวนการที่ทำการนำชิ้นงานออกจากที่วางงาน (Pallet) ใส่ไว้ในถาดที่จะเข้าสู่กระบวนการล้างและทดสอบทางไฟฟ้า โดยจะมีการอ่านหมายเลขหัวอ่านไว้เพื่อตรวจสอบภายหลัง

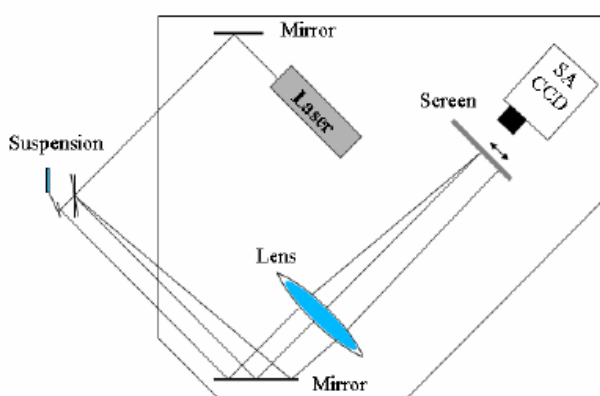
2.25 ลักษณะของค่ามุมจับหัวอ่านเขียนข้อมูล

ดังที่กล่าวมาแล้วถึงความสำคัญของมุมจับหัวอ่านเขียนข้อมูล ในส่วนนี้จะกล่าวถึงลักษณะของมุมจับหัวอ่านเขียนข้อมูล มุมจับหัวอ่านเขียนข้อมูล (Pitch Static Attitude, PSA) เป็นมุมที่เกิดที่บริเวณส่วนที่ติดหัวอ่านเขียน (Slider Head) ซึ่งบริเวณนี้จะเรียกว่า “Tongue” โดยที่มุมที่เกิดขึ้นนี้จะอ้างอิงเทียบกับบริเวณเพลต (Plate) ดังแสดงในภาพที่ 2.22 โดยการวัดจะใช้เครื่องมือวัดแบบใช้แสงเลเซอร์ซึ่งมีความแม่นยำสูงเพื่อวัดค่าดังกล่าวได้อย่างถูกต้องดังภาพที่ 2.23 โดยตั้งมาตรฐานของลักษณะของค่ามุมจับหัวอ่านเขียนข้อมูลมาตรฐาน IDEMA ดังแสดงในภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.12

ลักษณะของค่ามุมจับหัวอ่านเขียนข้อมูล



ภาพที่ 2.13

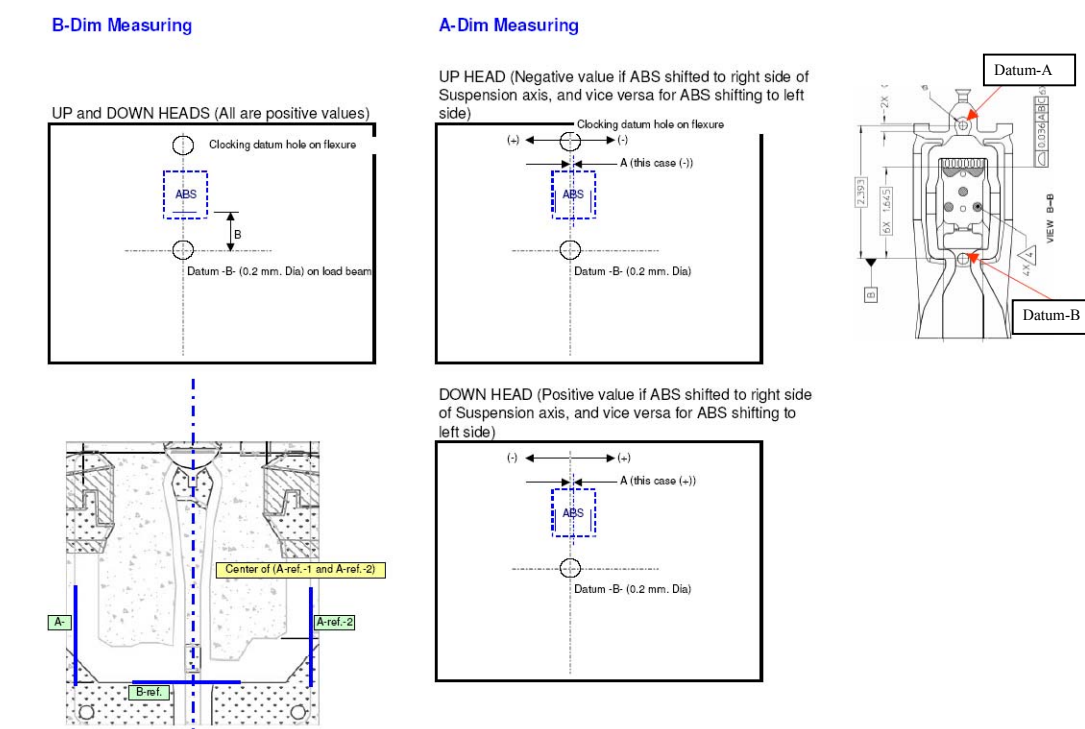
การวัดค่ามุมจับหัวอ่านเขียนข้อมูลด้วยเลเซอร์

2.26 วิธีการวัดตำแหน่งของหัวอ่าน

2.26.1 ตำแหน่งหัวอ่านตามขวาง (A Dimension) ของตัวแขวนหัวอ่าน (Suspension) จะกำหนดระยะตามขวางนี้ โดยจะมีการวัดศูนย์กลางของหัวอ่านตามแนวขวางเทียบกับรูอ้างอิงบนชิ้นแขวนหัวอ่าน (Suspension) จำนวน 2 รู คือ จุดอ้างอิง A (Datum A) และ จุดอ้างอิง B (Datum B) ดังแสดงในภาพ 2.25 (ก)

2.26.2 ตำแหน่งหัวอ่านตามยาว (B Dimension) ของชิ้นแขวนหัวอ่าน (Suspension) จะกำหนดระยะตามยาวนี้ โดยจะมีการวัดจากเส้นอ้างอิงของหัวอ่าน เทียบกับรูอ้างอิงบนชิ้นแขวนหัวอ่าน (Suspension) จำนวน 2 รู คือ จุดอ้างอิง A (Datum A) และ จุดอ้างอิง B (Datum B) ดังแสดงในภาพ 2.25 (ข)

How to measure A-B location (slider alignment respected to dimple center)



ภาพที่ 2.14

การวัดตำแหน่งของหัวอ่านตามยาว และตามขวาง

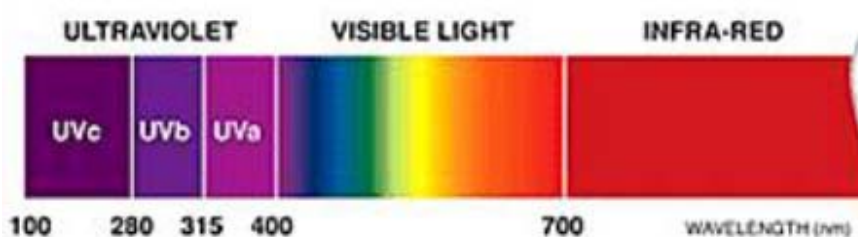
2.27 คุณสมบัติของกาว ที่ทำการติดหัวอ่านเข้ากับชิ้นแขวนหัวอ่าน (Suspension)

การที่ทำการติดหัวอ่านเข้ากับชิ้นแขวนหัวอ่าน คือการ อีพอกซี (EPOXY) รุ่น NEA 123 TKHGA ซึ่งเป็นกาวที่อนุญาตให้ใช้ในการประกอบหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์ จากการแยกสารองค์ประกอบในกาวด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี ประกอบกับการศึกษาโครงสร้างทางเคมีเบื้องต้นด้วยเทคนิคฟลูออโรทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี พบว่ากาว NEA 123 TKHGA มีสารประกอบประเภทเอสเทอร์และยูรีเทนเป็นองค์ประกอบหลัก การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของกาวด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริเมตรี ประกอบกับผลการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของกาวที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเทคนิคฟลูออโรทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี พบว่ากาว NEA 123 TKHGA เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติง ซึ่งแข็งตัวจากปฏิกิริยาการบ่มโดยโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแห ปฏิกิริยาการบ่มจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 110-165 องศาเซลเซียส โดยคายพลังงานประมาณ 245 จูลต่อกรัม กาวจะเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส นอกจากพลังงานความร้อนแล้วกาว NEA 123 TKHGA ยังสามารถบ่มได้ด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (ยูวี) ซึ่งปฏิกิริยาการบ่มจะเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสงและ/หรือเวลาในการรับแสง ปฏิกิริยาการบ่มด้วยแสงยูวีจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เมื่อใช้พลังงานแสงมากกว่า 6 จูลต่อตารางเซนติเมตร จากการศึกษาสมบัติด้านวิทยาการกระแสนพบว่า ในช่วงอัตราการเฉือน 0.001-0.003 ต่อวินาที-1 กาวมีพฤติกรรมการไหลแบบไดเลแทนท์ อย่างไรก็ตามในช่วงอัตราการเฉือนมากกว่า 0.003 ต่อวินาที-1 พฤติกรรมการไหลของกาวจะเปลี่ยนเป็นแบบซูโดพลาสติก ความหนืดของกาวจะลดลงเมื่อได้รับอัตราการเฉือนมากขึ้น และเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิ ที่อัตราการเฉือนและอุณหภูมิคงที่ ค่าความเค้นเฉือนจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โครงสร้างของกาว NEA 123 TKHGA สามารถกลับคืนตัวหลังได้รับแรงเฉือนหากให้เวลาในการคืนตัว อย่างไรก็ตามการคืนตัวของโครงสร้างมีแนวโน้มลดลงตามความถี่ของการให้แรงกระทำ

2.28 กาวที่สามารถบ่มได้ด้วยแสง (Photo Curable Adhesive/Light Curing Adhesive)

กาวที่เกิดการบ่มได้ด้วยแสง เป็นกาวที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากเป็นกาวที่สามารถยึดติดชิ้นงานได้ในเวลาสั้น ใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่า กาวที่ต้องบ่มด้วยความร้อน และมักเป็นกาวที่มีใช้ในกระบวนการผลิตที่มีความสะอาดสูง เหมาะกับ

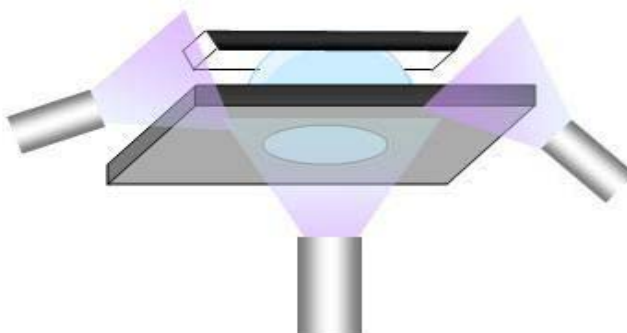
ชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความละเอียด แสงที่ใช้ในการบ่มจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ แสงขาว (Visible Light) และแสงอัลตราไวโอเล็ต หรือแสงยูวี (Ultraviolet, UV) ซึ่งแสงทั้งสองชนิดจะมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน แสงขาวมีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร สามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุที่มีความโปร่งแสงน้อยๆ ได้ (Translucent Less) จึงบ่มการได้ดีลึกกว่า และมีความปลอดภัยมากกว่าแสงยูวี ส่วนแสงยูวีมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 200-400 นาโนเมตร ช่วงความยาวคลื่นที่นิยมใช้คือ ยูวีเอ (UVA) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 315-400 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพ 2.26 ข้อได้เปรียบของแสงยูวีคือ ใช้เวลาในการบ่มการอย่างสมบูรณ์ได้ในเวลารวดเร็วกว่า และยับยั้งการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี



ภาพที่ 2.15

ช่วงความยาวคลื่นของแสงยูวีเอ 315 – 400 นาโนเมตร และแสงขาว 400 – 700 นาโนเมตร

ข้อจำกัดของการที่เกิดการบ่มได้ด้วยแสงคือ ในบริเวณที่การไม่ได้รับแสง หรือแสงไม่สามารถส่องผ่านพื้นผิวที่ติดการได้ การจะไม่เกิดการบ่มอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ความแข็งแรงในการยึดติดกับผิวของวัสดุ และความแข็งแรงในเนื้อการลดลง การแก้ไขปัญหานี้ นอกจากการพยายามให้แสงสัมผัสกับการโดยเปลี่ยนทิศทางในการให้แสงกับการ ดังแสดงในภาพ 2.27 การบ่มด้วยความร้อน (Thermal Curing) เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ โดยความร้อนจะเข้าไปกระตุ้นการเกิดพันธะในการที่แสงไม่สามารถส่องผ่านไปได้ ทำให้การเกิดการบ่มอย่างสมบูรณ์ ความร้อนและเวลาที่ใช้ในการบ่มจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของการ เมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นเวลาที่ใช้จะลดน้อยลง



ภาพที่ 2.16

ทิศทางการรับแสงของกากว

การที่บ่มได้ด้วยแสงโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 4 อย่างคือ

2.28.1. โอลิโกเมอร์ (Oligomer) หมายถึงพอลิเมอร์สายโซ่ขนาดกลาง เป็นตัวให้สมบัติพื้นฐานของกากว โอลิโกเมอร์ที่ใช้จะมีส่วนช่วยในการปรับเปลี่ยนสมบัติด้านความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ค่ามอดูลัส (Modulus) และการยืดตัว (Elongation) ของกากว

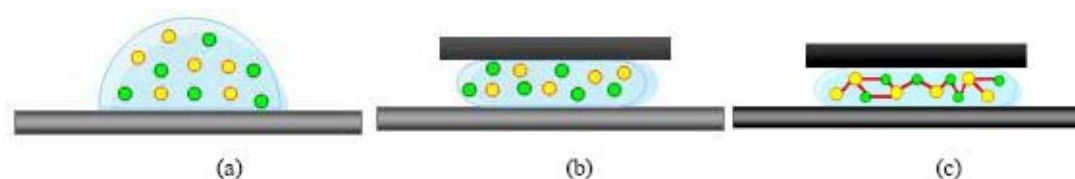
2.28.2. มอนอเมอร์ (Monomer) เป็นตัวที่ทำให้เกิดสมบัติพิเศษแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้น

2.28.3. สารเติมแต่ง (Additive) เป็นตัวกำหนดค่าความหนืด (Viscosity) เพื่อให้ง่ายต่อการกระจายตัว หรือเป็นตัวเติมเต็มในช่องว่าง (Gap) เพื่อให้เกิดการหดตัวน้อยที่สุด

2.28.4. สารเริ่มปฏิกิริยาแบบใช้แสง (Photoinitiator) เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาในการเกิดปฏิกิริยาการบ่ม

การบ่มกากวด้วยแสงเกิดได้จากการเติมตัวเริ่มปฏิกิริยาที่ถูกกระตุ้นได้ด้วยแสง (Photoinitiator) ลงในส่วนประกอบของกากว ดังแสดงในภาพ 2.28 (a), (b) ปฏิกิริยาเริ่มจากตัวเริ่มปฏิกิริยาในกากวได้รับการกระตุ้นจากแสงที่มีความยาวคลื่น และความเข้มแสงที่เหมาะสม ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ (Polymerization) สร้างพันธะในเนื้อกากวจนมีความแข็งแรงมากขึ้น หรือเกิดเป็นเรซิน (Resin) ตัวเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นสารอินทรีย์ที่ดูดซับแสงเพื่อทำให้เกิดตัว

อนุมูล (Radical) ขึ้น จากนั้นตัวอนุมูลจะเริ่มทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ และโพลิโกเมอร์ และเกิดการยึดติดกับผิววัสดุ (Substrate) ในภายหลัง ดังแสดงในภาพ 2.28 (c)



ภาพที่ 2.17

กลไกการบ่มตัวของกาวที่บ่มได้ด้วยแสง

- (a) โมเลกุลสารประกอบภายในกาว
- (b) กาวที่อยู่ระหว่างพื้นผิว 2 ชนิด
- (c) โมเลกุลของกาวที่เกิดการเชื่อมโยงหลังได้รับแสง

2.29 ประเภทของกาวในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่บ่มได้ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

1. กาวอะคริลิก (Acrylic Adhesive) เป็นกาวประเภทหนึ่งที่สามารถเกิดการบ่มได้หลายวิธี ทั้งการบ่มด้วยปฏิกิริยาทางเคมี การบ่มด้วยความร้อน รวมไปถึงการบ่มได้ด้วยแสง ความแตกต่างของวิธีการบ่มขึ้นอยู่กับการใช้งาน และการเติมสารเริ่มปฏิกิริยา โดยกาวอะคริลิกที่บ่มได้ด้วยแสงจะใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการความรวดเร็วเป็นพิเศษ เช่น อุตสาหกรรมการประกอบชิ้นส่วน เนื่องจากกาวประเภทนี้จะเกิดปฏิกิริยารวดเร็วมาก ทำให้กาวมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการบ่มแบบอื่น กาวที่บ่มด้วยแสงจะให้ค่าแรงดึงที่เท่ากับการบ่มแบบธรรมดาได้ในเวลาเพียงไม่กี่วินาที

2. กาวอีพอกซี (Epoxy Adhesive) เป็นกาวที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มีสมบัติเป็นฉนวนที่ดีมาก สามารถยึดติดได้ในพื้นผิวหลายประเภท และเกิดการบ่มตัวได้ภายใต้อุณหภูมิห้อง กาวประเภทนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ที่ช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น และสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้โดยไม่เกิดการทาปฏิกิริยากับสารหลัก การทำให้กาวที่บ่มด้วยแสง

ยวี่นี้ เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึงและสมบูรณ์ได้นั้น จะต้องฉายแสงยูวีให้สัมผัสทุกส่วนของกาวที่ต้องการให้แข็งตัว กาวอีพอกซีเป็นกาวที่มีการหดตัวหลังจากการบ่มน้อย ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ หากหากากาวบางๆ กาวอีพอกซีจะใช้เวลาในการบ่มน้อยกว่ากาวอื่น แต่มีข้อจำกัดเมื่อกาวมีความหนามาก คือกาวอีพอกซีจะบ่มได้ไม่ลึกมาก มีการยึดติดและความทนทานต่ำกว่ากาวชนิดอื่น

3. กาวเมอแคปแทนเอสเทอร์ (Mercaptan Ester Adhesive) เป็นกาวพอลิเอสเทอร์แบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Adhesive) ที่มีสารประกอบแบบไทโธล-อิน พอลิเมอร์ (Thiolene Polymer) ให้การยึดติดที่มีลักษณะแข็งไปจนถึงอ่อนนุ่มได้ กาวบางสูตรจะใส่ตัวทำละลาย (Solvent) และอาจติดไฟได้ (Flammable) เมื่อเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแล้ว กาวจะบ่มด้วยปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบรวมตัว (Additional Polymerization) โดยทั่วไปแล้วจะต้องใช้เวลาระยะหนึ่งเพื่อให้เกิดการบ่มตัวสมบูรณ์ มักใช้เวลาอย่างน้อยที่สุดประมาณ 1 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

2.30 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

E.M. Anawa, A.G. Olabi

ได้ศึกษาหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยในการเชื่อมต่อโลหะ 2 ชนิดเข้าด้วยกัน ด้วย CO₂ เลเซอร์ เพื่อให้พื้นที่ที่เกิดการหลอมละลาย (Fusion Zone) มีขนาดเล็กที่สุด โดยโลหะสองชนิดที่นำมาเชื่อมต่อกัน คือ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 และเหล็กคาร์บอนต่ำ AISI 1009 และมีปัจจัยของการเชื่อมที่นำมาศึกษาประกอบด้วย พลังงานของเลเซอร์, ความเร็วในการเชื่อม และระยะโฟกัสของเลเซอร์ วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Taguchi (Taguchi Method) ได้ถูกนำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยต่าง ๆ นอกจากนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่ที่เกิดการหลอมละลาย และขนาดความกว้างของพื้นที่ที่เกิดการหลอมละลายได้ถูกสร้างขึ้น ซึ่งผลของการวิจัยสรุปได้ว่า ความเร็วในการเชื่อมมีผลกระทบต่อพื้นที่ที่เกิดการหลอมละลายมากที่สุด ในขณะที่ระยะโฟกัสของเลเซอร์ไม่มีผลกระทบต่อพื้นที่ที่เกิดการหลอมละลาย และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถพยากรณ์ผลได้อย่างน่าพอใจ

ทรงพล พิเศษวิวัฒนา

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงดึงระหว่าง Slider และ Flexure ของหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และเสนอเงื่อนไขที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มคุณภาพของแรงดึงของหัวอ่าน/เขียนดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขที่เป็นไปได้จริง งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการอาศัยความรู้และความชำนาญของผู้เชี่ยวชาญและจากเอกสารจำนวนมากที่เกี่ยวข้อง เพื่อระบุถึงปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อแรงดึงของหัวอ่านเขียนข้อมูลโดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) จากการวิเคราะห์แผนภูมิดังกล่าวทำให้ทราบว่าปัจจัย 4 ชนิดที่น่าจะมีผลอย่างมากต่อแรงดึงระหว่าง Slider และ Flexure ของหัวอ่าน/เขียน ซึ่งปัจจัยนี้ได้แก่ อัตราส่วนผสมของสารยึดเหนี่ยว อุณหภูมิในการอบ เวลาในการอบ และชนิดของน้ำหนักรีด ซึ่งปัจจัยดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้เพื่อที่จะวิเคราะห์หาปัจจัยใดบ้างที่มีความสำคัญโดยนัยสำคัญต่อแรงดึง และจากการทดลองพบว่า มี 3 ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึง ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนผสมของสารยึดเหนี่ยว อุณหภูมิในการอบ และเวลาในการอบ จากนั้นได้ทำการทดลองอีกครั้งโดยมีจำนวนการทำซ้ำ (Replication) เพิ่มมากขึ้น เพื่อหาปัจจัยสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ค่าแรงดึงสูงสุดโดยไม่ขัดกับเงื่อนไขทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับหัวอ่าน/เขียน ผลการทดลองแสดงสภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนผสม 4: 1 อุณหภูมิในการอบ 300 องศาฟาเรนไฮต์ และเวลาที่ใช้ในการอบ 16 นาที และเมื่อนำค่าแรงดึงที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเชิงสถิติกับค่าแรงดึงของหัวอ่านเขียนในปัจจุบันพบว่า ค่าแรงดึงเฉลี่ยที่สภาวะใหม่นี้มีค่าสูงกว่าแรงดึงที่เป็นอยู่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ประณิธิ กาวารี

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เกิดของเสียจากกระบวนการถ่ายภาพแบบ 3 ชนิด ได้แก่ ขนาดของงานที่ไม่สม่ำเสมอ มุมของขอบงานไม่สม่ำเสมอ และมีเศษวัสดุมาเกาะติดชิ้นงาน โดยใช้วิธีการคัดสรรปัจจัยด้วยวิธีทาภูชิและแฟรคชันนอลแฟคทอเรียล พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อของเสียทั้ง 3 แบบ ไม่แตกต่างกัน โดยสรุปได้ คือ พลังงานการฉายแสง เวลาในการกดงาน และอิทธิพลร่วมของพลังงานการฉายแสงกับความสูงของหัวล้างงาน และกำหนดการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้ปัจจัยเบื้องต้นที่ได้จากการคัดสรรปัจจัยด้วยวิธีทาภูชิ สามารถให้สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการถ่ายภาพ

สุรพล สุบรรเจิดพร

ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมตึบ-ตะกั่วบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองศึกษาปัจจัย 4 ปัจจัย คือ ความเร็วของสายพาน

คุณสมบัติในการส่นอบความร้อน ค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ และลักษณะการไหลของโซลเดอร์ โดยอ้างอิงผลการตรวจสอบลักษณะจุดบกพร่องของรอยเชื่อม จากผลการวิจัยพบปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อจำนวนจุดบกพร่องในรอยเชื่อม คือ ลักษณะการไหลของโซลเดอร์ และ ความเร็วของสายพาน ดังนั้นจากการทดลองการปรับลักษณะการไหลของโซลเดอร์ให้มีการไหลทั้ง 2 ด้าน และความเร็วสายพานเท่ากับ 108 เซนติเมตรต่อนาที ทำให้จุดบกพร่องลดลงได้