สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 รายละเอียดวัตถุดิบ

2.1.1 โพลิเอสเตอร์เรซิน (Unsaturated Polyester Resin)

เป็นพลาสติกเหลวที่นำมาใช้เป็นเนื้อผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากราคาถูกกว่าอย่างอื่น และมีคุณสมบัติที่เหมาะที่จะนำมาใช้งาน เช่น มีความแข็งเป็นพิเศษ ง่ายต่อการนำมาใช่หล่อ ศัพท์เทคนิคที่ถูกต้องเรียกว่า โพลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว เมื่ออยู่ในสภาพที่ยังไม่ได้ใช้งาน (ยังเป็นวัตถุดิบอยู่) จะมีสภาพเป็นของเหลวข้นคล้ายน้ำมันเครื่อง กลิ่นฉุนพอควร และเมื่อใส่สารเคมีบางชนิดลงไป จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น จะเปลี่ยนสภาพเป็นพลาสติกแข็งใสหรืออมเหลือง

โพลิเอสเตอร์เรซินมีหลายชนิดแล้วแต่การใช้งาน เช่นใส ทนความร้อน ทนกรดด่างเป็นพิเศษ และชนิดธรรมดา ที่นิยมใช้แบ่งออกเป็น 5 ชนิดคือ

1. ออโทฟาทาลิกอะซิด (Ortho-phthalic acid type)
2. ไอโซฟาทาลิกอะซิด (Isophthalic acid type)
3. เทเรฟทาสิกอะซิด (Terephthalic acid type)
4. บิสฟีนอล-เอ (Bisphenol-A type)
5. ไวนิลเอสเทอร์ (Vinylester type)

การแข็งตัวของโพลี่เอสเตอร์เรซิน

1. โดยใช้ตัวคะตะลิสต์ (Catalyst) หรือตัวทำให้แข็ง และความร้อน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย, สะดวก และนิยมใช้มาก
2. โดยใช้ตัวคะตะลิสต์และตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง
3. โดยใช้แสงอุลตราไวโอเลต
4. โดยใช้ลำอิเลกตรอน

คุณลักษณะของโพลิเอสเตอร์เรซิน

1. ปฏิกิริยาในการแข็งตัวจะให้ความร้อน (Exothermic Reaction) โดยหลังจากเติมตัวคะตะลิสต์ ความแข็งของโพลิเอสเตอร์เรซินจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเมื่อถึงอุณหภูมิจุดยอดสูงสุด หลังจากนั้นจะค่อยๆแข็งตัวขึ้น

องค์ประกอบที่มีผลต่อการแข็งตัวของโพลิเอสเตอร์เรซิน

- อุณหภูมิโพลิเอสเตอร์ อุณหภูมิสูงจะแข็งตัวได้ดีกว่าอุณหภูมิต่ำ
- ปริมาณคะตะลิสต์และโพรโมเตอร์ โดยปริมาณมากการแข็งตัวเร็วกว่าปริมาณน้อย
- ปริมาณโพลิเอสเตอร์เรซิน ปริมาณมากการแข็งตัวเกิดได้เร็วกว่าปริมาณน้อย
- ความชื้นหรือน้ำ ความชื้นสูงการแข็งตัวของโพลิเอสเตอร์เรซินจะเกิดขึ้นชา
- ปริมาณออกซิเจน ออกซิเจนเป็นการป้องกันการแข็งตัวของโพลิเอสเตอร์เรซิน ถ้าปริมาณออกซิเจนสูง เช่น มีการกวนมากๆ จะทำให้การแข็งตัวช้าลง

2. ขณะแข็งตัวโพลิเอสเตอร์เรซินจะหดตัว (Shrinkage) ปริมาณการหดตัวโดยปริมาตร 6-8 % โดยเฉลี่ย

2.1.2 โมโนเมอร์

ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ สไตรีนโมโนเมอร์ (Styrene Monomer) เนื่องจากราคาถูกและสามารถทำปฏิกิริยากับโพลิเอสเตอร์เรซินขณะเกิดปฏิกิริยาแข็งตัว (Curing Reaction) ได้ดี นอกจาก สไตรีนโมโนเมอร์แล้ว โมโนเมอร์อื่นๆ เช่น เมทิลเมทาคริเลต (Methyl Methacrylate) ซึ่งมีคุณสมบัติในการทนสภาพแวดล้อม (Weathering Resistance) ได้ดี สีคงทน แต่เนื่องจากคุณสมบัติในการแข็งตัวไม่ดีพอ ดังนั้นจึงนิยมใช้โมโนเมอร์ตัวนี้ผสมกับ สไตลีนโมโนเมอร์ นอกจากนี้มีการนำไวนิล โทลูอีน (Vinyl Toluene), คลอโรสไตรีน(Chlorostylene) และไดอัลลิลฟาทาเลต (Diallyl phthalate) เพื่อคุณสมบัติเฉพาะอื่นๆ แต่ไม่นิยมใช้เนื่องจากราคาแพง

มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี กลิ่นเหมือนโพลีเอสเทอร์เรซิน สไตรีนโมดนเมอร์ เป็นตัวทำละลายหรือทำให้เหลว และขณะเดียวกันก็เป็นตัวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชั่น ปริมาณโมโนเมอร์ต่อปริมาณเนื้อโพลิเอสเตอร์เรซินมีค่าโดยประมาณ 40/60

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3 **ตัวคะตะลิสต์** (Catalyst)

หรือ ตัวทำให้แข็ง (Hardener) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชั่น เปลี่ยนสภาพโพลิเอสเตอร์เรซินจากพลาสติกเหลวเป็นพลาสติกแข็ง ซึ่งในระหว่างเกิดปฏิกิริยาทางเคมีนั้น จะเกิดความร้อนสูงกว่า 100°ซ โดยปกติแล้ว Catalyst นิยมใช้สารพวกเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ซึ่งชนิดที่นิยมมากที่สุดคือ Methyl Ethyl Ketone Peroxide (MEKPO) ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสีกลิ่นคล้ายกรดเป็นอันตรายต่อเยื่อจมูกและตามาก ควรระวังอย่าใช้มือที่จับเช็ดตา หรือให้กระเด็นเข้าตา

2.1.4 **ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา** (Accelerator **หรือ** Promoter)

ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยเปลี่ยนแปลงจากพลาสติกเหลวเป็นพลาสติกแข็งของ Unsaturated Polyester Resin โดยใช้ตัว Catalyst นั้นสามารถทำได้โดยใช้ความร้อนช่วยแต่ช้ามาก ในทางปฏิบัติจะใช้ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) มาช่วยปรับให้เกิดการแข็งตัวของพลาสติกเหลวเร็วขึ้น ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ โคบอลท์แนฟทีเนต (Cobalt Naphthenate) มีลักษณะเป็นของเหลวสีม่วง

ในทางปฏิบัติจะใช้ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา ผสมลงในโพลิเอสเตอร์เรซินก่อน เมื่อจะใช้งานจึงผสมตัว Catalyst ในปริมาณ 0.5-2.0 % ลงไป

2.1.5 **ใยแก้ว** (Fiber Glass **หรือ** Glass Fiber)

เป็นตัวเสริมความแข็งแรงให้กับโพลิเอสเตอร์เรซิน เช่น เดียวกับเหล็กเส้นเสริมในงานคอนกรีต มีรูปร่างแตกต่างกันไปหลายชนิด เช่น เส้นยาว (Roving) เส้นสั้น (Chopped Stand) แบบรีดเป็นผืน (Mat) และแบบถักเป็นผืน (Fabrics) ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ใยแก้วต่างๆ ให้เหมาะสม กับคุณสมบัติ ของชิ้นงานไฟเบอร์กลาสที่ต้องการและกรรมวิธีการผลิตที่เหมาะสม

เส้นใยแก้วเหล่านี้จะมีน้ำยาอาบผิวหลายชนิด เช่น Silane finish หรือ Chrome finish เป็นต้น มีคุณสมบัติในการทำให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับโพลิเอสเตอร์เรซินดียิ่งขึ้น

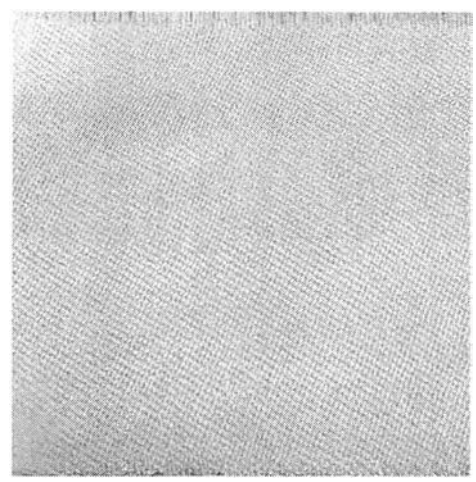
ใยแก้วแบ่งออกตามคุณสมบัติออกได้ 4 กลุ่มคือ

1. กลุ่ม A (Alkali) ใช้สำหรับงานป้องกันสารเคมีที่เป็นด่าง
2. กลุ่ม C (Chemical) ใช้สำหรับงานป้องกันสารเคมีพวกกรดและอื่นๆ
3. กลุ่ม E (Electrical) ใช้สำหรับงานป้องกันไฟฟ้า
4. กลุ่ม S หรือ T (High Strength) ใช้สำหรับงานที่รับแรงมากๆ

ใยแก้วชนิดเส้นยาว (Roving) มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวตลอด ม้วนเป็นหลอด เหมาะสำหรับกรรมวิธีการผลิตแบบใช้เครื่องพ่น (Spray up) แบบพันท่อ (Filament Winding) แบบดึงแนวยาว (Pultrusion) และแบบ SMC (sheet Molding Compound) ให้ความแข็งแรงในด้านการรับแรงดึงและแรงบิดงอได้สูงมาก

ใยแก้วชนิดผืนเส้นสั้น (Chopped Strands Mat) เป็นใยแก้วชนิดที่นิยมใช้กับงานทั่วๆ ไป มีผืนขนาดแตกต่างกันไปแล้วการใช้งานเช่นผืนเบอร์ 300 450 และ 600 (ตัวเลขของผืนเบอร์คือ น้ำหนักเป็นกรัมต่อหนึ่งตารางเมตร ดังนั้น ใยแก้วเบอร์ 300 จะบางกว่าเบอร์ 450) ใยแก้วบางชนิดนิยมใช้กับชิ้นงานขนาดเล็กต้องการน้ำหนักเบา ใยแก้วหนาใช้กับชิ้นงานใหญ่

ใยแก้วชนิดผืนทอละเอียด (Woven Roving) ใช้กับชิ้นงานที่ต้องการความแข็งแรงเป็นพิเศษหรือชิ้นงานที่ 2-3 ต่อจากเจลโค๊ต มีชื่อเรียกง่ายๆ ทั่วไปว่า ใยแก้วสานเล็ก



ใยแก้วชนิดเส้นด้าย (Yarn) มีลักษณะเป็นเส้นยาวเหมือนเส้นด้าย ผ่านการพันบิดรวมเส้นแล้วนำไปทอเป็นใยแก้วชนิดผืนทอพิเศษ (Fabrics)

2.1.6 Pigment

คือสีที่ผสมลงในโพลีเอสเตอร์เรซิน เพื่อทำให้ชิ้นงานมีสีต่างๆ ดูสวยงามขึ้น สีเรซินมีลักษณะข้นคล้ายจาระบีมีส่วนสำคัญต่อการแข็งตัวของโพลิเอสเตอร์เรซิน (และเจลโค๊ต) สีบางสีจะเร่งให้โพลิเอสเตอร์เรซินแข็งตัวเร็วขึ้น (Accelerate) บางสีจะทำให้การแข็งตัวช้าลง (Decelerate)

2.1.7 **น้ำยาล้าง (Solvent)**

ที่นิยมใช้คืออะซิโทน (Acetone) มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี กลิ่นฉุนแรงกว่าทินเนอร์ ไวไฟ ใช้ล้างทำความสะอาดเครื่องมืออุปกรณ์ที่เปื้อนโพลิเอสเตอร์เรซิน

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต

สมบัติของเส้นใยเสริมแรง

สมบัติของโพลิเมอร์ (เรซิน)

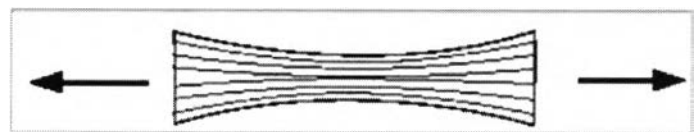
สัดส่วนของเส้นใยเสริมแรง (Fiber Volume Fraction – FVF) เนื่องจากวัสดุที่เป็นเส้นใยเสริมแรงมักมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าโพลิเมอร์ ดังนั้นหากคอมโพสิตมีเส้นใยเสริมแรงมากขึ้นจะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่การผสมเส้นใยเสริมแรงกับโพลิเมอร์ก็มีขีดจำกัดเนื่องจากเส้นใย

เสริมแรงควรมีเนื้อโพลิเมอร์ห่อหุ้มอยู่โดยรอบ โดยทั่วไปการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอมโพสิต เช่น เรือไฟเบอร์กลาสจะนิยมขึ้นรูปด้วยวิธีที่เรียกว่า แฮนด์เลย์อัพ (hand lay-up) ซึ่งจะมีสัดส่วนของเส้นใยเสริมแรงประมาณ 30-40% แตกต่างจากชิ้นงานคอมโพสิตที่ใช้ในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงจะมีสัดส่วนของเส้นใยประมาณ 70%

การจัดเรียงตัว (orientation) ของเส้นใยในคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงให้ค่าสมบัติเชิงกลตามแนวยาวสูงกว่าแนวขวาง ดังนั้นหากเส้นใยในคอมโพสิตมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันแล้ว สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่แสดงออกมาจะมีค่าแตกต่างกันตามแนวแรงที่กระทำ ดังนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาตั้งแต่การออกแบบคือ ขนาดและลักษณะแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน

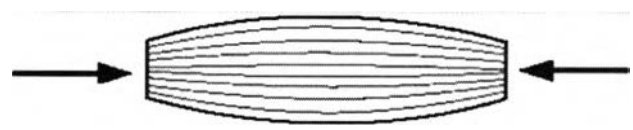
2.2.2 การรับแรงของวัตถุ โดยทั่วไปแรงที่กระทำต่อวัตถุมีด้วยกัน 4 ประเภทคือ

1. แรงดึง (Tension) รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะแรงดึงที่กระทำต่อคอมโพสิต การตอบสนองต่อแรงกระทำของวัสดุขึ้นอยู่กับแรงดึงและความแข็งแรงเชิงกลของเส้นใยเสริมแรงที่ใช้



รูปที่ 2.1 ลักษณะการรับแรงดึง

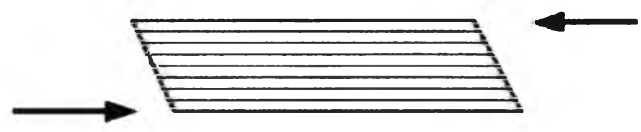
2. แรงกดอัด (Compression) รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะคอมโพสิตที่ได้รับแรงกดอัด ในสภาพนี้ความแข็งแรงของวัสดุจะขึ้นกับสมบัติความแข็งตึง และการยึดติด (adhesion) ของเนื้อโพลิเมอร์เป็นหลัก เนื่องจากโพลิเมอร์ทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงให้อยู่ในลักษณะเส้นตรงและป้องกันไม่ให้เส้นใยโค้งงอ



รูปที่ 2.2 ลักษณะการรับแรงกดอัด

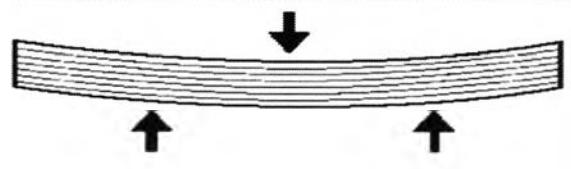
3. แรงเฉือน (Shear) ลักษณะแรงที่กระทำต่อคอมโพสิตมีทิศทางตรงข้ามกันและแนวแรงอยู่ต่างระดับกัน ดังรูปที่ 2.3 ภายใต้สภาวะแบบนี้โพลิเมอร์จะมีบทบาทอย่างมากในเรื่องการยึดติดกับเส้นใยเสริมแรงไม่ใช่ในเรื่องสมบัติ

ความแข็งแรงเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอมโพสิตที่มีการเรียงเส้นใยเสริมแรงเป็นชั้น ๆ



รูปที่ 2.3 ลักษณะการรับแรงเฉือน

4. แรงดัด (Flexure) ลักษณะของแรงที่กระทำกับวัตถุมีลักษณะผสมของแรงดึง แรงเฉือน และแรงกดอัด 3 แรงเข้าด้วยกัน จากรูปที่ 2.4 เห็นได้ว่ากึ่งกลางของด้านบนของวัตถุถูกแรงกดอัดกระทำ ขณะที่ใต้วัตถุจะถูกแรงยืดและแรงเฉือนจากการยืดตัวของวัตถุ



รูปที่ 2.4 ลักษณะการรับแรงดัด

เมื่อทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิตทั้ง 4 ข้อแล้ว ก็สามารถนำข้อมูลเหล่านั้นมาพิจารณาเลือกชนิดเส้นใยเสริมแรง และชนิดโพลิเมอร์ที่เหมาะสม รวมถึงทิศทางของแรงที่กระทำเพื่อจัดวางตำแหน่งเส้นใยเสริมแรงให้เหมาะสม เพื่อผลิตชิ้นงานคอมโพสิตออกมาให้ได้สมบัติเชิงกลตามต้องการ

2.3 สาเหตุความสูญเสีย

ความสูญเสียในกระบวนการผลิต คือ ค่าใช้จ่ายที่เสียไปในกระบวนการผลิตโดยไม่มีส่วนสนับสนุนกระบวนการผลิตแต่อย่างใด ในสายการผลิตโดยทั่วไป ตรงปลายสุดของสายพานลำเลียงสินค้าที่ผลิตเสร็จ ก่อนการบรรจุและส่งสินค้าไปเก็บยังคลังสินค้า จะมีพนักงานคอยตรวจสอบ บางครั้งเมื่อเขาหยิบสินค้าสำเร็จรูปขึ้นมาดูแล้วกลับโยนมันลงถังรองรับของเสีย เพราะสินค้าเหล่านั้นมีความบกพร่อง (Defect) อยู่ในตัว เขาเรียกว่าของเสีย (Defective) หรือชิ้นงานเสีย

Defect คือรอยตำหนิ หรือความบกพร่องที่ปรากฏ หรือติดมากับชิ้นงานที่ผลิตขึ้น และเมื่อเทียบกับข้อกำหนดทางเทคนิคแล้วไม่สอดคล้องและยอมรับเป็นชิ้นงานที่ดีไม่ได้ ในบางกรณีรอยตำหนิอาจไม่รุนแรงขนาดต้องคัดทิ้ง แต่อาจส่งชิ้นงานนั้นไปซ่อมได้

ส่วน Defective คือของเสีย หรือชิ้นงานเสียใช้งานไม่ได้ ทั้งนี้เป็นเพราะว่ามีรอยตำหนิเกิดขึ้นในชิ้นงานนั้น อาจจะเพียง 1 รอยตำหนิ หรือมากกว่าก็ได้ ซึ่งรอยตำหนิหรือความบกพร่องที่ตรวจพบในชิ้นงานนั้น มากเกินกว่าที่จะส่งกลับไปทำการซ่อม (Rework) ได้ ซึ่งต้องคัดชิ้นงานนั้นทิ้งไป และเรียกชิ้นงานที่ใช้ไม่ได้นี้ว่าของเสีย (Defective)

คนส่วนใหญ่มองการเกิดของเสียเป็นไปในทางที่ว่า เนื่องจากสินค้าของตนเองมีคุณสมบัติและข้อกำหนดทางเทคนิคสูงมาก กับทั้งในแต่ละขั้นตอนของการผลิตก็มีโอกาสเกิดจุดบกพร่องได้ ดังนั้นการเกิดของเสียจึงเป็นเรื่องที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่อย่างไรก็ตามเราพบว่าสาเหตุของความบกพร่องนี้เป็นสากล โดยไม่แตกต่างกันเลยไม่ว่าจะเป็นสินค้าชนิดใด หรือมีกรรมวิธีการผลิตที่แตกต่างกันออกไปมากเท่าใดก็ตาม

สาเหตุที่เป็นสากลในที่นี้ก็คือ ความผิดแผกกัน (Variation) ซึ่งความผิดแผกกันในกระบวนการผลิต มีสาเหตุมาจากปัจจัยสำคัญ 5 ตัว คือความผิดแผกกันในเรื่องของ

พนักงาน (Man) เกิดได้จากหลายสาเหตุเกี่ยวเนื่องไปถึงด้านเทคนิคและด้านจิตวิทยา

วัสดุที่ใช้ (Material) เกิดจากความผิดแผกกันในเรื่องคุณสมบัติจำเพาะ, รูปทรง, รูปพรรณ และความสม่ำเสมอของคุณภาพวัตถุดิบ

วิธีการทำงาน (Method) เนื่องมาจากการทำงานที่ผิดวิธีทำให้ชิ้นงานเสียหายไม่ได้คุณภาพ การลดความสูญเสียจำเป็นที่จะต้องสร้างมาตรฐานในการทำงาน และฝึกอบรมให้ความรู้แก่ผู้ปฏิบัติงาน

เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต (Machine) ปัญหาสำคัญของความสูญเสียเนื่องมาจากเครื่องจักรและอุปกรณ์ ไม่อยู่ในสภาพที่สามารถใช้งานได้ดี, ชำรุด, ถูกนำไปใช้ผิดประเภท หรือขาดการบำรุงรักษา

สภาพแวดล้อม (Environment)

เราจะพบเสมอว่าในทุก ๆ สายการผลิต จะไม่มีสภาพการผลิตที่เป็นของดีอยู่ตลอดเวลาหรือของเสียตลอดเวลา แต่ทว่ามักจะพบเสมอว่ามีของดี และของเสียถูกผลิตออกมาปะปนกันอยู่เสมอ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าภายใต้การทำงานปกติ ความผิดแผกกันของปัจจัยการผลิต 5 ตัวข้างต้นได้เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลานั่นเอง

2.3.1 การวิเคราะห์สาเหตุของความสูญเสีย

ปัจจัยที่ก่อให้เกิดความสูญเสียในการผลิตก็คือ ทรัพยากรในโรงงาน อันได้แก่ คนงาน (Man) วัตถุดิบ (Material) วิธีการทำงาน (Method) และเครื่องจักร (Machine) การเริ่มต้นที่จะลดความสูญเสียขั้น จำเป็นที่จะต้องทำการวิเคราะห์ถึงสาเหตุของปัจจัยที่ทำให้เกิดความสูญเสียดังกล่าว โดยอาจใช้เครื่องมือในการดำเนินงานได้ดังนี้

2.3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

สร้างระบบรายงานและบันทึกข้อมูล เพื่อดูการกระจายของกระบวนการผลิต หรือดูสาเหตุของสิ่งที่ต้องการปรับปรุง ว่ามีการกระจายมากน้อยเพียงใด มีสาเหตุเนื่องจากอะไร และจะได้ทราบที่มาของปัญหา ในการเก็บรวบรวมข้อมูลมีเทคนิคเครื่องมือหลายชนิดที่ใช้ เช่น ใบตรวจสอบ (Check sheets) ผังพาเรโต (Pareto diagrams) กราฟและรูปแผนภูมต่าง ๆ (Graph and Charts)

2.3.3 ใบตรวจสอบ (Check sheets)

คือ แผ่นที่มีแบบฟอร์ม ซึ่งได้รับการออกแบบช่องว่างต่าง ๆ และพิมพ์มาเรียบร้อย เพื่อให้ผู้บันทึกสามารถลงบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ลงในแต่ละช่องว่างได้อย่างสะดวก ถูกต้อง ไม่ยุ่งยาก และต้องเขียนให้น้อยที่สุด ขณะเดียวกันผู้ที่อ่านข้อมูลหลังจากการจัดบันทึกแล้ว ต้องเข้าใจได้ง่าย และสามาถนำไปใช้งานได้อย่างง่ายดายที่สุด

2.3.4 แผนภูมิพาเรโต (Pareto diagrams)

เป็นแผนภูมิหรือกราฟแท่ง ที่แสดงว่ามูลเหตุใดเป็นมูลเหตุที่สำคัญที่สุด และวิเคราะห์ความมีเสถียรของข้อมูลที่จำแนกประเภท โดยหลักการพาเรโตที่ว่า "ข้อมูลที่มีความเสถียรภาพนั้นจะมีลักษณะข้อมูลที่มีความสำคัญมาก (ประมาณ 80%ของตัววัดความสำคัญทั้งหมด) จะมาจากประเภทข้อมูลจำนวนเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 20% ของประเภทข้อมูลทั้งหมด) ขณะที่ประเภทข้อมูลจำนวนที่เหลือ (ประมาณ 80% ของประเภทข้อมูลทั้งหมด) จะมีความสำคัญเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 20% ของความสำคัญทั้งหมด)"

วิธีการเขียนแผนภูมิพาเรโต เริ่มจากใช้ใบตรวจสอบข้อมูลก่อนแล้วจำแนกแจกแจงข้อมูลเป็นหมวดหมู่ตามสาเหตุต่าง ๆ หลังจากนั้นก็จัดอันดับโดยนำสาเหตุที่มีความถี่สูงสุดไปแสดงไว้ด้านซ้ายสุดในแผนภูมิ และสาเหตุรองลงมาก็แสดงไว้ชิดทางขวามือ นอกจากจะแสดงมูลเหตุที่สำคัญที่สุดและเรียงลำดับความสำคัญแล้ว จะต้องแสดงเส้นกราฟสะสมไว้ด้วย

2.3.5 แผนภูมิควบคุม

ในการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของข้อมูลเพื่อคาดการณ์นี้ นอกจากจะใช้แผนภาพพาเรโตแล้ว ถ้าหากข้อมูลดังกล่าวมีเพียงประเภทเดียว เช่น ค่าใช้จ่ายโดยรวม ค่าแรงดึง น้ำหนักบรรจุ เป็นต้น แล้วมีความจำเป็นจะต้องวิเคราะห์ผ่านแผนภูมิควบคุม (Control chart) ซึ่งอาจจะเป็นรูปภาพ แผนภูมิ หรือ การพล็อตจุด เพื่อแสดงค่าของข้อมูลและความเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลหรือแสดงองค์ประกอบของค่าวัดต่าง ๆ การใช้งานแผนภูมิควบคุมในกระบวนการผลิตควรมีเทคนิคต่อไปนี้ เลือกบริเวณที่จะควบคุมก่อนอื่นก็คือปัญหาอะไรที่จะต้องทำ และเรามีจุดมุ่งหมายอะไร จากการตัดสินปัญหาเราจะสามารถทราบได้ว่าต้องการข้อมูลอะไร พิจารณาใช้แผนภูมิควบคุมแบบไหน อาจจะใช้เป็นแผนภูมิแบบ X-R, X, pn, p, c หรือ U chart ก็ได้ขึ้นอยู่กับโรงงานและผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ถ่ายทอดข้อมูลที่ดี เพราะมีลักษณะพิเศษ คือ ทำได้ง่าย เข้าใจง่าย และอ่านข้อมูลได้รวดเร็ว เปรียบเทียบข้อมูลแต่ละข้อมูลได้ชัดเจน และเป็นแนวทางไปสู่การวิเคราะห์ขั้นสูงต่อไป

ในการปฏิบัติงานลดความสูญเสียนั้นจำเป็นที่จะต้องเรียนรู้การวิเคราะห์ปัญหาอย่างเป็นระบบ เพื่อใช้ในการค้นหาต้นตอของสาเหตุที่มาของปัญหาโดยใช้คำถาม 5W 1H คือ

Who	ใครทำให้เกิดความสูญเสีย?
What	ความสูญเสียเกิดจากอะไร?
Where	ความสูญเสียเกิดขึ้นที่ไหน?
When	ความสูญเสียเกิดขึ้นเมื่อไร?
Why	ทำไมจึงเกิดความสูญเสียขึ้น?
How	ความสูญเสียเกิดขึ้นได้อย่างไร?

ในการวิเคราะห์หาสาเหตุนั้น ผู้ตั้งคำถามจะต้องเรียนรู้ในการตั้งคำถามที่เป็นประโยชน์เพื่อนำไปสู่สาเหตุที่แท้จริงในการแก้ปัญหา อีกวิธีหนึ่งที่นิยมอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาคือ แผนผังก้างปลาหรือแผนผังเหตุและผล (Cause and Effect diagram) เป็นแผนผังที่ใช้ต่อจากแผ่นภูมิพาเรโต ขั้นต่อไปก็เป็นการระดมความคิด (Brainstorming) เพื่อแก้ปัญหาที่เลือกขึ้นมาจากแผนภูมิพาเรโต โดยแสดงผลของสาเหตุของปัญหาไว้ที่ปลายของผังและระหว่างทางถึงปลายของแผนผัง จะแสดงถึงสาเหตุของปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากการระดมความคิด จำแนกออกเป็นแขนงเหมือนก้างปลา สามารถจำแนกชนิดของแผนภาพก้างปลาได้ 3 ประเภทคือ

1. การวิเคราะห์ความแปรผัน (Dispersion Analysis) โดยก้างปลาแบบนี้จะใช้แสดงสาเหตุของการเกิดความแปรผันในคุณภาพที่แสดงด้วยหัวปลาตามลำดับก่อนหลังด้วยการตั้งคำถามว่า "ทำไมจึงเกิดความแปรผัน" ขึ้นเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ โดยผู้สร้างก้างปลาประเภทนี้ จะต้องสำนึกไว้เสมอว่าความผันแปรทุกตัวสามารถตรวจจับและทำให้ลดลงได้ โดยที่จุดแข็งของก้างปลาประเภทนี้จะช่วยแสดงอย่างเป็นระบบถึงปัจจัยที่มีผลต่อความแปรผัน แต่อย่างไรก็ตามก้างปลาแบบนี้จะมีจุดอ่อนคือ ขึ้นอยู่กับวิธีคิดของผู้สร้างค่อนข้างมาก ถ้าหากมีการถามตอบโดยขาดวิธีคิดอย่างเป็นระบบจะทำให้ก้างปลาแบบนี้ไม่มีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ปัญหาแต่อย่างใด

2. การจำแนกตามกระบวนการผลิต (Process Classification) ใช้สำหรับการแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลโดยมีการจำแนกกระบวนการย่อยๆ โดยแผนภาพก้างปลาประเภทนี้มีจุดเด่นคือ สามารถสร้างได้ง่ายและสื่อความหมายได้ดี เพราะสามารถสร้างแผนภาพก้างปลาสาเหตุและผลที่แต่ละกระบวนการย่อยแล้วจึงนำมาต่อกระบวนการกัน แต่มีจุดด้อยคือ ทำให้ดูเหมือนว่ามีสาเหตุซ้อนสาเหตุ (สาเหตุของกระบวนการต้นน้ำ (Upstream) จะเป็นสาเหตุของกระบวนการท้ายน้ำ (Downstream) ด้วย) ทำให้มีสาเหตุมากกว่าหนึ่งปัจจัยซึ่งทำให้ยากต่อการวิเคราะห์

3. การกำหนดรายการของสาเหตุ (Cause Enumeration) แผนภาพก้างปลาแบบนี้จะมีโครงสร้างคล้ายกับแผนภาพการวิเคราะห์แบบแปรผัน แต่จะมีความแตดต่างกันตรงที่ว่า แผนภาพก้างปลาประเภทนี้จะมุ่งสู่รายการสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหา (ตามหัวปลา) ในขณะที่แผนภาพก้างปลาประเภทแรกอาจจะกล่าวถึงอาการหรือสาเหตุของปัญหาก็ได้ โดยความคิดที่ใช้ในการสร้างแผนภาพก้างปลาแบบการวิเคราะห์ความแปรผันจะต้องมาจากหลักการ 3 จริง ของพนักงาน (ประกอบไปด้วย สถานที่ทำงานจริง ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง โดยอาศัยของจริง) แต่ในขณะที่ ความคิดสำหรับแผนภาพก้างปลาแบบกำหนดรายการของสาเหตุจะต้องมาจากเทคโนโลยีเฉพาะด้าน (Intrinsic Technology) แผนภาพก้างปลาประเภทกำหนดรายการของสาเหตุนี้ จะมีประโยชน์คือ ทำให้ทราบรายการของสาเหตุทั้งหมด ทำให้พิสูจน์หาสาเหตุได้ค่อนข้างง่าย แต่มีข้อเสียคือ มีความยากในการสร้างค่อนข้างมาก เพราะนอกจากจะต้องระดมสมองหาสาเหตุที่คาดว่าจะเป็นไปได้ทั้งหมดแล้ว ยังจำเป็นต้องมีการทบทวนอยู่เสมอด้วย เพื่อมั่นใจว่าสาเหตุหลัก ๆ มิได้ตกหล่นไปจากการพิจารณา

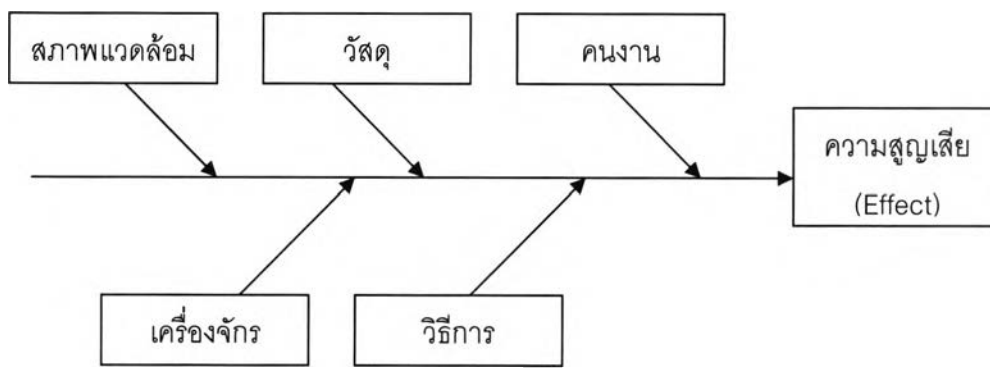
ซึ่งมีหลักการเขียนแผนผังก้างปลาดังนี้

กำหนดปัญหา ที่ต้องการแก้ไขจากแผนภูมิพาเรโต จากปัญหาที่กำหนดจะเป็นผลของสาเหตุที่อยู่ที่ปลายสุดของแผนภูมิก้างปลา แล้วลากเส้นตรงไปตามแนวนอน และสุดปลายเส้นตามแนวนอนจะเป็นผลของสาเหตุ

เขียนต้นเหตุของปัญหา ที่เป็นสาเหตุของปัญหาเล็ก ๆ แตกแยกแขนงออกจากเส้นตามแนวนอนที่ชี้ไปยังผลของสาเหตุ ซึ่งการเขียนสาเหตุของปัญหาจะได้จากการระดมความคิดทั้งหมด โดยเริ่มจากต้นเหตุใหญ่ของปัญหาซึ่งโยทั่วไปจะประกอบด้วย

- คนงาน (Man)
- วัสดุที่ใช้ (Material)
- วิธีการทำงาน (Method)
- เครื่องจักร (Machine)
- สภาพแวดล้อม (Environment)

เมื่อนำมาเขียนเป็นแผนผังก้างปลาของต้นเหตุใหญ่ จะได้ดังรูปที่ 2.5

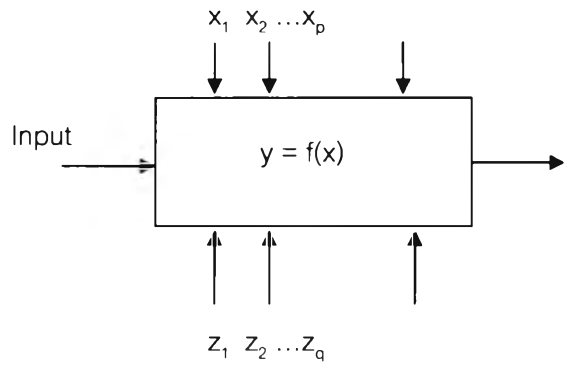


รูปที่ 2.5 รูปแบบแผนผังก้างปลา

2.4 หลักการออกแบบการทดลอง

การทดลองถูกสร้างขึ้นโดยผู้ทดลอง ซึ่งมาจากหลายสาขาอาชีพที่ต้องการค้นหาคำตอบจากกระบวนการหรือระบบที่ผู้ทดลองมีความสนใจ การทดลองในที่นี้อาจหมายถึงการทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่คาดหมายว่าเมื่อเปลี่ยนตัวแปรป้อนเข้าของกระบวนการหรือระบบ จะเป็นผล

ให้ตัวแปรตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในงานทางด้านวิศวกรรม การทดลองมีบทบาทสำคัญในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ การพัฒนากรรมวิธีการผลิตของกระบวนการและการปรับปรุงกระบวนการผลิต บางกรณีอาจต้องการพัฒนากระบวนการที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากแหล่งภายนอกกระบวนการจะมีผลกระทบไม่มากต่อกระบวนการ (Robust Design)



y คือ ตัวแปรตามหรือผลิตภัณฑ์

X,Z คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัย

$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{i\phi}$

ซึ่ง μ คือ ค่าเฉลี่ย

τ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย

ϵ คือ ความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 2.6 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ

โดยทั่วไป การทดลองถูกใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการหรือระบบ (Process or System) รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบของกระบวนการหรือระบบ ส่วนใหญ่จะสามารถมองเห็นภาพของกระบวนการเป็นการรวมกันของเครื่องจักร วิธีการ คน และทรัพยากรอื่น ๆ และเมื่อมีสิ่งป้อนเข้า (Input) สู่กระบวนการจะถูกเปลี่ยนรูปออกมาได้เป็นผลลัพธ์ (Output) ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวอาจมีได้ตั้งแต่หนึ่งคำหรือมากกว่าหนึ่งคำจากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่ากระบวนการหรือระบบยังประกอบด้วยปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ X_1 , X_2 ,...,X_p และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) คือ Z_1 , Z_2 ,...,Z_q

2.4.1 ปัจจัยในกระบวนการผลิต

ปัจจัยในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ประเภท คือ

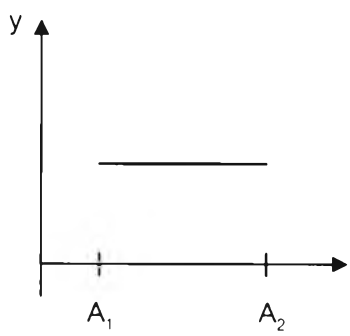
2.4.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors)

ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่คิดว่ามีผลต่อค่าตอบสนองที่สนใจ

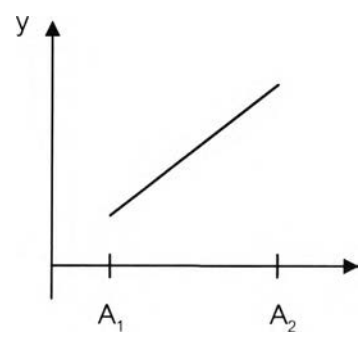
2.4.1.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors)

ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัยพอหรือต้นทุนในการควบคุมสูงมากหรือมีความรู้ไม่เพียงพอ ฯลฯ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมาก ผู้ทำการทดลองควรพยายามกำจัดปัจจัยลักษณะนี้เพื่อให้เปลี่ยนเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ จึงจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ให้ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์หรือไม่ ต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับแล้วทำการทดลอง จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น ให้ y เป็นความยาวของเหล็กปลายสั้นที่มีรูกลวง A เป็นความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง ซึ่งจะสรุปผลเมื่อได้กราฟ แสดงดังรูปที่ 2.7



ปัจจัย A ไม่มีผลต่อผลิตภัณฑ์



ปัจจัย A มีผลต่อผลิตภัณฑ์

รูปที่ 2.7 อิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์

2.4.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลอง มีดังต่อไปนี้

หาตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง y มากที่สุด

กำหนดค่า x ที่ทำให้ค่า y ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ

1. กำหนดค่า x ที่ทำให้ค่า y มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
2. กำหนดค่า x ที่ทำให้ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) Z_1 , Z_2 ,...,Z_q มีผลน้อยมาก

2.4.3 คำจำกัดความ

คำจำกัดความ มีดังต่อไปนี้

1. อิทธิพลหรือผล (Effect) หมายถึง ผลของตัวแปรต้นที่มีตัวแปรตาม
2. ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่งที่คิดว่ามีอิทธิพลต่อผลการทดลองของคุณสมบัติในตัวผลิตภัณฑ์
3. ระดับของปัจจัย (Level of Factor) หมายถึง สภาวะต่าง ๆ ของปัจจัยหนึ่ง ๆ ที่ทำการกำหนดในการทดลอง
4. ปัจจัยรบกวน (Noise Factor) หมายถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดจากผลกระทบเล็กๆ น้อย ๆ และไม่สามารถควบคุมได้

2.4.4 หลักในการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการวางแผนของการทดลองซึ่งข้อมูลในการทดลองนั้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ จนได้ข้อสรุปของวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อทำความเข้าใจในข้อมูล และหาผลสรุปออกมานั่นเอง หลักในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

2.4.4.1 การทำซ้ำ (Replication)

การทำซ้ำคือการทำการทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูลเพื่อกำจัดผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออกไป การทำซ้ำมีความสำคัญ 2 ประการ คือ เพื่อการประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลอง และเพื่อการประมาณค่าเฉลี่ยนั้นให้มีความมั่นใจมากขึ้น

2.4.4.2 การทำแบบสุ่ม (Randomization)

การทำแบบสุ่ม คือการให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวให้เท่ากันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่า ๆ กัน การทำแบบสุ่มสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีดังนี้

1. การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)
2. การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)
3. การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization within Blocks)

2.4.4.3 การบล็อก (Blocking)

การบล็อก คือการจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วงเพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ทำให้การทดลองนั้นมีความเที่ยงตรงมากขึ้น การบล็อกส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีความสม่ำเสมอ จึงจำเป็นต้องแยกเอาผลของวัสดุที่แตกต่างกันออกไปจะสนใจผลการทดลองที่เกิดขึ้นในแต่ละบล็อกเท่านั้น

2.4.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบ และวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งจำเป็น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีการในการเก็บข้อมูลตลอดจนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา

2.4.5.1 การนิยามปัญหา

การนิยามปัญหา เป็นการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวโยงไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.4.5.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย

การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์ที่เคยปฏิบัติมาในการผลิต เพื่อระบุว่ามีปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร เพื่อระบุระดับของปัจจัยในการทดลอง สุดท้ายคือระบุว่าระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Levels), แบบสุ่ม (Random Levels) หรือแบบผสม (Mixed Levels)

1. แบบกำหนด (Fixed Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน
2. แบบสุ่ม (Random Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน
3. แบบผสม (Mixed Levels) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดได้และแบบสุ่ม

2.4.5.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables)

ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทำการทดลองต้องมั่นใจว่าเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการที่ทำการศึกษา ค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าวัดจะใช้เป็นตัวแปรตอบสนอง โดยทั่วไปจะเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองเพียงค่าเดียว แต่ก็มีบางการทดลองที่ทำการวัดค่าตัวแปรตอบสนองหลายค่า การวัดค่าจะต้องมีความแม่นยำรวมทั้งความถูกต้องของเครื่องมือวัดด้วย

2.4.5.4 การเลือกแบบการทดลอง

การเลือกแบบการทดลองจะต้องพิจารณาถึงขนาดของข้อมูลหรือจำนวนที่ใช้ในการทำซ้ำ (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับในการทดลอง ข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่จำเป็น ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวโยงกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง

2.4.5.5 การดำเนินการทดลอง

เมื่อทำการทดลอง ต้องทำการตรวจสอบการทดลองอย่างระมัดระวังว่ามีการดำเนินการตามที่วางไว้ ข้อควรระวังในการทำการทดลองคือความถูกต้องของกระบวนการเครื่องมือวัด และ

ความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความผิดพลาด (Error) น้อยที่สุด เพราะความผิดพลาดในขั้นตอนนี้มักจะทำให้การทดลองล้มเหลวได้

2.4.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลจากการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลอาจใช้ซอฟต์แวร์ (Software) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์อยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ วิธีการถูกนำมาใช้อย่างได้ผลคือกราฟอย่างง่ายโดยช่วยในการวิเคราะห์และตีความข้อมูลจากการทดลอง การตรวจสอบความเพียงพอของโมเดล (Model Adequacy Checking) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อความเชื่อมั่นของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลอง จึงจำไว้ว่าวิธีการทางสถิติไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลได้แน่นอน เพียงแต่เป็นเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่นโดยระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ดีการใช้หลักการทางสถิติช่วยให้การตัดสินใจเป็นนามธรรมมากขึ้น

2.4.5.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เมื่อข้อมูลถูกวิเคราะห์ จะต้องสรุปผลของการวิเคราะห์ซึ่งอาจแสดงในรูปแบบกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะจากการทดลอง เมื่อสรุปผลแล้ว ควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

2.4.6 การใช้หลักการทางสถิติในการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการทดลองนั้น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจในประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ผู้ทำการทดลอง ต้องมีความรู้เกี่ยวกับงานในสาขาที่จะทำการทดลองโดยใช้ความรู้ที่ไม่ใช่วิธีการทางสถิติในการพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้น
2. ผู้ทำการทดลอง ควรเลือกการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ที่ง่ายและไม่ซับซ้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ผู้ทำการทดลอง ควรเข้าใจถึงความแตกต่างระหว่างนัยสำคัญในทางปฏิบัติและนัยสำคัญทางสถิติ เพราะว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในการทดลอง ซึ่งเรียกว่าความแตกต่างทางด้านสถิตินั้นไม่สามารถประกันได้ว่าจะมีความแตกต่างมากเพียงพอที่จะใช้ในทางปฏิบัติ และจะต้องคำนึงถึงด้นทุนว่าคุ้มค่าในการลงทุนหรือไม่

4. ผู้ทำการทดลอง ควรทำการทดลองซ้ำๆ หลายครั้งเพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลที่ได้ถูกต้อง

2.4.7 **การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ** (Hypothesis Testing)

2.4.7.1 ความหมายของสมมติฐานทางสถิติ

สมมติฐาน คือ ความเชื่อของบุคคลใดบุคคลหนึ่งหรือของกลุ่มบุคคลใดๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าสมมติฐานเป็นสิ่งที่บุคคลหรือองค์กรคาดว่าจะเกิดขึ้น ความเชื่อหรือสิ่งที่คาดนั้นอาจเป็นจริงหรือไม่ก็ได้

2.4.7.2 ชนิดของสมมติฐาน

สมมติฐานแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. **สมมติฐานหลัก** (Null Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์ H_0

2. **สมมติฐานอื่นๆ** (Alternative Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์ H_1

สมมติฐานหลักที่ตั้งขึ้น เพื่อทดสอบว่าจะยอมรับหรือไม่ว่าเป็นจริง การปฏิเสธไม่ยอมรับสมมติฐานหลักก็คือการยอมรับสมมติฐานอื่นๆ ว่าเป็นจริง

2.4.7.3 ประเภทของสมมติฐาน

สมมติฐานแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

สมมติฐานเดี่ยว (Simple Hypothesis) คือ **สมมติฐาน**ประเภทที่กำหนดค่าเฉพาะของพารามิเตอร์เจาะจงลงไปว่ามีค่าเท่ากับเท่าใด

สมมติฐานรวม (Composite Hypothesis) คือ สมมติฐานประเภทที่มีค่าพารามิเตอร์หลายๆค่าสมมติฐานหลักและสมมติฐานอื่นๆ อาจเป็นสมมติฐานประเภทสมมติฐานเดี่ยวหรือสมมติฐานรวมก็ได้ แสดงตามตัวอย่างดังต่อไปนี้

2.4.7.4 ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน

ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error) หรือเรียกโดยทั่วไปว่า ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) ใช้สัญลักษณ์ α เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานอื่นๆ โดยที่สมมติฐานหลักเป็นจริง

ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) ใช้สัญลักษณ์ β เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานหลักและปฏิเสธสมมติฐานอื่นๆ โดยที่สมมติฐานอื่นๆ เป็นจริง

ในการทดสอบแต่ละครั้ง ผู้ทดสอบย่อมต้องการให้มีความผิดพลาดทั้งสองประเภท (α และ β) น้อยที่สุด แต่เมื่อค่าของ α ลดลง ค่าของ β จะเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกัน เมื่อค่าของ α เพิ่มขึ้น ค่าของ β จะลดลง ดังนั้นเมื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดทั้งสองประเภทให้ลดลงได้พร้อมๆกัน ทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้มากขึ้น

2.4.7.5 การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง

การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง สามารถแบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Effects Model) จะทำการตรวจสอบว่าปัจจัยต่างๆ มีผลกระทบต่อกระบวนการหรือไม่ สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการ

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อกระบวนการ

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์ μ เมื่อ μ คือค่าเฉลี่ยของปัจจัย

H_0 : $\mu_1 = \mu_2 = \ldots = \mu_\alpha$

H_1 : $\mu_i = \mu_\phi$; อย่างน้อยที่สุดหนึ่งคู่ (i,j)

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์ τ เมื่อ τ คือค่าเฉลี่ยของปัจจัย

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \ldots = \tau_\alpha = 0$$

$$H_1 : \tau_i = 0 \text{ ; อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า i}$$

2. การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบแบบสุ่ม (Random Effects Model) จะทำการตรวจสอบว่า ความแปรปรวน (σ^2_τ) จะมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ เพราะไม่สามารถหาค่าของอิทธิพล (Effect) ของระดับของปัจจัยที่เกิดขึ้นแน่นอน สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

$$H_0 : \sigma^2_\tau = 0$$

$$H_1 : \sigma^2_\tau > 0$$

3. การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixed Effects Model) เมื่อปัจจัยในการทดลองมีลักษณะเป็นแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Levels) และแบบสุ่ม (Random Levels) รวมกันอยู่ จะต้องใช้การทั้งสมมติฐานของ 2 กรณีที่กล่าวข้างต้น โดยแยกตามลักษณะรูปแบบของปัจจัยนั้นๆ

2.4.8 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองสามารถแบ่งออกได้ ดังต่อไปนี้

2.4.8.1 แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design)

แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียวจะต้องเก็บข้อมูลโดยระดับของปัจจัยหรือทรีทเม้นต์ (Treatment) เพื่อทดสอบว่าระดับของปัจจัยต่างๆ มีผลต่อค่าตอบสนองหรือไม่ โดยแผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD)เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียว แต่จะทำการเปรียบเทียบระหว่างระดับของปัจจัย มีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ มีผลกระทบน้อย และไม่มีปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) โดยการทดลองจะใช้หลักการทำแบบสุ่ม (Randomization) และการทำซ้ำ (Replication)

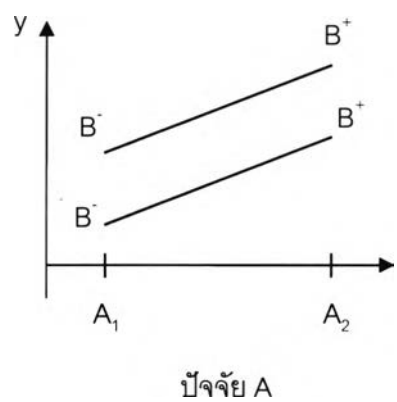
2. การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ภายในบล็อก (Completely Randomized Block Design) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียวและมีปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) ที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง และต้องทำการกำจัดปัจจัยรบกวนดังกล่าวทิ้ง

บางครั้งปัจจัยรบกวนนั้นไม่ทราบและไม่สามารถควบคุมได้ จึงใช้วิธีการบล็อก (Blocking) ในการกำจัดผลของปัจจัยรบกวนออกได้

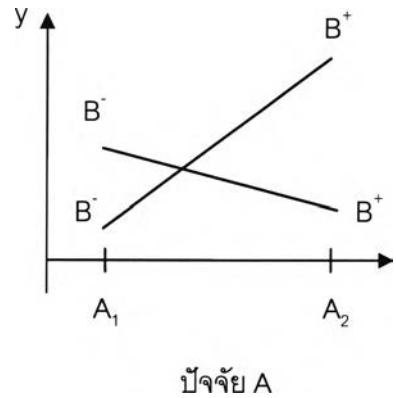
2.4.8.2 แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design)

แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นๆ จึงเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้ในการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ตัวอย่างเช่น กรณี 3 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย 3 ระดับ ปัจจัย B ประกอบด้วย 3 ระดับ และปัจจัย C ประกอบด้วย 3 ระดับ ในการทดลองทำซ้ำ (Replicate) 2 ครั้ง จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด 3x3x3x2 = 54 การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล จึงกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง(Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) และหากผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งเรียกว่าการมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แนวคิดดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8และ รูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย



รูปที่ 2.9 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า เส้นของ B^- และ B^+ จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสอง ในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่า เส้นของ B_- และ B_+ ไม่ขนานกัน และสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะเช่นนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสำคัญ (Significant) ของอันตรกิริยา อย่างไรก็ตามกราฟเช่นนี้ไม่ควรนำมาใช้แทนเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลในทางสถิติ เพราะว่าการตีความจากกราฟค่อนข้างที่จะขึ้นกับความคิดเห็นส่วนบุคคล ซึ่งอาจทำให้เกิดการเข้าใจผิดหรือวิเคราะห์ผิดพลาดได้

รูปแบบของแผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลยังแบ่งย่อยในกรณีที่แผนการทดลองมีลักษณะเฉพาะตัวอีกดังต่อไปนี้

1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k (2^k Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k เป็นการทดลองที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ –1 หรือ (-) และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ (+) การทดลองแบบนี้เหมาะสำหรับการทดลองที่มีปัจจัยมากๆ เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเบื้องต้นจะช่วยในการทดลองที่เจาะลึกต่อไป

2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3^k (3^k Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3^k เป็นการทดลองที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ –1 หรือ (-) ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์ 0

หรือ (0) และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ (+) การทดลองแบบนี้เหมาะสมเมื่อผู้ทดลองกำลังสนใจกับผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

3. การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล เป็นการทดลองที่ใช้ในกรณีเมื่อการทดลองมีหลายปัจจัย ทำให้ต้องเสียเวลาในการเก็บข้อมูลมาก ดังนั้นจะทำให้ความสัมพันธ์ของทรีทเม้นต์ (Treatment Combination) บางตัวถูกตัดออกไปโดยอาศัยหลักการของการคอนฟาวด์ (Confound) ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนั้นลดลง

2.4.8.3 แผนการออกแบบการทดลองอื่น ๆ

แผนการออกแบบการทดลองอื่นๆ มีดังต่อไปนี้

1. แผนการออกแบบการทดลองลาตินสแควร์ (Latin Square Design)
2. แผนการออกแบบการทดลองเนสเต็ด (Nested Design)
3. แผนการออกแบบการทดลองสปิทพล็อท(Split-Plot Design)
4. แผนการออกแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

2.4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนคือเทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความแปรผัน (Variance) ที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความแปรผัน ความแปรผันที่เกิดขึ้นในข้อมูล เขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล

สมการดังกล่าวได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลนั้นไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติ หรือที่เรียกว่าความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) ของข้อมูลแต่เพียงอย่างเดียว แต่น่าจะมาจากปัจจัย (Factor) หนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆปัจจัยทำให้เกิดความแปรผัน ดังนั้นความแปรผันทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความแปรผันของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม โดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่ได้มีแค่ค่าเดียวแต่จะมีหลายๆค่าซึ่งเรียกว่าระดับ (Level) ของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตามจริงๆ

แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทำการทดลอง (Treatment) กำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่างๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความแปรผันโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง จึงมักจะต้องทำการทวนซ้ำ (Replicated) ให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัย

ถ้าเป็นการเจาะจง รูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Effect Model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปได้เฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดสอบ แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกแบบสุ่ม รูปแบบของการทดสอบจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปอิทธิพลโดยรวม (in General) ของปัจจัย จาก

ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล

หรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SS_T = SS_{Tr} + SS_E$$

โดยที่ SS_T คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด

SS_{Tr} คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัย

SS_E คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวัดความแปรผันจากข้อมูลในการทดลองนั้น จะใช้ตัวประมาณค่าของความแปรผัน (Variance) ที่ดีที่สุดคือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean Square: MS) โดยที่ค่า MS สามารถคำนวณได้จาก

$$MS = SS/DF$$

เมื่อ SS คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)

และ DF คือ ขั้นของความอิสระ

สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่ใช้นำมาเปรียบเทียบค่าความแปรผันคือ

$$F = MS_{Tr}/MS_E$$

เมื่อ MS_{Tr} คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย

MS_E คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม

เปรียบเทียบค่าสถิติสำหรับทดสอบ F กับค่า F_{α,ν_1,ν_2}

ถ้า $F >= F_{\alpha,\nu_1,\nu_2}$ ปฏิเสธ H_0

ถ้า $F < F_{\alpha,\nu_1,\nu_2}$ ยอมรับ H_0

เมื่อ a คือระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)

ν_1 คือ ขั้นของความอิสระของปัจจัย

ν_2 คือ ขั้นของความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

2.4.9.1 รูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ (Linear Statistical Model)

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นจำเป็นต้องมีการสร้างรูปแบบเชิงเส้นขึ้นด้วย ซึ่งลักษณะรูปแบบเชิงเส้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผนการออกแบบการทดลอง จะแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีที่มี 3 ปัจจัย รูปแบบเชิงเส้นคือ

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_\phi + \gamma_\kappa + (\tau\beta)_{i\phi} + (\tau\gamma)_{i\kappa} + (\beta\gamma)_{\phi\kappa} + (\tau\beta\gamma)_{i\phi\kappa} + \varepsilon_{i\phi\kappa\lambda}$$

โดยที่ i = 1,2,3,...,a (ระดับของปัจจัย A)

j = 1,2,3,...,b (ระดับของปัจจัย B)

k = 1,2,3,...,c (ระดับของปัจจัย C)

l = 1,2,3,...,n (จำนวนซ้ำ)

และ y_{ijkl} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

τ_i คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย A

β_ϕ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย B

γ_κ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย C

$(\tau\beta)_{i\phi}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A และ B

$(\tau\gamma)_{i\kappa}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A และ C

$(\beta\gamma)_{\phi\kappa}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย B และ C

$(\tau\beta\gamma)_{i\phi\kappa}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A,B และ C

$\varepsilon_{i\phi\kappa\lambda}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยข้อมูลจะถูกนำมาคำนวณและใส่ไว้ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
A	SS_A	a-1	SS_A/DF	MS_A/MS_E
B	SS_B	b-1	SS_B/DF	MS_B/MS_E
C	SS_C	c-1	SS_C/DF	MS_C/MS_E
AB	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	SS_{AB}/DF	MS_{AB}/MS_E
AC	SS_{AC}	(a-1)(c-1)	SS_{AC}/DF	MS_{AC}/MS_E
BC	SS_{BC}	(b-1)(c-1)	SS_{BC}/DF	MS_{BC}/MS_E
ABC	SS_{ABC}	(a-1)(b-1)(c-1)	SS_{ABC}/DF	MS_{ABC}/MS_E
Error	SS_E	Abc(n-1)	SS_E/DF	
Tatal	SS_T	Abcn-1		

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\sum_{l=1}^{n} y_{ijkl}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn}$$

$$SS_A = \frac{1}{bcn}\sum_{i=1}^{a} y_{i...}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn}$$

$$SS_B = \frac{1}{acn}\sum_{j=1}^{b} y_{.j..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn}$$

$$SS_C = \frac{1}{abn}\sum_{k=1}^{c} y_{..k.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn}$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} y_{ij..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn}\sum_{i=1}^{a}\sum_{k=1}^{c} y_{i\cdot k\cdot}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_C$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c} y_{\cdot jk\cdot}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_B - SS_C$$

$$SS_{ABC} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c} y_{ijk\cdot}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{ABC}$$

การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง จะใช้ค่าสถิติทดสอบที่มีการกระจายแบบเอฟ (F-Distribution) โดยกำหนดค่า α ก่อน หากค่า $F < F_{\alpha,v_1,v_2}$ ยอมรับ H_0 นั่นคือปัจจัยนั้นไม่มีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น (1-α)% แต่ถ้าหาก $F >= F_{\alpha,v_1,v_2}$ ปฏิเสธ H_0 นั่นคือปัจจัยนั้นมีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น (1-α)%

2.4.9.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการทางสถิติหรือไม่ โดยอาศัยข้อสมมติฐานที่สำคัญซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

สมการเชิงเส้นตรง : $y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{i\phi}$

โดยที่ y_{ij} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

τ_i คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย

$\varepsilon_{i\phi}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม หรือความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ σ^2 มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่า ซึ่งเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้

ε_{ij} - NID(0, σ^2) ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริง กระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ก็จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับที่ถูกต้อง

ในทางปฏิบัติ สมมติฐานมักจะไม่เป็นเช่นนี้ ซึ่งจะเชื่อถือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดยสามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต j ของระดับที่ i ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}$$

โดยที่ $\hat{y}_{ij}$ คือค่าประมาณของค่าสังเกต y_{ij} ซึ่งหาได้จาก

$$\hat{y}_{ij} = \mu - \tau_i$$

$$\hat{y}_{ij} = \bar{y}_{..} + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})$$

$$\hat{y}_{ij} = \bar{y}_{i.}$$

จากสมการ ค่าประมาณของค่าสังเกตใดๆ ในระดับที่ i ก็คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

2.4.9.2.1 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยนำค่าส่วนตกค้าง (Residual) ไปทดสอบ ใช้วิธีการดังต่อไปนี้

1. การทดสอบแบบไคร์สแควร์ (χ_2-Goodness of Fit Test)
2. การทดสอบแบบโคลโกโมรอฟ-สเมอร์นอฟ (Kolgomorov-Smirnov Test)
3. การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (NOPP)

2.4.9.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ ทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล แล้วดูลักษณะของข้อมูลว่ามีการกระจายเป็นอิสระหรือมีลักษณะเป็นรูปแบบใดๆ

2.4.9.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (fitted Value) ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมานี้จะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมานี้จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมานี้มีลักษณะเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับ (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลนั้นไม่มีความเสถียรของความแปรปรวนหรือไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล

เมื่อทราบแบบจำลองการถดถอยแล้ว จะต้องตรวจสอบขนาดของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (The Coefficient of Determination: R-Square)

ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) แสดงโดยใช้ค่าสัดส่วนของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ต่อความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในตัวแปรตามดังนั้น R-Square จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ถ้า R-Square มีค่าเข้าใกล้ 0 เช่น R-Square = 0.1 แสดงว่า 10% ของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ส่วนอีก 90% ที่เหลือควรจะเนื่องมาจากปัจจัยอื่นๆ

ถ้า R-Square มีค่าเข้าใกล้ 1 เช่น R-Square = 0.9 แสดงว่า 90% ของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ส่วนอีก 10% ที่เหลือควรจะเนื่องมาจากปัจจัยอื่นๆ

ถ้า R-Square มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

ถ้า R-Square มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

2.4.10 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง เป็นเครื่องมือสำคัญในระบบงานของด้านวิศวกรรม สำหรับการเพิ่มสมรรถนะของกรรมวิธีการผลิตของกระบวนการ ซึ่งมักจะทำให้เกิดการพัฒนาในกระบวนการใหม่ การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองในการพัฒนากระบวนการสามารถพิจารณาในรูปแบบต่อไปนี้

การเพิ่มผลผลิตของกระบวนการ

การลดความผันแปรของกระบวนการ และกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ต้องการ

การลดเวลาที่ต้องใช้ในการพัฒนา

การลดต้นทุนโดยรวมของกระบวนการ

วิธีการออกแบบการทดลอง มีบทบาทอย่างมากในการออกแบบทางวิศวกรรม ทำให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ออกมา การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการออกแบบทางวิศวกรรม จะรวมถึงสิ่งต่อไปนี้

- การประเมินและเปรียบเทียบของพื้นฐานการออกแบบ
- การประเมินทางเลือกของวัสดุ
- เลือกพารามิเตอร์ของการออกแบบที่เมื่อพารามิเตอร์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงจะไม่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์
- หาพารามิเตอร์ในการออกแบบที่มีผลต่อสมรรถภาพของผลิตภัณฑ์

การใช้การออกแบบการทดลองในลักษณะนี้ สามารถส่งผลต่อผลิตภัณฑ์คือ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายกว่า มีความน่าเชื่อถือ มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า และระยะเวลาในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่สั้นกว่า

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุรสิทธิ์ ทองทวีชัยกิจ (2542)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาหาอิทธิพลของสภาวะการตัดในแต่ละขั้นตอนย่อยสำหรับกระบวนการเจียระไนทรงกระบอก (แบบยันศูนย์) ที่มีผลต่อความหยาบโดยอาศัยหลักการออกแบบการทดลองทางสถิติ ซึ่งเมื่อทำการทดลองและวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย คือ อัตราการป้อนล้อหินเจียระไนเข้าหาชิ้นงานในช่วงการเจียระไนละเอียด, เวลาหยุดนิ่งหลังการเจียระไนในช่วงการเจียระไนละเอียดพิเศษ และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยทั้งสอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หากอัตราการป้อนล้อหินเจียระไนเข้าหาชิ้นงานในช่วงการเจียระไนละเอียดพิเศษมีค่าสูง หรือป้อนหนัก(เร็ว) จะทำให้ร่องรอยของการตัดมีลักษณะลึก หากเวลาหยุดนิ่งหลังการเจียระไนในช่วงการเจียระไนละเอียดพิเศษไม่นานพอที่จะให้เม็ดขัดเข้ามากำจัดยอดของรอยตัด ส่งผลให้ผิวของชิ้นงานมีลักษณะหยาบ

สรียา กสิกพันธุ์ (2543)

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงและความคงขนาดของแผ่นพาร์ทิเคิล และหาเงื่อนไขส่วนผสมที่เหมาะสมในการนำเศษแผ่นพาร์ทิเคิลจากการตัดริมมาเป็นส่วนผสมในการผลิตแผ่นพาร์ทิเคิล โดยอาศัยหลักการออกแบบการทดลอง เพื่อเพิ่มมูลค่าของเศษแผ่นพาร์ทิเคิลที่เหลือจากการใช้ประโยชน์ โดยแผ่นพาร์ทิเคิลที่ผลิตได้ต้องมีคุณภาพตรงตามมาตรฐาน และเหมาะสมต่อการใช้งานการวิจัยเริ่มจากทำการทดลองศึกษาปัจจัย 4 ปัจจัย คือ ปริมาณเศษแผ่นพาร์ทิเคิล ปริมาณกาวผิว ปริมาณกาวไส้ และปริมาณสารเร่งแข็ง ปัจจัยเหล่านี้ถูกนำไปทดลองเบื้องต้น พบว่าปริมาณสารเร่งแข็งก่อให้เกิดปัญหาในการผลิต จึงพิจารณาปัจจัยที่เหลือเพียง 3 ปัจจัย และนำปัจจัยเหล่านี้ไปทำการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ โดยทำการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความคงขนาดของแผ่นพาร์ทิเคิลตามข้อกำหนดของ มอก.876-2532 และทำการศึกษาวิเคราะห์หาปัจจัยและส่วนผสมที่เหมาะสมจากผลการทดลอง แล้วนำไปทดลองผลิตจริง

วิชาญ วรรณา (2545)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น และเสนอเงื่อนไขที่เหมาะสม (Suitable Condition) ที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่เป็นไปได้งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการพิจารณาหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นโดยใช้การระดมสมอง ทำให้สามารถเลือกปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัยที่น่าจะมีผลอย่างมากต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นสำหรับกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง ปัจจัยเหล่านี้ประกอบด้วย (1) อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่หนึ่ง (2) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง และ (3) อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช โดยใช้แผนการทดลอง 2k แฟคทอเรียลในการทดลองเบื้องต้นโดยทุกระดับของปัจจัย 2 ระดับ เพื่อตัดปัจจัยที่ไม่น่าจะมีผลต่อสิ่งที่ต้องการศึกษาออกไป จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยทั้ง 3 ชนิดมีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น การทดลองแบบแฟคทอเรียลได้ถูกนำมาใช้อีกครั้งโดยเพิ่มระดับของปัจจัยเป็น 3 ระดับเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด

อลงกต กาญจนคช (2546)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ปรับปรุงความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ใช้ในการผลิตกล่องกระดาษ โดยใช้ประยุกต์วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่มีความสำคัญมาก อีกทั้งยังเป็นค่าสำคัญที่ลูกค้าใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษลูกฟูกที่นอกเหนือจากความสวยงามของการพิมพ์สีบนผิวกล่องด้านนอก จากการศึกษาสภาพการผลิตแผ่นลูกฟูกพบว่ามีรายละเอียดและความซับซ้อนของกระบวนการค่อนข้างมาก โดยก่อนปรับปรุงกระบวนการมีค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) เฉลี่ยที่ 891 kg/33.2cm^2 และมีค่าดัชนีความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการแบบระยะสั้น (C_{pk}) เท่ากับ 0.63 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ดี จึงสมควรที่จะปรับปรุงให้สูงขึ้น โดยขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัยจะมีการนำเครื่องมือต่างๆเข้ามาวิเคราะห์และกลั่นกรองปัจจัย ก่อนที่จะไปทำการออกแบบการทดลองซึ่งประกอบด้วย แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ผังกลุ่มความคิด (Affinity Diagram) การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram) การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis) และการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test) ตามลำดับ และผลที่ได้จากการวิเคราะห์เหลือปัจจัยทั้งหมด 9 ปัจจัย สำหรับนำไปออกแบบการทดลองเพื่อ

I 37232145

กรองปัจจัย (Screening DOE) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัย พบว่ามีปัจจัยที่มีนัยสำคัญแบบอันตรกิริยา 6 ปัจจัย รวมทั้งรูปแบบสมการมีลักษณะของส่วนโค้งเกิดขึ้น (Curvature) จึงนำทั้ง 6 ปัจจัยดังกล่าวซึ่งประกอบด้วย สัดส่วนแป้งแห้งSF(Solid Content of SF) สัดส่วนแป้งแห้งDF(Solid Content of DF) อัตราส่วนความเร็วลูกแป้งกับลูกลอนล่างของDF(G/L Speed Ratio:DF) แรงลมดูด (Suction Fan) ระยะห่างระหว่างลูกปาดกับลูกแป้งของDF(Gap Glue Roll& Doctor Roll: Double facer) และระยะการกดระหว่างลูกกลิ้งทับผ้าใบกับแผ่นความร้อน(Gap Weight Roll)ไปทำการออกแบบการทดลองพื้นผิวตอบ (Response Surface Method) เพื่อหาการกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมของทั้ง 6 ปัจจัย

สุรชัย จิรศักดิ์สิริกุล (2548)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ค้นหาเหตุปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดของเสียในการผลิตแผ่นเทอร์โมเซตติงลามิเนต การดำเนินงานวิจัยทำโดยการศึกษากระบวนการผลิตทุก ๆ ขั้นตอน และเก็บข้อมูลพร้อมกับการจำแนกประเภทของเสียของผลิตภัณฑ์ จากนั้นทำการค้นหาและวิเคราะห์สาเหตุการเกิดของเสีย ผลของการปรับปรุงพบว่าสามารถลดของเสียลงได้