

## แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 แล้วว่าการศึกษางานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการลดต้นทุนและลดปริมาณความสูญเสีย Scrap จากการฉีดพลาสติก รวมทั้งการศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างเม็ดพลาสติกใหม่กับ Scrap และศึกษาอุณหภูมิในการฉีดพลาสติก (ส่วนปลาย) ที่มีอิทธิพลต่อค่าของแรงกระแทก (Impact Test) โดยผู้วิจัยได้มีแนวความคิดที่จะประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง ดังนั้น ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษานี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพลาสติก
  - 1.1 ชนิดของพลาสติก
  - 1.2 กระบวนการผลิตพลาสติก
2. กระบวนการฉีดพลาสติก
  - 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก
  - 2.2 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก
3. การทดสอบด้วยแรงกระแทก (Impact Test)
4. ทฤษฎีและการวิเคราะห์เชิงสถิติ
  - 4.1 การทดสอบสมมติฐาน
  - 4.2 อำนาจทดสอบข้อมูล (Power of Test)
  - 4.3 การทดลองปัจจัยเดียวและการวิเคราะห์ความแปรปรวน
5. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)
  - 5.1 แนวทางในการออกแบบการทดลอง
  - 5.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟรคทอเรียล
  - 5.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟรคทอเรียลแบบสองระดับ
6. หลักการ 3R
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

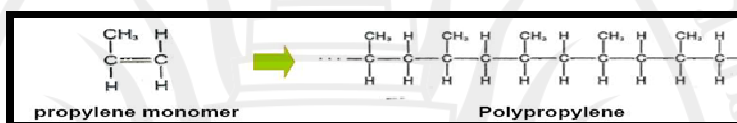
### ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพลาสติก

วันวิสา คำนวณตระกูลศิลป์ (2552 : 7) กล่าวว่า พลาสติกเป็นสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบสำคัญ คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน จัดเป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่ประกอบด้วยโมเลกุลเล็กที่ต่อเนื่องซ้ำ ๆ กัน

### ชนิดของพลาสติก

ชนิดของพลาสติก แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. เทอร์มอพลาสติก (Thermoplastics) หมายถึง พลาสติกที่สามารถอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนและเปลี่ยนกลับเป็นสภาพเดิมเมื่อเย็นตัวลง จึงสามารถนำมาใช้ใหม่ได้ เพราะความร้อนไม่ทำให้โครงสร้างของพลาสติกเปลี่ยนไป ได้แก่ Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), Polyvinyl Chloride (PVC), Polyamide (PA), Polyester (PET) และ Polystyrene (PS)



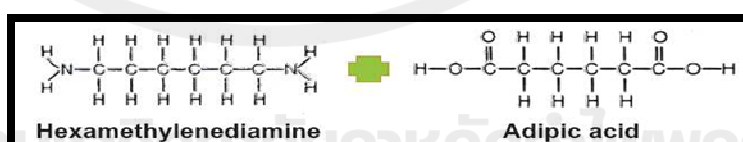
ภาพประกอบ 2 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรไพลีน (Polypropylene : PP)

ที่มา : วันวิสา คำนวณตระกูลศิลป์. 2552 : 7

พอลิโพรไพลีน (Polypropylene : PP) ผลิตจากก๊าซโพรพิลีน เป็นพลาสติกที่มีความมันวาวสูงทนทานความร้อนได้สูง ดังโครงสร้างในภาพประกอบ 2

สมบัติทั่วไปมีลักษณะขรุขระ ทนทานต่อการขีดข่วนคงตัวไม่เสีรูปง่าย เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีแม้ที่อุณหภูมิสูง ทนทานต่อสารเคมีส่วนมาก แต่สารเคมีบางชนิดอาจทำให้พองตัวหรืออ่อนนุ่มได้ มีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิโพรไพลีนที่พบเสมอคือ อุปกรณ์ของรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรม อุปกรณ์ทางการแพทย์ขูดใส่สารเคมี เป็นต้น

โพลีเอไมด์ (Polyamides : PA or Nylon) ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง Di-Acids และ Di-Amines เกิดเป็นพอลิเมอร์สายยาว มีความเหนียว ทนทานต่อแรงดึง ทนทานต่อการขูดขีด มีผิวลื่น ทนทานต่อสารเคมี ทนทานต่อไขมัน สก๊ตกันก๊าซได้สูง จุดหลอมตัวสูง ข้อเสียคือดูดซึบความชื้นง่ายและทำให้คุณสมบัติเปลี่ยน ดังโครงสร้างในภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 แสดงโครงสร้างทางเคมีของโพลีเอไมด์ (Polyamides or Nylon)

ที่มา : วันวิสา คำนวณตระกูลศิลป์. 2552 : 8

2. เทอร์โมเซต (Thermoset) หมายถึงพลาสติกที่เมื่อนำขึ้นรูปโดยใช้ความร้อนและความดันแล้ว จะไม่อ่อนตัวลงอีก เนื่องจากความร้อนทำให้โครงสร้างของพลาสติกเปลี่ยนแปลงไป จึงไม่สามารถนำมาหลอมใช้ใหม่ได้ เช่น Polyester, Phenol Formaldehyde (PF) เป็นต้น

### กระบวนการผลิตพลาสติก

สารานุกรมไทย สำหรับเยาวชน (2554 : 255) กระบวนการผลิตพลาสติก แบ่งออกเป็น 5 กระบวนการดังนี้

1. การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) เป็นวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยการฉีดพลาสติกที่กำลังหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยความดันสูง เครื่องจักรที่ใช้ในการนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และเป็นที่ยอมรับหลาย ดังแสดงในภาพประกอบ 4 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ

1.1 ฮอปเปอร์ (Hopper) อุปกรณ์ส่วนนี้มีลักษณะเป็นกรวยขนาดใหญ่ เป็นส่วนที่ใช้บรรจุเม็ดพลาสติกและสารเติมแต่ง เพื่อป้อนเข้าเครื่องฉีดพลาสติก

1.2 กระบอกฉีดและสกรู (Injector and Screw) เป็นส่วนสำคัญของเครื่องฉีดพลาสติกทำหน้าที่หลอมเหลวพลาสติก และสร้างแรงดันเพื่อฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ ประกอบด้วยกระบอกตรงติดอยู่กับที่ส่วนต้นของกระบอกเป็นที่ติดตั้งฮอปเปอร์ ตรงส่วนกลางและส่วนปลายของกระบอกมีเครื่องให้ความร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ปลายของกระบอกจะต่อเข้ากับหัวฉีดภายในของกระบอกนี้เป็นสกรูที่มีความยาวสั้นกว่ากระบอกเล็กน้อย มีลักษณะเป็นเกลียวหยาบหมุนป้อนส่วนผสมของพลาสติกให้เคลื่อนที่เข้าสู่กระบอกสามารถเคลื่อนถอยหลังและดันกลับ เพื่อเพิ่มแรงดันให้พลาสติกหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์

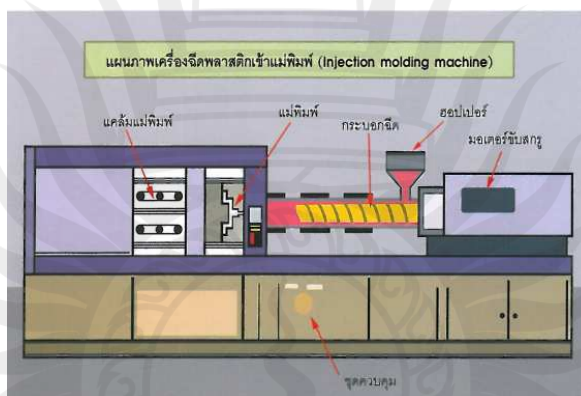
1.3 หัวฉีด (Nozzle) เป็นส่วนต่อปลายกระบอกฉีดพลาสติกเข้ากับช่องทางไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์หัวฉีดมีรูขนาดเล็กเพื่อให้พลาสติกหลอมเหลวไหลผ่านเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ด้วยความรวดเร็ว

1.4 มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรู (Driven Motor) มอเตอร์ขับเคลื่อน อาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหรือมอเตอร์ไฮดรอลิก สำหรับหมุนสกรูและขับเคลื่อนสกรูเพื่อฉีดพลาสติกที่กำลังหลอมเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์

1.5 แม่พิมพ์ (Mold) เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นช่องว่างที่มีรูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต แม่พิมพ์โดยทั่วไปมักออกแบบให้มี 2 ชิ้น เพื่อให้สะดวกต่อการถอดผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์ นอกจากนี้ต้องมีช่องทางไหลของพลาสติกหลอมเหลวต่อจากหัวฉีดเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์เรียกว่า สปรู (Sprue) ในแม่พิมพ์ที่มีหลายช่อง (เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ครั้งละหลายชิ้น) จะต้องมีช่องทางแยกจากสปรูเข้าสู่แม่พิมพ์แต่ละช่อง เรียกว่า รันเนอร์ (Runner)

1.6 ตัวหนีบยึดแม่พิมพ์ (Hydraulic Clamp Unit) มักเรียกกันว่า แคล้ม เป็นกลไกสำหรับเปิดและปิดฝาแม่พิมพ์ขับเคลื่อนด้วยกำลังไฮดรอลิกอุปกรณ์ส่วนนี้ยังรวมทั้งอุปกรณ์ทำความร้อนเพื่ออุ่นแม่พิมพ์ก่อนฉีด และอุปกรณ์ทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิแม่พิมพ์ทำให้ผลิตภัณฑ์แข็งตัวก่อนถอดออกจากแม่พิมพ์

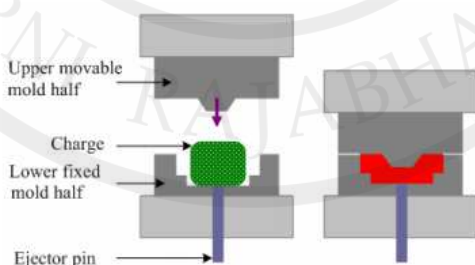
1.7 ชุดควบคุมกลาง (Central Control) เป็นชุดควบคุมเครื่องจักรรวมทุกส่วน ได้แก่ อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์วัด และควบคุมอุณหภูมิอุปกรณ์ควบคุมความดันและอุปกรณ์ตั้งเวลา



ภาพประกอบ 4 แสดงกรรมวิธีการผลิตแบบการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding)

ที่มา : สารานุกรมไทย สำหรับเยาวชน. 2554 : 255

2. การอัดขึ้นรูป (Compression Molding) ส่วนประกอบของเครื่องคือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ อีกแผ่นหนึ่งจะถูกยึดติดกับที่ส่วนประกอบอื่นๆ คืออุปกรณ์ให้ความร้อน ระบบไฮดรอลิก และอาจมีอุปกรณ์หล่อเย็น โดยลักษณะเครื่องอัดขึ้นรูปพลาสติกได้แสดงดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ลักษณะเครื่องใช้แปรรูปพลาสติกโดยการอัดขึ้นรูป (Compression Molding)

ที่มา : สุภาสินี ลิ้มปานภาพ ซีท. 2551 : 180 ; อ้างถึงใน บริษัท นิสชินโบ เมคาทรอนิกส์ (ประเทศไทย)

จำกัด. ออนไลน์. 2554

ซึ่งมีอุปกรณ์ประกอบชนิดต่าง ๆ ดังนี้

1. ระบบการขับเคลื่อนเบ้า เครื่องอัดเบ้าส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่แผ่นเหล็กอัดขึ้นลง โดยใช้แรงขับเคลื่อนจากไฮดรอลิกแต่มีเครื่องอัดบางชนิดที่เคลื่อนที่โดยใช้แรงลม (Pneumatically Operation) นอกจากทำหน้าที่ให้แผ่นเหล็กอัดจะเคลื่อนที่ขึ้นลงแล้ว ระบบขับเคลื่อนจะทำหน้าที่ในการให้แรงดันในการอัดซึ่งเครื่องขนาดเล็กที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ จะให้แรงดันอยู่ในช่วง 5 ถึง 100 ตัน ส่วนเครื่องที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม จะให้แรงดันอยู่ในช่วง 10 ถึง 400 ตัน ขนาดของแรงดันจะขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นเหล็กอัดมีขนาดอยู่ในช่วง 8 ตารางนิ้วถึง 5 ตารางฟุต

2. ระบบให้ความร้อนและหล่อเย็น การให้ความร้อนแก่พลาสติก แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การให้ความร้อนแก่คอมปาวด์ก่อนอัด และการให้ความร้อนแก่เบ้าโดยตรงขณะที่อัด การให้ความร้อนแก่คอมปาวด์ก่อนอัดเป็นการลดระยะเวลาในการอัด เนื่องจากเทอร์โมเซทเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี ดังนั้นการเติมคอมปาวด์ที่เย็นในเบ้าโดยตรง ทำให้เสียเวลาในการทำคอมปาวด์มีอุณหภูมิถึงจุดที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง วิธีการให้ความร้อนแก่คอมปาวด์ก่อนทำการอัดมีหลายวิธี เช่น การใช้แผ่นโลหะร้อน การใช้รังสีอินฟราเรด การใช้ตู้อบชนิดความถี่สูง การให้ความร้อนในเบ้าร้อน เป็นต้น เมื่อนำคอมปาวด์เข้าเบ้าจะต้องให้ความร้อนต่อโดยแหล่งความร้อนที่ให้แก่เบ้าโดยตรงขณะทำการอัดดังนั้น ระบบให้ความร้อนแก่เบ้าของเครื่องอัดมีหลายชนิด คือ ระบบไฟฟ้า นิยมใช้กันมากเนื่องจากออกแบบและติดตั้งได้ง่ายและมีความสะดวกในการซ่อมบำรุง ระบบไอน้ำ น้ำมีข้อดี คือ ให้ความร้อนที่สม่ำเสมอแต่ให้ความร้อนเกิน  $180^{\circ}\text{C}$  ไม่ได้ และระบบน้ำร้อนไหลเวียน เป็นเทคนิคใหม่ที่ได้รับการนิยมนิยมมากในปัจจุบัน ทำโดยการใช้การเผาพอน้ำด้วยเปลวจากก๊าซหุงต้ม แล้วให้ไหลเวียน เพื่อให้ความร้อนแก่เบ้า

นอกจากระบบให้ความร้อนแล้วยังอาจจะมีระบบหล่อเย็น เพื่อให้ชิ้นงานพลาสติกจากการอัดเบ้าเย็นตัวลง ระบบหล่อเย็นไหลหมุนเวียนเข้าสู่ระบบท่อไอเสียช่องว่างของเบ้า หรืออาจจะใช้ระบบน้ำร้อนที่สามารถสลับจากการให้ความร้อนเป็นการหล่อเย็นได้

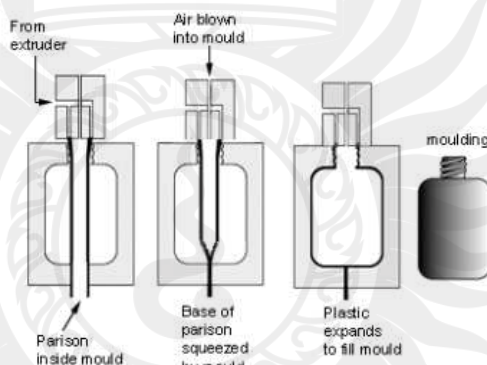
3. การเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) กระบวนการเป่าที่ใช้ในอุตสาหกรรมมี 2 วิธี คือ

3.1 แบบฉีดแล้วเป่าขึ้นรูป (Injection Blow Molding) เป็นวิธีแปรรูปพลาสติกที่ใช้พลาสติกที่ใช้เทคนิคการฉีดและการเป่าร่วมกัน เป็นวิธีที่ใหม่ที่สุดของเทคโนโลยีการเป่าพลาสติก เครื่องฉีดเป่าประกอบด้วยชุดฉีดและหลอมพลาสติก และชุดขึ้นรูป ชุดหลอมพลาสติกเหมือนเทคนิคการฉีด (Injection Molding) ดังภาพประกอบ 6 ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการฉีดเป่าได้ 3 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมชิ้นงานก่อนขึ้นรูป โดยใช้เครื่องฉีดพลาสติกขึ้นรูปพาริสันบนตัวรองรับหรือแกนที่เป็นโลหะ แล้วหมุนพลาสติกหลอมที่ติดอยู่บนแกนซึ่งเรียกว่าเป็น เฟอร์ฟอร์ม (Perform) ไปทำการเป่าในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 ปิดเบ้าหลังจากรับชิ้นงานจากขั้นตอนที่ 1 แล้วเป่าลมเข้าเพื่อให้พาริสันพองตัวและมีรูปร่างเต็มตามเบ้าต่อมาชิ้นงานจะเย็นลง เนื่องจากการหล่อเย็นด้วยระบบนำหมุนเวียน

ขั้นตอนที่ 3 เคลื่อนย้ายชิ้นงานไปยังชุดถอดชิ้นงาน เพื่อถอดชิ้นงานออกจากตัวรองรับ

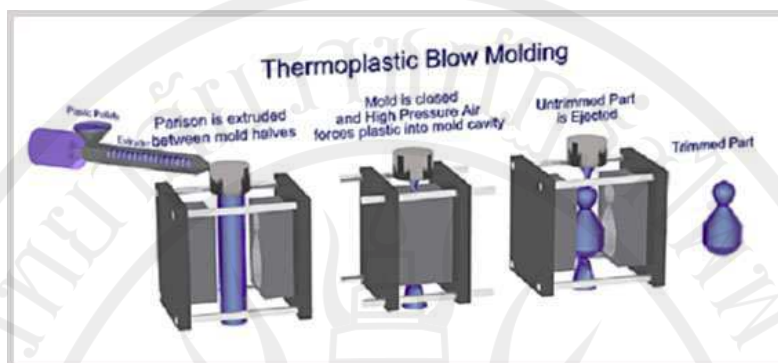


ภาพประกอบ 6 แสดงกรรมวิธีการผลิตแบบฉีดแล้วเป่าขึ้นรูป (Injection Blow Molding)

ที่มา : สุภาสินี ลิ้มปานภาพ ชีท. 2551 : 182 ; อ้างถึงใน บริษัท นิสชินโบ เมคาทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด. ออนไลน์. 2554

3.2 แบบอัดรีดแล้วเป่าขึ้นรูป (Extrusion Blow Molding) เป็นเทคนิคที่ทำการอัดรีดพลาสติกหลอมเป็นท่อกลวง (Parison) แล้วเป่าด้วยลมให้ท่อเกิดการพองตัวภายในเบ้า ซึ่งนับเป็นวิธีการเป่าโดยตรง (Direct Method) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ผลิตภัณฑ์จากการเป่ามากที่สุด

เทคนิคการอัดรีดเป่าเป็นการผลิตแบบ ขั้นตอนเดียว (One-Station Process) ซึ่งเป็นการใช้เครื่องอัดรีดที่เดินเครื่องและหยุดเป็นจังหวะการเป่า (Intermittent Running Extruder) กล่าวคือ มีการหมุนและหยุดของสกรูเป็นช่วง ๆ คล้ายกับกรณีกับเครื่องอัดรีดที่ใช้เป็นชุดหลอมในเครื่องฉีดพลาสติก ลักษณะของเครื่องอัดรีดที่เดินเครื่องในลักษณะดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 แสดงกรรมวิธีการผลิตแบบอัดรีดแล้วเป่าขึ้นรูป (Extrusion Blow Molding)

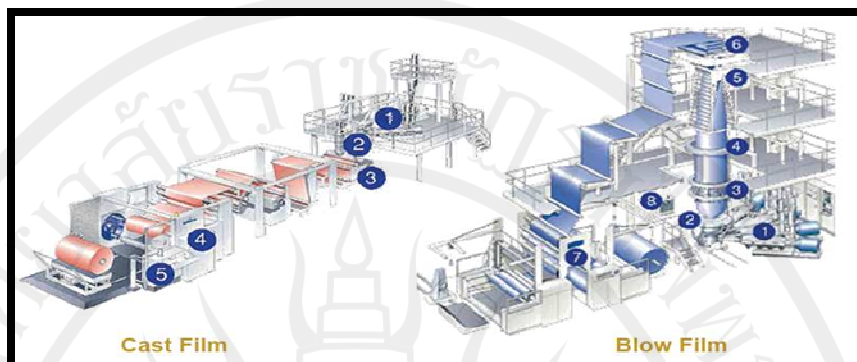
ที่มา : วันวิสา คำนวณตระกูลศิลป์. 2552 : 12

การเป่าโดยวิธีนี้เริ่มต้นโดยการอัดรีดพาริสันออกมา โดยให้ตำแหน่งวางอยู่ใจกลางของเบ้าทั้งสองซีก และต้องอัดรีดพาริสันให้ยาวกว่าส่วนล่างของเบ้าเล็กน้อย หลังจากนั้นปิดเบ้าแล้วใช้ใบมีดตัดพาริสันในตำแหน่งเหนือส่วนบนของเบ้าเล็กน้อย แล้วเป่าลมเข้าไปในแกนกลางของพาริสัน โดยใช้ความดันลมประมาณ 8 บาร์ (180 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ทำให้พลาสติกพองตัวกระทบเบ้าเย็น ซึ่งนิยมใช้น้ำเย็นที่มีช่วงอุณหภูมิระหว่าง 5 ถึง 15 องศาเซลเซียส ไหลหมุนเวียนในเบ้าตัวหล่อเย็นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามรูปร่างของเบ้า หลังจากขึ้นงานแข็งตัวดีแล้วถอดชิ้นงานออกจากเบ้า และเริ่ม Cycle ของการผลิตใหม่

4. การอัดรีด (Extrusion) เป็นการหลอมเม็ดพลาสติกผ่านตาย แล้วขึ้นรูปเป็นรูปทรงตามต้องการ ส่วนประกอบของเครื่องอัดรีด ได้แก่ ส่วนป้อน กระจกอบอัดรีดและหัวตาย ซึ่งการอัดรีดมี 2 แบบดังนี้

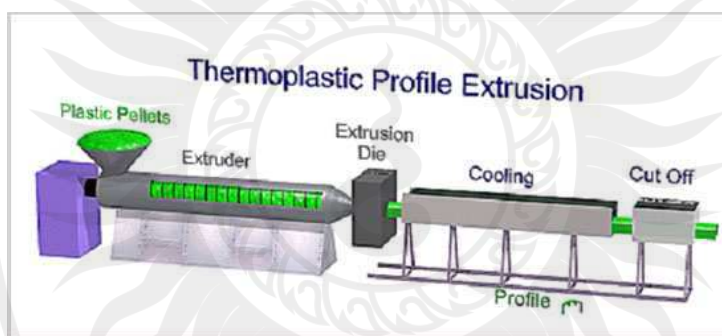
4.1 การอัดรีดฟิล์มแล้วเป่า (Blow Film) นิยมใช้ในการผลิตฟิล์ม ทำถุงพลาสติกซึ่งเม็ดพลาสติกที่ใช้ เช่น LDPE, HDPE และกรรมวิธีการผลิตอัดพลาสติกเหลวผ่านตายรูปร่างแหวนฟิล์มจะมีลักษณะเป็นท่อ ท่อจะขยายโดยเป่าอากาศเข้าไปภายใน สามารถควบคุมความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของฟิล์มได้ ส่วนปลายของลูกโป่งถูกเป่าด้วยลมเย็นและถูกรีดด้วยลูกกลิ้งเพื่อพับเข้าเป็นม้วน ดังภาพประกอบ 8

4.2 การอัดรีดฟิล์มแล้วหล่อ (Cast Film) ข้อดีคือได้ฟิล์มพลาสติกที่ใสกว่าวิธีเป่า ความหนาสม่ำเสมอ แต่หน้ากว้างของฟิล์มไม่มากนัก ใช้ผลิตถุงหรือซองพลาสติกแผ่นหนา นิยมไปใช้ทำชิ้นงานขึ้นรูปด้วยความร้อนต่อ ซึ่งเม็ดพลาสติกที่ใช้ เช่น PS, PP และ HDPE เป็นต้น ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 เปรียบเทียบกรรมวิธีการผลิตฟิล์มแบบการอัดรีด

ที่มา : วันวิสา ค่วนตระกูลศิลป์. 2552 : 13



ภาพประกอบ 9 แสดงกรรมวิธีการผลิตแบบอัดรีด

ที่มา : วันวิสา ค่วนตระกูลศิลป์. 2552 : 13

จากภาพประกอบ 9 เครื่องจักรที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกด้วยการรีดนี้มีลักษณะคล้ายกับวิธีการฉีด (Injection Molding) มีส่วนประกอบสำคัญคือ ฮอปเปอร์ (Hopper), สกรู (Screw), หัวฉีด (Nozzle) และมอเตอร์ขับเคลื่อน (Driven Motor) แต่ต่างกันตรงที่การขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดไม่มีส่วนแม่พิมพ์และอุปกรณ์ ควบคุมสำหรับแม่พิมพ์ ตรงปลายของกระบอกฉีดพลาสติกจะติดตั้งตาย (Die) ซึ่งมีลักษณะเป็นช่องรีดพลาสติกออกมาเป็นเส้น หรือแผ่นที่มีรูปหน้าตัดตามรูปตาย การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้สามารถประยุกต์เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ได้มากมาย เช่น ท่อหรือเส้นพลาสติก ถุงพลาสติก ฟิล์ม แผ่นหรือแท่งพลาสติกที่มีรูปหน้าตัดพิเศษ เป็นต้น

5. การขึ้นรูปร้อน (Thermoforming) การแปรรูปพลาสติกโดยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมีหลายเทคนิค แต่ทุกเทคนิคมีหลักการพื้นฐาน คือ การทำให้พลาสติกอ่อนตัวที่อุณหภูมิที่เหมาะสม

แล้วทำการดึงแผ่นพลาสติกให้ยืด (Stretching) ตามด้วยการขึ้นรูป (Forming) โดยการใช้แรงดันลม แรงดันสุญญากาศแรงดึงเชิงกล หรือใช้แรงทั้งสามชนิดนี้ร่วมกัน แรงดันลมที่ใช้จะอยู่ในช่วง 1 ถึง 800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ส่วนแรงดันสุญญากาศ อยู่ในช่วง 20 ถึง 27 นิ้ว ของปรอท ระดับของแรงดันลมและแรงดันสุญญากาศที่ใช้ ขึ้นอยู่กับชนิดของเทคนิคเทอร์โมฟอร์ม คุณภาพ และรายละเอียดของชิ้นงานที่ผลิต ส่วนแรงดึงเชิงกล มักจะได้ออกมาจากการดันเบ้าเข้าหาแผ่นพลาสติก เทคนิคเทอร์โมฟอร์มชนิดต่าง ๆ ที่ใช้กันโดยทั่วไปสรุปได้ดังนี้

5.1 เทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสุญญากาศโดยตรง (Straight Vacuum Forming) เป็นเทคนิคเทอร์โมฟอร์มที่ง่ายที่สุด ใช้กับการแปรรูปที่ใช้ เบ้าตัวผู้ (Male Mold) และ เบ้าตัวเมีย (Female Mold) และตัวจับแบบเฟรมคู่ (Double Clamping Flame) สามารถสรุปขั้นตอน ของการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสุญญากาศโดยตรงได้ 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จับยึดแผ่นพลาสติก โดยใช้เฟรมจับ (Clamping Flame)

ขั้นตอนที่ 2 ให้ความร้อน (Heating) และวางตำแหน่ง (Positioning) ทำโดยการให้ความร้อน จนแผ่นพลาสติกอ่อนตัวซึ่งในเครื่องเทอร์โมฟอร์มบางแบบทำการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติกซึ่งวางอยู่ด้านของเบ้า

ขั้นตอนที่ 3 การขึ้นรูป (Forming) ทำโดยใช้แรงดันสุญญากาศ (Vacuum) ดึงให้แผ่นพลาสติกที่อ่อนตัวยึดตัวประกบเบ้า

ขั้นตอนที่ 4 ถอดชิ้นงานออกจากเบ้าเทคนิคนี้นิยมใช้ในการแปรรูปพลาสติกที่มีความแข็งสูง แต่มีข้อเสีย คือชิ้นงานที่ได้มีความหนาไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ มีส่วนกันหนา และมีส่วนมุม (Corners) บาง ลักษณะการยึดตัวของพลาสติกในขณะที่ถูกดึงโดยแรงดันสุญญากาศ

5.2 เทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสุญญากาศแล้วอัดสวนด้วยแรงลม (Vacuum Snap-Back Forming) เทคนิคนี้ทำโดยการดึงให้แผ่นพลาสติกที่อ่อนตัวให้ยืดออกด้วยแรงดันสุญญากาศก่อน โดยให้ถูกโป่งขยายตัวลงในห้อง (Chamber) ซึ่งอาจจะมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมหรือรูปทรงเหลี่ยม โดยมีการคำนวณระยะเวลาการดึงไว้ล่วงหน้าแล้ว เมื่อคุณให้แผ่นพลาสติกพองตัวเปลี่ยนเป็นลูกโป่ง (Bubble) ที่มีขนาดและรูปทรงตามที่ต้องการแล้ว เลื่อนเบ้าตัวผู้ลงมาประกบส่วนบนของห้อง การประกบต้องให้สนิท กล่าวคือไม่ให้อากาศไหลเข้าหรือออกจากห้องได้ หลังจากนั้นค่อยๆ หยุดแรงดันสุญญากาศ แล้วใช้แรงดันลมอัดสวนทาง ทำให้ลูกโป่งพลิกตัวกลับ ไปประกบเบ้าซึ่งอยู่ด้านบนของห้อง การเป่าลมสวนทางในลักษณะนี้เรียกว่า การอัดสวนทาง (Snap Back)

5.3 เทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้เบ้าดันแผ่นพลาสติกก่อนแล้วใช้แรงดันสุญญากาศ (Vacuum Drape Forming) เนื่องจากการผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงที่มีความลึกไม่สามารถทำได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ โดยการใช้เทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้ แรงดันสุญญากาศโดยตรง (Straight Vacuum Forming) เนื่องจากจะต้องมีการดึงแผ่นพลาสติกให้มี การยืดตัวสูง (Deep Draw) ก่อนที่จะทำการขึ้นรูป ในปัจจุบันนิยมใช้เทคนิคใหม่ โดยใช้เบ้าดันพลาสติกแผ่นให้เกิด การยืดตัวก่อน (Pre-Stretching) แล้วจึงใช้แรงดันสุญญากาศ ในการขึ้นรูปขั้นสุดท้ายเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ง่าย กระบวนการแปรรูปเริ่มจากการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก แล้วเคลื่อนเบ้าขึ้นเพื่อเบ้าดันแผ่นพลาสติกให้ยืดตัวออกก่อน หลังจากนั้น จึงใช้แรงดันสุญญากาศ เพื่อดูดแผ่นพลาสติกให้ประกบแนบสนิทกับเบ้าแล้วถอดตัวอย่างโดยใช้ลมเป่าสวนทาง เพื่อให้ชิ้นงานหลุดออกจากเบ้า

### กระบวนการฉีดพลาสติก

ชยันต์ เลาสุทแสน (2548 : 7 - 8) กล่าวว่า ก่อนที่จะเริ่มทำการฉีดพลาสติกนั้นต้องทราบถึงหลักการในการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกก่อน เพื่อความรวดเร็วและถูกต้องในการฉีดพลาสติก ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

#### ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก

ส่วนประกอบภายในเครื่องฉีดพลาสติกมีความสำคัญต่อกระบวนการฉีดเป็นอย่างมาก ซึ่งอุปกรณ์ภายในดังกล่าวมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันตามหน้าที่การทำงานดังแสดงในภาพประกอบ 10



### ภาพประกอบ 10 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องฉีดพลาสติก

ที่มา : บริษัท นิสชิน โบ เมคาโทรนิคส์ (ประเทศไทย) จำกัด. ออนไลน์. 2554

## ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

1. กรวยป้อนเม็ดพลาสติก (Feed Hopper) คือ ส่วนที่ป้อนเม็ดพลาสติกเข้าสู่ Heating Cylinder การป้อนเม็ดพลาสติกนั้นจะสามารถตั้งระยะเวลาป้อนตามปริมาณหรือขนาดของชิ้นงาน

2. เกลียวหนอน (Reciprocating Screw) คือ สกรูในเครื่องฉีดพลาสติกที่ทำหน้าที่หมุนพาริตพลาสติกจาก Hopper วิ่งไปตามกระบอกฉีดจนถึงหัวฉีด ในขณะที่หมุนพลาสติกจะได้รับความร้อนจาก Heater และขณะเดียวกันก็จะได้รับความร้อนจากการเสียดสีเนื่องจากแรงบิดของสกรูด้าย

3. ตัววัดอุณหภูมิ (Thermocouple) คือ ตัววัดอุณหภูมิของกระบอกสูบเครื่องฉีดพลาสติก

4. กระบอกสูบ (Barrel) คือ ส่วนที่เป็นกระบอกสูบ

5. แถบให้ความร้อน (Heater Bands) คือ ส่วนที่อยู่ภายในกระบอกสูบที่สามารถปรับอุณหภูมิให้ความร้อนในแต่ละช่วงภายในกระบอกสูบได้เพราะพลาสติกแต่ละชนิดจะให้ความร้อนที่แตกต่างกันออกไป โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ ส่วนหน้า ส่วนกลางและส่วนหลัง

6. วาล์วกันกลับ (Non Return Valve) คือ วาล์วปิดเปิดที่ป้องกันการไหลย้อนกลับของพลาสติกเหลวในจังหวะการฉีดและรักษาความดัน เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานสัมพันธ์กับ Screw Tip

7. ยอดหัวสกรู (Screw Tip) คือ สกรูที่ป้องกันการไหลย้อนกลับของพลาสติกเหลวในจังหวะการฉีดและรักษาความดัน

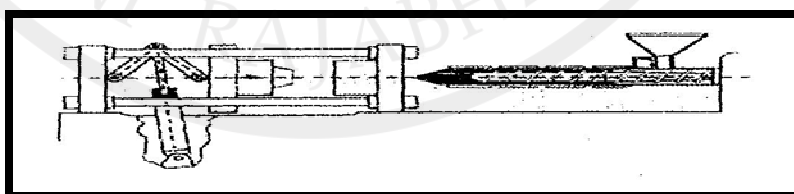
8. ส่วนหัวกระบอกสูบ (Cylinder Head) คือ ส่วนที่เป็นกระบอกให้ความร้อนแก่เม็ดพลาสติก ปลายกระบอกฉีดจะมีหัวฉีดประกอบอยู่และภายในกระบอกจะประกอบด้วยสกรู

9. หัวฉีด (Nozzle) คือ หัวฉีดซึ่งเป็นส่วนประกอบอยู่ที่ปลายของกระบอกฉีด มีหน้าที่ในการเชื่อมต่อชุดฉีดกับแม่แบบในการส่งพลาสติกจากส่วนหัวกระบอกสูบหลอมพลาสติกผ่านหัวนำฉีดเข้าไปยังแม่แบบ

#### ขั้นตอนการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก

ขั้นตอนการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกลำดับขั้นตอนการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกสามารถแบ่งได้เป็น 9 ขั้นตอน ดังนี้

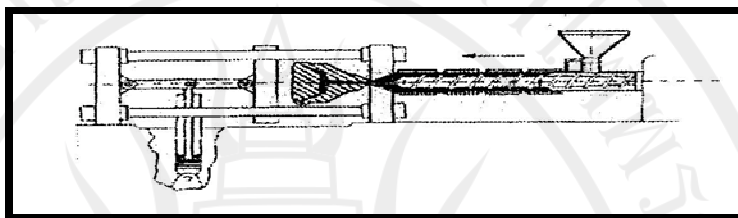
1. จังหวะปิดแม่พิมพ์ เป็นจังหวะที่แม่พิมพ์เคลื่อนที่ปิดด้วยระบบไฮดรอลิกส์พร้อมกับล็อกไม่ให้แม่พิมพ์เปิดขณะฉีด ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 จังหวะที่ 1 ปิดแม่พิมพ์

ที่มา : วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. 2540 : 26

2. จังหวะชุดฉีดเลื่อนเข้าหาแม่พิมพ์ เป็นจังหวะเดียวกับที่แม่พิมพ์ปิด ชุดฉีดจะเลื่อนเข้าหาแม่พิมพ์ด้านที่อยู่ฝั่ง จนชนกับทางเข้า (Spure) แล้วค้างไว้ด้วยแรงค้ำหนึ่ง ดังภาพประกอบ 12

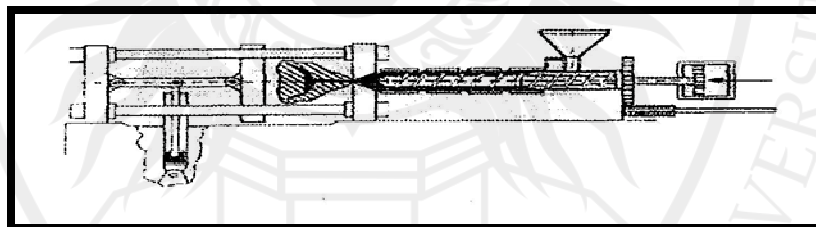


ภาพประกอบ 12 จังหวะที่ 2 ชุดฉีดเลื่อนเข้าหาแม่พิมพ์

ที่มา : วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. 2540 : 27

3. จังหวะฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์หรือจังหวะเติมพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์เกลียวหนอน จะเคลื่อนที่ตามแนวแกนเพื่อดันน้ำพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ ดังภาพประกอบ 13

4. จังหวะฉีดรักษาความดัน (Holding) และชุดเซกการหดตัว ดังภาพประกอบ 13

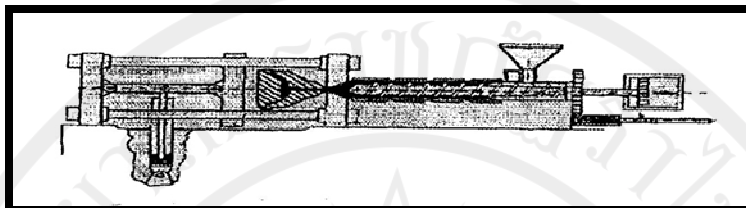


ภาพประกอบ 13 จังหวะที่ 3 และ 4 ฉีดรักษาความดัน

ที่มา : วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. 2540 : 27

5. ช่วงการหล่อเย็นชิ้นงาน เป็นการทำงานเพื่อรอให้พลาสติกเหลวแข็งตัว ดังภาพประกอบ 14

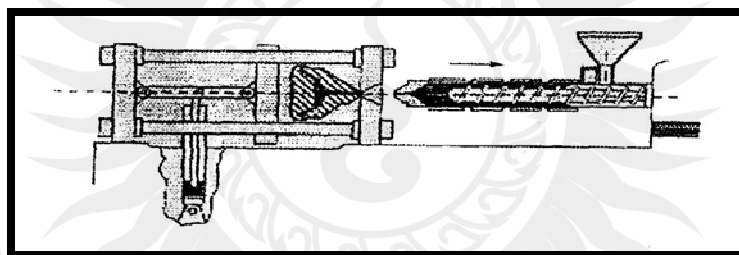
6. ป้อนพลาสติกเข้าเกลียวหนอนก่อนทำการหลอมใหม่ เป็นจังหวะที่เกลียวหนอนหมุนเพื่อดึงเม็ดพลาสติกจากกรวยเติมเข้ากระบอกฉีดเพื่อหลอมเหลว เกลียวหนอนจะถอยกลับและพร้อมที่จะทำการฉีดในจังหวะต่อไป โดยที่หัวฉีดยังคงติดอยู่กับแม่พิมพ์โดยไม่ถอยกลับ ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 จังหวะที่ 5 และ 6 เป็นการหล่อเย็นชิ้นงานที่ฉีดเสร็จ และในขณะเดียวกันทำการป้อนพลาสติกเข้าเกลียวหนอนก่อนทำการหลอมใหม่

ที่มา : วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. 2540 : 28

7. ชุดฉีดดอยกลับเพื่อป้องกันอุณหภูมิหัวฉีดต่ำเกินไป และไม่ให้พลาสติกที่แข็งตัวติดที่หัวฉีด ทำให้การฉีดครั้งต่อไปง่ายขึ้น ดังภาพประกอบ 15

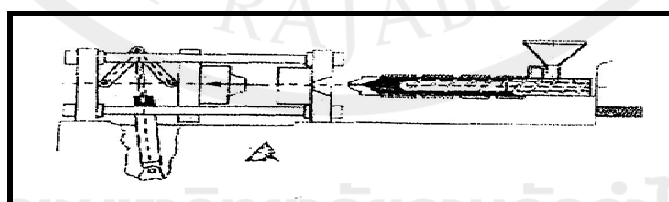


ภาพประกอบ 15 จังหวะที่ 7 ชุดฉีดดอยกลับ

ที่มา : วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. 2540 : 28

8. แม่พิมพ์เคลื่อนที่เป็ออกถึงระยะสูงสุด ดังภาพประกอบ 16

9. ทำการปลดชิ้นงาน (Ejection) ตัวอีเจกเตอร์ (Ejector) จะกระทุ้งให้ชิ้นงานหลุดจากแม่พิมพ์ ดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 จังหวะที่ 8 และ 9 แม่พิมพ์เปิดแล้วปลดชิ้นงานออก

ที่มา : วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. 2540 : 28

### การทดสอบด้วยแรงกระแทก (Impact Test)

อิทธิพล เดียววิชย์ (2550 : ไม่ปรากฏเลขหน้า) ได้กล่าวไว้ว่า การทดสอบกระแทก เป็นวิธีการทดสอบวิธีหนึ่งในการศึกษาการแตกหักของวัสดุ และยังเป็นการทดสอบที่บรรจุอยู่ในมาตรฐานอุตสาหกรรม (Industrial Standard) เพื่อใช้ตรวจสอบและยืนยันคุณภาพวัสดุ การทดสอบการกระแทกเป็นที่นิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้ารวมไปถึงกระบวนการผลิต อย่างเช่น การเชื่อมโลหะที่ต้องการตรวจสอบความสมบูรณ์ของวัสดุหลังผ่านการเชื่อมการทดสอบการกระแทกจำแนกออกเป็นหลายวิธีแต่การทดสอบแบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ การทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy Test) และแบบอิซอด (Izod Test) โดยการทดสอบทั้งสองแบบคล้ายคลึงกันมาก เพียงแต่มีความแตกต่างอยู่ที่วิธีการจับวางและบากร่องบนชิ้นงานเท่านั้น

ในการทดสอบการกระแทกแบบนี้จะใช้ค้อนน้ำหนักที่ทราบค่าน้ำหนักแน่นอนปล่อยลงมากระทบกับชิ้นทดสอบ ชิ้นทดสอบนั้นจะบากร่องอยู่ตรงกลางชิ้นงานเพื่อบังคับให้ชิ้นงานแตกขาดออกจากกันตรงรอยบากหลังการตีกระแทกจากค้อนน้ำหนัก สำหรับการทดสอบ Impact Test แบบ Falling Weight Test ซึ่งเหมาะสำหรับชิ้นงานที่เป็นแผ่น โดยในการทดสอบจะทำได้ 2 ลักษณะ คือกำหนดให้ระดับความสูงของค้อนน้ำหนักคงที่ แล้วทำการทดสอบโดยการเพิ่มน้ำหนักจนกระทั่งชิ้นงานแตก หรือในทางกลับกันอาจทดสอบโดยใช้น้ำหนักคงที่แล้วทำการปรับระยะความสูงแทนก็ได้

กิตติพัฒน์ ปณิฐาภรณ์ (2542 : 1) ได้กล่าวเพิ่มเติมว่า จุดประสงค์ในการทดสอบ เพื่อใช้ในการหาค่าความทนทาน การแตกเปราะและค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกโลหะ ซึ่งจะเป็นตัวแสดงที่เกี่ยวข้องกับความเหนียวของโลหะชนิดต่างๆในสภาวะอุณหภูมิใช้งานต่าง ๆ กัน และสามารถนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะชนิดต่างๆเพื่อช่วยในการเลือกใช้โลหะอย่างเหมาะสมกับงานด้านต่าง ๆ

หลักในการทดสอบ ทำได้โดยการปล่อยค้อนแกว่ง (Pendulum) จากตำแหน่งที่ยึดไว้ลงมากระทบชิ้นงาน ค่าพลังงานที่ชิ้นงานสามารถดูดซับได้ เราเรียกว่าค่าแรงกระแทก (Impact Value) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลแตกต่างของระดับพลังงานของค้อนแกว่งระหว่างก่อน และหลังการทดสอบแล้ว สำหรับโลหะเปราะจะทำให้งานทดสอบแตกหักออกจากกัน แต่ถ้าเป็นโลหะเหนียวงานทดสอบจะงอ

### ทฤษฎีและการวิเคราะห์เชิงสถิติ

ปารเมศ ชูติมา (2545 : 24) กล่าวถึงการวิเคราะห์เชิงสถิติที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไปนี้ ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบสมมติฐานอำนาจการทดสอบของข้อมูล (Power of Test) การทดลอง ปัจจัยเดียว และวิเคราะห์ความแปรปรวน

#### การทดสอบสมมติฐาน

ปารเมศ ชูติมา (2545 : 24) ได้ให้ความหมายของคำว่า สมมติฐานทางสถิติว่า สมมติฐานทางสถิติ คือ ประโยคที่กล่าวเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นซึ่งอาจจะเป็นจริงหรือเท็จก็ได้ ข้อความหรือประโยคดังกล่าวนี้ต้องระบุกลุ่มของประชากรที่เกี่ยวข้องมาด้วย กลุ่มหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งกลุ่มก็ได้

สมมติฐานทางสถิติที่เขียนไว้ในเชิงปริมาณการเท่ากันของค่าสถิติเราเรียกว่า สมมติฐานที่ไม่มีความแตกต่างกัน ภาษานักวิจัยเรียกกันว่า สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) แทนด้วยสัญลักษณ์  $H_0$  ส่วนสมมติฐานที่มีความแตกต่างกันเรียกว่า สมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis) แทนด้วยสัญลักษณ์  $H_1$

#### 1. การทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว (One Tailed Tests)

$$H_0 : \mu = \mu_0$$

$$H_1 : \alpha < \alpha_0 \text{ หรือ } H_1 : \alpha > \alpha_0$$

โดยที่  $\alpha$  คือ ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ

$\mu_0$  คือ ค่าเฉลี่ยอ้างอิง

#### 2. การทดสอบสมมติฐานแบบสองทาง (Two Tailed Tests)

$$H_0 : \mu = \mu_0$$

$$H_1 : \mu \neq \mu_0$$

โดยที่  $\alpha$  คือ ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ

$\mu_0$  คือ ค่าเฉลี่ยอ้างอิง

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots \mu_a$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ (i,j)}$$

โดยที่  $\alpha$  คือ ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ

$i, j$  คือ 1, 2, ..., a

ในการทดสอบสมมติฐานอาศัยวิธีการในการสุ่มตัวอย่าง การคำนวณค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบที่เหมาะสม และทำการสรุปเพื่อปฏิเสธหรือยอมรับ  $H_0$  นอกจากนี้ยังต้องมีการ

กำหนดกลุ่มของค่าที่จะนำไปสู่การปฏิเสธ  $H_0$  ซึ่งกลุ่มของค่านี้เรียกว่า “พื้นที่วิกฤติ” หรือ “พื้นที่ของการปฏิเสธ” ของการทดสอบ

### อำนาจการทดสอบข้อมูล (Power of Test)

ในการทดสอบสมมติฐานนั้นผู้ทดสอบจะมีโอกาสตัดสินใจ 2 ลักษณะ คือ ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis :  $H_0$ ) กับการยอมรับสมมติฐานหลัก ซึ่งการตัดสินใจอย่างใดอย่างหนึ่งต่างเสี่ยงต่อความคลาดเคลื่อนจากสภาพความจริง ดังนั้น เมื่อผ่านกระบวนการทดสอบทางสถิติ จะสามารถสรุปผลการทดสอบได้ด้วยความเชื่อมั่นระดับหนึ่งโดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งผลสรุปที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้ และความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจพิจารณาได้ 2 กรณี คือ

1. ความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 1 (Type I Error) คือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการปฏิเสธ  $H_0$  ทั้งที่  $H_0$  เป็นจริง โอกาสที่จะยอมให้เกิดความคลาดเคลื่อนประเภทนี้ ผู้ใช้สถิติจะระบุไว้ล่วงหน้าทีจุดเสี่ยงในโอกาสประมาณเท่าไร โดยทั่วไประดับความมีนัยสำคัญจะใช้สัญลักษณ์  $\alpha$

2. ความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 2 (Type II Error) คือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการยอมรับ  $H_0$  ทั้งที่  $H_0$  ไม่เป็นจริง ผู้ใช้สถิติทดสอบอาจคำนวณที่ความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 2 ได้เช่นเดียวกัน เมื่อสามารถประมาณค่าความแตกต่างระหว่างพารามิเตอร์ที่ทดสอบได้ โอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 2 จะเท่ากับ  $\beta$

ค่า  $1-\beta$  จะเป็นโอกาสของการทดสอบที่ตัดสินใจได้ถูกต้องซึ่งทางด้านสถิติจะให้ความหมายค่านี้ คือ อำนาจการทดสอบข้อมูล (Power of Test) สถิติทดสอบที่เหมาะสมควรจะมีอำนาจการทดสอบข้อมูลเข้าใกล้ 1.00 หรือ 100%

อำนาจการทดสอบข้อมูล (Power of Test) คือ ความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) เมื่อ  $H_0$  ไม่เป็นจริง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1-\beta$  ในการทดสอบสมมติฐานครั้งหนึ่ง ๆ ต้องการให้ค่าความผิดพลาดทั้งสองประเภทมีค่าน้อย ๆ แต่เนื่องจากความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองมีทิศทางตรงข้ามหมายถึงเมื่อกำหนด  $\alpha$  มีค่าน้อย ๆ ค่า  $\beta$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นและหากกำหนดค่า  $\beta$  มีค่าน้อย ๆ ค่า  $\alpha$  มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น ในการทดสอบสมมติฐานไม่สามารถกำหนด  $\alpha = 0$  ได้เนื่องจากเมื่อกำหนดเป็น  $\alpha = 0$  ค่า  $\beta$  จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การทดสอบนั้นมีอำนาจการทดสอบลดลง

สูตรในการคำนวณหาอำนาจการทดสอบของข้อมูล (กรณี 2 ปัจจัย) ดังสมการที่ (2-1)

$$\Phi'' = \frac{v\beta\Delta''}{\alpha\sigma''} \quad (2-1)$$

- เมื่อ  $n$  = จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (Replication)  
 $a$  = ระดับของปัจจัย A  
 $b$  = ระดับของปัจจัย B  
 $D$  = ค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ย (Difference of mean)  
 $\sigma^2$  = ค่าความแปรปรวน

นำค่าที่ได้จากการคำนวณข้างต้นไปเปิดตาราง OC Curve จะทำให้ได้ค่า  $\beta$  ออกมาจากนั้นก็ทำการหาอำนาจการทดสอบของข้อมูล คือ  $1-\beta$

### การทดลองปัจจัยเดียวและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในทางสถิติสามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งจะแบ่งออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 1. การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ปารเมศ ชูติมา (2545 : 55) กล่าวว่าไว้ว่า กระบวนการที่เหมาะสมเพื่อทดสอบความเท่ากันของค่าเฉลี่ยหลายค่า คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

สมมติว่ามีระดับซึ่งแตกต่างของปัจจัยเดียวที่ต้องการทำการเปรียบเทียบ และค่าตอบสนองที่ได้จากการสังเกตในแต่ละระดับเป็นตัวแปรสุ่ม ข้อมูลควรจะมีลักษณะเหมือนในตาราง 3 ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่แสดงในตาราง เช่น  $y_{ij}$  หมายถึง ค่าสังเกตที่  $j$  ภายใต้ระดับที่  $i$  หรือ

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \end{matrix} \quad (2-2)$$

โดยทั่วไปจะมีค่า

สังเกต  $n$  ค่า ภายใต้ระดับ  $i$

สามารถอธิบายค่าสังเกตต่าง ๆ นี้ด้วยแบบจำลองทางสถิติเชิงเส้นคือ

โดยที่  $y_{ij}$  เป็นค่าสังเกตที่  $ij$  และ  $\mu$  คือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันทุกระดับซึ่งเรียกว่า “ค่าเฉลี่ยรวม (Overall Mean)”  $\tau_i$  คือ ค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่  $i$  หรือผลกระทบจากระดับที่  $i$  และ  $\epsilon_{ij}$  คือ องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จุดประสงค์เพื่อทำการทดสอบสมมติฐานที่เหมาะสมเกี่ยวกับผลกระทบของระดับต่าง ๆ และทำการประมาณค่าสำหรับการทดสอบสมมติฐาน ความผิดพลาดของแบบจำลองถูกสมมติให้เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจาย

แบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน ด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และความแปรปรวน  $\sigma^2$  ซึ่งสมมติให้มีค่าคงตัวตลอดทุกระดับของปัจจัย

ตาราง 3 แสดงข้อมูลสำหรับการทดลองปัจจัยเดียว

Treatment (level)	Observations				Totals	Averages
1	y11	y12	...	y1n	y1.	$\bar{y}_1$
2	y21	y22	...	y2n	y2.	$\bar{y}_2$
:	:	:	...	:	:	:
A	ya1	ya2	...	yan	ya.	$\bar{y}_a$
					y..	y..

ที่มา : ปารเมศ ชูติมา. 2545 : 55

แบบจำลองนี้เรียกว่า “การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Analysis of Variance)” เพราะมีเพียงแค่ปัจจัยเดียวที่นำมาพิจารณา และลำดับในการทดลองจะต้องเป็นแบบสุ่ม ดังนั้นการทดลองนี้จึงเป็นการออกแบบการทดลองที่เรียกว่า “การออกแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design)”

แบบจำลองทางสถิติในสมการที่ (2-2) อธิบายความแตกต่างของ 2 สถานการณ์ที่เกี่ยวกับผลกระทบของระดับ อันดับแรกคือ ระดับ a ระดับสามารถถูกกำหนดขึ้น โดยผู้ทดลอง ในที่นี้ต้องการที่จะทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของระดับ และบทสรุปที่เกิดขึ้นจะนำไปประยุกต์ได้กับระดับของปัจจัยที่พิจารณาเท่านั้น ข้อสรุปที่ได้ไม่สามารถไปใช้กับระดับอื่นที่มีค่าใกล้เคียงที่ไม่ได้พิจารณาหรือทำการทดลองได้ นอกจากนั้นต้องการที่จะประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ( $\mu, \tau, \sigma^2$ ) ซึ่งเรียกว่า “แบบจำลองผลกระทบคงที่ (Fixed Effects Model)” ในทางกลับกัน ถ้าระดับ a ถูกสุ่มเลือกจากประชากรขนาดใหญ่ของระดับต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ ในกรณีนี้เราสามารถที่จะขยายผลสรุป (ซึ่งขึ้นกับตัวอย่างของระดับที่ใช้) ไปยังทุก ๆ ระดับของประชากร ถึงแม้ว่าอาจจะไม่ได้ทำการพิจารณาระดับนั้น ๆ อย่างชัดเจนก็ตาม การวิเคราะห์ในที่นี้  $\tau_i$  คือ ตัวแปรสุ่ม และความรู้เกี่ยวกับค่าตัวแปรสุ่มตัวใดตัวหนึ่งจะไม่มีประโยชน์แต่อย่างไร

จึงเลือกทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแปรผันของ  $\tau$   $\tau$  และพยายามที่จะประมาณค่าความแปรผันนี้ ซึ่งเรียกว่า “แบบจำลองผลกระทบแบบสุ่ม (Random Effect Model)”

## 2. การวิเคราะห์แบบจำลองผลกระทบคงที่

ปารเมศ ชูติมา (2545 : 56) ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวของแบบจำลองผลกระทบคงที่ไว้ว่า ผลกระทบของระดับ ( $\tau$   $\tau$ ) มีนิยามเหมือนกับส่วนของค่าที่เบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยรวม

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \quad (2-3)$$

ให้  $y_{ij}$  แทนค่าของค่าสังเกตทุก ๆ ตัวของระดับ  $i$  ในทำนองเดียวกันให้  $y_{i.}$  แทนค่าสังเกตทั้งหมด และ  $y_{.j}$  แทนค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตภายใต้ระดับที่  $j$  ในทำนองเดียวกัน  $y_{..}$  แทนผลรวมของค่าสังเกตทั้งหมด และ  $y_{.}$  แทนค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตทั้งหมด ซึ่งเราสามารถเขียนในรูปของสัญลัษณ์ คือ

$$y_{ij} = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (2-4)$$

$$\bar{y}_{i.} = \frac{y_{i.}}{n} \quad (2-5)$$

$$y_{.} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (2-6)$$

$$\bar{y}_{..} = \frac{y_{.}}{N} \quad (2-7)$$

โดยที่  $i = 1, 2, \dots, a$  และ  $N = an$  คือ จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด จะสังเกตว่าเครื่องหมาย “.” แทนผลรวมของตัวห้อยที่เครื่องหมายนั้นเข้าไปแทนที่อยู่

ค่าเฉลี่ยของระดับ  $i$  คือ  $E(\psi\tau_i)$  ( $\psi\tau_i$ )  $\propto \tau_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, a$  ดังนั้นค่าเฉลี่ยของระดับที่  $i$  ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยรวมบวกกับผลกระทบที่เกิดจากระดับที่  $i$  เราสนใจในการทดสอบความเท่ากันของค่าเฉลี่ย  $a$  ระดับคือ

$$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a$$

$$H_1 : \alpha_i \neq \alpha_j \text{ อย่างน้อยหนึ่งคู่ของ } (i, j)$$

ถ้าหาก  $H_0$  เป็นจริง ทุกระดับจะมีค่าเฉลี่ยที่เท่ากันคือ  $\alpha$  เขียนสมมติฐานใหม่ในรูปของผลกระทบของระดับ  $\tau_i$  ได้ คือ

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อยหนึ่ง } i$$

ดังนั้น สามารถกล่าวได้ว่า การทดลองความเท่ากันของค่าเฉลี่ย ของระดับหรือการทดสอบผลที่เกิดขึ้นจากระดับ ( $\tau_i$ ) เท่ากับศูนย์ก็ได้ กระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความเท่ากันของค่าเฉลี่ยของระดับ  $a$  คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2-8)$$

### 3. การแยกย่อยของผลรวมของกำลังสอง

ปรเมศ ชูติมา (2545 : 57) กล่าวว่า คำว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน มาจากความหมายของการแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็นส่วนประกอบย่อยๆ จะได้ว่า Total Corrected Sum of Square คือ ใช้สำหรับวัดความแปรผันทั้งหมดของข้อมูล เป็นการเหมาะสมถ้าหาร  $SS_T$  ด้วยระดับขั้นความเสรีที่เหมาะสม (ในกรณีนี้  $an-1 = N-1$ ) จะได้ความแปรปรวนของตัวอย่าง  $y$  สังเกตว่า Total Corrected Sum of Square,  $SS_T$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 + 2 \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})(y_{ij} - \bar{y}_{i.}) \quad (2-10)$$

หรือ

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 + n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2-9)$$

อย่างไรก็ตาม พจน์ของผลคูณไขว้ในสมการที่ (2-10) มีค่าเป็น 0 เพราะ

$$\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.}) - y_{i.} - n\bar{y}_{i.} - y_{i.} - n\left(\frac{y_{i.}}{n}\right) = 0 \quad (2-11)$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (2-12)$$

สมการที่ (2-12) กล่าวว่า ความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล ซึ่งวัดจาก Total Corrected Sum of Square สามารถแบ่งออกเป็น ส่วนของผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม รวมกับผลรวมของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ย ของระดับนั้น ๆ ค่าของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตเฉลี่ยของแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม คือ ตัววัดความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของระดับ ในขณะที่ค่าความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับคือ ความผิดพลาดสุ่ม (Random Error) ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (2-12) ได้เป็น

$$\Sigma\Sigma T = \Sigma\Sigma T_{\text{reatment}} + \Sigma\Sigma E \quad (2-13)$$

ซึ่ง SSTreatment เรียกว่า ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากระดับ (นั่น คือ ระหว่างระดับต่าง ๆ) และ SSE เรียกว่า ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากความผิดพลาด เนื่องจากมีค่าสังเกตทั้งหมด  $an = N$  ค่า ดังนั้น SST จะมี  $N-1$  ระดับขั้นความเสรี ปัจจัยที่กำลังพิจารณาอยู่จะมี  $a$  ระดับ (และค่าเฉลี่ยของระดับจะมี  $a$  ค่า ดังนั้น SSTreatment มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $a-1$  และภายในทุก ๆ ระดับจะมี  $n$  เพลทเกิด ทำให้มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $n-1$  สำหรับประมาณความผิดพลาดในการทดลอง ดังนั้นถ้าปัจจัยมี  $a$  ระดับ จะมี  $a(n-1) = an-a = N-a$  ระดับขั้นความเสรีสำหรับความผิดพลาด

จะมีประโยชน์อย่างมากถ้าพิจารณาในรายละเอียดของสองพจน์ทางด้านขวามือของสมการที่ (2-12) ให้พิจารณาค่าผิดพลาดของผลรวมของกำลังสอง

$$SS_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 = \sum_{i=1}^a \left[ \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \right] \quad (2-14)$$

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสุโขทัยและเทคโนโลยี

ในรูปแบบนี้จะเป็นการง่ายที่พิจารณาพจน์ที่อยู่ในวงเล็บซึ่งถูกหารด้วย  $n-1$  ว่าเป็นค่าความแปรปรวนของตัวอย่างในระดับที่  $i$

$$s_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{n-1} \quad i = 1, 2, \dots, a \quad (2-15)$$

ตอนนี้ความแปรปรวนตัวอย่าง  $a$  ค่าอาจจะถูกรวมให้เป็นค่าประมาณหนึ่งค่าของค่าความแปรปรวนร่วมของประชากร ซึ่งแสดงได้โดย

$$\frac{(n-1)s_1^2 + (n-1)s_2^2 + \dots + (n-1)s_a^2}{(n-1) + (n-1) + \dots + (n-1)} = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^a (n-1)} = \frac{SS_E}{(N-a)} \quad (2-16)$$

ดังนั้น  $\frac{SS_M}{(N-a)}$  คือ ค่าประมาณความแปรปรวนร่วมภายในระดับแต่ละระดับ ซึ่งมีทั้งหมด  $A$  ระดับ

ในทำนองเดียวกัน ถ้าหากไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของระดับทั้งหมด  $a$  ระดับสามารถนำค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของระดับกับค่าเฉลี่ยรวมเพื่อประมาณ  $\sigma^2$  โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ ค่าประมาณของ  $\sigma^2$  ถ้าหากค่าเฉลี่ยของระดับมีค่าเท่ากัน เหตุผลสำหรับอธิบายเป็นดังนี้ คือ ค่าประมาณค่าของ  $\sigma^2 / n$  ซึ่งหมายถึงความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของระดับ ดังนั้นจะเป็นตัวประมาณของ  $\sigma^2$  ถ้าหากไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับ

$$\frac{SS_{\text{between}}}{a-1} = \frac{n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{a-1} \quad (2-17)$$

พบว่าการวิเคราะห์เอกลักษณ์ความแปรปรวน (สมการที่ (2-12)) ทำให้ได้ค่าประมาณของ  $\sigma^2$  2 ตัว ตัวหนึ่งเป็นความแปรผันภายในระดับ และอีกตัวหนึ่งอยู่ในความแปรผันระหว่างระดับ ถ้าหากไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับ ค่าประมาณทั้ง 2 ค่าจะคล้ายคลึงกันมาก แต่หากว่าไม่เป็นเช่นนั้นควรจะสงสัยว่า ความแตกต่างของค่าสังเกตต้องเกิดมาจากความแตกต่าง

ของค่าเฉลี่ยของระดับ เรียกจำนวน  $MSTreatment = SSTreatment/(a-1)$  และค่ากำลังสองเฉลี่ยคือ  $MSE = SSE/(N-a)$  ตอนนี้จะมาพิจารณา ค่าคาดหวังของค่ากำลังสองเฉลี่ยเหล่านี้กล่าวคือ

$$E(MSE) = \frac{1}{N-a} \left[ N\mu^2 + n \sum_{i=1}^a \tau_i^2 + N\sigma^2 - N\mu^2 - n \sum_{i=1}^a \tau_i^2 - a\sigma^2 \right] \quad (2-18)$$

หรือ

$$E(MSE) = \sigma^2 \quad (2-19)$$

และในทำนองเดียวกัน

$$E(MSTreatment) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1} \quad (2-20)$$

ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า  $MSE = SSE/(N-a)$  เป็นตัวประมาณของ  $\sigma^2$  และถ้าหากไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของระดับ (ซึ่งหมายความว่า  $\tau_i = 0$ )  $MSTreatment = SSTreatment/(a-1)$  จะเป็นตัวประมาณของ  $\sigma^2$  เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม สังเกตว่าถ้าหากค่าเฉลี่ยของระดับแตกต่างกัน ค่าคาดหวังของค่าเฉลี่ย ของระดับยกกำลังสองจะมากกว่า  $\sigma^2$

การทดสอบสมมติฐานซึ่งไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของระดับสามารถทำได้ โดยการเปรียบเทียบ  $MSTreatment$  และ  $MSE$

#### 4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ปรเมศ ชุตินา (2545 : 61) ได้กล่าวถึง การทดสอบสมมติฐานอย่างเป็นทางการ ในกรณีที่ไม่มี ความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับ ( $H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0$  หรือ  $H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$ ) จะทำได้อย่างไร เนื่องจากต้องสมมติให้  $e_{ij}$  มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน มีค่าเฉลี่ย = 0 และค่าความแปรปรวน =  $\sigma^2$  ค่าสังเกต  $y_{ij}$  มีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระมีค่าเฉลี่ย =  $\alpha + \tau_i$  และความแปรปรวน  $\sigma^2$  ดังนั้น SST คือ ผลรวมของกำลังสองของตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้น สามารถแสดงได้ว่า  $SST / \sigma^2$  จะมีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่มี  $N-1$  ระดับขั้นความเสรียิ่งกว่านั้น สามารถแสดงได้ว่า  $SSE / \sigma^2$  มีการแจกแจง

แบบ Chi-Square ที่มี  $a-1$  ระดับขั้นความเสรี และ  $SS_{Treatment}$  มีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่มี  $a-1$  ระดับขั้นความเสรี ถ้าสมมติฐานหลัก  $H_0 : \tau_i = 0$  เป็นจริง อย่างไรก็ตาม ค่าผลรวมของกำลังสองทั้ง 3 ไม่ได้เป็นอิสระต่อกัน เพราะ  $SSE$  และ  $SS_{Treatment}$  รวมกันเป็น  $SST$  ทฤษฎีที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้มีประโยชน์ในการสร้างความเป็นอิสระให้แก่  $SSE$  และ  $SS_{Treatment}$

### 5. ทฤษฎีของ Cochran

ปารเมศ ชูติมา (2545 : 61) กล่าวถึง ทฤษฎีของ Cochran

$$\sum_{i=1}^s Z_i^2 = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_s, \quad s \leq v_s$$

ให้  $Z_i$  เป็น NID (0,1) สำหรับ  $i = 1, 2, \dots, v$  ซึ่ง และ  $Q_i$  มี  $v_i$  ระดับขั้นความเสรี ( $i = 1, 2, \dots, s$ ) ดังนั้น  $Q_1, Q_2, \dots, Q_s$  เป็นการแจกแจง Chi-Square ที่เป็นอิสระต่อกัน ด้วยค่า  $v_1, v_2, \dots, v_s$  ระดับขั้นความเสรีตามลำดับ ก็ต่อเมื่อ  $v = v_1 + v_2 + \dots + v_s$  เพราะระดับขั้นความเสรีของ  $SS_{Treatment}$  และ  $SSE$  รวมกันเท่ากับ  $N-1$  ซึ่งเป็นระดับขั้นความเสรีรวมทั้งหมด ทฤษฎีของ Cochran บอกเป็นนัยว่า  $SS_{Treatment} / \sigma^2$  และ  $SSE / \sigma^2$  เป็นตัวแปรอิสระที่มีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นถ้าหากสมมติฐานหลักคือ ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของระดับเป็นจริง ดังนั้นอัตราส่วน

$$F_0 = \frac{SS_{Treatments} / (a-1)}{SS_E / (N-a)} = \frac{MS_{Treatments}}{MS_E} \quad (2-21)$$

จะมีการแจกแจงแบบ F ด้วยระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $a-1$  และ  $N-a$  สมการที่ (2-20) คือ สถิติทดสอบสำหรับสมมติฐานที่ว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของระดับ

จากค่าคาดหวังกำลังสองเฉลี่ย พบว่า โดยทั่วไป  $MS_E$  จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ  $\sigma^2$  ภายใต้สมมติฐานหลัก  $MS_{Treatment}$  จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ  $\sigma^2$  เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าสมมติฐานหลักเป็นเท็จ ค่าคาดหวังของ  $MS_{Treatment}$  จะมากกว่า  $\sigma^2$  ดังนั้น ภายใต้สมมติฐานรอง ค่าคาดหวังของตัวตั้งของสถิติทดสอบ (สมการที่ (2-21)) จะมากกว่าค่าคาดหวังของตัวหาร และจะปฏิเสธ  $H_0$  ถ้าค่าของสถิติทดสอบมีค่าที่มาก หรือค่าดังกล่าว

ตกอยู่ในบริเวณวิกฤตซึ่งหมายถึงพื้นที่ด้านขวาของค่าวิกฤต  $(F_{\alpha, a-1, N-a})$  ดังนั้นจะปฏิเสธ  $H_0$  และสรุปว่า มีความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของระดับ โดยที่

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} \quad (2-22)$$

ซึ่ง  $F_0$  คำนวณได้จากสมการที่ (2-21) หรือโดยการใช้ P-Value ในการตัดสินใจก็ได้ สูตรสำหรับคำนวณผลรวมของกำลังสองสามารถหาได้จากการเขียนและลดรูปของ  $MS_{Treatment}$  และ  $SS_T$  ในสมการที่ (2-12) ให้ง่ายขึ้นซึ่งจะได้ว่า

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij}^2 - \frac{y_i^2}{N}) \quad (2-23)$$

และ

$$SS_{Treatment} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y^2}{N} \quad (2-24)$$

ค่าผิดพลาดของผลรวมของกำลังสองสามารถหาค่าได้จากการลบ กล่าวคือ

$$\Sigma\Sigma E = \Sigma\Sigma T - \Sigma\Sigma Treatment \quad (2-25)$$

ขั้นตอนการทดสอบได้สรุปไว้ในตาราง 4 ซึ่งเรียกว่า ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตาราง 4 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว แบบจำลองผลกระทบคงที่

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	$F_0$
Between Treatments	$SS_{Treatment}$	$a-1$	$MS_{treatments}$	$F_0 = \frac{MS_{treatments}}{MS_E}$
Error (within treatments)	$SS_E$	$N-a$	$MS_E$	
Total	$SS_T$	$N-1$		

ที่มา : ปารเมศ ชูติมา. 2545 : 62

### การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

วชิรพงษ์ สาริสิงห์ (2546 : 36) ได้กล่าวไว้ว่า การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับตั้งค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่ต้องการ ซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลองคือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นแบบการลองผิดลองถูกหรือใช้การทดลองปรับตั้งค่าของกระบวนการทีละค่า (One-Factor-At-A-Time) เช่น ถ้าหากสงสัยว่าต้องปรับตั้งค่าของอุณหภูมิในการอบชิ้นงาน เวลาที่ใช้ในการอบ และส่วนผสมของชิ้นงานเป็นเท่าไรดี จึงจะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพสูงสุดไม่เป็นของเสีย ดังนั้นแนวทางที่มักใช้กันโดยทั่ว ๆ ไปก็คือลองปรับตั้งในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบก่อน (ในขณะที่คงค่าของเวลาที่ใช้ในการอบกับอัตราส่วนผสมไว้) เมื่อทดลองจนได้ค่าของอุณหภูมิที่เราต้องการแล้วจึงค่อยไปปรับตั้งเรื่องของเวลา (และก็คงค่าของอุณหภูมิกับอัตราส่วนผสมไว้) จากนั้นสุดท้ายจึงไปทำการปรับตั้งเรื่องของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (โดยการคงค่าของอุณหภูมิกับเวลาไว้) และเราอาจทำซ้ำไปเรื่อย ๆ เพื่อที่จะหาจุดที่ดีที่สุดของกระบวนการ ซึ่งลักษณะการทำ เช่นนี้เรียกว่า One-Factor-At-A-Time โดยจะให้ผลของการเข้าสู่จุดหมายที่เราต้องการของกระบวนการได้ช้ามากและสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์และเก็บข้อมูลสูงและยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีผลของความสัมพันธ์ร่วม (Interaction Effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการ

### แนวทางในการออกแบบการทดลอง

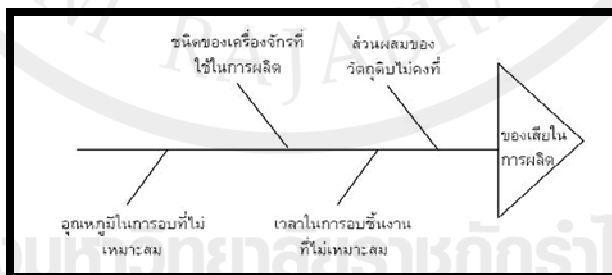
มอนโกเมอรี (Montgomery, 2005 : 24) กล่าวว่า การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง ทุกคนที่เกี่ยวข้องในการทดลองจะต้องมีความเข้าใจว่า กำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา อาจคิดว่าขั้นตอนนี้ง่ายและตรงไปตรงมา แต่ในความเป็นจริงแล้วขั้นตอนนี้ไม่ได้ง่ายอย่างที่คิด ในขั้นตอนนี้จะต้องพยายามพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และจะต้องหาข้อมูลจากบุคคลหรือหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจในคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้น ๆ ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบการทดลองทุกครั้งควรมีการทำงานเป็นทีม

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

และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ ซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดนี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) ควรจะกำหนดให้ระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อย ๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัย ควรจะเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึงว่า ขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ ควรมีค่ากว้าง ๆ และเมื่อได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุดอาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้

วชิรพงษ์ สาริสิงห์ (2546 : 37) ได้กล่าวไว้ว่า ในขั้นตอนการระบุหาปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการนี้ใช้วิธีการระดมความคิดแล้วพิจารณาดูว่ามีปัจจัยใดบ้างที่อาจจะส่งผลกระทบต่อปัญหาที่สนใจ เช่น ถ้าหากปัญหาคือ อัตราของเสียในการผลิตที่สูง ดังนั้นจากการประชุมร่วมกับพนักงานที่เกี่ยวข้องและเป็นพนักงานที่มีประสบการณ์ในการผลิตตรงพื้นที่ปัญหานั้นก็จะทำให้สามารถระบุปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจจะส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดของเสียได้ เช่น เวลาในการอบชิ้นงาน (อบนานเสียมากอบเร็วได้ชิ้นงานดีมากกว่า) อุณหภูมิในการอบ (ความร้อนสูงให้คุณภาพดีกว่าความร้อนต่ำ) เป็นต้น ซึ่งประสบการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการก้าวไปสู่ขั้นตอนต่อไปของการออกแบบการทดลอง โดยทั่วไปแล้วทีมงานของการออกแบบการทดลองนั้นจะต้องประกอบไปด้วยพนักงานอย่างน้อย 1 คนขึ้นไปที่เป็นพนักงานที่มีประสบการณ์สูงที่ปฏิบัติงานอยู่ในพื้นที่ของปัญหานั้นมาเป็นระยะเวลาค่อนข้างนาน ทั้งนี้ก็เพื่อจุดประสงค์ในการช่วยคณะทำงานท่านอื่น ๆ ในการระดมความคิดหาปัจจัยที่คาดว่าส่งผลกระทบต่อกระบวนการและจะได้นำเอาปัจจัยทั้งหลายเหล่านี้ไปดำเนินการออกแบบการทดลองได้ต่อไป และเครื่องมือคุณภาพที่นิยมนำมาใช้ในการช่วยระดมความคิดเพื่อระบุสาเหตุที่คาดว่าน่าจะส่งผลกระทบต่อปัญหานั้นได้แก่ แผนภูมิแก๊งปลา (Cause and Effect Diagram), FMEA, Selection Matrix เป็นต้น ดังแสดงในภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 ตัวอย่างของการระบุสาเหตุของปัญหาโดยการใช้แผนภูมิแก๊งปลา

ที่มา : วชิรพงษ์ สาริสิงห์ 2546 : 37

เมื่อระบุได้แล้วว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะส่งผลต่อปัญหาที่สนใจ ดังนั้น ขั้นตอนถัดไปคือการกำหนดค่าระดับในการทดลองของปัจจัยแต่ละตัว เช่น หากปัจจัยที่คาดว่าน่าจะมีผลต่ออัตราการเกิดของเสียคืออุณหภูมิและเวลาในการอบชิ้นงาน ดังนั้น เราก็ลองปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิที่ระดับ 100 กับ 200 °C และลองตั้งเวลาในการอบที่ 45 กับ 60 นาที เป็นต้น ซึ่งการตั้งค่าระดับในการทดลองของปัจจัยนี้จะต้องเลือกระดับความแตกต่างที่ไม่น้อยจนเกินไป (เช่น ทำการทดลองที่ 10 °C กับ 10.5 °C) หรือเลือกระดับที่แตกต่างกันมากจนเกินไป (เช่น ทำการทดลองที่ 0 °C กับ 200 °C) เป็นต้น เนื่องจากการที่กำหนดค่าระดับของปัจจัยในการทดลองที่แคบเกินไปหรือกว้างเกินไปอาจจะส่งผลให้ไม่สามารถเห็นผลของการทดลองที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน

### 3. เลือกตัวแปรผลตอบ

มอนโกเมอรี (Montgomery, 2005 : 41) ได้กล่าวไว้ว่า ในการเลือกตัวแปรผลตอบ ผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ย หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการจะเป็นตัวแปรผลตอบ เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องกำหนดให้ได้ว่าอะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

4. เลือกการออกแบบการทดลอง พิจารณาจากขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรปลิเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่า ควรจะใช้วิธีบล็อกหรือใช้การแรนดอมไมเซชันอย่างไรอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบการทดลองต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนมากจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้นจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

5. ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวังเพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ควรนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติก็คือ ทำให้ผู้ที่มิชำนาญในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้านำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมามีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

7. สรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้นำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำการขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

#### การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

ปารเมศ ชูติมา (2545 : 217) ได้กล่าวไว้ว่า การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เพลทิกेट (Replicate) จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด  $ab$  การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล จะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้น ๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) เนื่องจากว่ามันเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลองในการทดลองบางอย่างอาจจะพบว่าความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้น บนระดับต่าง ๆ ของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่น ๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น ซึ่งหมายถึงว่า ผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่น ๆ และเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

ปารเมศ ชูติมา (2545 : 222) กล่าวว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุดจะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย คือ A และ B ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลคือในแต่ละเพลทิกेटของการทดลองจะประกอบด้วยการทดลองรวมปัจจัยทั้งหมด  $ab$  การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนเพลทิกेटทั้งหมด  $n$  ครั้ง

กำหนดให้  $Y_{ijk}$  คือ ผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, a$ ) และปัจจัย B อยู่ที่ระดับ  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, b$ ) สำหรับเพลทิกेटที่  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2-3 เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง  $abn$  ครั้ง ถูกเลือกมาอย่างสุ่ม ดังนั้น การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า การออกแบบสุ่มบริบูรณ์

(Completely Randomized Design) ข้อมูลจากการทดลองอาจจะเขียนในรูปของแบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) คือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i=1,2,\dots,a \\ j=1,2,\dots,b \\ k=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (2-26)$$

โดยที่  $\mu$  หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด ;  $\tau_i$  หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่  $i$  ของแถว (Row) ของปัจจัย A ;  $\beta_j$  หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่  $j$  ของคอลัมน์ (Column) ของปัจจัย B ;  $(\tau\beta)_{ij}$  หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง  $\tau_i$  และ  $\beta_j$  และ  $\sum \varepsilon_{ijk}$  หมายถึง องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม สมมติว่าปัจจัยทั้งคู่มีค่าตายตัว (Fixed) และผลจากการทดลอง (Treatment Effect) หมายถึง ส่วนที่เบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมด ดังนั้น  $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$  และ

$\sum_{i=1}^b \beta_i = 0$  ในทำนองเดียวกัน สมมติว่าผลที่เกิดจากอันตรกิริยามีค่าตายตัว และกำหนดว่า

$$\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$$

เนื่องจากการทดลองครั้งนี้มีจำนวนเรพลิเคต  $n$  ครั้ง ดังนั้นจำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ  $abn$

ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ทั้งปัจจัยที่เกิดจาก A (แถว) และ B (คอลัมน์) มีความสำคัญเท่ากัน ดังนั้นเราต้องการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย A หรือกล่าวได้ว่า

$$\begin{aligned} H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \\ H_1 : \text{at least one } \tau_i \neq 0 \end{aligned} \quad (2-27)$$

และความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย B

$$\begin{aligned} H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0 \\ H_1 : \text{at least one } \beta_j \neq 0 \end{aligned} \quad (2-28)$$

ตาราง 5 รูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

		Factor B			
		1	2	...	B
Factor A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$	...	$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$	...	$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$
	...	...	...	...	...
	a	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$	...	$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$

ที่มา : ปารเมศ ชุติมา. 2545 : 223

นอกจากนั้นแล้ว เรายังสนใจผลที่จะทราบว่า อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปัจจัย A และ B มีนัยสำคัญหรือไม่ หรือกล่าวได้ว่า

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$$

$$H_1 : \text{at least one } (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad (2-29)$$

## 2. การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับ Fixed Effect Model

ปารเมศ ชุติมา (2545 : 224) กล่าวว่า การกำหนดให้  $y_{i..}$  เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่  $i$  ของปัจจัย A;  $y_{.j}$  เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่  $j$  ของปัจจัย B;  $y_{ij}$  เป็นค่าผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้เซลล์ตำแหน่งที่  $ij$  และ  $y_{...}$  เป็นผลรวมของข้อมูลจาก

การทดลองทั้งหมดที่ได้ กำหนดให้  $\bar{y}_{i..}$ ,  $\bar{y}_{.j}$ ,  $\bar{y}_{ij}$  และ  $\bar{y}_{...}$  เป็นค่าเฉลี่ยของแถว คอลัมน์ เซลล์และผลรวมทั้งหมด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y_{i..} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n Y_{ijk} \bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{bm} \quad i=1,2,\dots,a$$

$$y_{.j} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} \bar{y}_{.j} = \frac{y_{.j}}{am} \quad j=1,2,\dots,b$$

$$y_{ij} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \bar{y}_{ij} = \frac{y_{ij}}{n} \quad i=1,2,\dots,a$$

$$y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \bar{y}_{...} = \frac{y_{...}}{abm}$$

ค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\Sigma\Sigma T = \Sigma\Sigma A + \Sigma\Sigma B + \Sigma\Sigma AB + \Sigma\Sigma E$$

โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abn}$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y^2}{abn}$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y^2}{abn}$$

$$SS_{Subtotals} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y^2 \dots}{abn}$$

$$SS_{AB} = SS_{Subtotals} - SS_A - SS_B$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B$$

หรือ

$$\Sigma \Sigma E = \Sigma \Sigma T - \Sigma \Sigma \Sigma \beta \tau \alpha \lambda \sigma$$

เมื่อนำค่าของผลรวมของกำลังสองมาหารด้วยระดับขั้นความเสรีก็จะได้ค่าของค่ากำลังสองเฉลี่ย สังเกตว่า ถ้าสมมติฐานว่าง (Null Hypothesis) ที่ว่าไม่มีผลเนื่องจากปัจจัยของแถวคอลัมน์ และอันตรกิริยา มีค่าเป็นจริง ดังนั้น  $MS_A$ ,  $MS_B$ ,  $MS_{AB}$  และ  $MS_E$  จะมีค่าประมาณเท่ากับ  $\sigma^2$  อย่างไรก็ตาม ถ้ามีความแตกต่างเนื่องจากปัจจัยของแถว จะได้ว่า  $MS_A$  จะมีค่ามากกว่า  $MS_E$  เหตุการณ์ทำนองเดียวกันจะเกิดขึ้นกับ  $MS_B$  และ  $MS_E$  เช่นกัน ดังนั้นในการทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา ก็เพียงหารค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกี่ยวข้องด้วยค่า  $MS_E$  และถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามาก หมายความว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองไม่สนับสนุนสมมติฐานว่าง (ปฏิเสธสมมติฐานว่าง)

ตาราง 6 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ตัวแปร แบบ Fixed Effects Model

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	$F_0$
A treatments	$SS_A$	$a-1$	$MS_A = SS_A / a-1$	$F_0 = MS_A / MS_E$
B treatments	$SS_B$	$b-1$	$MS_B = SS_B / b-1$	$F_0 = MS_B / MS_E$
Interaction	$SS_{AB}$	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = SS_{AB} / (a-1)(b-1)$	$F_0 = MS_{AB} / MS_E$
Error	$SS_E$	$ab(n-1)$	$MS_E = SS_E / ab(n-1)$	
Total	$SS_T$	$abn-1$		

ที่มา : ปารเมศ ชูติมา. 2545 : 226

ถ้าสมมติว่าแบบจำลองตามสมการที่ (2-26) เป็นแบบจำลองที่เหมาะสม และพจน์ของความผิดพลาด  $\sum \epsilon_{ijk}$  มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ โดยมีค่าความแปรปรวนคงตัวเท่ากับ  $\sigma^2$  ดังนั้นอัตราส่วนของค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจาก  $MS_A/MS_E$ ,  $MS_B/MS_E$  และ  $MS_{AB}/MS_E$  จะมีการกระจายแบบ F ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีของตัวตั้งเป็น  $a-1$ ,  $b-1$  และ  $(a-1)(b-1)$  และมีระดับขั้นความเสรีของตัวหารคือ  $ab(n-1)$  ค่าบริเวณวิกฤติคือ ปลายทางด้านบนของการกระจายแบบ F วิธีการทดสอบจะกระทำโดยอาศัยตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังตาราง 6

### 3. การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง

ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้ จะต้องมีการตรวจสอบความเพียงพอ (Adequacy) ของแบบจำลองทางสถิติที่นำมาใช้เสียก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคือ การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ส่วนตกค้างสำหรับแบบจำลองแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย คือ

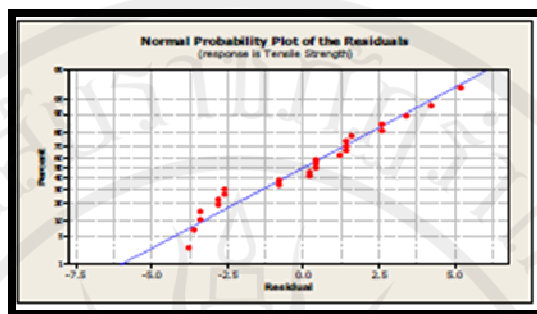
$$\sum \epsilon_{ijk} = \psi_{ijk} - \psi_{ij\cdot} \quad (2-39)$$

และเนื่องจากว่าค่าของ  $\psi_{ijk} = \psi_{ij\cdot}$  (ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการสังเกตในเซลล์ที่  $ij$ ) สมการที่ (2-38) กลายเป็น

$$\sum \epsilon_{ijk} = \psi_{ijk} - \psi_{ij\cdot} \quad (2-40)$$

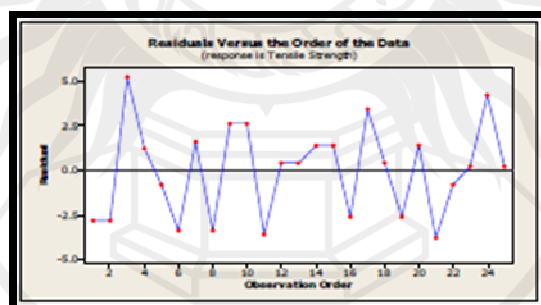
โดยมีสมมติฐานว่า รูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองต้องเป็นไปตามหลักการ  $\sum \epsilon_{ijk} \sim NID(0, \sigma^2)$  คือ ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และ  $\sigma^2$  มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ การตรวจสอบ  $\sum \epsilon_{ijk}$  มีขั้นตอน คือ

3.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) จากการพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง โดยนำข้อมูลมาสร้างเป็นแผนภูมิดังภาพประกอบ 18 พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพประกอบ 18 กราฟตัวอย่างแสดงการกระจายตัวแบบปกติของค่า Residual  
ที่มา : วันวิสา คำนวณตระกูลศิลป์. 2552 : 74

3.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) พิจารณาจากแผนภูมิการกระจายดังภาพประกอบ 19 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้างเทียบกับ Observation Order พบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

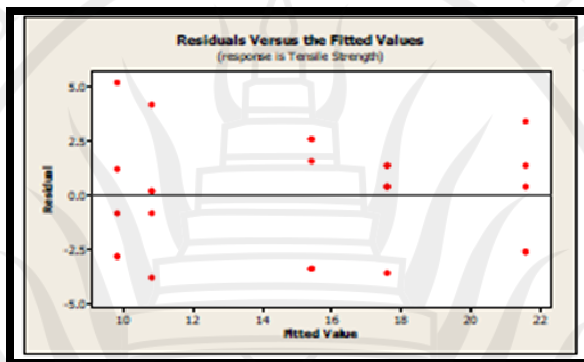


ภาพประกอบ 19 กราฟตัวอย่างแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ  
Observation Order

ที่มา : วันวิสา คำนวณตระกูลศิลป์. 2552 : 75

3.3 การตรวจสอบความเสถียรของ  $\sigma^2$  (Variance Stability) สามารถพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายดังภาพประกอบ 20 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Fitted Value พบว่า  $\sigma^2$  ของค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวเป็นรูปเหมือนกรวยปลายเปิด แสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนที่ไม่คงตัว กรณีนี้ต้องประยุกต์ใช้การแปลงข้อมูล เช่น การแปลงโดยใช้รากที่สอง การแปลงแบบลอการิทึม เป็นต้น จากนั้นจึงนำข้อมูลที่แปลงแล้วมาทำการตรวจสอบ

อีกครั้งและถ้าพบว่า  $\sigma^2$  ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง รูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพประกอบ 20 กราฟตัวอย่างแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Fitted Value มีการกระจายตัวเป็นรูปเหมือนกรวยปลายเปิด

ที่มา : วันวิสา ค่วนตระกูลศิลป์. 2552 : 75

4. รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

ปารเมศ ชูติมา (2545 : 239) กล่าวถึงผลของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ที่กล่าวมาข้างต้นอาจจะขยายไปสู่กรณีทั่วไปได้ ในกรณีที่ปัจจัย A มีจำนวนระดับเท่ากับ a, ปัจจัย B มีจำนวนระดับเท่ากับ b, ปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c ต่อไปเช่นนี้เรื่อย ๆ และทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในลักษณะของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งจะมีจำนวนข้อมูลที่ได้ทั้งหมดในการทดลองเท่ากับ  $abc\dots n$  และจะต้องมีเรพลิเคตอย่างน้อย 2 เรพลิเคต  $v \geq 2$  เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ถ้าอันตรกิริยาที่เป็นไปได้ทั้งหมดถูกนำเข้าไปพิจารณาในแบบจำลอง

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, v \end{cases} \quad (2-41)$$

ถ้าปัจจัยในการทดลองทั้งหมดเป็นแบบค่าตายตัว สามารถที่จะคิดสูตรและทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลหลักและอันตรกิริยาได้โดยง่าย สำหรับแบบจำลองแบบผลตายตัว ตัวทดสอบ

เชิงสถิติสำหรับผลหลักและอันตรกิริยาสามารถหาได้โดยสร้างค่ากำลังสองเฉลี่ยของสิ่งนั้นขึ้น แล้วหารด้วยค่ากำลังสองเฉลี่ยของความผิดพลาด (เหมือนกับกรณีของ 2 ปัจจัย) และการทดสอบ

สมมติฐานจะใช้ F-Test แบบทดสอบปลายด้านบนหนึ่งด้าน จำนวนระดับขึ้นความเสรีสำหรับผลหลักของปัจจัยใด ๆ มีค่าเท่ากับจำนวนระดับของปัจจัยนั้นลบด้วย 1 และจำนวนระดับขึ้นความเสรีของอันตรกิริยามีค่าเท่ากับผลคูณของระดับขึ้นความเสรีของส่วนประกอบของอันตรกิริยานั้น ๆ ตัวอย่างเช่น พิจารณาแบบจำลองการวิเคราะห์ความแปรปรวน 3 ปัจจัย

สมมติว่า A, B และ C มีค่าตายตัว ตารางสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงได้ดังตาราง 7 ค่าของ F-Test ของผลหลักและอันตรกิริยาหาได้โดยตรงจากค่ากำลังสองเฉลี่ย คาดหมายที่ได้

ตาราง 7 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลอง 3 ปัจจัย แบบ Fixed Effects

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	$F_0$
A	$SS_A$	$a-1$	$MS_A$	$F_0 = MS_A / MS_E$
B	$SS_B$	$b-1$	$MS_B$	$F_0 = MS_B / MS_E$
C	$SS_C$	$c-1$	$MS_C$	$F_0 = MS_C / MS_E$
AB	$SS_{AB}$	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB}$	$F_0 = MS_{AB} / MS_E$
AC	$SS_{AC}$	$(a-1)(c-1)$	$MS_{AC}$	$F_0 = MS_{AC} / MS_E$
BC	$SS_{BC}$	$(b-1)(c-1)$	$MS_{BC}$	$F_0 = MS_{BC} / MS_E$
ABC	$SS_{ABC}$	$(a-1)(b-1)(c-1)$	$MS_{ABC}$	$F_0 = MS_{ABC} / MS_E$
Error	$SS_E$	$abc(n-1)$	$MS_E$	
Total	$SS_T$	$abcn-1$		

ที่มา : ปารเมศ ชูติมา. 2545 : 240

การคำนวณด้วยมือสำหรับค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองในตาราง 7 มีสูตรในการคำนวณดังนี้ค่าผลรวมของกำลังสองของผลหลักหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} \tag{2-42}$$

เพื่อที่จะคำนวณค่าผลรวมของกำลังสองแบบ 2 ปัจจัยของอันตรกิริยา จะต้องสร้างตารางผลรวม ซึ่งประกอบด้วยเซลล์จำนวน  $A B, A \cdot X$  และ  $B \cdot X$  เซลล์ขึ้นมา ซึ่งเกิดจากการยุบตารางข้อมูล

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y^2}{abcn} \quad (2-43)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y^2}{abcn} \quad (2-44)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{..k}^2 - \frac{y^2}{abcn} \quad (2-45)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_B \quad (2-46)$$

$$= SS_{Subtotal(AB)} - SS_A - SS_B$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{i.k.}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_C \quad (2-47)$$

$$= SS_{Subtotal(AC)} - SS_A - SS_C$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{.jk.}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_B - SS_C \quad (2-48)$$

$$= SS_{Subtotal(BC)} - SS_B - SS_C$$

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk.}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (2-49)$$

$$= SS_{Subtotal(ABC)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

เบื้องต้นให้อยู่ในรูปของตารางแบบ 2 ทาง จำนวน 3 ตาราง เพื่อคำนวณค่าต่าง ๆ เหล่านี้ค่าผลรวมของกำลังสองหาได้จากค่าผลรวมของกำลังสองของอันตรกิริยาแบบ 3 ปัจจัยหาได้จากสูตร

ค่าผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาดหาได้จากการลบผลรวมของกำลังสองทั้งหมดที่เกิดจากผลหลักและอันตรกิริยาจากผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง

$$\Sigma\Sigma E = \Sigma\Sigma T - \Sigma\Sigma\Sigma\nu\beta\tau\sigma\alpha\lambda\sigma(ABX) \quad (2-50)$$

#### การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ

ปารเมศ ชูติมา (2545 : 259) ได้กล่าวไว้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งต้องการที่จะศึกษาถึงผลรวมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้นกรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย  $k$  ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพได้ เช่น เครื่องจักรหรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่ง ๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้น ๆ ก็ได้ ใน 1 เพลทเคดที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้

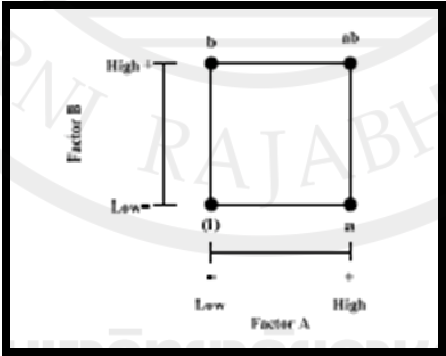
จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น  $2\xi 2\xi 2\xi \dots \xi 2 = 2^k$  ข้อมูล และเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  การออกแบบ  $2^k$  มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลอง จำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง  $k$  ชนิดได้อย่างบริบูรณ์โดยใช้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ดังนั้น จึงไม่น่าแปลกใจเลยที่การออกแบบ  $2^k$  จะถูกนำมาใช้ อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการ ทดลองแบบ  $2^k$  ประกอบด้วย 2 ระดับ ขอสมมติว่าผลตอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วง ของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานเช่นนี้เป็นสิ่งที่ยอมรับได้สำหรับการ ทดลองเพื่อกรองปัจจัยเมื่อเราเพิ่งเริ่มต้นทำการศึกษาระบบ

1. การออกแบบ  $2^k$

ปารเมศ ชูติมา (2545 : 260) การออกแบบ  $2^k$  ชนิดแรกที่จะกล่าวถึง คือ การออกแบบ ที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล แบบ  $2^k$  ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ “ต่ำ” และ “สูง”

การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบนี้แสดงในรูปของกราฟดังภาพประกอบ 21 ตามปกติแล้วเราจะแสดงผลของปัจจัยด้วยตัวอักษรลาตินตัวใหญ่ ดังนั้น A จะแทนผลของปัจจัย A, B แทนผลของปัจจัย B และ AB แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB ในการออกแบบ  $2^k$  ระดับต่ำ และสูง จะแทนด้วยเครื่องหมาย + และ - บนแกน A และ B ตามลำดับ

$$\begin{aligned}
 B &= \frac{1}{2n} \{ab - a\} + \{b - (1)\} \\
 &= \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)]
 \end{aligned}
 \tag{2-52}$$



ภาพประกอบ 21 การทดลองร่วมปัจจัยของการออกแบบ  $2^k$

ที่มา : ปารเมศ ชูติมา. 2545 : 261

การทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 สำหรับการออกแบบนี้จะแทนด้วยตัวอักษรเล็ก (ภาพประกอบ 21) จะเห็นได้ว่า สำหรับระดับสูงของปัจจัยใด ๆ จะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็กของปัจจัยนั้น ในการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้น สำหรับระดับต่ำจะไม่ปรากฏตัวอักษรใด ๆ ในการทดลองร่วมปัจจัย ดังนั้น สำหรับการออกแบบ  $2^k$  ในที่นี้  $a$  จะแทนการทดลองร่วมปัจจัยของปัจจัย A ที่ระดับสูง และ B ที่ระดับต่ำ  $b$  แทน A ที่ระดับต่ำและ B ที่ระดับสูง,  $ab$  แทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับสูง และ (1) แทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ

สำหรับการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ระดับ กำหนดว่าผลเฉลี่ยของปัจจัยหนึ่ง คือ ความเปลี่ยนแปลงของผลตอบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้น ๆ ที่ถูกนำมาเฉลี่ยกับระดับของปัจจัยอื่น สัญลักษณ์ (1),  $a$ ,  $b$  และ  $ab$  แทนผลรวมของ „ เรพลีเมนต์ของการทดลองร่วมปัจจัยนั้น ๆ ผลของ A ที่ระดับต่ำของ B คือ  $[a-(1)]/n$  และผลของ A ที่ระดับสูงของ B คือ  $[ab-b]/n$  นำค่าทั้งคู่นี้มาเฉลี่ยจะได้ผลหลักของปัจจัย A คือ

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2n} \{[ab-b] - [a-(1)]\} \\ &= \frac{1}{2n} [ab+a-b-(1)] \end{aligned} \quad (2-51)$$

ค่าเฉลี่ยของผลหลักของปัจจัย B หาได้จากผลของ B ที่ A ระดับต่ำ คือ  $[b-(1)]/n$  และที่ A ระดับสูง คือ  $[ab-a]/n$  ซึ่งเขียนได้เป็น

ผลของอันตรกิริยาของ AB คือ ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างผลของ A ที่ B ระดับสูง กับผลของ A ที่ B ระดับต่ำ ซึ่งก็คือ

$$\begin{aligned} AB &= \frac{1}{2n} \{[ab-b] - [a-(1)]\} \\ &= \frac{1}{2n} [ab+(1)-a-b] \end{aligned} \quad (2-53)$$

ในทางกลับกันอาจจะหาค่าของ AB ได้จากค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างผลของ B ที่ A ระดับสูง กับผลของ B ที่ A ระดับต่ำ ซึ่งจะให้ผลออกมาเช่นเดียวกับสมการที่ (2-53)

สมการของผลของ A, B และ AB อาจหาได้โดยวิธีอื่นอีก เช่น ผลของ A สามารถหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบของการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองบนด้านขวามือของรูปที่เหลี่ยมจัตุรัสในภาพที่ 2-20 (เรียกว่า  $\psi A+$  เนื่องจากมันคือค่าเฉลี่ยของผลตอบของการ

ทดลองร่วมปัจจัยที่ A มีค่าสูง) กับการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองที่อยู่ทางด้านซ้ายมือ (เรียกว่า  $\psi A^-$ ) นั้นคือ

ซึ่งผลที่ได้จะมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากสมการที่ (2-51) ทุกประการ ผลของ B ดังแสดงในสมการที่ (2-52) ก็สามารถหาได้จากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบของการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองบนด้านบนของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (เรียกว่า  $\psi B^+$ ) กับค่าเฉลี่ยของการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองที่อยู่ด้านล่าง (เรียกว่า  $\psi B^-$ ) นั้น คือ

$$\begin{aligned} B &= \bar{y}_{B^+} - \bar{y}_{B^-} \\ &= \frac{ab+b}{2n} - \frac{a+1}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} [ab+b-a-1] \end{aligned} \quad (2-55)$$

สุดท้าย ผลของอันตรกิริยาของ AB หาได้จากค่าเฉลี่ยของการทดลองร่วมปัจจัยจากขวาไปซ้าย ตามแนวเส้นทแยงมุมของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ab และ 1) ลบด้วยค่าเฉลี่ยของการทดลองร่วมปัจจัยจากซ้ายไปขวาตามแนวเส้นทแยงมุมของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (a และ b) หรือ

$$\begin{aligned} AB &= \frac{ab+1}{2n} - \frac{a+b}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} [ab+1-a-b] \end{aligned} \quad (2-56)$$

ซึ่งค่าที่ได้มีค่าเดียวกันกับสมการที่ (2-53) ทุกประการ

ในการทดลองที่เกี่ยวกับการออกแบบ  $2^k$  เราจะต้องตรวจสอบทั้งขนาดและทิศทางของปัจจัยที่มีผลเพื่อที่จะหาว่า ตัวแปรตัวใดที่น่าจะเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดผลขึ้นและใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนมาเป็นตัวยืนยันข้อสรุปนั้น

พิจารณาผลรวมของกำลังสองของ A, B และ AB กำหนดให้ว่าคอนแทรสต์ที่จะใช้ในการประมาณผลของ A คือ

$$\text{Χοντραστ } A = \alpha\beta + \alpha - \beta - (1) \quad (2-57)$$

จะเรียกคอนแทรสต์นี้ว่า ผลทั้งหมด (Total Effect) ของ A จากสมการที่ (2-52) และสมการที่ (2-53) พบว่าคอนแทรสต์นี้ยังสามารถใช้ในการประมาณผลของ B และ AB ได้อีกด้วย

ยิ่งกว่านั้นคอนแทรกต์เหล่านี้ยังมีรูปแบบในเชิงตั้งฉาก (Orthogonal) และผลรวมของกำลังสองของคอนแทรกต์ใด ๆ จะหาได้จากคอนแทรกต์ยกกำลังสอง ทารด้วยผลคูณของจำนวนของข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในคอนแทรกต์นั้นกับผลรวมกำลังสองของสัมประสิทธิ์ของคอนแทรกต์ ดังนั้นผลรวมของกำลังสองของ A, B, และ AB สามารถเขียนได้ดังนี้

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{4n} \quad (2-58)$$

$$SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{4n} \quad (2-59)$$

$$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n} \quad (2-60)$$

และผลรวมทั้งหมดของกำลังสองสามารถหาได้จาก

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{..}^2}{4n} \quad (2-61)$$

ปกติแล้ว  $SS_T$  จะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $4n-1$  และค่าผิดพลาดของผลรวมของกำลังสองซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $4(n-1)$  สามารถคำนวณได้จาก

$$\Sigma \Sigma E = \Sigma \Sigma T - \Sigma \Sigma A - \Sigma \Sigma B - \Sigma \Sigma AB \quad (2-62)$$

## 2. แบบจำลองการถดถอย

ปารเมศ ชูติมา (2545 : 266) กล่าวถึง ในการออกแบบ  $2^k$  แบบจำลองการถดถอย (Regression Model) สามารถหาได้ง่าย ๆ ดังนี้

$$\psi = \beta_0 + \beta_1 \xi_1 + \beta_2 \xi_2 + \dots \quad (2-63)$$

โดยที่  $x_1$  และ  $x_2$  เป็นตัวแปรที่ถูกเข้ารหัส และ  $\beta$  แทนสัมประสิทธิ์ของการถดถอย

## 3. รูปทั่วไปของการออกแบบ $2^k$

ปารเมศ ชูติมา (2545 : 277) กล่าวไว้ว่า วิธีการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวถึงมาก่อนหน้านี้ อาจจะถูกทำให้อยู่ในรูปทั่วไปของการออกแบบ  $2^k$  ได้นั้นคือ การออกแบบที่มี  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัย

ประกอบด้วย 2 ระดับ แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบ  $2^k$  จะประกอบด้วยผลหลัก  $k$  ชนิด  $\frac{k}{2}$  อันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย  $\frac{k}{3}$  อันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย, K, และ 1 อันตรกิริยาของ  $k$  ปัจจัยนั้น

คือ แบบจำลองบริบูรณ์สำหรับการออกแบบ  $2^k$  จะประกอบไปด้วยผลทั้งสิ้น  $2^k - 1$  ชนิดเครื่องหมาย สำหรับการทดลองร่วมปัจจัยที่กำหนดให้ก่อนหน้านี้ยังใช้ในรูปแบบทั่วไปได้เช่นกัน

วิธีการทั่วไปในการวิเคราะห์เชิงสถิติของการออกแบบ  $2^k$  ได้สรุปไว้ในตาราง 8

ตาราง 8 ขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบ  $2^k$

1. Estimate Factor Effects
2. Form Initial Model
3. Perform Statistical Testing
4. Refine Model
5. Analyze Residual
6. Interpret Results

ที่มา : ปารเมศ ชูติมา. 2545 : 277

จากตาราง 8 ในขั้นตอนแรกจะต้องประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ และตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลที่เกิดขึ้น ข้อมูลเช่นนี้จะทำให้ผู้ทดลองทราบโดยเบื้องต้นว่า ปัจจัยและอันตรกิริยาดังใดที่มีความสำคัญ และปัจจัยเหล่านี้ควรจะถูกรับให้อยู่ในทิศทางใดเพื่อที่จะปรับปรุงผลตอบ ในขั้นตอนที่สองการสร้างแบบจำลองเริ่มต้น ควรจะเลือกแบบจำลองเต็มรูปแบบซึ่งประกอบด้วยผลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมด ในขั้นตอนที่สาม จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อที่จะทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา ดังในตาราง 9

ตาราง 9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบ  $2^k$

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom
$k$ main effects		
A	$SS_A$	1
B	$SS_B$	1
⋮	⋮	⋮
K	$SS_K$	1
$\binom{k}{2}$ two-factor interactions		
AB	$SS_{AB}$	1
AC	$SS_{AC}$	1
⋮	⋮	⋮
JK	$SS_{JK}$	1
$\binom{k}{3}$ three-factor interactions		
ABC	$SS_{ABC}$	1
ABD	$SS_{ABD}$	1
⋮	⋮	⋮
IJK	$SS_{IJK}$	1
$\binom{k}{k}$ 1 $k$ -factor interaction		
ABC...K	$SS_{ABC...K}$	1
Error	$SS_E$	$2^k(n-1)$
Total	$SS_T$	$n2^k-1$

ที่มา : ปารเมศ ชุติมา. 2545 : 278

จากตาราง 9 แสดงรูปแบบทั่วไปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  ที่มี  $n$  เรพลีเคต ขั้นตอนถัดไปจะเป็นการจัดเกลาแบบจำลอง ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกี่ยวกับการดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบขั้นตอนที่ห้าจะเป็นการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลองและตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้นมีบางครั้งเช่นกันที่การจัดเกลาแบบจำลองเกิดขึ้น หลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ทั้งนี้เนื่องจากพบว่าแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอหรือสมมติฐานที่กำหนดให้มันไม่ถูกต้องอย่างรุนแรง ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยจะสร้างกราฟของผลหลักและอันตรกิริยาขึ้น

เพื่อที่จะประมาณค่าของผล หรือค่าผลรวมของกำลังสองของผล จะต้องคำนวณค่าคอนแทรกสต์ที่เกี่ยวข้องกับผลตัวนั้นก่อน ซึ่งทำได้โดยการใช้ตารางของเครื่องหมายบวกและลบ ดังเช่น ตาราง 10 เป็นต้น อย่างไรก็ตามสำหรับ  $k$  ที่มีค่ามาก วิธีการเช่นนี้จะทำให้เกิดความล่าช้าในการใช้งาน ดังนั้นควรจะใช้วิธีการอีกอย่างหนึ่งก็คือ ขยายทางด้านขวามือของสมการคอนแทรกสต์

$$X_{\text{contrast}}_{AB...K} = (\alpha \pm 1)(\beta \pm 1) \dots (\kappa \pm 1) \tag{2-64}$$

ในการขยายสมการที่ (2-63) จะใช้พีชคณิตเบื้องต้นเข้ามาช่วย และแทนค่า 1 ในสูตรที่คำนวณได้ครั้งสุดท้ายด้วย (1) สัญลักษณ์ในวงเล็บแต่ละชุดจะเป็นค่าลบ ถ้าปัจจัยนั้นได้ถูกรวมไว้ในคอนทราสต์และเป็นค่าบวก ถ้าปัจจัยนั้นไม่ได้ถูกรวมเอาไว้

เมื่อคำนวณค่าคอนทราสต์สำหรับผลต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว สามารถที่จะประมาณค่าผลต่าง ๆ และคำนวณหาค่าของผลรวมของกำลังสองได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$AB \dots K = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB \dots K}) \quad (2-65)$$

$$SS_{AB \dots K} = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB \dots K})^2 \quad (2-66)$$

ตามลำดับ โดยที่ n แทนจำนวนของเรพลิกेट

ตาราง 10 เครื่องหมายทางพีชคณิตสำหรับการคำนวณผลในการออกแบบ  $2^k$

Treatment Combination	Factorial Effect			
	I	A	B	AB
(1)	+	-	-	+
A	+	+	-	-
B	+	-	+	-
ab	+	+	+	+

ที่มา : ปารเมศ ชูติมา. 2545 : 300

### หลักการ 3R

กรมโรงงานอุตสาหกรรม (ออนไลน์. 2555) กล่าวถึง “3Rs” ประกอบด้วย R1-Reduce ซึ่งคือการลดหรือใช้น้อยเท่าที่จำเป็น R2-Reuse ซึ่งคือการใช้ซ้ำและ R3-Recycle ซึ่งคือ การแปรรูปมาใช้ใหม่การจัดการ “ของเสีย” ตามหลัก 3Rs หมายถึง การจัดการของเสียที่มีความสำคัญในการลดการเกิดของเสียให้เหลือน้อยที่สุดเป็นลำดับแรกโดยมุ่งเน้นการใช้วัตถุดิบหรือทรัพยากรการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมาเมื่อเกิดของเสียแล้วต้องพยายามหาแนวทางการนำกลับไปใช้ซ้ำหรือใช้ใหม่ให้ได้มากที่สุดโดยพิจารณาถึงศักยภาพการใช้ประโยชน์ของของเสียแต่ละประเภทและกฎหมายที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เหลือของเสียที่จะต้องบำบัด/กำจัดในปริมาณน้อยที่สุดโดยเลือกใช้วิธีการกำจัดของเสียเป็นวิธีสุดท้าย

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดวงกมล เรืองรุระกิจ (2545 : 57 - 59) ได้ทำการศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยางพื้นรองเท้า โดยวิธีการออกแบบการทดลอง การวิจัยได้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการหาสาเหตุของการเกิดรูพรุนของเนื้อยาง เป็นการศึกษาวิธีการที่แตกต่างกันในการใส่สารเคมียาพองและยาสุกในขั้นตอนการผสม ส่วนที่สองเป็นการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบที่ต้องควบคุม ซึ่งได้ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $3^k$  ผลการวิจัยพบว่า การใส่ส่วนผสมยาพองและยาสุกหลังจากส่วนผสมวัตถุดิบอื่น ๆ ในเครื่องผสมเข้ากันได้ดีแล้ว จะทำให้ยางเกิดของเสีรูพรุนน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถกำหนดค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบที่ควบคุมได้ดังนี้

1. ปริมาณ Scrap ที่ 20 กิโลกรัม ใช้ปริมาณแป้งที่ 21 กิโลกรัม และใช้ PE ที่ 25 กิโลกรัม
2. ปริมาณ Scrap ที่ 20 กิโลกรัม ใช้ปริมาณแป้งที่ 21 กิโลกรัม และใช้ PE ที่ 27 กิโลกรัม
3. ปริมาณ Scrap ที่ 20 กิโลกรัม ใช้ปริมาณแป้งที่ 19 กิโลกรัม และใช้ PE ที่ 27 กิโลกรัม

ฉัตรารณณ์ โฉมวัฒนา (2546 : 93 - 94) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าอัตราการไหลของน้ำยาดับกลิ่นสุขภัณฑ์ งานวิจัยนี้ได้นำหลักการของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองมาประยุกต์ใช้ โดยศึกษาปัจจัย 4 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนเกลียวฝ้ายในสายชับน้ำยา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายชับน้ำยา ระดับความลึกในการจุ่มสายชับน้ำยา และความยาวของสายชับน้ำยา ในเบื้องต้นได้ใช้แผนการทดลองแบบ  $2^k$  Factorial จากการศึกษาพบว่าจำนวนเกลียวฝ้ายในสายชับน้ำยาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายชับน้ำยา และความยาวของสายชับน้ำยา มีอิทธิพลต่อค่าอัตราการไหลของน้ำยาดับกลิ่นสุขภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นจึงนำปัจจัยดังกล่าวมาทำการทดลองโดยเปลี่ยนเป็นแผนการทดลองแบบ  $3^k$  Factorial วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายชับน้ำยา 0.5 เซนติเมตร จำนวนเกลียวฝ้ายในสายชับน้ำยา 10 เส้น และความยาวของสายชับน้ำยา 17.7 เซนติเมตร จะทำให้ค่าอัตราการไหลของน้ำยาดับกลิ่นสุขภัณฑ์อยู่ในช่วงที่ต้องการและสามารถ ลดจำนวนการให้บริการจากเดิมเฉลี่ยปีละ 18 ครั้ง เหลือ 12 ครั้ง ต่อปี หรือลดลง 33 เปอร์เซ็นต์ โดยลดค่าใช้จ่ายได้ประมาณ 173,208 บาทต่อปี จากอุปกรณ์สุขอนามัยทั้งหมด 560 เครื่อง

ชยันต์ เลาสุทแสน (2548 : 40) ได้ทำการศึกษากระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อชิ้นส่วนฝาครอบส่วนระบายอากาศที่ติดตั้งนอกอาคารที่ผลิตจากการฉีดพลาสติก จากการศึกษาสภาพของปัญหาเบื้องต้นในการฉีดพลาสติกพบว่าปัญหาที่สำคัญคือ ชิ้นส่วนพลาสติกเกิดการฉีดไม่เต็ม โดยใช้แผนการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ

พบว่า ความดันในการฉีดพลาสติก ความเร็วในการฉีดพลาสติก ความเร็วของสกรู ความเร็วในการหลอมพลาสติก และอุณหภูมิภายในกระบอบกึ่งกลาง เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการฉีดไม่เต็มชิ้นงานของฝาครอบส่วนระบายอากาศที่ติดตั้งนอกอาคารอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติ หลังจากคัดเลือปัจจัยได้แล้วจึงทำการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยด้วยแผนการทดลองเช่นทรีลคอมโพสิตและการวิเคราะห์ค่าโนนิคอล ผลการวิเคราะห์ปัญหาการฉีดไม่เต็มชิ้นงานมีรูปแบบเป็นจุดอานม้า เมื่อทำการพิจารณาหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมคือ ความดันในการฉีดพลาสติกที่ 42.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความเร็วในการฉีดพลาสติกที่ 47.00 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วของสกรูที่ 91.50 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการหลอมพลาสติกที่ 7.67 มิลลิเมตรต่อวินาที และอุณหภูมิภายในกระบอบกึ่งกลางที่ 225.00 °C โดยมีสัดส่วนของเสียที่เกิดจากการฉีดไม่เต็มชิ้นงานเท่ากับ 1.94 (หรือคิดเป็นค่าของเปอร์เซ็นต์ของเสียเท่ากับ 0.22 %) ซึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .10

ประทุมมา สุโสะ (2554 : บทคัดย่อ) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของพลาสติกผสม 3 ชนิด เพื่อให้ได้พลาสติกผสมที่มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยการผสมระหว่างพลาสติก 3 ชนิดคือ HDPE, LDPE, และ PP หาอัตราส่วนที่เหมาะสมและทำการเติมสารก่อผลึกเพื่อให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น กระบวนการในการเตรียมพลาสติกผสมในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป เพื่อให้พลาสติกผสมเข้ากันแล้วนำไปผ่านการฉีดขึ้นรูปเพื่อนำไปทดสอบ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของพลาสติกผสมผลการทดลอง พบว่า ขั้นตอนที่ 1 ผสมพลาสติก 2 ชนิด ระหว่าง HDPE กับ LDPE ผสมตามอัตราส่วนที่กำหนด เพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของพลาสติกผสม ในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ HDPE20% : LDPE80% นำพลาสติกผสมดังกล่าวไปผสมกับ PP ตามอัตราส่วนที่กำหนด ทดสอบสมบัติเชิงกล ทดสอบสมบัติทางกายภาพ ซึ่งจะได้อัตราส่วนของพลาสติกผสมคือ(HDPE+LDPE)50% + PP50% เนื่องจากเมื่อนำพลาสติกผสมไปดูโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction จะมีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความสมมาตรสูง ขั้นตอนที่ 3 นำพลาสติกผสม (HDPE+LDPE) 50% + PP50% ผสมกับ Nucleating Agent ตามอัตราส่วนที่กำหนด อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ (HDPE+LDPE)50% + PP50% ผสมกับ Nucleating Agent 0.2%wt เนื่องจากทดสอบสมบัติทางกายภาพดูโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction พบว่ามีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal นำพลาสติกผสม ทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเติมสารก่อผลึก(Nucleating Agent) จะพบได้ว่าค่า Resistance, Hardness, Tensile Strength มีค่าสูงกว่า HDPE+LDPE+PP ที่ไม่เติม Nucleating Agent

โสภิตา ท่วมมี (2550 : 80) ทำการศึกษาการลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่น โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองกรณีศึกษาบริษัทในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก ผู้ทำวิจัยมีวัตถุประสงค์ที่จะลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการเกิดเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ผลจากการวิเคราะห์พบว่า อุณหภูมิในการหลอม PVC Compound ที่ Mixing Rolls เท่ากับ  $180^{\circ}\text{C}$  และปริมาณเศษพลาสติกพีวีซีแผ่น (Scrap) ที่นำกลับมาหลอมใหม่ที่ Mixing Rolls เท่ากับ 30 กิโลกรัม/Batch จะทำให้ค่าจำนวนจุดบกพร่องประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ 1 ตารางเมตร อยู่ในช่วงที่ลูกค้าต้องการ คือ มีค่าไม่เกิน 10 จุดต่อตารางเมตร

ภคจิรา พิงสุข (2554 : 589) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อลดสัดส่วนของเสียกระบวนการผลิตเครื่องซักผ้าที่มีของเสียเกิดขึ้น 4.29% เมื่อพิจารณาจากข้อมูลของเสียตั้งแต่เดือนกันยายน 2553 ถึงเดือนมกราคม 2554 พบว่า การฉีดพลาสติกเป็นตัวถังเครื่องซักผ้า (Tub) ก่อให้เกิดของเสียที่มีลักษณะเป็นฟองอากาศบริเวณผิวชิ้นงาน 61.1% จากของเสียทั้งหมด จึงได้นำสาเหตุที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์หาสาเหตุและพิจารณาความเป็นไปได้ โดยใช้การวิเคราะห์ทำไม ทำไม (Why Why Analysis) พบว่าปัจจัยที่ก่อให้เกิดของเสีย คือ ความเร็วภายในกระบอกสูบ (ประกอบด้วย 5 ช่วงความเร็วในการฉีด 1 ชิ้นงาน) และอุณหภูมิบริเวณแม่พิมพ์ (Hot Runner) จากนั้นนำปัจจัยที่เกิดขึ้นมาทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  แบบ 1 ซ้ำ เพราะมีข้อจำกัดในเรื่องของวัสดุดิบ พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศมีดังนี้ ปัจจัยหลัก (Main Effect) คือ ความเร็วในช่วงที่ 1 3 5 และอุณหภูมิบริเวณแม่พิมพ์ ปัจจัยร่วม (3-Way Interaction) คือ อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วช่วงที่ 1 3 และ 5 รวมทั้งอิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วช่วงที่ 1 5 และอุณหภูมิบริเวณแม่พิมพ์ ซึ่งระดับปัจจัยที่เหมาะสม คือ ความเร็วในช่วงที่ 1 3 5 อยู่ที่ 45 90 70 MPa ตามลำดับ และอุณหภูมิบริเวณแม่พิมพ์อยู่ที่  $280^{\circ}\text{C}$  เมื่อทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการวิจัย โดยนำค่าระดับปัจจัยไปใช้จริงในกระบวนการผลิตเครื่องซักผ้า พบว่า สัดส่วนของเสียจากเดิม 2.62% ลดลงเหลือเพียง 2.02% ซึ่งสามารถลดมูลค่าการสูญเสียลงได้ 97,350 บาทต่อเดือน

ชุตินา ราชพิทักษ์ (2551 : บทคัดย่อ) ได้ทำการศึกษาเพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแบบแมชชีนซึ่ง โดยมีเป้าหมาย คือ การลดอัตราของเสียที่เกิดขึ้นลง 60% การสำรวจปัญหาที่เกิดขึ้นพบว่า การเกิดรอยขีดข่วนบนชิ้นงานทำให้เกิดของเสียมากที่สุด ซึ่งใช้การออกแบบการทดลอง  $2^k$  กรองปัจจัย จากนั้นจึงทำการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial พบว่า เพื่อทำให้จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดลงควรกำหนดปัจจัย คือ วิธีการวางชิ้นงาน

แบบใหม่ เวลาในการเป่าเศษกลิ้งอยู่ที่ 15 วินาที และปริมาณน้ำยาหล่อเย็นอยู่ที่ระดับ 160 ลิตร ซึ่งจากการทดลองพบว่า สามารถลดจำนวนของเสียลงได้ถึง 79.46% ของจำนวนของเสียทั้งหมด หรือลดมูลค่าของเสียลงได้เท่ากับ 207,615 บาทต่อเดือน

ศิริลักษณ์ สุจิตต์นารัตน์ (2553 : บทคัดย่อ) ได้ศึกษากระบวนการพ่นเครื่องเคลือบสุขภัณฑ์ที่ไม่สามารถควบคุมความหนาของน้ำยาเคลือบได้ตามข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์ โดยได้ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  ที่มีจุดศูนย์กลาง และมี 1 ซ้ำ พบว่า ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมบางตัวมีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาย่างมีนัยสำคัญ จากการทดลองทำให้สามารถค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการพ่นเคลือบด้านสมรรถนะเพิ่มขึ้นเป็น 1.01% และปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่องลดลงเหลือ 2.46%

จากผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดสามารถสรุปรายละเอียดของผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตาราง 11

ตาราง 11 แสดงรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎี/หลักการ ผู้วิจัย	การออกแบบ การทดลองเชิง แฟกทอเรียล แบบ 2 ระดับ	การบล็อกกร			การ ออกแบบเชิง แฟกทอเรียล แบบสาม ระดับ	พื้นผิว ตอบสนอง
		ผลิต ใน การ ออกแบบเชิง แฟกทอเรียล แบบ $2^k$	การออกแบบ เศษส่วนเชิง แฟกทอเรียล แบบสอง ระดับ	การ ออกแบบเชิง แฟกทอเรียล ระดับ		
กิตติพัฒน์. 2542					✓	
ดวงกมล. 2545					✓	
ชยันต์. 2548				✓		
อิทธิพล. 2550						✓
ประทุมมา. 2554			✓			✓
โสภิตา. 2550	✓				✓	✓
ภักจिरา. 2554		✓				✓
ปารเมศ. 2545		✓				✓
ชุติมา. 2551		✓				✓
นัตราภรณ์. 2546		✓				✓

ตาราง 11 (ต่อ)

ทฤษฎี/หลักการ ผู้วิจัย	การบดออกเกร			การ ออกแบบเชิง แฟกทอเรียล แบบสาม ระดับ	พื้นที่ คอบสนอง
	การออกแบบ การทดลองเชิง แฟกทอเรียล แบบ 2 ระดับ	พลีเคต ใน การ ออกแบบเชิง แฟกทอเรียล แบบ 2 <sup>k</sup>	การออกแบบ เศษส่วนเชิง แฟกทอเรียล แบบสอง ระดับ		
ศิริลักษณ์. 2553		✓			✓
วันวิสา. 2552		✓			✓
วิโรจน์. 2540					✓
วชิรพงษ์. 2546		✓			✓
Montgomery. 2005		✓			✓

สำหรับบทที่ 2 นี้ ผู้วิจัยได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อันได้แก่ โครงสร้างทางเคมีของพลาสติก กรรมวิธีฉีดพลาสติกขึ้นรูป สาเหตุและแนวทางการแก้ไขด้วยการใช้แผนภูมิการปลาเบื่องต้น เกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง การทดลองสมมุติฐาน การตรวจสอบความถูกต้องของปัญหา การวิเคราะห์ความแปรปรวน การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2<sup>k</sup> ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย โดยผู้วิจัยจะนำทฤษฎีต่าง ๆ เหล่านี้มาประยุกต์ใช้เพื่อลดปริมาณความสูญเสีย (Scrap) จากการฉีดพลาสติกและการนำของเสีย (Scrap) กลับมาใช้ใหม่ รวมทั้งการศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างเม็ดพลาสติกใหม่กับ Scrap และอุณหภูมิในการฉีดพลาสติก (ส่วนปลาย) ที่เหมาะสม ที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกลของแรงกระแทก (Impact Test)

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่างานวิจัยนี้ น่าจะเป็นประโยชน์ต่อโรงงานกรณีศึกษาในเรื่องของการนำมามีประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานจริง ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงาน จะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 3 ต่อไป