# บทที่ 2
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ

### 2.1.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

หมายถึง การออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบดูว่า ปัจจัย (Factor) ใด หรือตัวแปร (Input Variable) ใดที่มีผลต่อสิ่งที่สนใจ โดยมีจุดมุ่งหมายดังนี้

2.1.1.1 เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง(Confirmation) คือการพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริงหรือความเชื่อจากประสบการณ์ หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการการผลิต

2.1.1.2 เพื่อค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) คือการศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีผลต่อกระบวนการ

### 2.1.2 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของการทดลอง

2.1.2.1 การทดลองร่วมปัจจัย (Treatment Combination) คือ สิ่งหรือวิธีที่เราปฏิบัติต่อสิ่งทดลอง เพื่อวัดเปรียบเทียบตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.1.2.2 หน่วยทดลอง (Experiment Unit) เป็นมาตราหรือหน่วยซึ่งใช้วัดอิทธิพลของการทดลองร่วมปัจจัย ซึ่งโดยคำจำกัดความแล้ว หมายถึง สิ่งหนึ่งหรือกลุ่มหนึ่งของสิ่งทดลองซึ่งได้รับการทดลองร่วมปัจจัยเดียวกันในการกระทำครั้งใดครั้งหนึ่ง หน่วยทดลองมีขนาดไม่จำกัดอาจผันแปรไปได้จากการทดลองแต่ละครั้ง จึงต้องให้คำจำกัดความของหน่วยทดลองให้ชัดเจน

2.1.2.3 ปัจจัย (Factor) ได้แก่ กลุ่มของการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหลายที่มีความเกี่ยวข้องกัน อาจใช้คำว่าตัวแปรอิสระแทนก็ได้ปัจจัยนั้นอาจเป็นไปได้ทั้งข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณสามารถแบ่งออกเป็น

1) ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการดำเนินการทดลอง

2) ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ อาจจะเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุน ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แบ่งออกเป็น

2.1) ตัวแปรรบกวน (Noise Variable) หรือ Background Variable ซึ่งหมายถึง ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ในการทดลองแต่ไม่ใช่ปัจจัยที่เรากำลังทำการศึกษา ส่วนใหญ่มักได้แก่ เวลา หรือเครื่องมืออุปกรณ์ เป็นต้น

2.2) Nuisance Variable คือตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่เราไม่ทราบมาก่อนเราสามารถกำจัดอิทธิพลของ Nuisance Variable ได้โดยการสุ่ม

2.1.2.4 ผลตอบสนอง (Response Variable) คือ ตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าตัวแปรตาม ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระนั่นเอง ในการทดลองหนึ่ง ๆ อาจวัดค่าตัวแปรตามมากกว่า 1 ก็ได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว ( Sensitivity) ความเชื่อถือได้ (Reliability) การแจกแจงของตัวแปรนั้นและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ในการเลือกตัวแปรตามจะต้องพิจารณาว่าค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองร่วมปัจจัยหนึ่ง ๆ ควรมีการแจกแจงแบบปกติโดยประมาณ ซึ่งข้อสมมุติในเรื่องความเป็นปกติ (Normality) นี้ เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบการทดลอง ซึ่งอาจจะใช้การแปลงข้อมูล (Tranformation) ค่าสังเกตที่มีการแจกแจงไม่ปกติเป็นแบบปกติได้

**2.1.3 ลำดับขั้นการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง**

การทดลองต่าง ๆ จะต้องมีขั้นตอนของการทดลองดังนี้ คือ

2.1.3.1 การนิยามปัญหา (Recognition of and statement of the problem) เป็นการระบุว่าความต้องการคืออะไร และต้องการรู้อะไรบ้างซึ่งการนิยามปัญหานี้ จะเกี่ยวโยงไปถึงวัตถุประสงค์การทดลอง

2.1.3.2 การเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัย (Choice of factors , levels , and ranges) เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์จากงานวิจัยต่างๆ เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร สุดท้ายคือระบุว่าระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Effect) แบบสุ่ม หรือแบบผสม ซึ่งสามารถอธิบายได้พอเป็นสังเขปดังนี้

1) แบบกำหนด (Fixed Effect) หมายถึงระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน

2) แบบสุ่ม (Random Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน

3) แบบผสม (Mixed Effect) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดและแบบสุ่ม

2.1.3.3 การเลือกผลตอบ ( Selection of the response variable) ในการเลือกผลตอบผู้วิจัยจะต้องเลือกตัวปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษา และการวัดค่านั้นจะต้องมีความแม่นยำละถูกต้องด้วย

2.1.3.4 การเลือกแบบทดลอง (Choice of experimental design) เมื่อกำหนดการทดลองร่วมปัจจัยและตัวแปรตอบสนองแล้วต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลอง ซึ่งหมายถึง

จำนวนชั้นของการทดลอง ความเหมาะสม ข้อจำกัดในการสุ่ม และการบล็อกที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวโยงกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลองสำหรับการเลือกปัจจัย

2.1.3.5 ดำเนินการทดลอง (Performing the experiment) ในระหว่างการดำเนินการทดลองผู้วิจัยจะต้องศึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด ปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้ ข้อควรระวังในขณะทำการทดลอง คือ ความถูกต้องของเครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลอง เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดซึ่งจะมีเทคนิคแตกต่างกันไปในแต่ละสาขาวิจัย

2.1.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical analysis of data) ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้สถิติเข้ามาวิเคราะห์และสรุปผล รวมทั้งตัดสินความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ วิธีการทางสถิติจะเป็นเครื่องมือที่ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยใดมีผลและปัจจัยใดไม่มีผลต่อผลตอบที่สนใจภายใต้ความเชื่อมั่นที่กำหนด

2.1.3.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and recommendation) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูปกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ และให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น

**2.1.4 หลักในการออกแบบการทดลอง**

2.1.4.1 การทำแบบสุ่ม ( Randomization) คือ เทคนิคการจัดหน่วยทดลองให้แก่การทดลองร่วมปัจจัยและจัดลำดับของหน่วยการทดลองร่วมปัจจัยให้แก่หน่วยทดลอง โดยให้แต่ละหน่วยทดลองมีโอกาสที่จะได้รับความผันแปรจากภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้เท่าๆกัน วัตถุประสงค์ของการสุ่มคือช่วยขจัดหรือเฉลี่ยความผันแปรภายนอกที่ควบคุมไม่ได้ เช่น ความเมื่อยล้าของผู้ทดลอง ความผันแปรของเครื่องจักรเมื่อเวลาผ่านไป เป็นต้น ให้เกิดขึ้นกับหน่วยทดลองด้วยโอกาสเท่า ๆกัน การทำแบบสุ่มยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ

1) การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)

2) การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)

3) การทำแบบสุ่มแบบสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization within Blocks)

2.1.4.2 การทำซ้ำ ( Replication) คือการที่การทดลองร่วมปัจจัยหนึ่งกระทำต่อหน่วยทดลองมากกว่า 1 หน่วยทดลอง โดยมีจุดประสงค์ของการทำซ้ำ คือ

1) การทำซ้ำทำให้สามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลองได้ เพื่อนำค่าความผันแปรภายในกลุ่มนี้มาเป็นตัวทดลองว่าการทดลองร่วมปัจจัยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติหรือไม่

2) เพิ่มความเที่ยง (Precision) ของการทดลองโดยการช่วยลดขนาดของค่าความเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย ซึ่ง

$$\sigma_{\bar{y}} = \sqrt{\sigma^2 / n}$$

จะเห็นว่าการเพิ่มจำนวนซ้ำ (n) จะช่วยลดค่า $\sigma_{\bar{y}}$ ได้

3) การบล็อก (Blocking) คือ การจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วง เพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ แต่ไม่จำเป็นที่ต้องทำเสมอไป

### 2.1.5 **การทดสอบสมมติฐาน** (Hypothesis Testing)

สมมติฐานเชิงสถิติ คือประโยคที่กล่าวเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นของประชากรเพื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่หรือเปรียบเทียบกับประชากรต่างกลุ่ม โดยสมมติฐานแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.1.5.1 สมมติฐานที่กำหนด (Null Hypothesis) เป็นข้อสงสัยหรือข้อสมมติเกี่ยวกับลักษณะต่าง ๆ ในประชากรที่ต้องการจะพิสูจน์ว่าจริงหรือไม่ โดยใช้สัญลักษณ์ $H_0$

2.1.5.2 สมมติฐานแย้ง (Alternative Hypothesis) เป็นข้อความหรือความคิดเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่หวังว่าจะเป็นโดยจะต้องมีความหมายที่แย้งกับสมมติฐานที่กำหนดโดยชัดเจนโดยใช้สัญลักษณ์ $H_a$

ในการทดสอบสมมติฐานจะอาศัยวิธีการการสุ่มตัวอย่าง การคำนวณค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบที่เหมาะสมและทำการสรุปเพื่อปฏิเสธหรือยอมรับ $H_0$ นอกจากนี้ยังต้องมีการกำหนดกลุ่มของค่าที่จะนำไปสู่การปฏิเสธ $H_0$ ซึ่งกลุ่มของค่านี้เรียกว่า "พื้นที่วิกฤต" หรือ "พื้นที่ของการปฏิเสธ" ของการทดสอบ

การตัดสินใจที่จะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนดอาจเกิดความผิดพลาดได้ 2 กรณี คือ

1) ความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนดโดยที่สมมติฐานที่กำหนดมีความถูกต้องหรือมีความเป็นจริง เรียกว่าความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I error) โดยใช้สัญลักษณ์ $\alpha$ ซึ่งความผิดพลาดนี้คือ ระดับความมีนัยสำคัญในการตรวจสอบสมมติฐาน

2) ความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานที่กำหนดโดยที่สมมติฐานที่กำหนดมีความไม่ถูกต้องหรือไม่มีความจริง เรียกว่าความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II error) โดยใช้สัญลักษณ์ $\beta$ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1 การตัดสินใจในการทดสอบสมมติฐาน**

| สมมติฐานที่กำหนด | สมมติฐานที่กำหนดมีความถูกต้อง | สมมติฐานที่กำหนดไม่มีความถูกต้อง |
|---|---|---|
| ยอมรับ | การตัดสินใจถูกต้อง | ความผิดพลาดแบบที่ 2 |
| ปฏิเสธ | ความผิดพลาดแบบที่ 1 | การตัดสินใจถูกต้อง |

โอกาสหรือความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดแบบที่ 1 และแบบที่ 2 สามารถแสดงได้ดังนี้

$\alpha$ = P (ความผิดพลาดแบบที่ 1)

= P (การปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนด / สมมติฐานที่กำหนดถูกต้อง)

$\beta$ = P (ความผิดพลาดแบบที่ 2 )

= P (การยอมรับสมมติฐานที่กำหนด / สมมติฐานที่กำหนดไม่ถูกต้อง)

โดย 1- $\beta$ = อำนาจของการทดสอบ

= P (การปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนด / สมมติฐานที่กำหนดไม่ถูกต้อง)

### 2.1.6 **การทดสอบสมมติฐานแบบ** Two-Sample T-Test

เป็นการทดสอบสมมติฐานและหาช่วงความเชื่อมั่นของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรสองชุด เมื่อไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากรโดยสมมติฐานที่ต้องการทดสอบคือ

$H_0: \mu_1 - \mu_2 = \delta_0$ กรณีทดสอบแบบสองด้าน

$H_a: \mu_1 - \mu_2 \neq \delta_0$

$H_0: \mu_1 - \mu_2 \geq \delta_0$ หรือ $H_0: \mu_1 - \mu_2 \leq \delta_0$ กรณีทดสอบแบบด้านเดียว

$H_a: \mu_1 - \mu_2 < \delta_0$ $\quad$ $H_a: \mu_1 - \mu_2 > \delta_0$

ตัวสถิติสำหรับการทดสอบคือ

$$t = ((\overline{x_1} - \overline{x_2}) - \delta_0) \; / \; S$$

ตัวแจกแจงทางสถิติคือ

$t_{\alpha/2,\upsilon}$ สำหรับการทดสอบแบบสองด้าน

$t_{\alpha,\upsilon}$ สำหรับการทดสอบแบบด้านเดียว

ช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ย

$(\overline{x_1} - \overline{x_2}) - t_{\alpha/2}\, s$ ถึง $(\overline{x_1} - \overline{x_2}) + t_{\alpha/2}\, s$ กรณีสองด้าน

$(\overline{x_1} - \overline{x_2}) - t_{\alpha}\, s$ หรือ $(\overline{x_1} - \overline{x_2}) + t_{\alpha}\, s$ กรณีด้านเดียว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.7 **การวิเคราะห์ความแปรปรวน** ( Analysis of Variance ; ANOVA)

ภายหลังจากที่ได้ออกแบบการทดลองและทำการทดลองแล้ว ขั้นต่อไปก็คือการนำข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติหรือหาแนวโน้มต่อไปโดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นวิธีการคำนวณแบบเลขคณิตโดยการแยกผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Total Sum of Square ; $SS_T$ ) ออกเป็นส่วนต่าง ๆ ตามแหล่งกำเนิดหรือสาเหตุโดยจะวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อการทดลองโดยพิจารณาความแตกต่าง โดยวัดความแตกต่างรวมออกมาในรูปของความแปรปรวนแล้วแตกออกมาเป็นความแตกต่างย่อย ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างย่อยเหล่านั้น หากความแตกต่างใดมีค่ามากกว่าแสดงว่าปัจจัยนั้นทำให้เกิดความแตกต่างโดยมีผลต่อค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square ; Ms) ซึ่งเป็นตัวที่ประมาณค่าความแปรปรวนที่ดีที่สุด ซึ่ง

$$MS = \frac{SS}{df}$$

เมื่อ $SS$ คือ ผลรวมกำลังสอง (Sum of Square)

$df$ คือ ขั้นของความอิสระ (Degree of Freedom)

สามารถอธิบายการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละแบบการทดลองได้ดังนี้

2.1.7.1 การทดลองสุ่มแบบสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD)

เราจะแยกความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็น 2 ส่วน คือ ความแปรปรวนเนื่องจากการให้การทดลองร่วมปัจจัยต่างกัน และความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ตัวอย่างการสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบที่มีอิทธิพลเป็นค่าคงที่ (Fixed Effect Model)

ตัวแบบ : $_{ijkl} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$ ; I = 1,2,...,a

J = 1,2,...,n

โดยที่ $_{ij}$ คือ ค่าสังเกตที่ j เมื่อได้รับการทดลองร่วมปัจจัย i

$\mu$ คือ ค่าเฉลี่ยรวมของทุกประชากร

$\tau_i$ คือ อิทธิพลอันเกิดจากการทดลองร่วมปัจจัย i

$\varepsilon_{ij}$ คือ ความคลาดเคลื่อนสุ่ม

ในการวิเคราะห์จะทำโดยการแบ่งความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตออกเป็นส่วนๆ โดยจะกำหนดความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตในรูปของผลรวมกำลังสองทั้งหมด (The Total Sum of Squares) $SS_T$ โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n} y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$SS_{Tr} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{a} y_{i.}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$$

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

ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของผลรวมกำลังสองของแต่ละตัวได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 โดยที่ถ้าหากค่า $F_0 \le F_{\alpha,df1,df2}$ แล้วถือว่าปัจจัยนั้นไม่มีผล สามารถยอมรับ Null Hypothesis ได้

**ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับ** One-way ANOVA

| Source of Variation (SOV) | Sum of Squares (SS) | Degree of Freedom (df) | Mean Squares (MS) | $F_0$ |
|---|---|---|---|---|
| Treatment | $SS_{Tr}$ | a-1 | $MS_{Tr}$ | $MS_{Tr}/MS_E$ |
| Error | $SS_E$ | N-a | $MS_E$ | |
| Total | $SS_T$ | N-1 | | |

2.1.7.2 การทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Experiment)

เราจะแยกความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็นความแปรปรวนเนื่องจากการปัจจัยต่าง ๆ ความแปรปรวนเนื่องจากอิทธิพลร่วม และความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ตัวอย่างการสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีมีตัวแปร 2 ตัวของตัวแบบที่มีอิทธิพลเป็นค่าคงที่ (Fixed Effect Model)

ตัวแบบ : $_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$

โดย $i = 1,2...,a$

$j = 1,2,...,b \quad k = 1,2,...,n$

เมื่อ $_{ij}$ คือ ค่าสังเกตที่ j ในการทดลองร่วมปัจจัยที่ j

$\mu$ คือ พารามิเตอร์ คือ ผลเฉลี่ยของค่าสังเกตทั้งหมด

$\tau_i$ คือ อิทธิพลของปัจจัย A ที่เกิดจากการทดลองร่วมปัจจัยที่ i

$\beta_j$ คือ อิทธิพลของปัจจัย B ที่เกิดจากการทดลองร่วมปัจจัยที่ j

$(\tau\beta)_{ij}$ คือ อิทธิพลร่วมของปัจจัย A ที่เกิดจากการทดลองร่วมปัจจัยที่ i และปัจจัยที่ B ที่เกิดจากการทดลองร่วมปัจจัยที่ j

$\varepsilon_{ijk}$ คือ ความคลาดเคลื่อนสุ่ม

ในการวิเคราะห์จะทำโดยการแบ่งความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตออกเป็นส่วน ๆ โดยจะกำหนดความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตในรูปของผลรวมกำลังสองทั้งหมด (The Total Sum of Squares) $SS_T$ โดยที่

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

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

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

ผลรวมกำลังสองของอิทธิพลร่วมกันของปัจจัย 2 ตัว (The two factors interaction sum of squares)

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

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

ดังนั้นเมื่อเอาผลรวมกำลังสองของผลหลัก (Main Effect) แต่ละตัวและของอันตรกิริยา (Interaction) ไปหักออกจากผลรวมกำลังสองของทั้งหมด ก็จะได้ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error) ดังสมการ

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

ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ของผลรวมกำลังสองของแต่ละตัวได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 โดยที่ถ้าหากค่า $F_0 \leq F_{\infty,df1,df2}$ แล้วถือว่าปัจจัยนั้นไม่มีผล สามารถยอมรับ Null Hypothesis ได้

**ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับ Two-Factor Fixed Effect Model**

| Source of Variation (SOV) | Sum of Squares (SS) | Degree of Freedom (df) | Mean Squares (MS) | $F_0$ |
|---|---|---|---|---|
| A | $SS_A$ | a-1 | $MS_A$ | $MS_A/MS_E$ |
| B | $SS_B$ | b-1 | $MS_B$ | $MS_B/MS_E$ |
| AB | $SS_{AB}$ | (a-1)(b-1) | $MS_{AB}$ | $MS_{AB}/MS_E$ |
| Error | $SS_E$ | ab-(n-1) | $MS_E$ | |
| Total | $SS_T$ | abn-1 | | |

2.1.7.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ "สูง"หรือ"ต่ำ" ของปัจจัยหนึ่ง ๆ หรือการ "มี" หรือ "ไม่มี" ของปัจจัยนั้น ๆ ก็ได้ ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2x2x2x...x2=2^k$ ข้อมูล และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$ ซึ่งในที่นี้ขอสมมติว่า(1) ปัจจัยทั้งหมดมีค่าตายตัว (2) การออกแบบเป็นแบบเชิงสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized) และ (3) สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติเป็นที่ยอมรับได้

การออกแบบ $2^k$ มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้เพื่อการศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์โดยใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ดังนั้น จึงไม่น่าแปลกใจเลยที่การออกแบบ $2^k$ จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการอกแบบ $2^k$ ประกอบด้วย 2 ระดับ เราขอสมมติว่าผลตอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลองซึ่งสมมติฐานเช่นนี้เป็นสิ่งที่ยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเมื่อเราเพิ่มเริ่มต้นทำการศึกษาระบบ

การออกแบบที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบ $2^k$ จะประกอบด้วยผลหลัก k ชนิด, $\left(\frac{k}{2}\right)$ อันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย $\left(\frac{k}{3}\right)$ อันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย,...และ1 อันตรกิริยาของ k ปัจจัย นั่นคือ แบบจำลองบริบูรณ์สำหรับการออกแบบ $2^k$ จะประกอบไปด้วยผลทั้งสิ้น $2^k - 1$ ชนิด เครื่องหมายสำหรับการทดลองร่วมปัจจัยที่กำหนดให้ก่อนหน้านี้ยังใช้ในรูปแบบทั่วไปได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น abd ในการออกแบบ $2^5$ จะหมายถึง การทดลองร่วมปัจจัยที่ A,B และ D อยู่ที่ระดับสูง และ C และ E อยู่ที่ระดับต่ำ การทดลองร่วมปัจจัยสามารถเขียนให้อยู่ในลำดับมาตรฐานได้โดยการเพิ่มปัจจัยเข้าไปทีละตัว และให้ปัจจัยใหม่เพิ่มขึ้นมานี้รวมกับปัจจัยที่อยู่ก่อนหน้ามัน ตัวอย่างเช่น ลำดับมาตรฐานของการออกแบบ $2^4$ คือ (1),a,b,ab,c,ac,bc,abc,d,ad ,bd,abd,cd,acd,bcd และabcd ตามลำดับ

วิธีการทั่วไปในการวิเคราะห์เชิงสถิติของการออกแบบ $2^k$ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.4 คือ ในขั้นแรกเราจะต้องประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ และตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลที่

เกิดขึ้น ข้อมูลเช่นนี้จะทำให้ผู้ทดลองทราบโดยเบื้องต้นว่า ปัจจัยและอันตรกิริยาตัวใดที่มีความสำคัญ และปัจจัยเหล่านี้ควรจะถูกปรับให้อยู่ในทิศทางใดเพื่อที่จะปรับปรุงผลตอบ ในการสร้างแบบจำลองเริ่มต้น เราควรจะเลือกแบบจำลองเต็มรูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยผลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมด ในขั้นตอนที่สาม เราจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนพื่อที่จะทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา ตารางที่ 2.5 แสดงรูปแบบทั่วไปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$ ที่มี n เรพลิเคต ขั้นตอนที่สี่จะเป็นการขัดเกลาแบบจำลอง ซึ่งขั้นตอนที่ห้าจะเป็นการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การขัดเกลาแบบจำลองเกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ทั้งนี้ เนื่องจากเราพบว่าแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอ หรือสมมติฐานที่กำหนดให้นั้นไม่ถูกต้องอย่างรุนแรง ในขั้นตอนสุดท้ายเราจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยจะสร้างกราฟของผลหลักและอันตรกิริยาขึ้น

**ตารางที่ 2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบ $2^k$**

| |
|---|
| 1. Estimate factor effects |
| 2. Form initial model |
| 3. Perform statistic testing |
| 4. Refine model |
| 5. Analyze residual |
| 6. Interpret results |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 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 | $SS_{ABC \cdots K}$ | 1 |
| Error | $SS_E$ | $2^k(n-1)$ |
| Total | $SS_T$ | $n2^k - 1$ |

### 2.1.8 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

เป็นการหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงและสร้างตัวแบบสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่ทำการศึกษา ซึ่งหากเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหนึ่งตัวและตัวแปรตาม จะเรียกว่า "Simple Linear Regression" แต่ถ้าหากเป็นความสัมพันธ์ที่มีตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัว จะเรียกว่า "Multiple Regression"

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์คือ

$$= \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon \qquad \text{โดยที่ i} = 1,2,\ldots.n$$

และสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวแบบได้ตามสมการดังนี้คือ

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2 = \sum_{i=1}^{n} x_i^2 \quad \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}{n}$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^{n} y_i\left(x_i - \bar{x}\right) = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)}{n}$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x}\,; \qquad \hat{\beta}_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

การทดสอบความมีนัยสำคัญของตัวแบบถดถอย โดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแบบ ซึ่งจะทำให้สามารถแยกความแปรปรวนออกเป็น ความผันแปรของตัวแบบถดถอยและความคลาดเคลื่อนจากสาเหตุโดยธรรมชาติดังสมการ

$$SS_{total} = SS_{regrssion} + SS_{error}$$

$$SS_{total} = \sum\left(y_i - \bar{y}\right)^2$$

$$SS_{regression} = \sum\left(\hat{y}_i - \bar{y}\right)^2 = \hat{\beta}_1 S_{xy}$$

$$SS_{error} = \sum\left(y_i - \hat{y}_i\right)^2$$

และตัวสถิติสำหรับการทดสอบคือ

$$F_0 = \frac{MS_{regreesion}}{MS_{error}}$$

จะปฏิเสธสมมติฐานเพื่อยืนยันว่าปัจจัยที่พิจารณามีผลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ

$$F_0 > F_{\alpha,1,n-2}$$

การทดสอบความไม่สมรูปของตัวแบบกับข้อมูล เพื่อเป็นการทดสอบว่าตัวแบบถดถอยดังกล่าวมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ จึงมีความจำเป็นต้องทดสอบเทียบความกลมกลืนกันของตัวแบบถดถอยดังกล่าว ด้วยการพิจารณาจากค่าเศษเหลือของข้อมูลที่เกิดจากตัวแบบถดถอยว่ามีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งสมมติฐานที่ต้องการทดสอบคือ

$H_0$ : ตัวแบบถดถอยมีความสมรูป (Fit) กับข้อมูล

$H_a$ : ตัวแบบถดถอยไม่มีความสมรูปกับข้อมูล

และใช้ตัวสถิติสำหรับการทดสอบคือ

$$F_0 = \frac{SS_{LOF} / (m-2)}{SS_{PE} / (n-m)} = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} \sim F_{m-2;n-m}$$

สัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) เป็นการพิจารณาว่าตัวแบบถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ สามารถที่จะอธิบายสัดส่วนความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนองได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งมีสมการดังนี้

$$R^2 = \frac{SS_{regression}}{SS_{total}} = 1 - \frac{SS_{error}}{SS_{total}}$$

เช่น $R^2$ มีค่าเท่ากับ 0.80 นั่นหมายถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของความผันแปรในตัวแปรตอบสนองที่สามารถที่จะอธิบายได้จากตัวแบบถดถอย

2.1.9 **การตรวจสอบความถเพียงพอของแบบจำลอง** (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าข้อมูลจากการทดสอบถูกต้องและเพียงพอหรือไม่ ที่จะนำไปวิเคราะห์และสรุปผลต่อไป ยกตัวอย่างสมการจากการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^2$

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \tau_i\beta_j + \varepsilon_{ij}$$

เมื่อ $\mu$ คือ ค่าเฉลี่ย

$\tau$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย i

$\beta$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย j

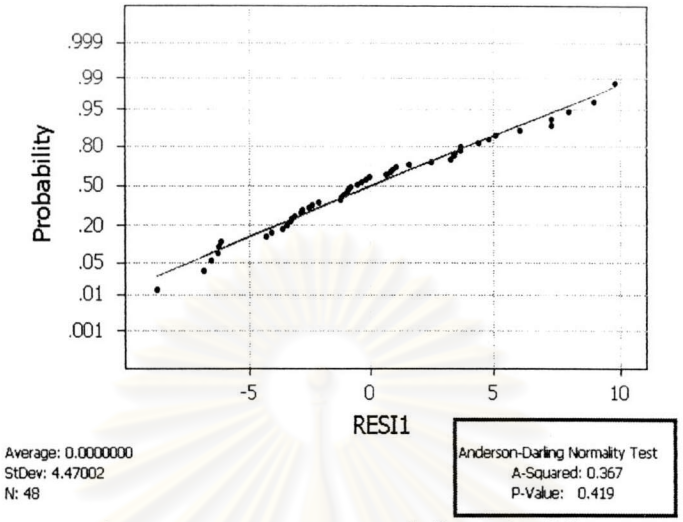
$\varepsilon$ คือ ความคลาดเคลื่อน

ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่ มักจะตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์จากการที่ y (ตัวแปร) มีการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น y จะมีการกระจายแบบนี้ได้ต้องให้ $\varepsilon$ มีการกระจายแบบปกติด้วย และต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระ $\varepsilon_{ij} \sim$ NID $(0,\sigma^2)$

การตรวจสอบ $\varepsilon_{ij}$ มี 3 ขั้นตอน คือ

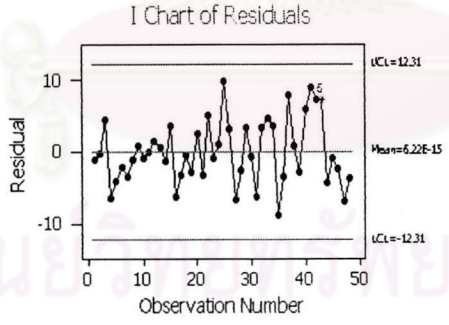
2.1.9.1 การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นแบบแจกแจงปกติ(Normal Distribution) หรือไม่ โดยใช้หลักการทดสอบแบบ Anderson-Darling ดังรูปที่ 2.1 และพิจารณาจากค่า P-Value เป็นหลัก ถ้า P-Value มากกว่าค่านัยสำคัญ ($\alpha$) ที่กำหนดไว้แล้วแสดงว่า $\varepsilon_{ij}$ มีการกระจายเป็นแบบแจกแจงปกติ จำนวนข้อมูลทดลองเพียงพอที่จะนำไปวิเคราะห์และสรุปผล แต่ถ้า P-Value น้อยกว่าค่า

นัยสำคัญ ($\alpha$) ที่กำหนดไว้นั้นแสดงว่า $\varepsilon_{ij}$ มีการกระจายไม่เป็นแบบแจกแจงปกติ ซึ่งหมายถึงจำนวนข้อมูลไม่เพียงพอที่จะสรุปผล



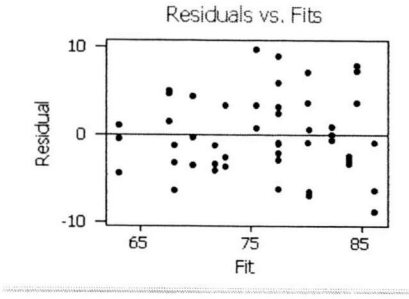

**รูปที่ 2.1 แสดงกราฟการตรวจสอบการแจกแจงปกติและค่าสถิติ** Anderson-darling

2.1.9.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ(Independent) โดยใช้แผนภูมิกระจาย (Scatter Plot) ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) โดยเขียนจุดของค่าความคลาดเคลื่อนเรียงตามลำดับของการเก็บข้อมูลแล้วดูลักษณะการกระจายของจุดบนแผนภูมิว่าเป็นรูปแบบอิสระ กระจายตัวรอบๆศูนย์หรือไม่ ดังรูปที่ 2.2




**รูปที่ 2.2 แสดงกราฟการตรวจความเป็นอิสระของข้อมูล**

2.1.9.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) กับค่าฟิต (Fit) หรือค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับของปัจจัย ถ้ารูปร่างของการกระจายของข้อมูลที่ออกมาไม่เป็นรูปแบบเฉพาะ (Pattern) ไม่มีลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน ดังรูปที่ 2.3




**รูปที่ 2.3 แสดงกราฟการตรวจความเสถียรภาพของความแปรปรวน**

## 2.2 Gage Repeatability and Reproducibility (GR&R)

เครื่องมือที่ใช้วัดความน่าเชื่อถือของข้อมูลจากเครื่องทดสอบหนึ่งก็คือ Gage Repeatability and Reproducibility หรือ Gage R&R ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่เครื่องทดสอบอ่านค่าได้โดยสามารถแยกแยะความแปรปรวนของข้อมูลออกเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

$$\sigma^2_{total} = \sigma^2_{process} + \sigma^2_{measurement.system}$$

ซึ่ง $$\sigma^2_{measurement.system} = \sigma^2_{\text{Re}\,producibility} + \sigma^2_{\text{Re}\,peatability}$$

โดยที่ $\sigma^2_{total}$ คือ ความแปรปรวนของข้อมูลที่อ่านได้ทั้งหมด

$\sigma^2_{process}$ คือ ความแปรปรวนอันเกิดจากกระบวนการผลิต

$\sigma^2_{measurement.system}$ คือ ความแปรปรวนอันเกิดจากระบบวัดข้อมูล

$\sigma^2_{\text{Re}\,producibility}$ คือ ส่วนหนึ่งของความแปรปรวนของระบบวัดข้อมูลอันเกิดจากความแตกต่างระหว่างคนวัดหรืออันตรกิริยาระหว่างคนวัดและชิ้นงานตัวอย่าง

$\sigma^2_{\text{Re}\,peatability}$ คือ ส่วนหนึ่งของความแปรปรวนของระบบวัดข้อมูลอันเกิดจากความสามารถของเครื่องมือวัดเองในการวัดชิ้นงานตัวอย่างชิ้นเดียวซ้ำหลาย ๆ ครั้ง

ดังนั้นจากสมการข้างต้นสามารถแตกสมาการต่อได้ดังนี้

$$\sigma^2_{measurement.system} = \sigma^2_{operator} + \sigma^2_{operator*parts} + \sigma^2_{Instrument}$$

**ค่าที่ใช้วัดระบบเครื่องมือวัดมีดังนี้**

1) %Contribution of Total Gage R&R เป็นอัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนของเครื่องมือวัดกับความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.6 ซึ่งข้อมูลจากสถาบัน BMG ผู้ฝึกอบรม Six Sigma ระบุว่า %Contribution ของเครื่องมือวัดไม่ควรเกิน 9 เปอร์เซ็นต์ ตัวเลขนี้ยิ่งน้อยยิ่งดีซึ่งแสดงถึงความแปรปรวนอันเกิดจากเครื่องมือวัดมีค่าน้อยลง

**ตารางที่ 2.6 แสดงตัวอย่างของข้อมูล** Gage R&R

**Gage R&R**

| Source | VarComp | %Contribution (of VarComp) |
|---|---|---|
| Total Gage R&R | 12.52 | 6.67 |
| Repeatability | 8.83 | 4.70 |
| Reproducibility | 3.69 | 1.97 |
| Operator | 1.66 | 0.88 |
| Operator*Part No. | 2.04 | 1.09 |
| Part-To-Part | 175.15 | 93.33 |
| Total Variation | 187.67 | 100.00 |
| Number of Distinct Categories | = 5 | |

$$\%Cont. = \frac{\sigma^2_{MS}}{\sigma^2_{Total}} = \frac{12.52}{187.67} x100$$

ความแปรปรวนทั้งหมดอันเกิดจากระบบวัด

$$= round_{down}\left(\frac{\sigma_{part}}{\varsigma_{MS}} x\sqrt{2}\right)$$

$$= round_{down}\left(\frac{\sqrt{175.15}}{\sqrt{12.52}} x\sqrt{2}\right)$$

2) Number of Distrinct Categories เป็นตัวเลขที่บ่งชี้ว่าผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่นำมาทำ Gage R&R นั้นข้อมูลกระจัดกระจายเพียงพอหรือไม่หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่าความสามารถในการแบ่งแยกกลุ่มข้อมูล (วิธีการคำนวณดูได้จากตารางที่ 2.6) ซึ่งข้อมูลจากสถาบัน BMG ผู้ฝึกอบรม Six Sigma ระบุว่าตัวเลขนี้ไม่ควรต่ำกว่า 3 ถ้าต่ำกว่า 3 ควรจะทำใหม่

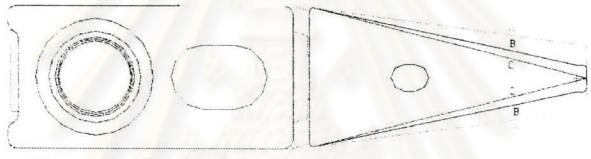
## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติต้านทานซอร์กของแขนจับหัวอ่าน/เขียน

ที่ผ่านมามีงานวิจัยหลายฉบับที่ศึกษาถึงคุณสมบัติต้านทานซอร์กของแขนจับหัวอ่าน/เขียน เพื่อที่จะพัฒนาความสามารถของอาร์ดดิสก์ไดร์ฟให้สูงขึ้น ผู้วิจัยได้หยิบยกงานวิจัยบางฉบับมาศึกษาเพื่อความเข้าใจถึงลักษณะการออกแบบแขนจับหัวอ่าน/เขียนที่ดีต่อคุณสมบัติต้านทานซอร์ก และใช้เป็นแนวทางในการคัดเลือกปัจจัยบางตัวไปทำการออกแบบการทดลอง งานวิจัยหัวข้อ 2.3.1 กล่าวว่ามวลของ Load beam มีผลต่อค่า G-to-Lift off แขนจับหัวอ่าน/เขียนที่มีมวลของ Load beam น้อยจะมีค่า G-to-Lift off สูงกว่าแขนจับหัวอ่าน/เขียนที่มีมวลของ Load beam มาก ดังนั้นความกว้างของ Load beam ด้านปลายอิสระควรจะแคบเท่าที่เป็นไปได้และไม่กระทบกับคุณลักษณะการใช้งานอื่นๆ งานวิจัยหัวข้อ 2.3.2 กล่าวว่าความหนาและความยาวของแขนจับหัวอ่าน/เขียนมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต้านทานซอร์กมากกว่าปัจจัยอื่นๆ งานวิจัยหัวข้อ 2.3.3 กล่าวว่าความยาวของ Load beam ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต้านทานซอร์กของอาร์ดดิสก์ไดร์ฟมากที่สุด งานวิจัยหัวข้อ 2.3.4 กล่าวว่าเมื่อแขนจับหัวอ่าน/เขียนอยู่ในสภาวะ Head Slap แล้วความเร็วของหัวอ่าน/เขียนขณะเคลื่อนที่ตกกระทบแผ่นดิสก์จะแปรผันโดยตรงกับความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนแผ่นดิสก์ ดังนั้นวิธีป้องกันไม่ให้แผ่นดิสก์เสียหายก็คือออกแบบให้แขนจับหัวอ่าน/เขียนสามารถ

ควบคุมความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียนขณะเกิด Head Slap ให้มีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤตของแผ่นดิสก์ งานวิจัยหัวข้อ 2.3.5 กล่าวว่าแขนจับหัวอ่าน/เขียนที่ถูกออกแบบให้มีรูฟ (Roof) เพื่อควบคุมการเคลื่อนไหวของ Gimbal ขณะเกิด Head Slap สามารถทนต่อสภาวะชอร์กได้สูงกว่าแขนจับหัวอ่าน/เขียนที่ถูกออกแบบไม่ให้มีรูฟ (Roof) รายละเอียดของงานวิจัยแต่ละฉบับมีดังนี้

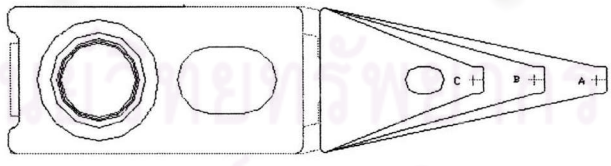
2.3.1 **คุณกัมพล สิทธิพงษ์พาณิช และคณะฝ่ายวิเคราะห์และพัฒนาคุณลักษณะของแขนจับหัวอ่าน/เขียนของบริษัทตัวอย่าง** , 2003 ประยุกต์ใช้ไฟไนอีลีเมนต์โมเดลศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ G-to-Lift off เมื่อเปลี่ยนรูปแบบแขนจับหัวอ่าน/เขียนในแบบต่าง ๆ ดังนี้

1) แขนจับหัวอ่าน/เขียนที่มีแรงกระทำกับแผ่นดิสก์ (Gram Load) เท่ากันแต่มีมวลของ Load beam ต่างกัน ผลิตภัณฑ์ที่มีมวลน้อยกว่าจะมีค่า G-to-Lift off สูงกว่า พิจารณารูปที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์ C มีมวลน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ B ผลิตภัณฑ์ A ตามลำดับ แต่ G-to-Lift off ของผลิตภัณฑ์ C สูงกว่าผลิตภัณฑ์ B และผลิตภัณฑ์ A ตามลำดับ



**รูปที่ 2.4 แสดงแขนจับหัวอ่าน/เขียนที่มีปลายกว้างต่างกัน**

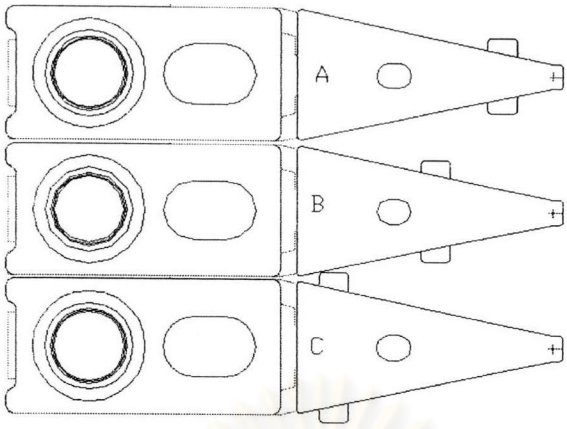
พิจารณารูปที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์ C มีมวลน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ B และผลิตภัณฑ์ A ตามลำดับ แต่ G-to-Lift off ของผลิตภัณฑ์ C สูงกว่าผลิตภัณฑ์ B และผลิตภัณฑ์ A ตามลำดับ




**รูปที่ 2.5 แสดงแขนจับหัวอ่าน/เขียนที่มีความยาวต่างกัน**

2) จากรูปที่ 2.5 สามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าแขนจับหัวอ่าน/เขียนตัวสั้นจะมีค่า G-to-Lift off สูงกว่าตัวยาว

3) แขนจับหัวอ่าน/เขียนที่มีจุดศูนย์กลางมวลของ Load beam เข้าใกล้ Plate จะมีค่า G-to-Lift off สูงกว่าตัวที่มีจุดศูนย์กลางมวลไกล Plate แสดงดังรูปที่ 2.6 G-to-Lift off ของผลิตภัณฑ์ C สูงกว่าผลิตภัณฑ์ B และผลิตภัณฑ์ A ตามลำดับ




**รูปที่ 2.6 แสดงแขนจับหัวอ่าน/เขียนที่มีจุดศูนย์กลางมวลต่างกัน**

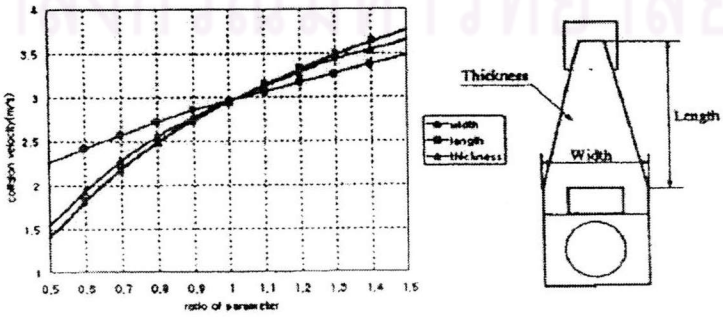
2.3.2 Sung Jin Lee., Soon Kyo Hong, และ Jang Moo Lee , 2000

ทำการศึกษาด้วยโมเดลลิ่งเพื่ออธิบายพฤติกรรมไดนามิกส์ของหัวอ่านและแผ่นดิสก์ (Head Disk Interface) หลังจากฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟอยู่ในสภาวะชอร์กกระทำและหาปัจจัยหลักของผลิตภัณฑ์แขนจับหัวอ่าน ที่สอดคล้องกับคุณสมบัติการต้านทานชอร์ก ซึ่งได้ผลสรุปดังนี้

1) การที่หัวอ่าน/เขียนยกตัวขึ้นจากแผ่นดิสก์ในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟไม่ได้ทำงาน (Non – Operating) จะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมทางด้านไดนามิกส์ของผลิตภัณฑ์แขนจับหัวอ่าน/เขียน เพียงอย่างเดียว

2) ความเสียหายของหัวอ่าน/เขียนและแผ่นดิสก์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการชอร์กกระทำจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแขนจับหัวอ่าน/เขียน เป็นหลักที่จะสามารถควบคุมความเร็วของการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียน ขณะชนกับแผ่นดิสก์

3) ในการออกแบบผลิตภัณฑ์แขนจับหัวอ่าน/เขียน จะต้องรักษาความเร็วของการชนให้ต่ำ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าความหนาและความยาวของแขนจับหัวอ่าน/เขียน เป็นพารามิเตอร์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการต้านทานชอร์กที่สุด รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบของแขนจับหัวอ่าน/เขียนและผลการทดลอง




**รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบของแขนจับหัวอ่าน/เขียนและผลการทดลอง**

2.3.3 Haruhide Takahashi , Shindo , Shozo Saegusa , Shigeo Nakamara and Yasuhiro Matsuda , 2000

ทำการศึกษาอิทธิพลของ 8 พารามิเตอร์บนผลิตภัณฑ์แขนจับหัวอ่าน/เขียน รุ่นหนึ่งในประเภทยูนิเม้า ที่ใช้กับ 2.5" HDD ดังรูปที่ 2.8 ต่อสภาวะการต้านทานชอร์กขณะฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟกำลังอ่าน/เขียน ข้อมูล(Operating Shock) โดยประยุกต์ทฤษฎีทากูชิ เขาพบว่าความหนาของ Load beam มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถต้านทานชอร์กของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมากที่สุด

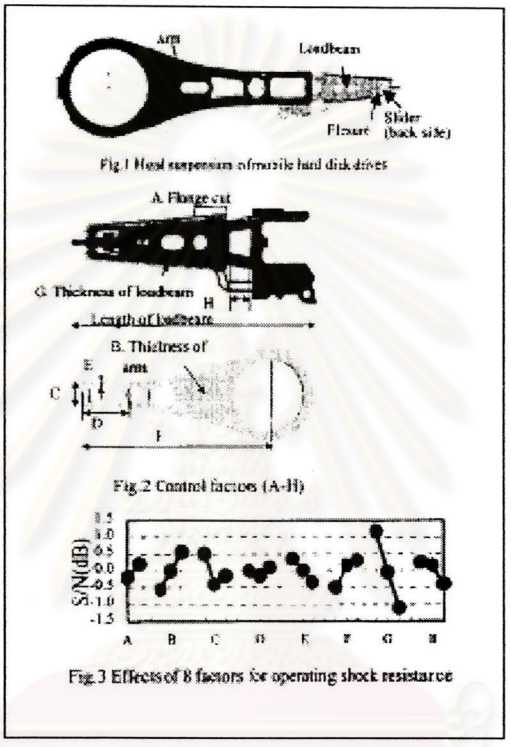



Fig.1 Head suspension of mobile hard disk drives

Fig.2 Control factors (A-H)

Fig.3 Effects of 8 factors for operating shock resistance

**รูปที่ 2.8 แขนจับหัวอ่าน/เขียนและ 8 พารามิเตอร์ที่ศึกษาโดยประยุกต์วิธีทากูชิ**

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.4 T. Kouhei, T. Yamada, Y. Kuroba, and K. Aruga ,1995

ทำการศึกษาความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการตกกระทบของหัวอ่าน/เขียนบนแผ่นดิสก์โดยการจำลองใช้ลูกตุ้มเหล็กมวล1.5 ม.ก. และรัศมี 0.010 ม.ม.ปล่อยตกอย่างอิสระลงบนแผ่นดิสก์ 3 ชนิด นั่นคือ อลูมิเนียม, แก้ว และคาร์บอน และคำนวณหาค่าความเค้นเฉือนโดยประยุกต์ใช้สมการของ Hartz's contact stress with energy conservation

$$\tau_{max} = c \bullet E'^{4/5} \bullet R^{-3/5} \bullet v^{2/5} \bullet m^{1/5}$$

เมื่อ m : มวลของหัวอ่าน/เขียน

v : ความเร็วสัมพัทธ์ของหัวอ่าน/เขียน

$\tau$ : ความเค้นเฉือน

E' : combined Young's modulus

R : รัศมีของมุมของหัวอ่าน/เขียน

c : ค่าคงที่

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับความเร็วตกกระทบดูได้จากรูป 2.9 ซึ่งพบว่าแผ่นดิสก์ที่ทำจากคาร์บอนและแก้วมีค่าวิกฤตของความเค้นเฉือนสูงกว่าแผ่นดิสก์ที่ทำจากอลูมิเนียม และความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียนบนแผ่นดิสก์จะแปรผันโดยตรงกับความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นกับแผ่นดิสก์ ดังนั้นวิธีป้องกันไม่ให้แผ่นดิสก์เสียหายก็คือ ป้องกันความเค้นเฉือนไม่ให้ถึงค่าวิกฤตซึ่งก็คือควบคุมไม่ให้ความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียนบนแผ่นดิสก์มีค่าสูงนั่นเอง

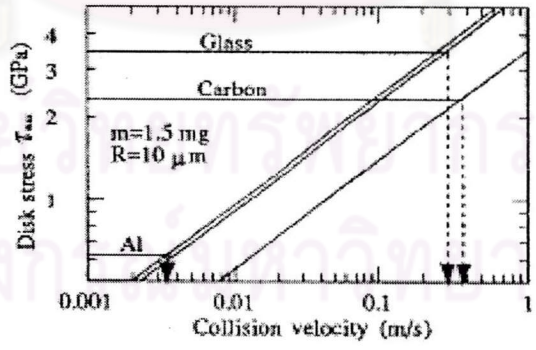
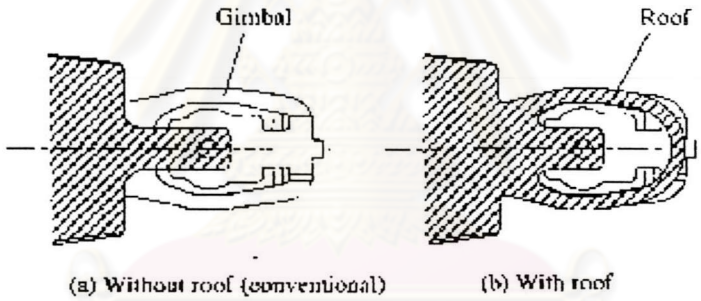



Fig. 6. Hertz's critical stress based on steel-ball falling tests

รูปที่ 2.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสัมพัทธ์กับความเค้นเฉือน

2.3.5 M. Tokuyama , Y. Katoa ,J.Shimizu ,S.Hirose , Y. Kojima และ H.Nishid ,1999

ทำการศึกษางานพฤติกรรมของ หัวอ่าน/เขียน หลังจากเกิดชอร์ก โดยใช้กล้อง High Speed Video Camera เป็นเครื่องมือจับภาพขณะทำการทดลองด้วยวิธี Drop Test ซึ่งติดด้วย Accelerometerไว้กับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟจำลองเพื่อจับสัญญาณชอร์กอินพุด เป้าหมายเพื่อออกแบบปรับปรุงผลิตภัณฑ์แขนจับหัวอ่าน/เขียนให้มีคุณสมบัติต้านทานสภาวะชอร์กได้สูงขึ้น ครั้งแรกทำการทดสอบกับผลิตภัณฑ์แขนจับหัวอ่าน/เขียนรูปแบบดังรูปที่ 2.10a กับระดับความรุนแรงชอร์กที่ 500 G half sine wave , 2ms พบว่าหัวอ่าน/เขียนยกตัวสูงขึ้นและทำมุมตกกระทบ 30 องศา กับแนวระดับ (Head Slap) โดยขอบด้านลีดดิ่งของหัวอ่าน/เขียน(Leading edge) ตกกระทบแผ่นดิสก์ก่อนทำให้เกิดรอยจิกบนแผ่นดิสก์ ต่อมาเมื่อทำการออกแบบปรับปรุงผลิตภัณฑ์แขนจับหัวอ่านเป็นดังรูปที่ 2.10b ปลาย Load beam มีส่วนยื่นออก (Roof)เพื่อควบคุมการเคลื่อนไหวของ Gimbal ที่เป็นสาเหตุให้หัวอ่าน/เขียนหมุนขณะเกิด Head Slap การเปลี่ยนการออกแบบทำให้มุมตกกระทบของสไลเดอร์เหลือเพียง 10 องศา และสามารถรับสภาวะชอร์กได้สูงกว่า 700 G half sine wave, 2ms โดยไม่มีรอยจิกบนแผ่นดิสก์




**รูปที่ 2.10(a,b) : รูปแบบแขนจับหัวอ่าน/เขียนที่ทำการทดสอบ**

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย