บทที่ 2

ผลงานวิจัย และงานเขียนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับหัวอ่าน

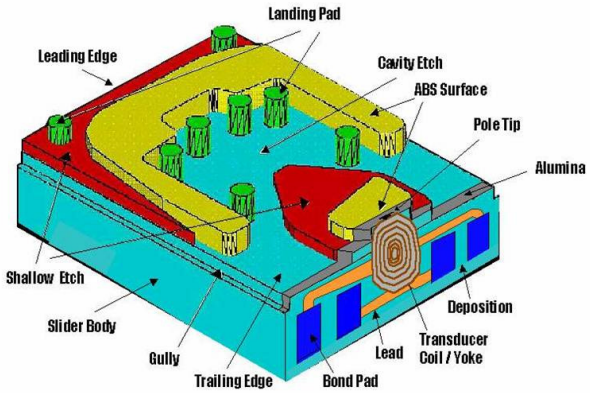
2.1.1 ส่วนประกอบของหัวอ่าน

หัวอ่าน หรือ สไลเดอร์ (Slider) ทำจากแร่อลูมิน่าออกไซด์และไทเทเนียม ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งประ กอบด้วยส่วนที่สำคัญๆ ดังนี้

2.1.1.1. ABS (Air Bearing Surface) ซึ่งเป็นด้านหน้าของตัวหัวอ่าน หน้าที่ของ ABS คือ ทำให้เกิด แรงยกตัวขึ้นของหัวอ่าน และเฮชจีเอ ขณะที่แผ่นดิสก์หมุน และจะเคลื่อน ไหวตามสภาพผิวของแผ่นดิสก์เพื่อรักษาระยะการบิน (Fly Height) ตามมาตรฐานของฮาร์ดดิสก์

2.1.1.2. Deposition เป็นด้านที่มีแผงวงจรฝังอยู่ ประกอบด้วย Transducer, Bond pad.

2.1.1.3. Pole Tip ทำหน้าที่อ่านหรือเขียนข้อมูลลงบนแผ่นดิสก์

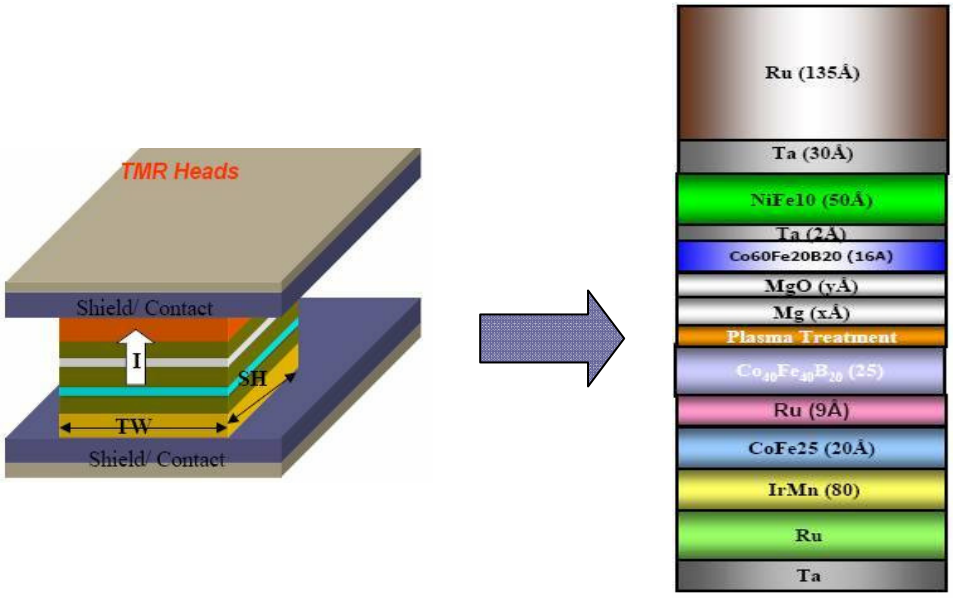


ภาพที่ 2.1

แสดงส่วนประกอบของหัวอ่าน (Slider)

2.1.2 โครงสร้างภายในของหัวอ่าน ในส่วนของเซ็นเซอร์

โครงสร้างในส่วนเซ็นเซอร์ของหัวอ่านนั้นมีการจัดวางส่วนประกอบที่เป็นธาตุด้วยกันหลายชนิด เช่น Ru , Ta , MgO, Co, Fe และ IrMn เป็นต้น ซึ่งธาตุเหล่านี้จัดเรียงตัวเป็นชั้น ๆ เพื่อให้ผลและประสิทธิภาพในการอ่านข้อมูลสูงสุด ซึ่งหัวอ่านแต่ละผู้ผลิตก็จะออกแบบแตกต่างกันไปตามความเหมาะสมและเทคโนโลยีที่มีอยู่.

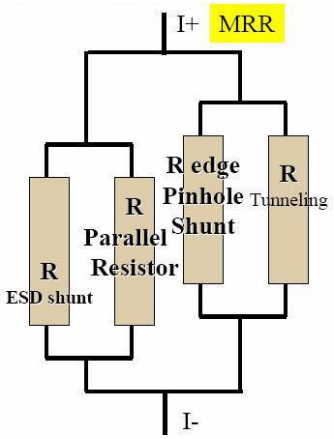


ภาพที่ 2.2

แสดงโครงสร้างภายในเซ็นเซอร์ของหัวอ่าน

2.1.3 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของหัวอ่านที่กระบวนการขัดผิว (Lapping)

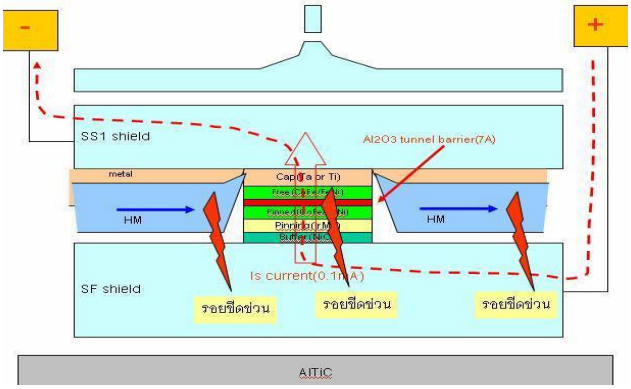
2.1.3.1 ค่า Magneto Resistive Resistance หรือเรียกว่าค่า MRR ในที่นี้จะกล่าว ถึงค่า MRR ของหัวอ่านชนิด TMR (Tunnel Magneto Resistive Resistance) เป็นหัวอ่านชนิดที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ซึ่งค่า MRR นี้ ได้มาจากค่าความต้านภายในหัวอ่าน 4 ชนิดที่ต่อขนานกันระหว่าง 1) R ESD Shunt 2) R Parallel Resistor และ 3) R edge Pin hole Shunt 4) R -Tunneling ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3

แสดงค่าความต้านภายในหัวอ่าน 4 ชนิดที่ต่อขนานกัน

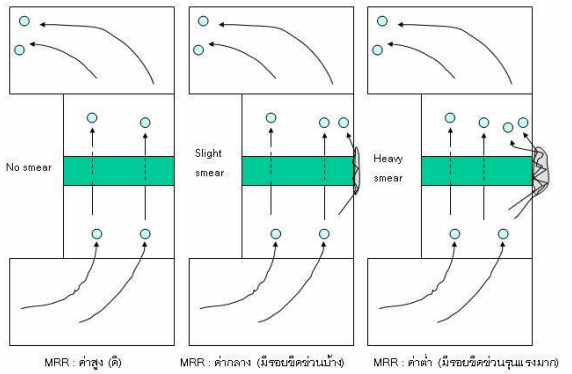
ค่า MRR นี้ส่งผลสำคัญต่อคุณภาพในการอ่านข้อมูลของหัวอ่าน ซึ่งกระบวนการที่สำคัญที่ทำให้ค่า MRR อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานนั้น คือ กระบวนการขัดผิวหัวอ่านแบบละเอียด หรือเรียกว่า Final Lapping Process ปัญหาที่เกิดขึ้นได้กระบวนการนี้ คือ ถ้าแผ่นเพลทขัดงานมีความหยาบสูงหรือด้อยคุณภาพ เมื่อนำไปขัดผิวหัวอ่านจะทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนเซ็นเซอร์ของหัวอ่าน ทำให้เกิดการลัดวงจรกระแสที่ป้อนให้กับเซ็นเซอร์ดังกล่าว แล้วทำให้หัวอ่านตัวนั้นๆ ไม่สามารถใช้การได้ ดังภาพจำลองลักษณะของการเกิดรอยบนเซ็นเซอร์ของหัวอ่าน ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4

แสดงจำลองลักษณะของการเกิดรอยบนเซ็นเซอร์ของหัวอ่าน

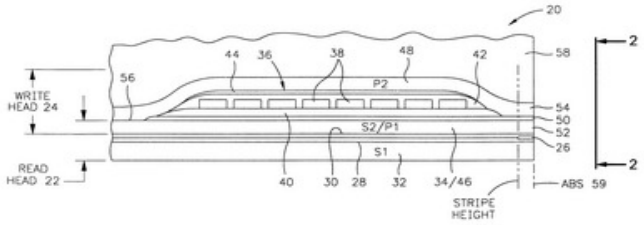
ซึ่งค่า MRR จะมีค่ามากหรือน้อยนั้นก็ขึ้นอยู่กับลักษณะรอยขีดข่วนและความลึกบนผิวหัวอ่านนั้นๆ โดยทั่วไปหัวอ่านที่มีผิวที่ดีไม่มีรอยขีดข่วนจะมีค่า MRR ที่สูงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (ขึ้นอยู่กับการออกแบบของแต่ละผู้ผลิต) ส่วนหัวอ่านที่มีรอยขีดข่วนที่ลึกจะมีค่า MRR ต่ำกว่ามาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 2.5 แสดงจำลองลักษณะรอยขีดข่วนที่ส่งผลต่อค่า MRR



ภาพที่ 2.5

แสดงจำลองลักษณะรอยขีดข่วนที่ส่งผลต่อค่า MRR

2.1.3.2 ค่า Electrical Lapping Guide หรือเรียกย่อว่า ค่า ELG. (Fontana Jr., Robert Edward and Hsiao, Richard ; 2000) ได้ให้คำจำกัดความของค่า ELG ไว้ว่าเป็นค่าที่บ่งบอกความหนาของหัวอ่านโดยทางอ้อม ซึ่งโดยตรงจะถูกวัดออกมาเป็นค่าความต้านทานในขณะที่อยู่ในกระบวนการขัดผิวหัวอ่าน ซึ่งจะได้ความหนาของหัวอ่านตามมาตรฐานที่กำหนด และค่า ELG นี้เองจะทำให้การควบคุมการขัดผิวชิ้นงานให้ได้ค่าที่สม่ำเสมอกันทั้งบาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยที่ตัว ELG ในหัวอ่านนั้นจะถูกแยกออกจากเซ็นเซอร์ ซึ่งค่า ELG นี้จะใช้เฉพาะกระบวนการขัดผิวหัวอ่านเท่านั้น หลังจากกระบวนการนี้ไปชิ้นส่วนตัว ELG จะถูกกัดออกไปที่กระบวนการ Etching.



ภาพที่ 2.6

แสดงจำลองโครงสร้างของตัว ELG ภายในหัวอ่าน

2.2 หลักการออกแบบการทดลอง

2.2.1 ความหมายของการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การออกแบบการทดลอง หมายถึง การออกแบบการทดลอง เพื่อตรวจสอบปัจจัย (Factor) ใดหรือตัวแปร (Input Variable) ใดที่มีผลต่อสิ่งที่สนใจ โดยมีจุดมุ่งหมายคือเพื่อพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริง หรือความเชื่อจากประสบการณ์ หรือทฤษฎีบางทฤษฎีที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต รวมทั้งศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีผลต่อกระบวนการผลิต

2.2.2 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของการทดลอง

2.2.2.1 ปัจจัย (Factor) ได้แก่ กลุ่มของการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหลายที่มีความเกี่ยวข้องกันอาจใช้คำว่าตัวแปรอิสระแทนที่ก็ได้ ปัจจัยนั้นอาจเป็นไปได้ทั้งข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณสามารถแบ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการทดลอง ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ อาจจะเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุนซึ่งปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แบ่งออกเป็น

ก. ตัวแปรรบกวน (Noise Variable) หรือ Background Variable ซึ่งหมายถึงตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ในการทดลองแต่ไม่ใช่ปัจจัยที่เรากำลังทำการศึกษา ส่วนใหญ่มักได้แก่เวลาหรือเครื่องมืออุปกรณ์ เป็นต้น

ข. Nuisance Variable คือ ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่เราไม่ทราบมาก่อน ซึ่งเราสามารถกำจัดอิทธิพลของ Nuisance Variable ได้โดยการสุ่ม

2.2.2.2 ผลตอบสนอง (Response) คือ ตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวแปรตาม ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระนั่นเอง ในการทดลองหนึ่ง ๆ อาจวัดค่าตัวแปรตามมากกว่า 1 ก็ได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (Sensitivity) ความเชื่อถือได้ (Reliability) การแจกแจงของตัวแปรนั้นและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ในการเลือกตัวแปรตามจะต้องพิจารณาว่าค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองร่วมปัจจัยหนึ่งๆ ควรมีการแจกแจงแบบปกติโดยประมาณ ซึ่งข้อสมมุติในเรื่องความเป็นปกติ (Normality) นี้ เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบการทดลอง ซึ่งอาจจะใช้การแปลงข้อมูล (Transformation) ค่าสังเกตที่มีการแจกแจงไม่ปกติเป็นแบบปกติได้

2.2.3. ลำดับขั้นการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

การทดลองต่าง ๆ จะต้องมีขั้นตอนของการทดลองดังนี้ คือ (Montgomery, 2005, หน้า 14-19)

2.2.3.1 การนิยามปัญหา (Recognition of and statement of the problem) เป็นการระบุว่า ความต้องการคืออะไร และต้องการรู้อะไรบ้าง ซึ่งการนิยามปัญหานี้ จะเกี่ยวโยงไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.2.3.2 การเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัย (Choice of factors, Levels and ranges) เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์จากงานวิจัยต่างๆ เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร สุดท้ายคือระบุว่าระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด แบบสุ่ม หรือแบบผสม ซึ่งสามารถอธิบายได้พอเป็นสังเขป ดังนี้

- แบบกำหนด (Fixed Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน
- แบบสุ่ม (Random Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน
- แบบผสม (Mixed Effect) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนด และแบบสุ่ม

2.2.3.3 การเลือกผลตอบ (Selection of the response variable) ในการเลือกผลตอบผู้วิจัยจะต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษา และการวัดค่านั้นจะต้องมีความแม่นยำ และถูกต้องด้วย

2.2.3.4 การเลือกแบบทดลอง (Choice of experimental design) เมื่อกำหนดการทดลองร่วมปัจจัยและตัวแปรตอบสนองแล้ว ต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลองซึ่งหมายถึงจำนวนขั้นของการทดลอง ความเหมาะสม ข้อจำกัดในการสุ่ม และการบล็อกที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวโยง กันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลองสำหรับการเลือกปัจจัย

2.2.3.5 การดำเนินการทดลอง (Performing the experiment) ในระหว่างการดำเนินการทดลอง ผู้วิจัยจะต้องศึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด ปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้ โดยมีข้อควรระวังในขณะทำการทดลอง คือ ความถูกต้องของเครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความเคลื่อนน้อยที่สุดซึ่งจะมีเทคนิคแตกต่างกันไปในแต่ละสาขาวิจัย

2.2.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (Statistical analysis of data) ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้สถิติเข้ามาวิเคราะห์และสรุปผล รวมทั้งตัดสินความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ วิธีการทางสถิติจะเป็นเครื่องมือที่ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยใดมีผลและปัจจัยใดไม่มีผลต่อผลตอบที่สนใจภายใต้ความเชื่อมั่นที่กำหนด

2.2.3.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and recommendation) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูล แล้วจะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูปภาพกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ และให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น

2.2.4. หลักในการออกแบบการทดลอง

2.2.4.1 การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ เทคนิคการจัดหน่วยทดลองให้แก่การทดลองร่วมปัจจัยและจัดลำดับของหน่วยการทดลองร่วมปัจจัยให้แก่หน่วยทดลอง โดยให้แต่ละหน่วยทดลอง มีโอกาสที่จะได้รับความผันแปรจากภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้เท่าๆ กัน วัตถุประสงค์ของการสุ่ม คือ ช่วยขจัดหรือเฉลี่ยความผันแปรภายนอกที่ควบคุมไม่ได้ เช่น ความเมื่อยล้าของผู้ทดลอง ความผันแปรของเครื่องจักรเมื่อเวลาผ่านไป เป็นต้น ให้เกิดขึ้นกับหน่วยทดลองด้วยโอกาสเท่า ๆ กัน การทำแบบสุ่มยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ

- การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)
- การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)
- การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization within Blocks)

2.2.4.2. การทำซ้ำ (Replication) คือ การที่การทดลองร่วมปัจจัยหนึ่งกระทำต่อหน่วยทดลองมากกว่า 1 หน่วยทดลอง โดยมีจุดประสงค์ของการทำซ้ำ คือ

ก. การทำซ้ำให้สามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลองได้เพื่อนำค่าความผันแปรภายในกลุ่มนี้มาเป็นตัวทดลองว่าการทดลองร่วมปัจจัยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติหรือไม่

ข. ทำให้ค่าความเที่ยง (Precision) ของการทดลองเพิ่มขึ้นโดยการช่วยลดขนาดของค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย ซึ่ง

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

โดยที่ $\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของประชากร

σ^2 คือ ความแปรปรวนของประชากร

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

2.2.4.3 การบล็อก (Blocking) คือ การจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วง เพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ แต่ไม่จำเป็นที่ต้องทำเสมอไป

2.2.5. สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination: R-square)

สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ หมายถึง สัดส่วนที่ตัวแปรหลักสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ ดังนั้นค่า R-square มาก แสดงว่าตัวแปรหลักและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันมาก หรือตัวแปรหลัก สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรตามได้มาก

2.2.6. การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

การสมมติฐานเชิงสถิติ คือ ประโยคที่กล่าวเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นของประชากร เพื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่หรือเปรียบเทียบกับประชากรต่างกลุ่ม โดยสมมติฐานแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

2.2.6.1 สมมติฐานกำหนด (Null Hypothesis) เป็นข้อสงสัยหรือข้อสมมติเกี่ยวกับลักษณะต่างๆ ในประชากรที่ต้องการจะพิสูจน์ว่าจริงหรือไม่ โดยใช้สัญลักษณ์ H_0

2.2.6.2 สมมติฐานแย้ง (Alternative Hypothesis) เป็นข้อความหรือความคิดเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่หวังว่าจะเป็นโดยจะต้องมีความหมายที่แย้งกับ สมมติฐานกำหนดโดยชัดเจน โดยใช้ลักษณะ H_0

ในการทดสอบสมมติฐานจะอาศัยวิธีการการสุ่มตัวอย่าง การคำนวณค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบที่เหมาะสมและทำการสรุปเพื่อปฏิเสธหรือยอมรับ H_0 นอกจากนี้ยังต้องมีการกำหนดกลุ่มของค่าที่จะนำไปสู่การปฏิเสธ H_0 ซึ่งกลุ่มของค่านี้เรียกว่า “พื้นที่วิกฤต” หรือ “พื้นที่ของการปฏิเสธ” ของการทดสอบ

การตัดสินใจที่จะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานกำหนดอาจเกิดความผิดพลาดได้ 2 กรณี คือ

ก. ความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานกำหนด โดยที่สมมติฐานกำหนดมีความถูกต้องหรือมีความ เป็นจริงเรียกว่า ความผิดพลาดแบบที่1 (Type I error) โดยใช้สัญลักษณ์ α ซึ่งความผิดพลาดนี้คือ ระดับความมีนัยสำคัญในการตรวจสอบสมมติฐาน

ข. ความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานกำหนด โดยที่สมมติฐานกำหนดมีความไม่ถูกต้องหรือไม่มีความจริง เรียกว่าความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II error) โดยใช้สัญลักษณ์ β ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

การตัดสินใจในการทดสอบสมมติฐาน

ผลการทดลอง	สมมติฐานที่กำหนดมีความถูกต้อง	สมมติฐานที่กำหนดไม่มีความถูกต้อง
ยอมรับ	การตัดสินใจที่ถูกต้อง	ความผิดพลาดแบบ ข.
ปฏิเสธ	ความผิดพลาดแบบ ก.	การตัดสินใจที่ถูกต้อง

ที่มา : Breyfogle III, Implementing Six Sigma Smarter Solutions Using Statistical Methods ,John Wiley & Sons, 1999

โดยที่โอกาส หรือความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดแบบ ก. และแบบ ข. สามารถแสดงได้ดังนี้

α = P (ความผิดพลาดแบบ ก.)

= P (การปฏิเสธสมมติฐานกำหนด เมื่อ สมมติฐานกำหนดมีความถูกต้อง)

β = P (ความผิดพลาดแบบ ข.)

= P (การยอมรับสมมติฐานกำหนด เมื่อ สมมติฐานกำหนดไม่ถูกต้อง)

โดย 1- β = อำนาจของการทดสอบ

= P (การปฏิเสธสมมติฐานกำหนด เมื่อ สมมติฐานกำหนดไม่ถูกต้อง)

2.2.7. **การทดลองแบบแฟคทอเรียล** (Factorial Experiment)

เราสามารถแยกความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็น ความแปรปรวนเนื่องจากการปัจจัยต่างๆ ความแปรปรวนเนื่องจากอิทธิพลร่วม และความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการทดลอง แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลทั่วไปมีรูปแบบ คือ A x B x C… แฟรคทอเรียล เช่น แฟคทอเรียล 3x2x3 รูปแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ที่สำคัญได้แก่

2.2.7.1 2^k แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 2 ระดับในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย

2.2.7.2 3^k แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 3 ระดับในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย

รูปแบบ 2^k แฟคทอเรียลเหมาะสมกับรูปแบบที่มีความเป็นเส้นตรงซึ่งจะทำให้สามารถตีความข้อมูลได้อย่างถูกต้อง แต่ถ้าหากว่าอิทธิพลของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองมีความเป็นเส้นตรงที่ไม่ดีแล้ว ใช้รูปแบบ 3^k แฟคทอเรียล แทนจะเหมาะสมมากกว่า

ประโยชน์ที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล สามารถสรุปได้ดังนี้ คือ เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัย อีกทั้งยังมีความจำเป็นเมื่อเกิดอันตรกิริยาขึ้น ซึ่งกรณีนี้ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงผลสรุปที่ผิดพลาดได้ อีกทั้งยังทำให้สามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ และทำให้หาข้อสรุปที่สมเหตุสมผล (Valid) ตลอดเงื่อนไขในการทดลองได้

2.2.8. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k

(Montgomery, 2005, หน้า 203)

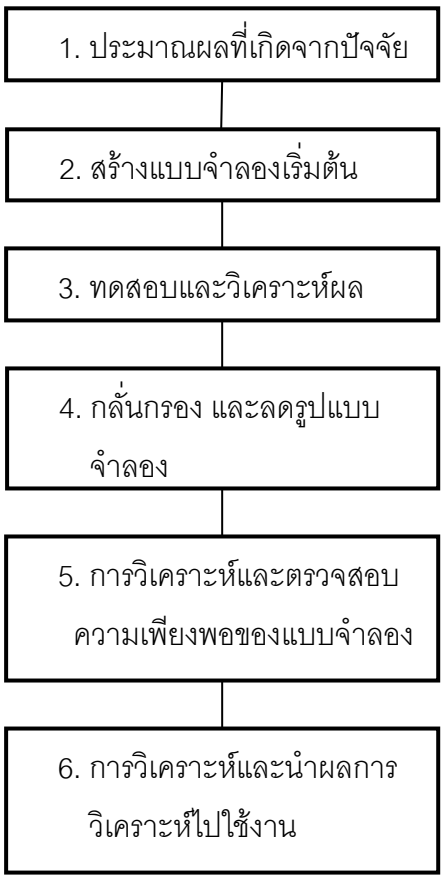
การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลมีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงานเป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่ง ๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้น ๆ ก็ได้ ในการทำซ้ำ 1 ครั้งที่สมบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \ldots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k ซึ่งในที่นี้ ขอสมมติว่า

- ปัจจัยทั้งหมดมีค่าตายตัว
- การออกแบบเป็นแบบเชิงสมบูรณ์ (Completely Randomized)
- สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติเป็นที่ยอมรับได้

การออกแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้เพื่อการศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างสมบูรณ์ โดยการออกแบบเชิงแฟคตอเรียล ดังนั้น จึงไม่น่าแปลกใจเลยที่การออกแบบ 2^k จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการออกแบบ 2^k ประกอบด้วย 2 ระดับ เราขอสมมติว่าผลตอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลองซึ่งสมมติฐานเช่นนี้เป็นสิ่งที่ยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเมื่อเราเริ่มต้นทำการศึกษาระบบ

การออกแบบที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบด้วยผลหลัก k ชนิดโดยที่ $\begin{bmatrix} k \\ 2 \end{bmatrix}$ คือ อันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย $\begin{bmatrix} k \\ 3 \end{bmatrix}$ คืออันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย และ1 คืออันตรกิริยาของ k ปัจจัยนั่นคือ แบบจำลองสมบูรณ์สำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบด้วยผลทั้งสิ้น $2^k - 1$ ชนิด เครื่องหมายสำหรับการทดลองร่วมปัจจัยที่กำหนดให้ก่อนหน้านี้ยังใช้ในรูปแบบทั่วไปได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น abd ในการออกแบบ 2^5 จะหมายถึง การทดลองร่วมปัจจัยที่ A, B และ D อยู่ที่ระดับสูงและ C และ E อยู่ที่ระดับต่ำ การทดลองร่วมปัจจัยใหม่เพิ่มขึ้นมานี้รวมกับปัจจัยที่อยู่ก่อนหน้ามัน ตัวอย่างเช่น ลำดับมาตรฐานของการออกแบบ 2^4 คือ (1) a, b, ab, c, ac, bc, abc, d, ad, bd, abd, cd, acd, bcd และ abcd ตามลำดับ

วิธีการทั่วไปในการวิเคราะห์เชิงสถิติของการออกแบบ 2^k ได้สรุปไว้ในภาพที่ 2.7 คือ ในขั้นแรกเราจะต้องประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ และตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลที่เกิดขึ้น ข้อมูลเช่นนี้จะทำให้ผู้ทดลองทราบโดยเบื้องต้นว่า ปัจจัยและผลกระทบร่วมตัวใดที่มีความสำคัญ และปัจจัยเหล่านี้ควรถูกปรับให้อยู่ในทิศทางใดเพื่อที่จะปรับปรุงผลตอบ ในการสร้างแบบ จำลองเริ่มต้น เราควรจะเลือกแบบจำลองเต็มรูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยผลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมด ในขั้นตอนที่สาม เราจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อที่จะทดสอบความมีนัยสำคัญของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม ขั้นตอนต่อจะเป็นการกลั่นกรองแบบจำลอง ซึ่งขั้นตอนที่ห้าจะเป็นการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การกลั่นกรองแบบจำลองได้เกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ทั้งนี้ เนื่องจากเราพบว่าแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอหรือสมมติฐานที่กำหนดให้นั้นไม่ถูกต้อง ในขั้นตอนสุดท้ายเราจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยสร้างกราฟของอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ขึ้น



ภาพที่ 2.7
แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบแฟคทอเรียล 2^k

2.2.9. **การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ**

(Montgomery, 2005, **หน้า** 282 - 293)

การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับถูกนำมาใช้มากในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อระบบ นั่นก็คือในการทดลองใดๆ อาจจะมีปัจจัยหลายๆ ปัจจัยที่กำลังให้ความสนใจอยู่ เราจะใช้การออกแบบเช่นนี้เพื่อค้นหาว่าปัจจัยตัวใดบ้างเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ การทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ส่วนมากจะใช้ในตอนเริ่มต้นออกแบบโครงการเป็นส่วนใหญ่ เหตุเพราะโดยมากแล้ว ในขณะนั้นจะมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลตอบที่กำลังพิจารณาอยู่หลังจากทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเสร็จสิ้นแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อๆ ไปที่จะตามมาในอนาคตความสำเร็จของการออกแบบแฟคทอเรียลบางส่วน ขึ้นอยู่กับแนวคิดที่สำคัญ 3 ประการ คือ

ประการที่ 1 หลักการที่ว่ามีปัจจัยจำนวนน้อยที่มีผลเมื่อมีตัวแปรหลายตัวการดำเนินการต่างๆ ของระบบหรือกระบวนการมีแนวโน้มที่จะถูกกำหนดโดยปัจจัยหลักและอันตรกิริยาขั้นต่ำเพียงบางตัวเท่านั้น

ประการที่ 2 คุณสมบัติการฉายการออกแบบ การออกแบบแฟรคทอเรียลบางส่วนสามารถถูกฉายไปสู่การออกแบบที่ดีกว่าในเซตย่อยของปัจจัยที่มีผล

ประการที่ 3 การทดลองต่อเนื่อง เป็นไปได้ที่จะรวมการทดลองแฟรคทอเรียลบางส่วนสองการทดลองหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน เพื่อจะทำให้การทดลองต่อเนื่องที่มีการออกแบบที่ใหญ่กว่า และสามารถประมาณผลของปัจจัยหลักละอันตรกิริยาที่อยู่ในความสนใจได้ดียิ่งขึ้น

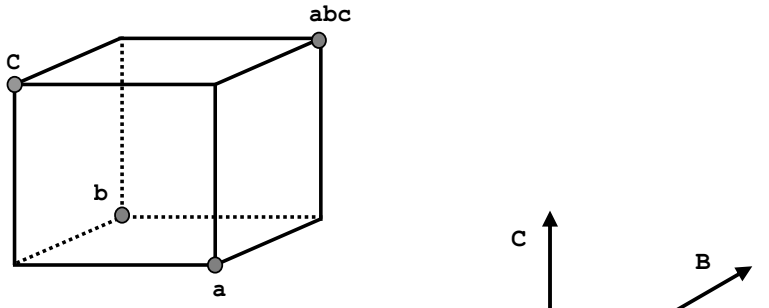
2.2.9.1 ½ ของการออกแบบ 2^k

เมื่อทำการทดลองผลของปัจจัย 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แต่ปรากฏว่าเราไม่สามารถทำการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด $2^3 = 8$ การทดลองได้ ทรัพยากรที่มีอยู่ยอมให้เราทดลองได้เพียง 4 การทดลองเท่านั้น เพราะว่าการออกแบบประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยจำนวน $2^{3-1} = 4$ การทดลอง ซึ่งก็คือ ½ ของการออกแบบ 2^3 หรือเรียกว่าเป็นการออกแบบ 2^{3-1} เครื่องหมายบวกและลบสำหรับการออกแบบ 2^3 แสดงได้ดังตารางที่ 2.2 สมมติว่าเลือกการทดลองร่วมปัจจัย a, b, c และ abc เป็นเศษส่วนครึ่งหนึ่ง ซึ่งการทดลองเหล่านี้แสดงอยู่ในครึ่งบนของตารางที่ 2.2 และภาพที่ 2.8ก.

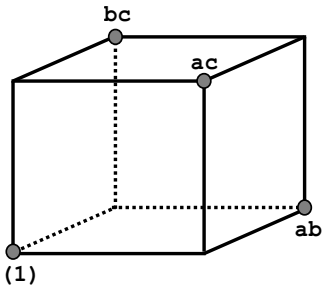
ตารางที่ 2.2

เครื่องหมายบวกและลบสำหรับการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ2^3

Treatment	Factorial Effect							
Combination	I	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
c	+	-	-	+	+	-	-	+
abc	+	+	+	+	+	+	+	+
ab	+	+	+	-	+	-	-	-
ac	+	+	-	+	-	+	-	-
bc	+	-	+	+	-	-	+	-
(1)	+	-	-	-	+	+	+	-



(ก) The principle fraction, I = +ABC



(ข) The alternate fraction, I = -ABC

ภาพที่ 2.8

แสดง ½ ของการออกแบบ 2^3

การออกแบบ 2^{3-1} สร้างขึ้นมาโดยการเลือกจากการทดลองร่วมปัจจัยที่มีค่าในคอลัมน์ ABC เป็นบวก ดังนั้น เรียก ABC ว่า “ตัวก่อกำเนิด (Generator)” ของเศษส่วนนี้ ซึ่งคอลัมน์ I จะมีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นจะเรียก I = ABC ว่าเป็น “ตัวกำเนิดความสัมพันธ์ (Defining Relation)” ของการออกแบบ โดยจะหมายถึงเซตของคอลัมน์ทั้งหมดที่เท่ากับคอลัมน์เอกลักษณ์ I และผลรวมเชิงเส้นของข้อมูลที่จะนำมาประมาณค่าของผลหลัก A, B และ C คือ

$$l_A = \tfrac{1}{2}(a-b-c+abc),\ l_B = \tfrac{1}{2}(-a+b-c+abc),\ l_C = \tfrac{1}{2}(-a-b+-c+abc)$$

$$l_{BC} = \tfrac{1}{2}(a-b-c+abc),\ l_{AC} = \tfrac{1}{2}(-a+b-c+abc),\ l_{AB} = \tfrac{1}{2}(-a-b+-c+abc)$$

ดังนั้น จะพบว่า $l_A = l_{BC}$, $l_B = l_{AC}$ และ $l_C = l_{AB}$ ซึ่งหมายความว่า เราไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่าง A และ BC, B และ AC, และ C และ AB ได้ เมื่อทำการประมาณค่าของ A, B และ C ก็จะประมาณค่าของ A+BC, B+AC, และ C+AB ด้วย ซึ่งเรียกว่าเป็น “คู่แฝดแฝง (Alias)”

$$l_A \rightarrow A + BC,\ l_B \rightarrow B + AC,\ l_C \rightarrow C + AB$$

$$A = BC,\ B = AC,\ C = AB$$

ซึ่งจะเรียกเศษส่วน ½ ที่มี I = ABC ว่า “เศษส่วนหลัก (Principle Fraction) “ และเมื่อทำการลือกการทดลองร่วมปัจจัยในตารางที่ 2.2 ที่มีเครื่องของคอลัมน์เป็นลบ ความความสัมพันธ์ของการออกแบบจะได้เป็น I = - ABC ซึ่ง

$$I'_A \rightarrow A - BC,\ I_B \rightarrow B - AC,\ I'_C \rightarrow C - AB$$

โดยเศษส่วนทั้งสองครั้งนี้จะทำให้เกิดการออกแบบ 2^3 ที่บริบูรณ์ซึ่งดูได้จากภาพที่ 2.8ก และ 2.8ข

2.2.9.2 มิติของการออกแบบ (Resolution)

จากในข้อ 2.2.9.1 สามารถเรียกการออกแบบ 2^{3-1} ได้ว่าเป็นการออกแบบมิติ III (Resolution III Design) การออกแบบเช่นนี้ ผลหลักจะคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยา 2 ปัจจัย การออกแบบจะมีมิติ R ก็ต่อเมื่อไม่มีผลของ p ปัจจัยใดๆ ที่คู่แฝดแฝงกับผลอื่น ที่น้อยกว่า R-p ปัจจัย เราจะใช้ตัวห้อยเป็นเลขโรมันแทนมิติของการออกแบบ ดังนั้น เศษส่วนของการออกแบบ 2^3 ที่มีตัวกำหนดความสัมพันธ์ I = ABC (หรือ I = -ABC) คือการออกแบบ 2_{III}^{3-1} เนื่องจากการออกแบบที่มีมิติ III,IV และ V มีความสำคัญ จึงสามารถให้นิยามแต่การมิติได้ดังต่อไปนี้

2.2.9.2.1 การออกแบบมิติ III การออกแบบเหล่านี้จะไม่มีผลต่อหลักใดๆ ที่จะคู่แฝดแฝงกับผลหลักตัวอื่นๆ แต่ผลหลักจะคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยา 2 ปัจจัย และอันตรกิริยาสองปัจจัยอาจจะคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกันได้

2.2.9.2.2 การออกแบบมิติ IV การออกแบบเหล่านี้จะไม่มีผลต่อหลักใดๆ ที่จะคู่แฝดแฝงกับผลกระทบหลักตัวอื่นๆ หรือกับอันตรกิริยา 2 ปัจจัยใดๆ แต่ผลกระทบร่วมสองปัจจัยอาจจะคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกัน เช่น การออกแบบ 2^{4-1} ที่มี I = ABCD เป็นการออกแบบมิติ IV (2_{IV}^{4-1})

2.2.9.2.3 การออกแบบมิติ V การออกแบบนี้จะไม่มีผลกระทบหลักหรือผลกระทบร่วมสองปัจจัยใดๆ ที่จะคู่แฝดแฝงกับผลกระทบหลักหรือผลกระทบร่วมสองปัจจัยตัวอื่นๆ แต่ในz ผลกระทบร่วมสองปัจจัยจะคู่แฝดแฝงกับผลกระทบร่วมสามปัจจัย เช่น การออกแบบ 2^{5-1} ที่มี I = ABCDE เป็นการออกแบบมิติ V (2_V^{5-1})

โดยมากแล้วจะออกแบบกำหนดให้มีมิติสูงสุดที่เป็นไปได้ของการออกแบบแฟคทอเรียลแบบเศษส่วนมีค่าตรงกันกับระดับของเศษส่วนที่ต้องการ ซึ่งเห็นได้ว่า การออกแบบยิ่งมีมิติสูงก็ยิ่งมีข้อจำกัดน้อยลงในเรื่องสมมติฐานเกี่ยวกับว่า ผลกระทบร่วมตัวใดจะถูกละเลยได้เพื่อจะได้ตีความหมายได้อย่างถูกต้อง

<u>ตัวอย่างที่ 1</u> การออกแบบ 2^{5-1} สำหรับการปรับปรุงกระบวนการ

โจทย์ ผู้ผลิตแผงวงจรไฟฟ้าต้องการตรวจสอบปัจจัย 5 ชนิดในกระบวนการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า โดยใช้การออกแบบ 2^{5-1} โดยมีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงผลผลิต ปัจจัยทั้งห้าประกอบด้วย

A = การตั้งช่อง (ใหญ่ ,เล็ก),

B = ระยะเวลาที่ให้ถูกแสง (ต่ำกว่าปกติ 20%, สูงกว่าปกติ 20%)

C = เวลาในการล้าง (30 วินาที , 45 วินาที)

D = ขนาดของการปิดบัง (เล็ก, ใหญ่)

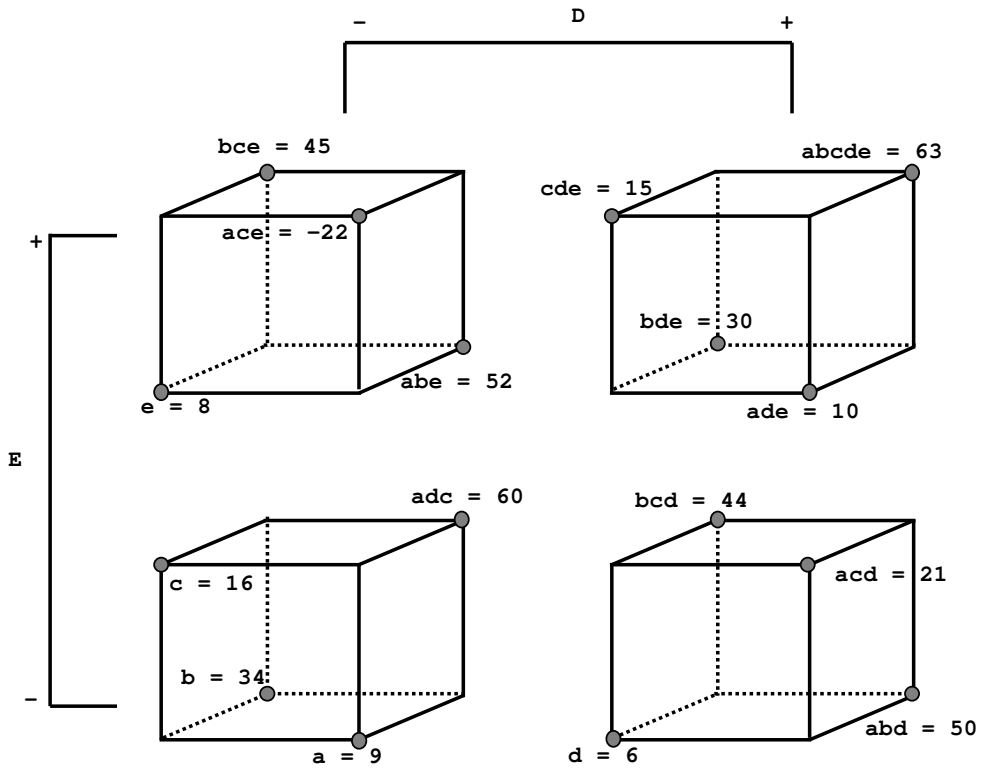
E = เวลาที่ใช้ในการกัด (14.5นาที, 15.5นาที)

จากตารางที่ 2.3 แสดงการออกแบบ 2^{5-1} มีทั้งหมด 16 การทดลอง (การออกแบบ 2^4 ที่มีปัจจัย A,B,C และ D) เลือก ABCDE เป็นตัวก่อกำเนิด และเลือกระดับของปัจจัยตัวที่ 5 คือ E = ABCD โดยที่ตัวกำหนดความสัมพันธ์สำหรับการออกแบบ I = ABCDE พบว่าผลหลักทุกตัวจะคู่แฝดแฝงกับผลกระทบร่วมแบบสี่ปัจจัย เช่น $I_A \rightarrow A + BCDE$ และผลกระทบร่วมแบบสองปัจจัยทุกตัวจะคู่แฝดแฝงกับผลกระทบร่วมแบบสามปัจจัย เช่น $I_{AB} = AB + CDE$ ดังนั้น การออกแบบนี้มีมิติ V ซึ่งจากข้อมูลนี้สามารถคาดได้ว่าการออกแบบ 2^{5-1} จะให้ความชัดเจนอย่างดีเกี่ยวกับผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมแบบสองปัจจัย

ตารางที่ 2.3

แสดงการออกแบบการทดลองแบบ 2_v^{5-1} ของตัวอย่างที่ 1

Run	Basic Design					Treatment	Yield
	A	B	C	D	E = ABCD	Combination	
1	-	-	-	-	+	e	8
2	+	-	-	-	-	a	9
3	-	+	-	-	-	b	34
4	+	+	-	-	+	abe	52
5	-	-	+	-	-	c	16
6	+	-	+	-	+	ace	22
7	-	+	+	-	+	bce	45
8	+	+	+	-	-	abc	60
9	-	-	-	+	-	d	6
10	+	-	-	+	+	ade	10
11	-	+	-	+	+	bde	30
12	+	+	-	+	-	abd	50
13	-	-	+	+	+	cde	15
14	+	-	+	+	-	acd	21
15	-	+	+	+	-	bcd	44
16	+	+	+	+	+	abcde	63



ภาพที่ 2.9

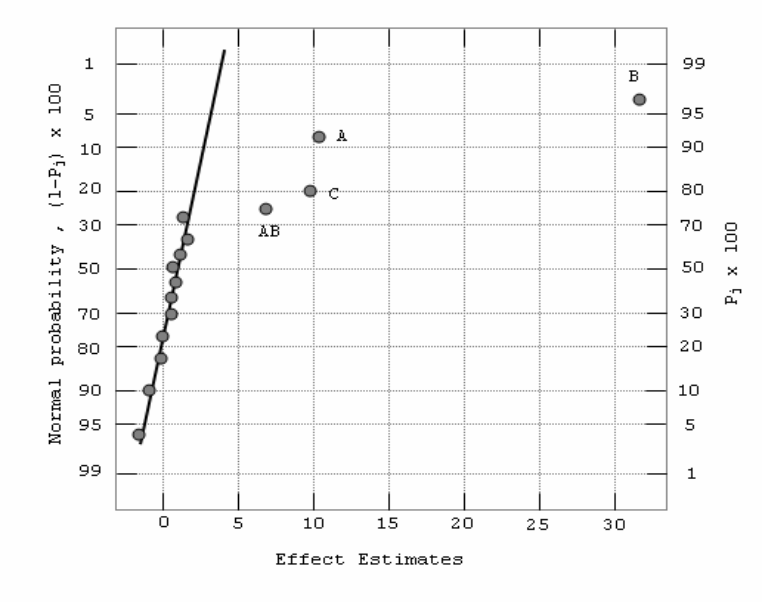
การออกแบบการทดลองแบบ 2_v^{5-1}

ตารางที่ 2.4

ผลสัมประสิทธิ์การถดถอยและผมรวมของกำลังสองสำหรับตัวอย่างที่ 1

Variable	Name	-1 Level	+1 Level
A	Aperture	-1	1
B	Development time	-1	1
C	Explosure time	-1	1
D	Mask dimension	-1	1
E	Etch time	-1	1

Variable	Regression Coefficient	Estimated Effect	Sum of Squares
Overall Average	30.3125		
A	5.5625	11.125	495.062
B	16.9375	33.875	4590.062
C	5.4375	10.875	473.062
D	-0.4375	-0.875	3.063
E	0.3125	0.625	1.563
AB	3.4375	6.875	189.063
AC	0.1875	0.375	0.563
AD	0.5625	1.125	5.063
AE	0.5625	1.125	5.063
BC	0.3125	0.625	1.563
BD	-0.0625	-0.125	0.063
BE	-0.0625	-0.125	0.063
CD	0.4375	0.875	3.063
CE	0.1875	0.375	0.563
DE	-0.6875	-1.375	7.563



ภาพที่ 2.10

แสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของผลสำหรับตัวอย่างที่ 1

จากตารางที่ 2.4 ค่าประมาณของผลรวมของกำลังสอง และสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลองสำหรับผลทั้ง15 ตัวในการทดลองนี้ ภาพที่ 2.10 แสดงกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติสำหรับค่าประมาณของผลที่เกิดขึ้น เห็นได้ว่าผลกระทบหลัก A, B และ C และผลกระทบร่วม AB มีค่ามาก แต่เนื่องจากการคู่แฝดแฝงจึงทำให้ผลเหล่านี้หมายถึง A + BCDE ,B+ACDE,C+ABDE และ AB+CDE อย่างไรก็ตามดูเหมือนว่าผลกระทบร่วมแบบสามปัจจัยและมากกว่าสามารถละเลยได้ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า A, B, C และผลกระทบร่วม AB มีผลอย่างมีนัยสำคัญ.

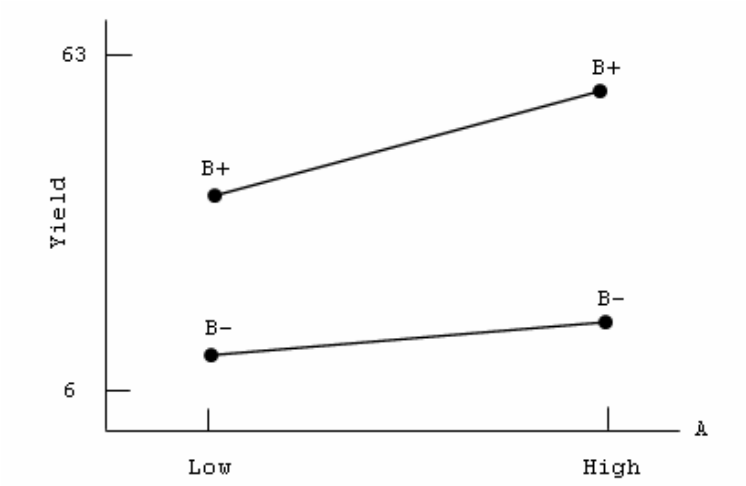
จากตารางที่ 2.5 สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับตัวอย่างนี้ ค่าผลรวมของกำลังสองของแบบจำลองคือ $SS_{Model} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} = 5,747.25$ และมีค่ามากกว่า 99% ของค่าความแปรปรวนทั้งหมด

ตารางที่ 2.5

แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับตัวอย่างที่ 1

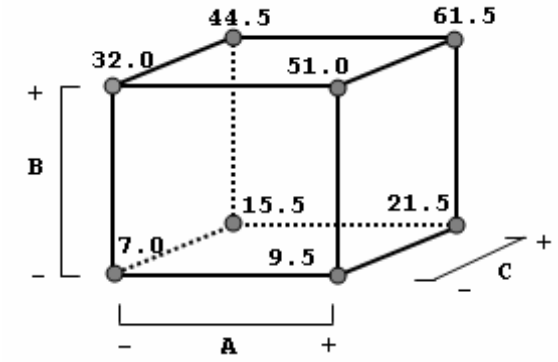
Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Squares	F_0	P-Value
A (Aperture)	495.0625	1	495.0625	193.20	<0.0001
B (Exposure time)	4590.0625	1	4590.0625	1791.24	<0.0001
C (Development time)	473.0625	1	473.0625	184.61	<0.0001
AB	189.0625	1	189.0625	73.78	<0.0001
Error	28.1875	11	2.5625		
Total	5775.4375	15			

จากภาพที่ 2.11 แสดงกราฟของผลกระทบร่วม AB จากกราฟสามารถยืนยันได้ว่าผลผลิตมีค่าสูง ถ้าเราใช้ปัจจัย A และ B ที่ระดับสูง



ภาพที่ 2.11
แสดงผลกระทบร่วม AB สำหรับตัวอย่างที่ 1

การออกแบบจะถูกยุบไปสู่การออกแบบ 2^3 ที่มี 2 เรพลิเคตภายใต้ 3 จาก 5 ปัจจัยเริ่มต้นดังภาพที่ 2.12 แสดงรูปลูกบาศก์ของปัจจัย A, B และ C ที่มีค่าผลผลิตเฉลี่ยอยู่ที่มุมทั้งแปด เมื่อดูจากภาพลูกบาศก์นี้จะพบว่าผลผลิตสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ A, B และ C อยู่ในระดับที่สูง โดยที่ปัจจัย D และ E มีผลน้อยมาก ดังนั้น ค่าของ D และ E อาจจะถูกกำหนดขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์อื่นๆ



ภาพที่ 2.12
แสดงการออกแบบที่ถูกยุบไปสู่การออกแบบ 2^3 ที่มี 2 เรพลิเคตภายใต้ 3 จาก 5 ปัจจัยเริ่มต้นของตัวอย่างที่ 1

2.2.9.3 รูปทั่วไปของการออกแบบแฟคทอเรียลบางส่วนแบบ 2^{k-p}

การออกแบบแฟคทอเรียลบางส่วนแบบ 2^k ที่ประกอบด้วย 2^{k-p} การทดลองเรียกว่าเศษส่วน $\frac{1}{2^p}$ ของการออกแบบ 2^k หรือเรียกว่า การออกแบบแฟคทอเรียลบางส่วนแบบ 2^{k-p} การออกแบบนี้จะเลือกตัวก่อกำเนิด p ตัวที่เป็นอิสระต่อกัน ตัวกำหนดความสัมพันธ์สำหรับการออกแบบนี้ประกอบด้วยตัวก่อกำเนิดที่เลือกมาในตอนเริ่มต้น p ตัว และอันตรกิริยาวางนัยทั่วไปแล้วที่เกิดจากตัวก่อกำเนิดอีก 2^p-p-1 ตัว โครงสร้างของคู่แฝดแฝงหาได้จากการคูณผลในแต่ละคอลัมน์ด้วยตัวกำหนดความสัมพันธ์แต่จะต้องให้ความระมัดระวังในการเลือกตัวก่อกำเนิดเพื่อว่าผลที่อยู่ในความสนใจจะไม่คู่แฝดแฝงซึ่งกันและกัน

เกณฑ์ในการเลือกตัวกำเนิด p ก็คือ ทำให้การออกแบบ 2^{k-p} มีมิติสูงสุด ดังตารางตัวอย่างที่ 2.6 แสดงการเลือกการออกแบบแฟคทอเรียลบางส่วนแบบ 2^{k-p}สำหรับ $k \leq 15$ ปัจจัย และ $n \leq 128$ การทดลอง ตัวก่อกำเนิดในที่นี้จะทำให้เกิดมิติสูงสุดเท่าที่จะเป็นได้

ตารางที่ 2.6

ตารางตัวอย่างการออกแบบแฟคทอเรียลบางส่วนแบบ 2^{k-p}

Number of Factors ,k	Fraction	Number of Runs	Design Generator
3	2_{III}^{3-1}	4	C = ±AB
4	2_{IV}^{4-1}	8	D = ±ABC
5	2_{V}^{5-1}	16	E = ±ABCD
	2_{III}^{5-2}	8	D = ±AB
			E = ±AC
6	2_{VI}^{6-1}	32	F = ±ABCDE
	2_{IV}^{6-2}	16	E = +ABCD
			F = ±BCD
	2_{III}^{6-3}	8	D = ±AB
			E = ±AC
			F = ±BC
7	2_{VII}^{7-1}	64	G = ±ABCDEF
	2_{IV}^{7-2}	32	F = ±ABCD
			G = ±ABDE
	2_{IV}^{7-3}	16	E = +ABC
			F = ±BCD
			G = ±ACD
	2_{III}^{7-4}	8	D = ±AB
			E = ±AC
			F = ±BC

2.2.10 หลักการประเมินผลค่ารีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ของระบบการวัด (GR&R – Gage Repeatability and Reproducibility) ,(กิตติศักดิ์, 2546 ,หน้า 111 – 113)

หลักการประเมินผลค่ารีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ของระบบการวัดหมายถึง การประเมินผลค่าผันแปรจากการวัดค่าจริงของงานหนึ่งชิ้นแบบซ้ำๆ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการศึกษาความผันแปรของระบบการวัดในรูปของรีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ ต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

(ก) วิธีการและเวลาที่จะมีการสอบเทียบเครื่องมือวัด โดยปกติแล้วจะทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดก่อนการทำรีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ ซึ่งไม่ควรทำการสอบเทียบในขณะที่ยังไม่เสร็จสิ้นในการศึกษาระบบการวัดนั้นๆ

(ข) จำนวนพนักงานที่ใช้สำหรับการทำรีพีททะบิลิตี้ และรีโปรดิวซิบิลิตี้ พนักงานที่มาทำการทดลองจะต้องผ่านการอบรมเป็นอย่างดีแล้ว ซึ่งถ้ามีพนักงานจำนวนมากให้เลือกมาทำการ ศึกษาระบบการวัดอย่างน้อย 2 – 3 คน

(ค) จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทำรีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ ตัวอย่างที่นำมาทำการศึกษาแต่ละชิ้นจะต้องมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และในกรณีที่จะทำให้ระบบการวัดมีคุณภาพด้านความผันแปรเพียงพอต่อการตรวจจับความผันแปรของชิ้นงานในกระบวนการแล้วจะต้องทำให้ข้อมูลมีความแตกต่างกันไม่ต่ำกว่า 3 – 5 ประเภท

(ง) จำนวนครั้งในการวัดซ้ำของตัวอย่างแต่ละชิ้น โดยปกติแล้วจะทำการวัดซ้ำที่แต่ละสิ่งตัวอย่างด้วยจำนวนซ้ำที่เท่า ๆ กัน ซึ่งกำหนดให้มีการวัดซ้ำสำหรับพนักงานวัดแต่ละคนด้วยจำนวน 2 - 3 ครั้งต่อชิ้นงานแต่ละชิ้น

(จ) วิธีการประเมินผลรีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ เมื่อการทดลองสิ้นสุดลงจะต้องมีการประเมินผลถึงคุณภาพของข้อมูล คือ ประเมินผลความสามารถการแยกความแตกต่างของค่าวัด ความเสถียร และความสม่ำเสมอของระบบการวัด จากนั้นจึงทำการประเมินผลรีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ ซึ่งมีทั้งหมด 3 วิธี คือ

1) วิธีอาศัยค่าพิสัย เป็นวิธีที่เหมาะกับการทดลองในช่วงสั้น ๆ และไม่มีการวัดซ้ำมีข้อดีคือประเมินผลได้ง่าย แต่ข้อเสียคือไม่สามารถแยกรีพีททะบิลิตี้ออกจากรีโปรดิวซิบิลิตี้ได้

2) วิธีอาศัยค่าเฉลี่ยและพิสัย เป็นวิธีที่เหมาะกับการทดลองซ้ำกับตัวอย่างโดยพนักงานแต่ละคน วิธีนี้สามารถแยกรีพีททะบิลิตี้ออกจากรีโปรดิวซิบิลิตี้ได้แต่ไม่สามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้นงานและพนักงานวัดออกจากรีพีททะบิลิตี้ได้

3) วิธีอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นวิธีที่เหมาะกับการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เพื่อพิจารณาว่าพนักกงาน และชิ้นงานเป็นสาเหตุความผันแปรอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ และสามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้นงาน และพนักงานวัดออกจากค่ารีพีททะบิลิตี้ได้ แต่มีข้อเสียคือมีความยุ่งยากในการคำนวณ ซึ่งแนะนำให้ใช้โปรแกรมช่วยคำนวณจะรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

เมื่อมีการประเมินค่าความผันแปรด้านรีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้แล้ว จะต้องมีการประเมินผลเทียบกับความผันแปรที่ยอมให้ ซึ่งอาจเป็นค่าความคลาดเคลื่อนอนุโลมของข้อกำหนดเฉพาะ เรียกว่า Precision to Tolerance หรือ P/T สำหรับระบบการวัดที่ใช้วิเคราะห์ระบบการวัดเพื่อแยก แยะชิ้นงานที่ดีหรือเสีย หรือเทียบจากความผันแปรจากกระบวนการ จะเรียกว่า Precision to Total Variation หรือ P/TV สำหรับระบบการวัดเพื่อตรวจจับความผันแปรในกระบวนการ โดยที่

$$\text{P/T} = \frac{GR\ \&\ R}{USL - LSL} x100\% = \frac{5.5 * \sigma_{measurement}}{USL - LSL}$$

และ $$\text{P/TV} = \frac{GR\ \&\ R}{\text{Process variation}} x100\%$$

และ $$\sigma^2_{Total} = \sigma^2_{product} + \sigma^2_{repeatibility} + \sigma^2_{reproductivity}$$

และ $$\%R\ \&\ R = \frac{\sigma^2_{measurement}}{\sigma^2_{total}} x100$$

การกำหนดเกณฑ์การยอมรับค่า P/T และ P/TV ไว้ดังต่อไปนี้

P/T หรือ P/TV < 10% สามารถยอมรับความสามารถของระบบการวัดได้

P/T $\geq$ 10% หรือ P/TV < 30% เป็นค่าที่อาจจะยอมรับความสามารถของระบบการวัดนี้ได้

P/T หรือ P/TV > 30% ไม่สามารถยอมรับความสามารถของระบบการวัดนี้ได้

การกำหนดเกณฑ์การยอมรับค่ารีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ (%R&R) ไว้ดังต่อไปนี้

%R&R < 15% สามารถยอมรับความสามารถของระบบการวัดได้

15% < %R&R < 30% เป็นค่าที่อาจจะยอมรับความสามารถของระบบการวัดนี้ได้

%R&R > 30% ไม่สามารถยอมรับความสามารถของระบบการวัดนี้ได้

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1. E.-S. Lee และ S.-Y. Baek (2549) ได้ทำการศึกษาหาค่าความหยาบของผิวที่ดีที่สุดในการเจียระไนเลนส์นูนขนาดเล็กโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง งานวิจัยเริ่มต้นจากการ หาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจียระไน ซึ่งสามารถเลือกได้ 3 อย่าง คือ ความเร็วของหัวเจียระไน , ความเร็วการหมุนของชิ้นงาน และอัตราการเคลื่อนที่ของหัวเจียระไนเข้าสู่ชิ้นงาน ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองแฟคชั่นนัลแฟคทอเรียล (2^3) ซึ่งมีการทดลองทั้งหมด 8 การทดลองและในแต่ละการทดลองมีการตั้งเงื่อนไขของแต่ละปัจจัยเป็นสองระดับดังนี้ คือ ความเร็วของหัวเจียระไน (10.467 และ 16.747 เมตรต่อวินาที) ,ความเร็วการหมุนของชิ้นงาน (18.831 และ 62.8 มิลลิเมตรต่อวินาที) และอัตราการเคลื่อนที่ของหัวเจียระไนเข้าสู่ชิ้นงาน (3 และ 10 มิลลิเมตรต่อนาที) จากการทดลองพบว่าทั้งสามปัจจัยส่งผลต่อความหยาบของผิวเลนส์ อย่างมีนัยสำคัญ (P-Value เท่ากับ 0.00) ซึ่งสามารถสรุปผลได้คือ ค่าความหยาบของผิวเลนส์จะมีค่าที่ดีที่สุดคือ 0.31 ไมครอน เมื่อปรับค่าความเร็วของหัวเจียระไนอยู่ในระดับสูง (16.747 เมตรต่อวินาที) ,ค่าความเร็วของชิ้นงานอยู่ในระดับสูง(62.8มิลลิเมตรต่อวินาที) และอัตราการเคลื่อนที่ของหัวเจียระไนเข้าสู่ชิ้นงาน (3 มิลลิเมตรต่อนาที).

2.3.2. Zalina Abdul-Aziz , Zaharad Wahid และ Andrew Viggo Metcalfe (2545) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของถุงมือยาง โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง งานวิจัยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์หาปัจจัยจากการผลิตถุงมือยาง ซึ่งมีสองปัจจัยนั่นคือค่าอุณหภูมิของยางดิบและค่าความชื้นในห้องผลิต คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองฟูล-แฟคทอเรียล มีการทดลองทั้งหมด 4 การทดลองซึ่งในแต่ละการทดลองมีการตั้งเงื่อนไขของแต่ละปัจจัยเป็นสองระดับ ดังนี้ คือ ค่าอุณหภูมิของยางดิบ (25-26 และ 29-30 องศาเซลเซียส) และค่าความชื้นในห้องผลิต ((ค่าความชื้นต่ำ (ช่วงกลางคืน) และค่าความชื้นสูง (ช่วงกลางวัน)) จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของถุงมือยางอย่างมีนัยสำคัญ (P-Value = 0.05) ก็คือค่าความชื้นภายในห้องผลิต โดยความหนาจะมีค่าสูงถึง 197 ไมครอน เมื่อค่าความชื้นในห้องผลิตมีค่าสูง ไม่ว่าอุณหภูมิของยางดิบจะมีค่าสูงหรือต่ำก็ตาม เช่นเดียวกัน ความหนาของถุงมือยางจะมีค่าต่ำลงเมื่อค่าความชื้นภายในห้องผลิตมีค่าต่ำ และจะยิ่งต่ำลงไปถ้าอุณหภูมิของยางดิบมีค่าต่ำอีกด้วย สรุปได้คือ สามารถผลิตถุงมือยางได้หนาในช่วงเวลากลางวัน และสามารถแก้ปัญหาถุงมือยางบาง ในเวลากลางคืนได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของยางดิบ.

2.3.3. K.Ravikumar ,Sung-Hoon Kim และ Young-A son (2549) ได้ทำการศึกษาอัตราการซึมซับของเบอร์บีไรด์ (Berberine หรือ สารที่ทำให้เป็นสี) ในวัสดุโพลีไมด์ (Polyamide)

หรือไนล่อน (Nylon) โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง งานวิจัยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์หาปัจจัยในการผลิตโพลีไมด์ ซึ่งมีทั้งสิ้นสี่ปัจจัย นั่นคือ ค่า pH ,ค่าอุณหภูมิ ,ค่าการรวมตัวของเบอร์บีไรด์ และค่าเวลา คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองฟูลแฟคทอเรียล (2^4) ,7 ค่าศูนย์กลาง (Center point) และ 8 Star point มีการทดลองทั้งหมด 31 การทดลอง ซึ่งในแต่ละการทดลองมีการตั้งเงื่อนไขของแต่ละปัจจัยเป็นสองระดับ ดังนี้ ค่า pH (10 และ 12), ค่าอุณหภูมิ (60 และ 100 องศาเซลเซียส), ค่าการรวมตัวของเบอร์บีไรด์ (0.5 และ 6 เปอร์เซ็นต์) และค่าเวลา (10 และ 60 นาที) ซึ่งจากการทดลองพบว่ามีหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการซึมซับสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ (P-Value = 0.00) คือ ค่า pH ซึ่งจากการหาผลที่ดีที่สุดจากโปรแกรมทางสถิติ จะได้ค่าอัตราการซึมซับของเบอร์รีไรด์สูงสุด คือ 96.85% เมื่อตั้งค่าของแต่ละปัจจัย ดังต่อไปนี้ ค่า pH เท่ากับ 10.78, ค่าอุณหภูมิ เท่ากับ 85 องศาเซลเซียส ,ค่าการรวมตัวกันของเบอร์รี-ไรด์ เท่ากับ 0.7274 เปอร์เซ็นต์ และค่าเวลา เท่ากับ 84.96 นาที

2.3.4. R.Bozzo ,G.Coletti, C.Gemme และ F.Guastavino (2540) ได้ทำการศึกษาค่าที่ดีที่สุดต่อระบบการวัดแบบดิจิตอลพาเชี่ยลดิสชาร์จ (Digital Partial Discharge) โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง งานวิจัยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์หาปัจจัยในระบบการวัดแบบนี้ ซึ่งมีสามปัจจัย คือ ค่าเวลาที่เลื่อนไป (PD Acquisition time lag), ค่าอัตราการขยาย (Amplifier gain) และค่าการกรองสัญญาณด้านต่ำ (Filter Low Level Discriminator) คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองฟูลแฟคทอเรียล (3^3) ซึ่งมีการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ซึ่งในแต่ละการทดลองมีการตั้งเงื่อนไขของแต่ละปัจจัยเป็นสามระดับดังนี้ ค่าเวลาที่เลื่อนไป (10 ,95 และ 180 วินาที), ค่าอัตราการขยาย (4 ,7 และ 10) และค่าการกรองสัญญาณด้านต่ำ (1 ,5.5 และ 10) จากการทดลองพบว่ามีทั้งสามปัจจัยส่งผลต่อการวัดอย่างมีนัยสำคัญ (P-Value = 0.00) ซึ่งจากการหาผลที่ดีที่สุดจากโปรแกรมทางสถิติ จะได้ค่าค่าของแต่ละปัจจัยที่นำไปปรับที่เครื่องวัด คือ ค่าเวลา เท่ากับ 80 ถึง 130 วินาที, ค่าอัตราการขยาย เท่ากับ 8 ถึง 9 และค่าการกรองสัญญาณด้านต่ำนั้น คณะผู้วิจัยไม่แนะนำให้ทำการปรับ.

2.3.5. Sanjoy Kumar และ Michael Tobin (2533) ได้ใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อแก้ปัญหาของเสียในการกระบวนการ Wire Bond ที่บริษัทแห่งหนึ่ง งานวิจัยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์หาปัจจัยในระบบการวัดซึ่งมีสามปัจจัยคือ กำลังไฟฟ้า ,ค่าเวลา และค่าแรงที่กระทำ คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเชิงเต็มจำนวน (2^3) กับ 2 ค่าศูนย์กลาง ซึ่งมีการทดลองทั้งหมด 9 การทดลอง ซึ่งในแต่ละการทดลองมีการตั้งเงื่อนไขของแต่ละปัจจัยเป็นสองระดับดังนี้ กำลังไฟฟ้า (90 และ 110 วัตต์ , ค่าศูนย์กลาง เท่ากับ 100 วัตต์) ,ค่า

เวลา (15 และ 35 วัตต์), ค่าศูนย์กลาง เท่ากับ 25 วัตต์ และค่าแรงที่กระทำ (3 และ 10 ปอนด์), ค่าศูนย์กลาง เท่ากับ 5 ปอนด์) จากการทดลองพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าเป็นปัจจัยส่งผลต่อการวัดอย่างมีนัยสำคัญที่สุด เมื่อให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงจะทำให้เกิดของเสียในกระบวนการ Wire bond ต่ำที่สุด ในขณะที่แรงที่กระทำและค่าเวลาไม่ส่งผลต่อการเกิดของเสียอย่างมีนัยสำคัญ

2.3.6. อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูลย์ (2548) ได้ใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะที่สุดของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ (Flux – Cored Arc Welding, FCAW) โดยเริ่มต้นจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเชิงเต็มจำนวน (2^{6-2}) โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ เพื่อกรองปัจจัย 6 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟ ,แรงดันไฟเชื่อม, ความเร็วเชื่อม, ระยะโผล่ลวดเชื่อม, มุมหัวเชื่อมและแก๊สคลุม ให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านแรงดึงของตะเข็บเชื่อม จากนั้นใช้การทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken) เพื่อวิเคราะห์หาผลตอบที่ดีที่สุด ในการศึกษาใช้เครื่องเชื่อม Lincoln รุ่น SQUIRT WELDER LN - 8 ใช้ลวดเชื่อม รหัส E71T-1 ขนาด 1.2 มิลลิเมตร โดยนำชิ้นงานมาทำการเชื่อมทางตรงและทดสอบหาคุณภาพทางกล ด้วยการทดสอบค่าความต้านแรงดึง ผลการทดลองความต้านแรงดึงของตะเข็บเชื่อม ที่ระดับ α = 0.05 พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรต่างๆ คือ กระแสไฟ เท่ากับ 250 แอมป์ แรงดันไฟเชื่อม เท่ากับ 32 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อม เท่ากับ 22 นิ้วต่อนาที ระยะโผล่ลวดเชื่อม เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มุมหัวเชื่อม เท่ากับ 45.6 องศาและแก๊ส CO2 คลุมแนวเชื่อม เท่ากับ 20 ลิตรต่อนาที ซึ่งได้ค่าแรงดึงสูงสุด คือ 6400 kgf.

2.3.7. วรพจน์ ศิริรักษ์ (2549) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพผิวเคลือบที่ได้จากการพ่นเคลือบแบบอาร์คไฟฟ้า ด้วยลวดโลหะที่ผลิตในประเทศไทย กับลวดโลหะที่ใช้ในการพ่นเคลือบซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาแพง ผู้วิจัยคาดว่าสามารถนำลวดโลหะที่ผลิตในประเทศไทยมาใช้แทนลวดพ่นที่ใช้ในการพ่นเคลือบได้ ดังนั้นจึงได้ทำการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยเพื่อให้ได้ผิวเคลือบที่มีคุณสมบัติที่ดี โดยออกแบบการทดลองแฟรคทอเรียลเชิงเศษส่วน (2^{6-2}) เพื่อกรองปัจจัยทั้งหมดหกปัจจัย จากกนั้นใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และแฟกทรอเรียล 3 ระดับ ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาคุณสมบัติที่ดีที่สุดของผิวเคลือบ จากการศึกษาผิวเคลือบทั้งหมด 11 ชนิด ผู้วิจัยสามารถแบ่งผิวเคลือบออกเป็นสองกลุ่มตามคุณสมบัติผิวเคลือบ คือ ลวดพ่นสเตนเลส, ลวด Ni5Al, ลวดเชื่อมเหล็ก, ลวดเหล็กก่อสร้าง, ลวดเชื่อมแก๊สเหล็ก และลวดเชื่อมสเตนเลส มีความแข็งของผวเคลือบเฉลี่ย 383 วิกเกอร์ ค่าอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 14.06 มิลลิกรัมต่อครั้ง และปริมาณสัดส่วนรูพรุนโดยเฉลี่ย 22.24% โดยผิวเคลือบที่ได้จากลวดกลุ่มแรกนี้เหมาะกับงานที่ป้องกันการสึกหรอ ส่วนกลุ่มที่สอง คือ ลวดสังกะสี,

ลวดอะลูมิเนียม, ลวดทองเหลือง, ลวดเชื่อมแก๊สทองเหลือง และลวดทองแดง ซึ่งมีความแข็งของผิวเคลือบเฉลี่ย 95.5 วิกเกอร์ ค่าอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 25.25 มิลลิกรัมต่อครั้ง และปริมาณสัดส่วนรูพรุนโดยเฉลี่ย 17.82% ซึ่งไม่เหมาะสำหรับใช้งานที่ต้องป้องกันการสึกหรอ จากการศึกษาพบว่าลวดที่ผลิตในประเทศไทยสามารถใช้ทดแทนลวดที่ใช้ในงานพ่นเคลือบได้ ดังนี้ กลุ่มแรก ลวดเชื่อมเหล็ก ,ลวดเหล็กก่อสร้าง ,ลวดเชื่อมแก๊สเหล็ก และลวดเชื่อมสแตน -เลส สามารถใช้แทนลวดพ่นสเตนเลส และลวด Ni5Al ได้ ส่วนในกลุ่มที่สอง ลวดอะลูมิเนียม ,ลวดเชื่อมแก๊สทองเหลือง และลวดทองแดง สามารถใช้แทนลวดสังกะสีได้.

2.3.8. พิคิด ดวงมาลา (2549) ได้ใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้าแบบใช้ก๊าซคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW) โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองฟูลแฟคทอเรียล (2^4) โดยในแต่ละปัจจัยมีสองระดับ โดยทำการกรองปัจจัยสี่ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม ,แรงดันไฟเชื่อม, ความเร็วในการเชื่อม และปริมาณก๊าซคลุม ให้เหลือเฉพาะที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าแรงดึงของตะเข็บเชื่อม จากนั้น ใช้การทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design ; CCD) เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองที่ดีที่สุด จากผลการทดลองความต้านทานแรงดึงของตะเข็บเชื่อมที่ระดับ α เท่ากับ 0.05 พบว่าค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ คือ กระแสไฟเชื่อม เท่ากับ 125 แอมแปร์ ,ค่าแรงดันไฟเชื่อม เท่ากับ 27 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม เท่ากับ 14.20 นิ้วต่อนาที ซึ่งได้ค่าแรงดึงสูงสุด คือ 599.379 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

2.3.9. เดโช บุญครอง (2546) ได้ศึกษาอิทธิพลหลัก (Main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) ของ 4 ปัจจัยหลักของแขนจับหัวอ่านเขียนประเภทเบสเพลตในรุ่นความยาว 14.5 มิลลิเมตร ที่มีผลต่อค่า G-to-Lift off ที่สภาวะ Shock Pulse Duration 0.1 และ 0.35 มิลลิวินาที และต่อความถี่ธรรมชาติที่จะเกิดกำทอนในโหมดสเวย์ (Sway Frequency) งานวิจัยนี้ยังศึกษาแนวโน้มการออกแบบของแต่ละปัจจัยเมื่อต้องการให้ทุกผลตอบมีค่ามากที่ดีที่สุดและศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างความเร็วของหัวอ่านเขียนขณะตกกระทบบนแผ่นดิสก์กับค่า G-to-Lift off เมื่อแขนจับหัวอ่านเขียนอยู่ในสภาวะชอร์กระดับเกินค่า G-to-Lift off เพื่อใช้พิจารณาเลือกแนวทางการออกแบบ และเสนอแนวทางการออกแบบนั้น เพื่อให้แขนจับหัวอ่านเขียนสามารถอยู่ในสภาวะชอร์กสูง ๆ ได้อย่างปลอดภัย สุดท้ายการศึกษาความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยไฟไนอีลีเมนต์ (Finite Element) โดยการเปรียบเทียบผลกับการทดสอบผลิตภัณฑ์จริง ซึ่งทั้งหมดจะประยุกต์ใช้หลักการออกแบบเชิงแฟรคตอเรียลแบบ (2^k) และการวิเคราะห์แบบถดถอย ผลการวิจัยสามารถสรุปแนวโน้มการออกแบบปัจจัยของแขนจับหัวอ่านเขียน เพื่อเพิ่ม

คุณสมบัติการต้านทานซอร์กทั้งในสภาวะซอร์กต่ำกว่าระดับค่า G-to-Lift off และเกินระดับค่า G-to-Lift off และความถี่ธรรมชาติที่เกิดกำทอนในโหมดสเวย์ให้มีค่าสูงขึ้นคือ อัตราส่วนของ L1/Ltotal ยาวขึ้น ความหนาของฮินจ์ (Hinge) หนาขึ้น ความกว้างของฮินจ์ บริเวณที่มีคุณสมบัติคล้ายสปริง (W) กว้างขึ้น ความหนาของแขนจับ (Load beam) บางลงและออกแบบส่วนอื่นเพิ่มเติม ได้แก่การมี Roof ที่แขนจับ หรือมี Limiter ที่ กิมบอล (Gimbal) เพื่อช่วยควบคุมการเคลื่อนไหวของกิมบอลให้มีความเร็วตกกระทบของหัวอ่านเขียนต่ำ ลงในขณะอยู่ในสภาวะซอร์กเกินระดับค่า G-to-Lift off และเกิด Head Slap

2.3.10. กฤษดา อัศวรุ่งแสงกุล (2542) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรอยบิ่น และรอยร้าวในกระบวนการตัดขั้นตอนสุดท้ายของการตัดหัวอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์และ หาเงื่อนไขและวิธีการปรับปรุงที่เหมาะสม งานวิจัยเริ่มจากการพิจารณาหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรอยบิ่นและรอยร้าวของหัวอ่านเขียนข้อมูล โดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล ทำให้สามารถเลือกปัจจัย ทั้งหมด 5 ปัจจัยประกอบด้วย ความเร็วรอบในการตัด ความลึกของใบมีดในการตัด อัตราการป้อนตัด จำนวนครั้งในการเดินลับมีด และทิศทางในการตัด ปัจจัยเหล่านี้ถูกนำไปใช้ในการทดลองเบื้องต้น โดยใช้แผนการทดลองแฟรกชั่นนอลแบบครึ่งหนึ่งของวิธีแฟคทอเรียลโดยทุกปัจจัย มีระดับของปัจจัย 2 ระดับ จากการวิเคราะห์ตามวิธีการทางสถิติสามารถหาปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดรอยบิ่นและรอยร้าว คือ ความเร็วรอบในการตัด และทิศทางในการตัด จากนั้นทำการวิเคราะห์พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการตัด คือ ความเร็วรอบในการตัด 8,500 รอบต่อนาที และทิศทางการตัดจากด้านโพลสู่ด้านเทเปอร์หลังจากนั้นทำการทดลองเพื่อยืนยันผลพบว่า รอยบิ่นและรอยร้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการตัดคือใช้ความถี่ในการลับมีดทุก ๆ การตัด 1 ครั้ง จะทำให้จำนวนรอยบิ่นและรอยร้าวต่ำสุด

2.3.11. สุรสิทธิ์ ทองทวีชัยกิจ (2542) ได้ศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดในแต่ละขั้นตอนย่อยสำหรับกระบวนการเจียระไนทรงกระบอก (แบบยันศูนย์) ที่มีผลต่อความหยาบผิวโดยอาศัยหลักการออกแบบการทดลองทางสถิติ โดยงานวิจัยนี้ได้หาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อความหยาบของผิวโดยใช้ผังก้างปลา ซึ่งจะได้ปัจจัยหลักที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อความหยาบของผิดอยู่ 6 ปัจจัยได้แก่ ความเร็วรอบของชิ้นงานในช่วงของการเจียระไนหยาบ (A), ความเร็วรอบของชิ้นงานในช่วงของการเจียระไนขั้นสุดท้าย (B), อัตราการป้อนล้อหินเจียระไนเข้าหาชิ้นงานในช่วงการเจียระไนหยาบ (C), อัตราการป้อนล้อหินเจียระไนเข้าหาในช่วงการเจียระไนละเอียด (D), อัตราการป้อนล้อหินเจียระไนเข้าหาในช่วงการเจียระไนละเอียดพิเศษ (E) และเวลาหยุดหลัง

ผ่านการเจียระไนในช่วงการเจียระไนละเอียดพิเศษ (F) โดยการออกแบบการทดลองได้ทำการทดลองแบบ The One-Quarter Fraction of The 2_{IV}^{6-2} Design โดยมีการทำซ้ำในแต่ละทรีตเมนต์คอมบิเนชั่น เท่ากับ 4 ซึ่งเมื่อได้ทำการทดลองและวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากการทดลอง พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย คือ อัตราการป้อนล้อเจียระไนเข้าหาชิ้นงานในช่วงการเจียระไนละเอียดพิเศษ (D) เวลาหยุดนิ่งหลักการเจียระไนในช่วงการเจียระไนละเอียดพิเศษ (E) และอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (DE) จากผลการวิจัย เมื่อควบคุมเพียงแต่อัตราป้อนล้อหินเจียรไนเข้าหาชิ้นงานในช่วงการเจียระไนพิเศษและเวลาหยุดนิ่งหลังจากเจียระไนในช่วงการเจียระไนพิเศษให้มีความเหมาะสม จะสามารถลดเวลาในการเจียระไนได้ถึง 31.58 เปอร์เซ็นต์

2.3.12. อนวัชชน์ จรปัญญานนท์ (2540) ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงค่าของมุมบิดของแขนจับ (Load Beam Twist) ซึ่งมีเป้าหมายในการปรับปรุงคือการเพิ่มค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการจาก 0.34 ให้มีค่าสูงกว่า 1.00 โดยการลดค่าเฉลี่ยของมุมบิดของแขนจับ (Load Beam Twist) ระหว่างกลุ่มงานให้อยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนอนุโลม +/-0.15 องศา จากค่าที่กำหนดหลังการปรับปรุงโดยการปรับปรุงตั้งค่าต่างๆ ของแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปทำให้ค่ามุมบิดของแขนจับ (Load Beam Twist) มีค่าความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มงานที่ลดลง ซึ่งลดต้นทุนในการผลิตของเสียเป็นจำนวนเงิน 313,127 บาท

2.3.13. ทศพล เกียรติเจริญผล (2537) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเคลือบแลกเกอร์บนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก และเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลองที่ทำให้การเคลือบแลกเกอร์ที่ได้มีคุณภาพดีเหมาะสมต่อการใช้งาน ในการวิจัยได้ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์ การทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัย 4 ปัจจัยคือ ชนิดของแลกเกอร์,น้ำหนักแลกเกอร์ต่อพื้นที่ อุณหภูมิบ่ม ,เวลาที่ใช้ในการบ่มที่มีผลต่อลักษณะของผิวแลกเกอร์ โดยทำการทดสอบลักษณะของผิวแลกเกอร์ 6 ลักษณะคือการทดสอบความยืดหยุ่น การทดสอบการทนต่อการขีดข่วน การทดสอบการทนต่อการขัดถู การทดสอบการทนต่อการแทรกซึมของไอน้ำ การทดสอบความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างแลกเกอร์กับเนื้อเหล็ก และการทดสอบการหลุดลอกของแลกเกอร์จากการต้มฆ่าเชื้อ พบว่าปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบความยืดหยุ่น การทนต่อการถู การทนต่อการขีดข่วนและการทนต่อการแทรกซึมของไอน้ำ คือ ชนิดของแลกเกอร์ น้ำหนักแลกเกอร์ต่อพื้นที่ อุณหภูมิบ่ม เวลาที่ใช้ในการบ่ม

2.3.14. ทรงพล พิเชษฐ์วัฒนา (2541) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงดึงระหว่าง Slider และ Flexure ของหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และเสนอเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มคุณภาพของแรงดึงของหัวอ่านเขียนดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขที่เป็นไปได้จริง งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการระบุถึง

ปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อแรงดึงของหัวอ่านเขียนข้อมูลโดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล (Cause-and Effect Diagram) จากการวิเคราะห์แผนภูมิดังกล่าวทำให้ทราบว่ามีปัจจัย 4 ชนิดที่น่าจะมีผลอย่างมากต่อแรงดึงระหว่าง Slider และ Flexure ของหัวอ่านเขียน ซึ่งปัจจัยนี้ได้แก่ อัตราส่วนผสมของสารยึดเหนี่ยว อุณหภูมิในการรอบ เวลาในการรอบ และชนิดของน้ำหนักที่กด ซึ่งปัจจัยดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้เพื่อที่จะวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดบ้างที่มีความสำคัญ โดยนัยสำคัญต่อแรงดึงและจากการทดลองพบว่ามี 3 ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึง ซึ่งได้แก่อัตราส่วนผสมของสารยึดเหนี่ยว อุณหภูมิในการรอบ และเวลาในการรอบ จากนั้นได้ทำการทดลองอีกครั้งโดยมีจำนวนการทำซ้ำ (Replication) เพิ่มมากขึ้น เพื่อหาปัจจัยสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ค่าแรงดึงดูดสูงสุดโดยไม่ขัดกับเงื่อนไขทาง ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับหัวอ่านเขียน ผลการทดลองแสดงภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนผสม 4:1 อุณหภูมิในการรอบ 300 องศาฟาเรนไฮต์ และเวลาที่ใช้ในการรอบ 16 นาที และเมื่อนำค่าแรงดึงที่ได้ไปเปรียบเทียบในเชิงสถิติกับแรงดึงของหัวอ่านเขียนในปัจจุบันพบว่า ค่าแรงดึงเฉลี่ยที่สภาวะใหม่นี้มีค่าสูงกว่าแรงดึงที่เป็นอยู่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2.3.15 วรุฒม์ บุตรภักดี (2550) ได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล (2^4) จำนวน 32 การทดลอง ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพจำนวน 4 ปัจจัยได้แก่ ปริมาณไอน้ำ อุณหภูมิไอเฮกเซน อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของระบบควบแน่น (Condenser) และอัตราการไหลของไอเฮกเซน เมื่อนำปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีผลมีนัยสำคัญที่ระดับ = 0.05 ผลการศึกษาพบว่าอิทธิพลหลักคือปัจจัยอัตราการไหลของไอเฮกเซนและปัจจัยปริมาณไอน้ำ อิทธิพลร่วมคือ ปัจจัยอัตราการไหลของไอเฮกเซนร่วมกับปัจจัยปริมาณไอน้ำ และปัจจัยปริมาณไอน้ำร่วมกับอุณหภูมิไอเฮกเซน มีผลต่อประสิทธิภาพอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าระดับ เท่ากับ 0.05 โดยมีระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ระบบ Solvent Recovery มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 94.2 คือ ปริมาณไอน้ำ 1,560 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิไอเฮกเซน 52 C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 43 C อัตราการไหลของไอเฮกเซน 396 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง การเปรียบเทียบผลการวิจัยพบว่า การเดินเครื่องที่มีระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการวิจัยมีค่าฉลี่ยของประสิทธิภาพร้อยละ 91.36 สูงกว่าการเดินเครื่องที่มีระดับปัจจัยที่ใช้ในปัจจุบันมีค่าฉลี่ยของประสิทธิภาพร้อยละ 82.07