

การลดความผันแปรในค่า MRR จากการขัดที่กระบวนการขัดละเอียด ของหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์

เกษมศักดิ์ ชุณหบุญญทิพย์¹ และ อัมภา จิระประยูรเลิศ²
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

รับเมื่อ 7 มีนาคม 2551 ตอรับเมื่อ 16 มกราคม 2552

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์ที่นำเสนอแนวทางในการลดความผันแปรของค่าความต้านทาน (Magneto-Resistive Resistance; MRR) ของหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ในกระบวนการขัดละเอียด โดยกรณีตัวอย่างศึกษาจากกระบวนการผลิตหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์รุ่นหนึ่ง พบว่าผลได้ทางไฟฟ้าปัจจุบันอยู่ที่ร้อยละ 91.51 ซึ่งต่ำกว่าเป้าหมาย (ร้อยละ 93 ของชิ้นงานที่ทำการตรวจ) และมีผลได้รวมอยู่ที่ร้อยละ 84.65 ของชิ้นงานที่ทำการผลิต จากการสำรวจของเสียที่เกิดขึ้น พบว่าข้อบกพร่องทางไฟฟ้าที่เกิดคือ ความผันแปรของค่าความต้านทานสูง ค่าความต้านทานของผลิตภัณฑ์มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานจากกระบวนการขัดละเอียดมากที่สุด งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่กระบวนการขัดละเอียด ผนวกกับค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) เท่ากับ 0.85 จึงสามารถยืนยันได้ว่ามีความผันแปรของค่าความต้านทานสูงเนื่องจากความผันแปรระหว่างบาร์ของชิ้นงาน จากนั้นทำการวิเคราะห์หาสาเหตุโดยการวิเคราะห์ปิรามิดที่มีผลต่อความผันแปรของค่าความต้านทานในงานระหว่างบาร์ด้วยการระดมสมองผ่านแผนภาพกังปลา และพิสูจน์สาเหตุด้วยการออกแบบการทดลอง จากผลการทดลองพบว่า วิธีการกวดบาร์มีผลต่อความผันแปรของค่าความต้านทานอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากวิธีการกวดแบบกระจายแรงสามารถลดการบิดตัวของบาร์ก่อนทำการขัด โดยหลังจากนำวิธีการกวดบาร์ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการขัดพบว่า ผลได้โดยเฉลี่ยเพิ่มมาอยู่ที่ร้อยละ 91.86 ของชิ้นงานที่ทำการตรวจ ส่งผลให้ผลได้รวมอยู่ที่ร้อยละ 84.81 ของชิ้นงานที่ทำการผลิต และสามารถเพิ่มค่าดัชนี C_{pk} ของค่าความต้านทานจากกระบวนการขัดละเอียดเท่ากับ 1.26

คำสำคัญ : กระบวนการขึ้นรูปหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ / การลดความผันแปร / MRR / กระบวนการขัด

¹ นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

MRR Sigma Reduction in Fine Lapping Process of Slider Fabrication

Kasemsak Chunhaboonyatip¹ and Adsada Jiraprayuklert²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Received 7 March 2008 ; accepted 16 January 2009

Abstract

This article intends to reduce variation of MRR (Magneto-Resistive Resistance) in Fine Lapping Process of Slider Fabrication. In the case study, it was found that the electrical yield of slider fabrication was 91.51%, which does not meet target at 93% of total inspected parts, and the overall yield of slider fabrication was 84.65% of total produced parts. From the study, the major problem was “out-of-specification MRR”, which was mainly contributed from the fine lapping process. The process capability index (C_{pk}) was 0.85, which indicated that the process had lapping control problem. Next step, the theories of resistance and real lapping process were studied. The factors that impact variation between bar of MRR were defined by cause and effect diagram and experimental design. The several experiments revealed that bar pressing method significantly effects the variation between bar, because the uniform load method can reduce bar twist before lapping. After implementing the new bar pressing method, electrical yield is increased to 91.86% of the total number of inspected parts. The C_{pk} index is increased to 1.26. Finally, overall yield is increased to 84.81% of the total number of produced parts.

Keywords : Slider fabrication / Variation reduction / MRR / Lapping process

¹ Graduated Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

² Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

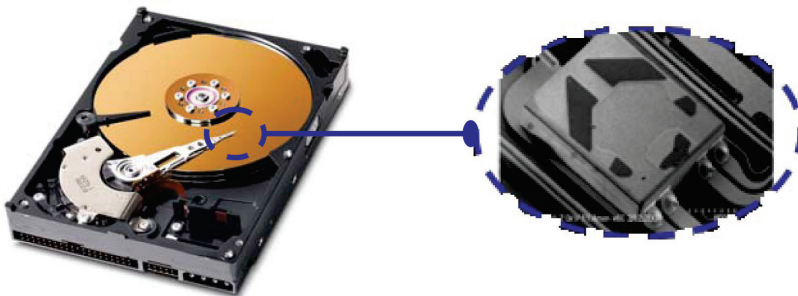
ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอีกอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการแข่งขันสูงทั้งในเรื่องของคุณภาพและราคาของตัวผลิตภัณฑ์ อีกทั้งในอนาคตนั้นยังมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว จึงมีความจำเป็นที่องค์กรต้องพยายามปรับลดต้นทุนลงและในขณะเดียวกันก็ทำการปรับปรุงคุณภาพการผลิตของผลิตภัณฑ์ไปด้วย พร้อมทั้งสร้างความเชื่อมั่นที่มีต่อองค์กรให้กับลูกค้าโดยการลดจำนวนของเสียที่เกิดจากผลิตภัณฑ์บกพร่อง

ปัจจุบันงานวิจัยต่างๆ ที่มีจุดประสงค์ลดของเสียหรือลดความผันแปรในกระบวนการผลิต เช่น งานวิจัย [1-6] เน้นวิเคราะห์หาสาเหตุจากปัจจัยที่ทำให้ความสนใจทั้งปัจจัยที่สามารถควบคุมได้และไม่สามารถควบคุมได้ แต่ไม่มีงานวิจัยใดที่พิจารณาถึงปัจจัยที่ถูกละเลยตั้งแต่ต้นกลับมาวิเคราะห์ ในกรณีศึกษาตัวอย่างพบว่า กระบวนการ ที่

เป็นอยู่ในปัจจุบันนั้นได้ค่าคุณลักษณะตรงตามเป้าหมายหรืออยู่ในระดับที่เหมาะสมอยู่แล้ว แต่ก็ยังไม่สามารถลดความผันแปรที่เกิดขึ้นในกระบวนการลงได้อีก ในงานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอแนวทางในการวิเคราะห์โดยนำปัจจัยที่ควบคุมได้และถูกละเลยมาวิเคราะห์และสามารถช่วยลดของเสียได้อย่างเห็นผลชัดเจน

2. วิธีการวิจัย

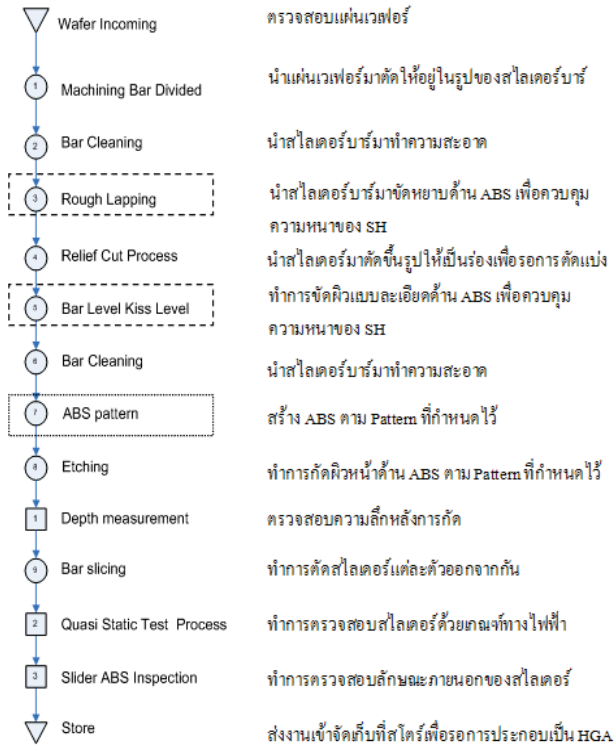
งานวิจัยนี้เริ่มจากการแสวงหาโอกาสในการปรับปรุงจากกระบวนการผลิตหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ พบว่า ในแต่ละไตรมาสนั้นบริษัทมีความสูญเสียเกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์บกพร่องเป็นจำนวนมากจากกระบวนการผลิตหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ โครงสร้างของฮาร์ดดิสก์และภาพขยายหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ทำการศึกษาในกรณีตัวอย่างนี้ได้แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของฮาร์ดดิสก์และภาพขยายหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์

ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นหัวอ่านเขียนรุ่นหนึ่งซึ่งใช้เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลในแนวตั้ง ทำให้ลดพื้นที่การเก็บข้อมูลในแต่ละบิตลงได้ โดยเหตุผลหลักในการเลือกรุ่นดังกล่าวคือ เป็นรุ่นที่ใช้เทคโนโลยีใหม่ล่าสุดนี้ในขณะที่ทำการศึกษาและอยู่ในช่วงเติบโตของวงจรผลิตภัณฑ์ หัวอ่านเขียนรุ่นนี้มีปัญหาเรื่องของผลได้โดยเฉลี่ยทางไฟฟ้า (electrical yield) ปัจจุบันอยู่ที่ร้อยละ 91.51 นั้นต่ำกว่าเป้าหมาย (ร้อยละ 93 ของชิ้นงานที่ทำการตรวจ คำนวณหาจากชิ้นงานเสียที่ตรวจพบ

หารด้วยชิ้นงานตรวจทั้งหมด) และมีผลได้รวมอยู่ที่ร้อยละ 84.65 ของชิ้นงานที่ทำการผลิต จากการสำรวจของเสียที่เกิดขึ้นพบว่ามีข้อบกพร่องทางไฟฟ้าประเภท Magneto-Resistive Resistance (MRR: ค่าความต้านทาน) นั้นสูงหรือต่ำเกินไปหรือมีความผันแปรของค่าความต้านทานสูง ซึ่งเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อผลได้และลูกค้า ในการที่จะวิเคราะห์กระบวนการผลิตหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ได้นั้นจะต้องเริ่มจากการทำความเข้าใจกับกระบวนการผลิตเสียก่อน ดังรูปที่ 2



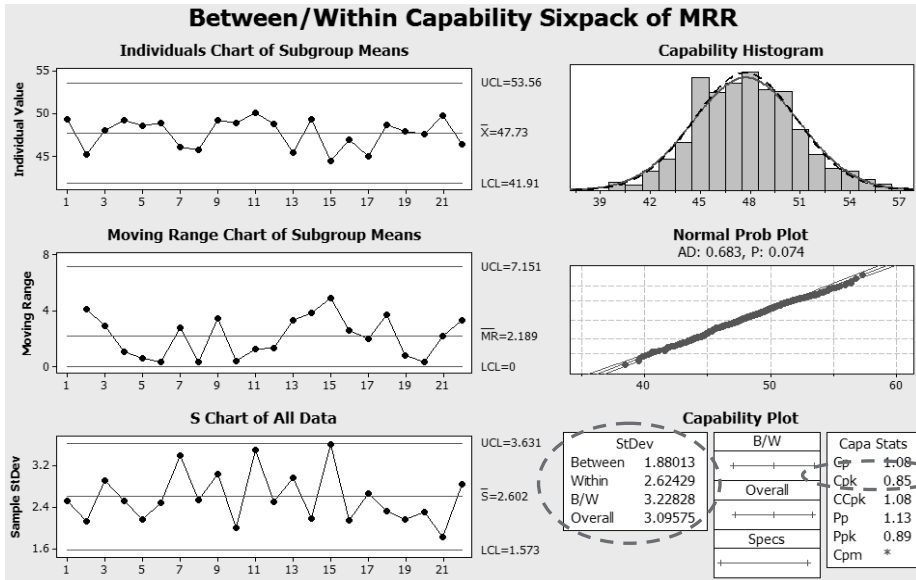
รูปที่ 2 แผนภูมิกระบวนการผลิตหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์

จากรูปที่ 2 แผ่นเวเฟอร์ได้รับการตัดเป็นบาร์แล้วจึงผ่านกระบวนการทำความสะอาด กระบวนการขัดหยาบและขัดละเอียด และกระบวนการอื่นๆ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่เรียกว่า สไลเดอร์ (slider) หรือหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ ค่า MRR เป็นค่าความต้านทานที่วัดได้หลังจากผ่านกระบวนการขัดหยาบและขัดละเอียด เพื่อแสดงถึงความหนาของบาร์ซึ่งจะกลายเป็นความยาวของตัวอุปกรณ์ภายในหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ [7, 8] ดังนั้นกระบวนการหลักที่สนใจ คือ กระบวนการขัดหยาบ (Rough Lapping; RL) และกระบวนการขัดละเอียด (Bar Level Kiss Level; BLKL) ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมความยาวของตัวอุปกรณ์ภายในหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่เรียกว่า Stripe Height; SH จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าค่าความต้านทานของผลิตภัณฑ์มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานจากกระบวนการขัดละเอียดมากที่สุด เมื่อวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการจากค่าของดัชนี C_{pk} เท่ากับ 0.85 ดังรูปที่ 3 หมายความว่ามีความผันแปรของค่าความต้านทานจากกระบวนการขัดละเอียดสูง เมื่อพิจารณา

ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (StDev จากรูปที่ 3) พบว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้านทานระหว่างล็อตที่ผลิตจากกระบวนการ (Between) มีค่าน้อยกว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานความต้านทานระหว่างบาร์ (Within) จึงสามารถยืนยันได้ว่ามีความแตกต่างของค่าความต้านทานระหว่างบาร์เกิดขึ้น ในการดำเนินงานเพื่อลดความแตกต่างของค่าความต้านทานระหว่างบาร์นั้นมียังวิธีการดำเนินงานดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ระบบการวัด

เริ่มดำเนินการโดยทำการประเมินระบบการวัดเพื่อพิจารณาถึงความผันแปรในระบบการวัดที่เกิดขึ้นว่ามีค่าเท่าใดแล้วความผันแปรที่เกิดขึ้นนั้นสามารถที่ยอมรับได้หรือไม่ โดยเครื่องวัด Quasi Static Test (QST) เป็นเครื่องวัดอัตโนมัติซึ่งจะให้พนักงานคอยนำงานใส่ในถาดที่เตรียมไว้และหยิบงานออกเท่านั้น จึงไม่พิจารณาปัจจัยด้านพนักงานที่ทำหน้าที่ในการตรวจ



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการขัดละเอียด

2.2 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ดำเนินการวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ก่อให้เกิดความผันแปรของค่าความต้านทานของงานระหว่างบาร์โดยในการสืบค้นหาสาเหตุเบื้องต้นนั้นจะใช้หลักการ 3 จริ่ง [9] แล้วทำการระดมสมองร่วมกับผู้เกี่ยวข้องกับสายการผลิตของกระบวนการขัดละเอียดผ่านแผนภาพก้างปลาแบบกำหนด รายการของสาเหตุซึ่งช่วยให้ได้รายละเอียดอย่างครบถ้วน แล้วจึงทำการพิสูจน์ตามข้อเท็จจริงสำหรับการแก้ไขต่อไป

2.3 การทดสอบและวิเคราะห์ปัจจัยที่ควบคุมได้ และได้รับการควบคุมปัจจุบัน

เมื่อทำการวิเคราะห์สาเหตุแล้วพบว่าปัจจัยในการผลิตที่อาจจะส่งผลต่อความผันแปรของค่าความต้านทานมีปัจจัยใดบ้าง หลังจากนั้นต้องทำการพิสูจน์ว่าปัจจัยใดที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของค่าความต้านทานอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะเรียกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของค่าความต้านทานว่า สาเหตุรากเหง้า การพิสูจน์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการใช้การทดลองในกระบวนการผลิตจริง เพื่อให้จำนวนการทดลองไม่มากจนเกินไปจึงออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัยก่อน หลังจากนั้นจึง

ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อวิเคราะห์อิทธิพลร่วม (interaction effect) โดยมีปัจจัยเวลาในการขัด (lapping time) เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ที่ต้องพิจารณาในขณะทำการทดลอง เนื่องจากเวลาในการขัดเป็นตัวขัดขวางเนื่องจากความคมของผงขัดในกระบวนการขัด ซึ่งส่งผลให้อัตราการขัดลดลงเมื่อใช้งานขัดไประยะหนึ่งทำให้เวลาในการขัดต้องเพิ่มขึ้นเมื่อความคมลดลงซึ่งส่งผลให้อัตราการขัดลดลงตามไปด้วย

2.3.1 การทดสอบกรองปัจจัยโดยใช้วิธีการของ ทากูชิ [10]

ในขั้นตอนของการกรองปัจจัยนั้นจำเป็นต้องใช้ความรู้ในงานวิศวกรรมและทฤษฎีมาทำการกรองปัจจัยบางตัวออกไป ในกรณีที่มียังปัจจัยไม่สามารถสรุปผลได้จึงต้องดำเนินการพิสูจน์สาเหตุที่สงสัย โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการของทากูชิ เนื่องจากมี 3 ปัจจัยที่มี 3 ระดับคือ ปัจจัยความเร็วรอบของงานขัด ความเร็วของแกนกล และความสูงของแกนกล ส่วนอีก 2 ปัจจัย คือ ตำแหน่งการติดบาร์และระยะขัดมี 2 ระดับ ซึ่งจากเงื่อนไขดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในเลือกเป็นตาราง Orthogonal Array; OA L18 ($2^1 \times 3^7$) สำหรับใช้ในการกรองหาปัจจัยโดยใช้ระดับความ

มีนัยสำคัญ 0.10 ซึ่งจะนำแผนการออกแบบการทดลองที่ได้ไปใช้เก็บข้อมูลจริงในการผลิต

2.3.2 การออกแบบการทดลองโดยใช้ 2^k

แพคทอเรียล

ในการทดลองแบบ 2^k แพคทอเรียลนี้จะนำปัจจัยที่ผ่านการกรองปัจจัยด้วยวิธีการของทากูชิมามาพิจารณาถึงอิทธิพลรวมของปัจจัยที่มากกว่า 2 ปัจจัยขึ้นไปว่ามีผลต่อความผันแปรของค่าความต้านทานระหว่างบาร์อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยก่อนออกแบบการทดลองจำเป็นต้องหาจำนวนของสิ่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองโดยกำหนดระดับของอำนาจในการทดสอบอยู่ที่ร้อยละ 85 เพื่อความผิดพลาดจากการตัดสินใจน้อยและจำนวนการทดลองอยู่ในระดับที่สามารถทำได้ในสายการผลิตจริง ดังนั้นเมื่อทราบจำนวนของปัจจัยที่ต้องการจะศึกษา ระดับของปัจจัยแต่ละตัว (ข้อกำหนดเฉพาะของกระบวนการที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน) ระดับความมีนัยสำคัญ และขนาดสิ่งตัวอย่าง ก็สามารถทำการออกแบบการทดลองได้ จากนั้นจึงนำแผนการออกแบบการทดลองไปดำเนินการทดลองจริงในสายการผลิตต่อไป

2.4 การทดสอบและวิเคราะห์ปัจจัยที่ควบคุมได้

แต่ถูกละเลยในกระบวนการผลิต

หลังจากทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ว่า ส่งผลต่อค่าความต้านทานระหว่างบาร์หรือไม่แล้ว ในบางกรณีปัจจัยเหล่านี้ยังไม่สามารถลดความแตกต่างของค่าความต้านทานระหว่างบาร์ได้อย่างเพียงพอ จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงปัจจัยอื่นๆ ที่ถูกละเลยมาตั้งแต่ต้น การทดสอบปัจจัยที่สามารถควบคุมได้แต่ถูกละเลยของกรณีตัวอย่างนี้กระทำโดยใช้ 2-sample t เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานที่ว่าวิธีการกดไม่มีผลต่อความแตกต่างของความต้านทานระหว่างบาร์ โดยการควบคุมปัจจัยตัวอื่นๆ ในการทดสอบนี้จะใช้ตามมาตรฐานเดิมแต่เปลี่ยนเฉพาะปัจจัยวิธีการกดบาร์เท่านั้น โดยเริ่มจากดำเนินการ

หาจำนวนสิ่งตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบปัจจัย โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดลอง ดังนี้

1. กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ต้องการให้มีความเสี่ยงในการตัดสินใจน้อย

2. กำหนดระดับของอำนาจในการทดสอบร้อยละ 85 เพื่อให้มีความถูกต้องสูง และจำนวนในการทดลองอยู่ในระดับที่สามารถทำได้ในสายการผลิตจริง

3. ค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่สามารถยอมรับได้ในระหว่างกระบวนการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 4 โอห์ม ถ้าหลังจากการชดเชยค่าความต้านทานแตกต่างกันเกิน 4 โอห์ม จะส่งผลและต้องรีบแก้ไข

4. ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความต้านทานในกระบวนการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 2.624 โอห์ม จากนั้นจึงไปดำเนินการเก็บข้อมูลจริงในสายการผลิต

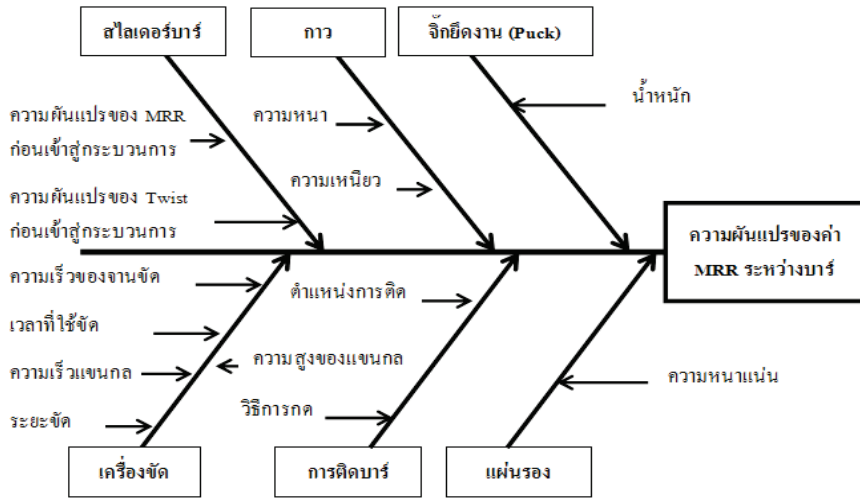
3. ผลและวิจารณ์การทดลอง

3.1 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัด

ผลการประเมินระบบการวัดพบว่าความผันแปรของข้อมูลที่วัดได้มีสาเหตุมาจากกระบวนการชดเชยเป็นส่วนใหญ่ และเป็นความผันแปรที่มาจากระบบการวัด (Total Gage R&R) เพียงร้อยละ 0.55 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (ความผันแปรจากเครื่องวัดมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 อยู่ในเกณฑ์ดี) [11] ทำให้มั่นใจได้ว่าค่าความต้านทานที่เครื่องวัดได้นั้นสะท้อนถึงความผันแปรที่มาจากกระบวนการชดเชยจริงๆ คือระบบการวัดไม่มีอิทธิพลต่อความผันแปรในการวัด

3.2 ผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากการระดมสมองร่วมกับผู้มีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการชดเชยและมีประสบการณ์มาไม่ต่ำกว่า 10 ปี ได้แก่ ผู้จัดการแผนก วิศวกรคุมเครื่อง หัวหน้าช่างซ่อมบำรุง ช่างเทคนิค และพนักงาน แผนภาพกังปลาที่ 4 ได้ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพก้างปลาแสดงเหตุและผลของการที่ค่าความต้านทานมีความผันแปรระหว่างบาร์

สาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่ส่งต่อความผันแปรของค่าความต้านทานระหว่างบาร์ ซึ่งปัจจัยสามารถควบคุมได้และได้รับการควบคุมตามมาตรฐานอยู่ในปัจจุบัน ยกเว้นวิธีการกดบาร์เป็นปัจจัยที่ยังไม่ได้รับการควบคุม เนื่องจากยังไม่มีมาตรฐานการปฏิบัติงาน และพนักงานแต่ละคนก็ปฏิบัติไม่เหมือนกัน (สามารถดูรายละเอียดการกดบาร์ได้ในหัวข้อ 3.4)

เมื่อนำวิธีการของทาภูเขาชิมาช่วยเพื่อกรองหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความผันแปรของค่าความต้านทานของงานระหว่างบาร์ร่วมกับความรู้ในงานวิศวกรรมทำให้มีปัจจัยบางตัวที่ไม่ได้เลือกมาพิสูจน์ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมจาก [12] โดยผลการทบทวนแผนภาพก้างปลา พบว่าสาเหตุที่น่าจะส่งผลต่อค่าความผันแปรของค่าความต้านทานอย่างมีนัยสำคัญ 6 ปัจจัย โดยมี 5 ปัจจัย คือ ตำแหน่งการติดบาร์ (A) ความเร็วรอบของจานขัด (B)

ความเร็วของแกนกล (C) ระยะขัด (D) และความสูงของแกนกล (E) เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้และมีการควบคุมอยู่ในปัจจุบัน ส่วนอีก 1 ปัจจัยคือ วิธีการกดบาร์เป็นปัจจัยที่ยังไม่ได้รับการควบคุมในปัจจุบัน ซึ่งเหตุผลสำคัญ 2 ประการที่ทำให้ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยที่ไม่ได้รับการควบคุม คือ ข้อแรกวิศวกรในโรงงานตัวอย่างเชื่อว่าน้ำหนักของจิ๊กยึดงาน (puck) ที่ใช้ในกระบวนการขัดละเอียดนั้นจะช่วยกดทับงานในขณะที่ทำการขัด ทำให้พนักงานวางบาร์ของชิ้นงานลงบนกาวที่ติดกับจิ๊กยึดงานก็เพียงพอแล้ว ข้อสองการสัมผัสกับชิ้นงานอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนขึ้น จากนั้นจึงทำการพิสูจน์สมมุติฐานว่าปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีผลจริงหรือไม่ ด้วยการออกแบบการทดลอง โดยระดับของปัจจัยที่ใช้ในการกรองปัจจัยดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ป้อนเข้าและระดับของปัจจัยที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

ปัจจัยที่ป้อนเข้า	หน่วย	ระดับพารามิเตอร์ในการทดลอง (Level)		
		Low	Mid	High
1. ตำแหน่งการติดบาร์ (bar position) ; (A)	แบบ	I	-	II
2. ความเร็วรอบของจานขัด (speed plate) ; (B)	รอบ/นาที	2	3	4
3. ความเร็วของแขนกล (oscillation speed) ; (C)	Stroke/นาที	1	2	3
4. ระยะเวลาขัด (stroke length) ; (D)	นิ้ว	1.1	-	2
5. ความสูงของแขนกล (arm height) ; (E)	นิ้ว	0.62	0.63	0.64

3.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ที่ปัจจัยที่ควบคุมได้และได้รับการควบคุมปัจจุบัน

3.3.1 ผลการทดสอบการองปัจจัยโดยใช้วิธีการของทากูชิ

ผลการการองปัจจัยด้วยวิธีของทากูชิผ่านค่า Signal-to-noise ratio พบว่าปัจจัยความเร็วรอบของจานขัด (B) ความเร็วของแขนกล (C) และระยะเวลาขัด (D) มีผล

ต่อค่าความผันแปรค่าความต้านทานของงานระหว่างบาร์อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความมีนัยสำคัญ 0.10 ดังรูปที่ 5 การการองปัจจัยด้วยวิธีนี้เป็นการศึกษาที่ละปัจจัย ดังนั้นจึงต้องนำทั้ง 3 ปัจจัยไปออกแบบการทดลองโดยใช้โดยใช้ 2^k แฟกทอเรียลอีกครั้งเพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยที่เกิดขึ้นด้วย

Linear Model Analysis: SN ratios versus A, B, C, D, E

Estimated Model Coefficients for SN ratios

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	25.0614	1.066	23.511	0.000
A 1	0.8004	1.005	0.796	0.446
B 1	4.5067	1.421	3.171	0.011
B 2	-0.4058	1.421	-0.285	0.782
C 1	-3.1933	1.421	-2.247	0.051
C 2	1.4548	1.421	1.024	0.333
D 1	2.1016	1.066	1.972	0.080
E 1	-1.2516	1.421	-0.881	0.401
E 2	3.9479	1.421	2.778	0.021

S = 4.264 R-Sq = 76.9% R-Sq(adj) = 56.4%

Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	11.53	11.53	11.53	0.63	0.446
B	2	223.75	223.75	111.88	6.15	0.021
C	2	92.01	92.01	46.01	2.53	0.134
D	1	70.67	70.67	70.67	3.89	0.080
E	2	146.53	146.53	73.27	4.03	0.056
Residual Error	9	163.62	163.62	18.18		
Total	17	708.12				

รูปที่ 5 ผลการทดสอบการองปัจจัยโดยใช้วิธีการของทากูชิ

3.3.2 ผลการออกแบบการทดลองโดยใช้ 2^k แฟคทอเรียล

การทดลองนี้มีปัจจัยที่สามารถควบคุมได้แล้ว ทำการปรับค่ามีอยู่ 3 ปัจจัย ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นและมี 1 ปัจจัยที่เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ในขณะที่ทำการทดลอง คือปัจจัยเวลาในการขีด ทำให้ในการทดลองนี้จึงวิเคราะห์ผลด้วยวิธี Analysis of Covariance; ANACOVA โดยเลือกทำการทดลองที่ 3 ข้ำเพราะให้ค่าระดับของอำนาจในการทดสอบสูงถึงร้อยละ 94 และสามารถที่จะทำการทดลองได้จริง จึงทำให้มีการทดลอง

ทั้งหมด 24 การทดลอง จากผลการทดลองในรูปแบบที่ 6 พบว่า ไม่มีอิทธิพลร่วมของปัจจัยดังกล่าว โดยปัจจัยที่มีผลต่อความผันแปรของค่าความต้านทานระหว่างบาร์อย่างมีนัยสำคัญ คือ ความเร็วรอบของจานขีด ระยะเวลา และเวลาในการขีด ที่ระดับความมีนัยสำคัญ 0.05 ดังสมการที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวกับค่าความต้านทานระหว่างบาร์ (ความต้านทานเฉลี่ยของบาร์) ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการทดลองและมีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ (PRESS = 76.2877) และเพื่อให้งานที่ขีดจากกระบวนการขีดละเอียดได้ตามค่าเป้าหมาย

$$MRR = 39.1585 - 0.06953 \text{ laptime} + 2.46426 \text{ speed plate} + 2.35399 \text{ stroke length} \quad (1)$$

Factorial Fit: MRR I versus Laptime, Speed plate, ...

Estimated Effects and Coefficients for MRR I (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		49.4129	1.13811	43.42	0.000
Laptime		-0.0695	0.02196	-3.17	0.005
Speed plate	3.6964	1.8482	0.32582	5.67	0.000
Oscillation speed	0.7074	0.3537	0.32582	1.09	0.291
Stroke length	2.1186	1.0593	0.32582	3.25	0.004

S = 1.59620 PRESS = 76.2877
R-Sq = 73.96% R-Sq(pred) = 58.96% R-Sq(adj) = 68.47%

Analysis of Variance for MRR I (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Covariates	1	25.55	25.55	25.550	10.03	0.005
Main Effects	3	111.91	111.91	37.304	14.64	0.000
Residual Error	19	48.41	48.41	2.548		
Total	23	185.87				

Unusual Observations for MRR I

Obs	StdOrder	MRR I	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
11	14	45.5109	48.9074	0.6634	-3.3965	-2.34R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Coefficients for MRR I using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	39.1585
Laptime	-0.0695282
Speed plate	2.46426
Oscillation speed	0.353704
Stroke length	2.35399

รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง 2³ แฟคทอเรียล

โดยเป้าหมายในการชดงานรุ่นตัวอย่างนี้ในแต่ละบาร์จะอยู่ที่ 48 โอห์ม เมื่อพิจารณา main effect plot และความเสถียรในการปรับตั้งเพิ่มเติม [12] พบว่าควรตั้งระยะซัดที่

$$\text{speed plate} = [48 - 39.1585 + (0.06953 \times \text{laptime}) - (2.35399 \times 2)] / 2.46426 \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 แสดงการปรับตั้งโดยอาศัยความเร็วรอบของงานซัดเป็นตัวชดเชยอัตราการซัดที่เกิดจากระยะเวลาซัดแต่ละระดับ ซึ่งการปรับระยะเวลาซัดเป็นไปได้อย่างในการผลิตจริง โดยที่ให้ค่าความต้านทานของงานในแต่ละบาร์ใกล้เคียงเป้าหมายที่ 48 โอห์ม และตั้งระยะซัดไว้ที่ 2 นิ้ว หลังจากนั้นจึงนำสมการที่ 2 ไปใช้จริง โดยทำการทดลองกับงานจำนวน 3 ลอตต่อเนื่องกัน โดยมีเงื่อนไขในการทดลองให้เป็นไปตามมาตรฐานการปฏิบัติในปัจจุบัน แต่จะเพิ่มเติมในส่วนของการนำสมการเข้ามาช่วยหาความเร็วรอบของงานซัดเพื่อให้งานในแต่ละลอตมีค่าความต้านทานในแต่ละบาร์ในลอตใกล้เคียงค่าเป้าหมายที่ 48 โอห์ม โดยผลจากการทดสอบจริงพบว่าตัวแบบถดถอยที่นำมาใช้งานนั้นยังไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง เนื่องจากยังมีค่าปัจจัยอื่นที่ไม่สามารถควบคุมได้อื่นมากระทบอีก เช่น ความหนาแน่นของผงเพชรที่อัดลงบนงานซัด ค่าความเรียบของผิวงานซัด เป็นต้น ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยดังกล่าวยังไม่มีความชัดเจนเนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือวัด ซึ่งถ้าในอนาคตทั้ง 2 ปัจจัยสามารถวัดค่าได้จะทำให้ได้ตัวแบบถดถอยที่มีความสอดคล้องกับสภาพการทำงานจริงมากยิ่งขึ้น

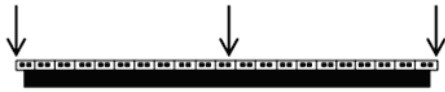
3.4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ปัจจัยที่ควบคุมได้ แต่ถูกละเลยในกระบวนการผลิต

เนื่องจากผลการทดสอบตัวแบบถดถอยที่สร้างจากปัจจัยที่ได้รับการควบคุม แล้วทำการปรับไปยังระดับของปัจจัยที่ให้ค่าที่เหมาะสมพบว่า ค่าความต้านทานของชิ้นงานในหลายบาร์มีค่าใกล้เคียงเป้าหมาย แต่มีชิ้นงานบางบาร์มีค่าความต้านทานแตกต่างไปอย่างมาก ซึ่งหมายความว่าไม่สามารถลดความผันแปรของความ

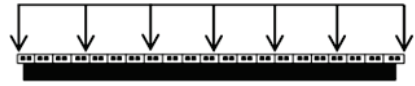
2 นิ้ว และเมื่อแทนค่าลงใน $MRR = 48$ ในสมการที่ 1 สามารถสร้างตัวแบบใหม่ได้ ดังสมการที่ 2

ด้านทานระหว่างบาร์ลงได้ คาดว่าสาเหตุน่าจะมาจาก 2 กลุ่มหลัก คือ 1) ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.3.2 และ 2) ปัจจัยที่ควบคุมได้ แต่ไม่ได้รับการควบคุมในปัจจุบัน ดังนั้นจึงกลับไปพิจารณาถึงปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ แต่ไม่ได้รับการควบคุม นั่นก็คือ วิธีการกดบาร์ โดยมีแนวความคิดในการพิจารณาเรื่องวิธีการกดบาร์คือ ก่อนเข้าสู่กระบวนการซัดละเอียด ชิ้นงาน สไลเดอร์บาร์ มีลักษณะเป็นหัวอ่านจำนวน 54 ตัวที่เรียงติดกัน โดยบาร์จะต้องติดอยู่บนกาวและผ่านกระบวนการซัดหยาบมาก่อน การที่สไลเดอร์บาร์มีลักษณะเป็นบาร์ที่มีขนาดเล็กมากถูกยึดอยู่บนกาวแล้วทำการซัดหยาบ จึงทำให้งานเกิดความเครียดขึ้นและบิดตัวได้ ซึ่งการที่บาร์บิดนั้นจะทำให้ระยะของบาร์ ณ ตำแหน่งที่เกิดการบิดเบือนไม่สนิทเมื่อถูกติดลงบนกาว และเมื่อชิ้นงานที่บิดถูกนำไปซัดต่อในกระบวนการซัดละเอียดจะทำให้ค่าความหนาของชิ้นส่วนที่บิดและไม่บิดมีความแตกต่างกันมากเมื่อกำหนดเวลาในการซัดคงที่ ส่งผลให้ค่าความต้านทานซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงานมีความแตกต่างเกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานที่เกิดการบิดและชิ้นงานที่ไม่บิด

ด้วยเหตุผลดังกล่าววิธีการวางบาร์บนกาวในปัจจุบันคือ กด 3 จุด ดังในรูปที่ 7ก อาจจะได้ช่วยให้สไลเดอร์บาร์ลดการบิดตัวจากความเครียดที่เกิดขึ้นในกระบวนการซัดหยาบลงได้ อีกทั้งยังไม่มีวิธีการกดบาร์อยู่ในมาตรฐานการปฏิบัติงาน ส่วนในรูปที่ 7ข นั้นแสดงแนวความคิดใหม่ซึ่งเป็นวิธีการกดบาร์โดยให้แรงในลักษณะที่มีการกระจายแรงเท่าๆ กันไปตลอดทั้งความยาวของสไลเดอร์บาร์ ซึ่งทำได้โดยการใช้หน้าหนักกดทับลงไปบนสไลเดอร์บาร์ก่อนทำการซัด เพราะวิธีนี้น่าจะช่วยให้บาร์ที่มีความเครียดอยู่แล้วสามารถลดการบิดตัวของสไลเดอร์บาร์ลงได้



ก.) วิธีการกดแบบจุด (point-load)



ข.) วิธีการกดแบบกระจายแรง (uniform-load)

รูปที่ 7 แนวความคิดของวิธีการกดบาร์

โดยผลการทดสอบด้วยวิธี 2-sample t พบว่า วิธีการกดทั้ง 2 วิธีให้ค่าความต้านทานเฉลี่ยของแต่ละบาร์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญสำคัญ 0.05 (P-value = 0.000) หมายความว่าวิธีการกดสไลเดอร์บาร์ โดยให้แรงในลักษณะที่มีการกระจายแรงตลอดทั้งบาร์ ก่อนทำการชดให้ค่าความต้านทานเฉลี่ยแตกต่างจาก MRR ในการกดแบบ 3 จุด และในการทดสอบความแปรปรวนของค่า MRR ระหว่างบาร์ด้วย F-test ($H_1: \sigma$ วิธีการกดใหม่ $< \sigma$ วิธีการกดเก่า) พบว่าวิธีการกดใหม่ (กดแบบกระจายแรง) ให้ค่าความแปรปรวน MRR ระหว่างบาร์น้อยกว่าวิธีเดิม (กดแบบจุด) อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญสำคัญ 0.05 (P-value = 0.0049) หมายความว่าวิธีการกดบาร์แบบกระจายแรงช่วยให้ค่า MRR ของงานในแต่ละบาร์ออกมาใกล้เคียงกว่าวิธีการเดิม จากนั้นจึงพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการที่มีน้ำหนักไปกด

ทำงานก่อนที่จะมีการชดละเอียดเกิดขึ้น โดยการนำชิ้นงานไปวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าตัวอื่นๆ ประมาณ 14 ตัว ซึ่งพบว่าวิธีการกดบาร์แบบใหม่นี้ไม่ทำให้ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าตัวอื่นๆ หลุดออกนอกข้อกำหนดเฉพาะ (specification)

3.5 การยืนยันผลการทดลอง

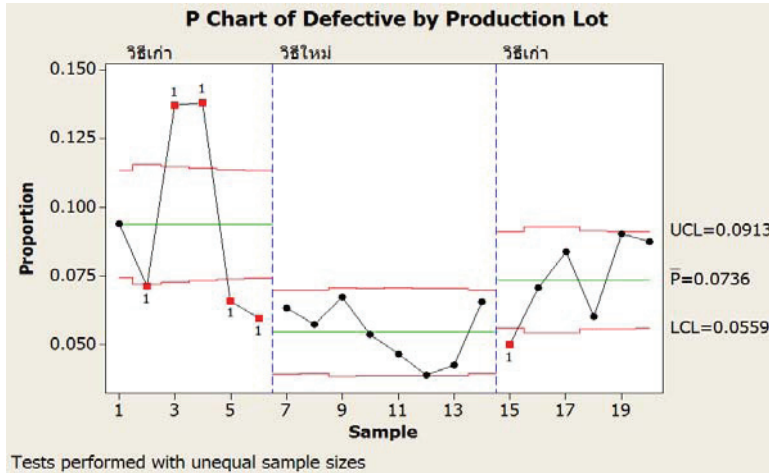
หลังจากศึกษาถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการปรับปรุงแล้วจึงใช้กับงานจริงในสายการผลิตหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์รุ่นตัวอย่างจำนวน 8 ลอต (จำนวนสไลเดอร์ 15,084 ตัว) ทำการผลิตต่อเนื่องกันไป โดยใช้เครื่องจักรเดียวกันกับที่ทำการทดสอบปัจจัยและเป็นเงื่อนไขเดียวกับการผลิตปัจจุบัน ดังตารางที่ 2 โดยปรับเปลี่ยนวิธีการกดบาร์ก่อนการชดละเอียด

ตารางที่ 2 ระดับปัจจัยในการผลิตจริง (ใช้อยู่ในปัจจุบัน)

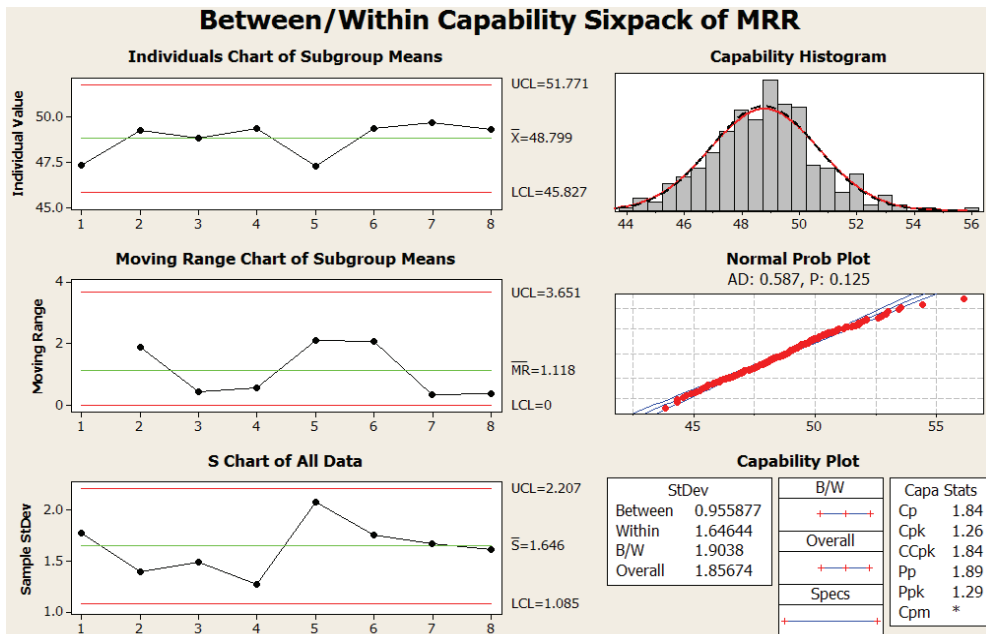
ปัจจัยที่ป้อนเข้า	หน่วย	ระดับปัจจัยในการผลิตจริง	
		Low	High
1. ความเร็วรอบของจานชด	รอบ/นาที	2	4
2. ความเร็วของแขนกล	Stroke/นาที	1	3
3. ระยะชด	นิ้ว	1.1	2

เพื่อให้การยืนยันผลมีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น การปรับเปลี่ยนวิธีการกดบาร์ก่อนทำการชดถูกแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ช่วง คือในการผลิต 20 ลอต จะทำการเปลี่ยนวิธีการกดที่ลอต 7-14 เท่านั้น เพื่อยืนยันว่าวิธีการกดช่วยลดความผันแปรของค่า MRR ระหว่างบาร์จริง และเพื่อมั่นใจได้ว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นอิทธิพลมาจาก

ปัจจัยอื่นๆ เช่น วัตถุดิบในการผลิต เป็นต้น แล้วทำการทวนสอบผลการปรับปรุงด้วยแผนภูมิควบคุม p ดังรูปที่ 8 พบว่าวิธีการกดแบบใหม่ให้ค่าสัดส่วนของผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภท MRR เท่ากับ 0.0546 ดีกว่าใช้วิธีการกดบาร์แบบเดิม ซึ่งอยู่ที่ 0.0938 และ 0.0736 ตามลำดับ



รูปที่ 8 แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียเปรียบเทียบวิธีการกวดแบบเดิมและกวดแบบใหม่



รูปที่ 9 การทวนสอบความสามารถของกระบวนการขัดละเอียดหลังปรับปรุง

จากนั้นจึงทำการทวนสอบผลการปรับปรุงกระบวนการขัดละเอียด โดยการใช้วิธีการกวดแบบใหม่ ด้วยการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการขัดละเอียด ดังรูปที่ 9 พบว่า ค่าของดัชนี C_{pk} เท่ากับ 1.26 (เพิ่มขึ้น

เท่ากับ 0.41) ทำให้เปอร์เซ็นต์ผลได้โดยเฉลี่ยทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมาอยู่ที่ร้อยละ 91.86 (เพิ่มร้อยละ 0.35) และทำให้ผลได้รวมเพิ่มขึ้นมาอยู่ที่ร้อยละ 84.81 ของชิ้นงานที่ทำการผลิต

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการลดของเสีย หรือผลิตภัณฑ์บกพร่องโดยเป็นข้อบกพร่องทางไฟฟ้าประเภทความต้านทานที่สูงหรือต่ำเกินไปที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์เป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อผลได้และลูกค้า โดยเริ่มจากการทดสอบและวิเคราะห์ปัจจัยที่ควบคุมได้และได้รับการควบคุมอยู่แล้วในปัจจุบัน ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนั้นการปรับปัจจัยหลักๆ ไม่สามารถลดของเสียที่เกิดขึ้นได้ ในกรณีตัวอย่างคาดว่าเป็นเพราะยังมีปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้อื่นมากระทบอีก เช่น ความหนาแน่นของผงเพชรที่อัดลงบนจานขัด ค่าความเรียบของผิวจานขัด เป็นต้น ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยดังกล่าวยังไม่มีความชัดเจนที่จะทำการควบคุมเพราะมีข้อจำกัดของเครื่องมือวัด จากนั้นจึงนำปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ แต่ถูกละเลยตั้งแต่ต้นคือ วิธีการกดบาร์ในกระบวนการผลิต กลับมาวิเคราะห์พบว่า สามารถช่วยลดของเสียที่เกิดขึ้นได้เห็นผลอย่างชัดเจน

5. ข้อเสนอแนะ

ผลจากการทำวิจัย พบว่าความผันแปรของค่าความต้านทานของงานระหว่างบาร์ในกระบวนการขัด มาจากการบิดตัวของบาร์ โดยจุดสำคัญของวิธีการกดบาร์นั้นก็คือการทำให้ระนาบของสไลเดอร์บาร์แนบสนิทติดอยู่บนกาวที่ติดอยู่บนจิกยึดงานก่อนที่จะนำไปขัดเสียก่อน โดยผู้วิจัยได้เสนอแนวทางในการควบคุมการบิดตัวของบาร์โดยการควบคุมวิธีการกดบาร์ไว้ 2 วิธี คือ วิธีแรกโดยใช้คนและวิธีที่สองใช้เครื่องจักร ซึ่งจากการพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสีย รวมถึงความคุ้มค่าในการใช้งานในความเห็นของผู้วิจัยได้เสนอให้ใช้เครื่องกดบาร์เพราะงานที่ทำการผลิตในแต่ละวันมีเป็นจำนวนมาก การใช้คนบางครั้งอาจจะละเลยการปฏิบัติในขั้นตอนนี้ และการใช้เครื่องกดทำให้มั่นใจได้ว่าการปฏิบัติงานจะเป็นไปตามแผนการควบคุมที่วางไว้สำหรับตรวจสอบในจุดปฏิบัติงานนี้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยทุนวิจัยมหาวิทยาลัย สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภายใต้โครงการสร้างกำลังคน

เพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมระดับปริญญาโท (สกว.-สว.) ประจำปี 2550

7. เอกสารอ้างอิง

1. ภัทธา อายุวัฒน์, 2546, *การลดของเสียที่เกิดจากค่าการรับน้ำหนักกดของชุดหัวอ่านสำเร็จไม่ได้ตามข้อกำหนดในกระบวนการประกอบหัวอ่านโดยใช้แนวทางซิกซ์ซิกม่า*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 28-36.
2. มนต์วี ดันเจริญ, 2546, *การเกิดผลิตภัณฑ์บกพร่องเนื่องจากการคายประจุของไฟฟ้าสถิตในกระบวนการผลิตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์รุ่นซีไดร์ฟ*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 21-81.
3. วิทยากร ฤทธิมนตรี, 2545, *การลดปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่องของอวนในกระบวนการผลิตอวนเส้นเดี่ยว*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 51-75.
4. วุฒิชัย เจริญยิ่งวัฒนา, 2546, *การใช้กรรมวิธีทางซิกซ์ ซิกม่าเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพงานพ่นสี*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 38-52.
5. ศิริวดี เอื้ออรุณโชติ, 2546, *การลดการปนเปื้อนจากกระบวนการผลิตหัวอ่านเขียนสำหรับคอมพิวเตอร์โดยการประยุกต์ใช้วิธีการซิกซ์ ซิกม่า*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 52-59.
6. สุมล มุสิกกาญจน์, 2547, *การประยุกต์ใช้ซิกซ์ ซิกม่าในงานผลิตอุปกรณ์ใยแก้วนำแสง*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 26-32.

7. Li, Y. and Meyer, D., 2001, "The Effect of Lapping Method on the Thermal Reliability of a GMR Head Based on Black's Equation", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 2, pp. 974-976.

8. Li, Y., 2001, "Effect of Current Density and Stripe Height on the Amplitude of a Dual-Synthetic GMR Head", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 4, pp. 1695-1697.

9. กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2550, หลักการการควบคุมคุณภาพ, พิมพ์ครั้งที่ 1, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, หน้า 100.

10. Madhav S.,P., 1989, *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice-Hall International Inc, New Jersey, pp. 1-211.

11. กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2549, การวิเคราะห์ระบบการวัด, พิมพ์ครั้งที่ 5, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, หน้า 61-174.

12. เกษมศักดิ์ ชุณหบุญญทิพย์, 2550, การลดความผันแปรในค่า MRR จากการขัดที่กระบวนการ BLKL ของหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคุณภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1-114.