

# การปรับปรุงคุณภาพระบบการวัดความสั้นสะท้อน ของสปินเดิลมอเตอร์โดยผ่านแนวทางซิกส์ซิกมา

ชิต เหล่าวัฒนา<sup>1</sup> และ ณัฐพงศ์ วุฒิกกร<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำแนวทางซิกส์ซิกมามาใช้ในการแก้ปัญหากระบวนการผลิต ณ บริษัท ซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) สาขารังสิต ผู้ผลิตสปินเดิลมอเตอร์ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการผลิตฮาร์ดดิสก์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ การลดค่าใช้จ่ายและความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยการปรับปรุงคุณภาพที่เกิดขึ้นภายในระบบการวัดเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการตัดสินใจให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ตลอดจนการสร้างเชื่อมั่นให้เกิดขึ้นต่อลูกค้า สำหรับกระบวนการที่เลือกมาศึกษานั้นเป็นกระบวนการวัดความสั้นสะท้อนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ โดยการควบคุมระดับความสั้นสะท้อนไม่ให้เกิน 150 %ACT จะทำให้ระบบการวัดดังกล่าวมีความถูกต้องและความแม่นยำสูงขึ้น ขั้นตอนการศึกษาทั้งหมดแบ่งเป็นสี่ขั้นตอนได้แก่ ขั้นตอนการวัดผล ขั้นตอนการวิเคราะห์ ขั้นตอนการปรับปรุง และขั้นตอนการควบคุม โดยศึกษาผ่านโมเดลซีต้า 18 แอลพี และจากผลการศึกษาพบว่ากระบวนการวัดนี้ขาดคุณสมบัติที่สำคัญอยู่สองประการได้แก่ คุณสมบัติเชิงเส้นตรง และคุณสมบัติความแม่นยำ โดยแท้จริงถือเป็นส่วนประกอบหลักที่มีผลต่อปัญหาดังกล่าว

<sup>1</sup> รองศาสตราจารย์ ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาระบบงานด้านวิศวกรรม (พีไอ)

<sup>2</sup> นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาระบบงานด้านวิศวกรรม (พีไอ)

## **Six Sigma Quality Enhancement of Motors Through a Vibration Measurement System**

**Djitt Laowattana<sup>1</sup> and Natapong Vutikorn<sup>2</sup>**

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

---

### **Abstract**

In this engineering research, we apply the Six Sigma discipline to solve problems in real production processes at the Seagate technology (Thailand) Rangsit, a manufacturer of spindle motors in computer harddisks. The objective of this research is to reduce all unnecessary expenditures and wastes in such production processes as much as possible. We have improved quality of its measuring system to promote customer confidence. The data is used to build up highly efficient decision making in production processes. We have also investigated motor vibration which should not exceed 150% ACT. Such investigation aims at finding ways to enhance accuracy and precision. There were four steps in our experiment i.e. measuring phase, analyzing phase, improving phase and controlling phase. Cheetah 18LP model was selected for such an experiment. We have found that the vibration measuring system lack of linearity and precision property. Bearing is a major component generating the vibration.

---

<sup>1</sup> Associate Professor, Center of Operation for Field Robotics Development (FIBO).

<sup>2</sup> Graduate Student, Center of Operation for Field Robotics Development (FIBO).

## 1. บทนำ

ระหว่างปี 1970 ถึงปี 1980 มีการพัฒนาด้านเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว (Technology boom) จึงเป็นเหตุให้การผลิตสินค้ามีความซับซ้อนมากขึ้น ระยะเวลาในการผลิตเร็วขึ้น ต้นทุนในการผลิตต่ำลง ช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์สั้นลงกว่าแต่ก่อน เป็นต้น ดังนั้นในการผลิตจำเป็นต้องมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้และจะต้องก้าวตามให้ทันในเรื่องของเทคโนโลยีเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า ด้วยเหตุนี้บริษัททั้งหลายจึงจำเป็นต้องแสวงหาแนวทางในการทำให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจ (Customer satisfaction) ในช่วงต้นปี 1980 บริษัทต่างๆ จึงเรียนรู้ว่าภายใต้การแข่งขันที่รุนแรงผู้ชนะในธุรกิจนั้นไม่ใช่เพียงแค่มุ่งการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีอย่างเดียวแต่ต้องทำให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจแบบเบ็ดเสร็จด้วย (Total customer satisfaction) บริษัทโมโตโรล่า คือ บริษัทหนึ่งที่ตระหนักถึงปัญหาเหล่านี้จึงได้มีการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาแนวทางหนึ่งขึ้นมาเรียกว่าซิกส์ซิกมา โดย ไมเคิล เจ แฮร์รี่ (Mikel J. Harry) และจากการนำโปรแกรมนี้มาใช้นั่นเองทำให้บริษัทโมโตโรล่าเป็นบริษัทที่ประสบความสำเร็จและมีการพัฒนาทางด้านคุณภาพอย่างรวดเร็วจนกระทั่งได้รับรางวัล Malcolm Baldrige National Quality Award เมื่อปี 1988

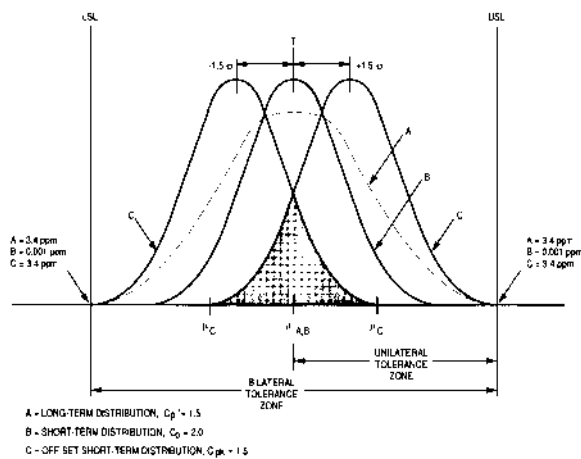
ถึงแม้ชื่อของซิกส์ซิกมาจะเป็นชื่อทางสถิติก็ตาม แต่จริงๆ แล้วเป็นหลักของการบริหาร ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการปรับปรุงคุณภาพ (Quality Improvement) โดยเน้นไปที่การปรับปรุงแบบพลิกโฉมหน้า (Breakthrough) หรือเป็นการปรับปรุงที่เน้นผลลัพธ์ เพื่อกันงานที่ไร้มูลค่าเพิ่มหรือปัญหาที่ซ่อนเร้นอยู่ในระบบ (Hidden Factory) ปัญหาที่ได้รับการเลือกมานั้นจึงต้องมีเสถียรภาพ และการเลือกโครงการต้องถูกกำหนดโดยผู้บริหารระดับสูง แล้วดำเนินการบริหารเพื่อการปรับปรุงคุณภาพที่บังคับทั่วทั้งองค์กร (Company Wide) และเป็นทางเลือกใหม่ในการจัดการกับปัญหาเพื่อการปรับปรุงคุณภาพอย่างต่อเนื่อง โดยการเปลี่ยนมุมมองในการมองกระบวนการเสียใหม่ให้มองกระบวนการในระยะยาว (Long Term) เนื่องจากถ้ามองกระบวนการแต่เพียงในช่วงเวลาสั้นๆ (Short Term) แต่เพียงอย่างเดียวอาจทำให้พลาดโอกาสในการแก้ไขปัญหาที่ซ่อนเร้นอยู่ในระบบ และอาจเข้าใจว่ากระบวนการที่ทำงานอยู่นั้นดีอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องแก้ไขหรือปรับปรุงอะไร หรือการที่ค่าเฉลี่ยของกระบวนการไม่ตรงกับค่าเป้าหมายนั้นจะตีความกลายเป็นว่ามันเกิดขึ้นโดยธรรมชาติควบคุมไม่ได้ แต่สิ่งต่างๆ ที่กล่าวมานั้นถ้ามองให้ดีแล้วจะพบว่าตามความเป็นจริงกระบวนการไม่ได้ดีอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ดีที่สุดตลอดเวลา กล่าวคือในระยะยาวแล้วไม่มีใครที่สามารถควบคุมกระบวนการให้ได้อยู่ได้ตลอดเวลา พนักงานปฏิบัติงานเองก็ไม่ได้ทำงานได้ดีอยู่ตลอด เมื่อทำงานไปนานๆ ก็เกิดความล้าช้ำ หรือเครื่องจักรเมื่อใช้งานไปนานๆ ก็เกิดการเสื่อมสภาพ ชำรุด สึกหรอ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นแค่เพียงตัวอย่างที่นำมากล่าวเพื่อให้เข้าใจในการมองกระบวนการระยะยาว ซึ่งในความเป็นจริงสภาวะต่างๆ เหล่านี้มีจำนวนมากมายและแปรเปลี่ยนไปตลอดเวลา ซึ่งสิ่งเหล่านี้เกิดขึ้นโดยระบบ

## 2. ทฤษฎีและหลักการ

### ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability)

ความสามารถของกระบวนการในระยะสั้น (Short Term Capability) ในกระบวนการผลิต ถ้าสามารถควบคุมการผลิตให้ตรงกับที่ออกแบบได้และสามารถทำให้ทุกอย่างที่ต้องการควบคุมเหมือนเดิมได้หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของกระบวนการต้องตรงกับค่ากลางของข้อกำหนดเฉพาะ ซึ่งแนวความคิดนี้มักเป็นจริงเพียงแค่นอกสุดมคติเท่านั้น เนื่องจากภายใต้หลักการนี้ทุกอย่างต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่นวัตถุดิบที่นำเข้ามาต้องดีตรงกับที่ออกแบบไว้ คนงานต้องไม่มีความล่าช้าเกิดขึ้น เครื่องจักรไม่มีการเสื่อมชำรุดหรือสึกหรอ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น (Instant Reproducibility)

ความสามารถของกระบวนการในระยะยาว (Long Term Capability) เมื่อมีการผลิตไปเรื่อยๆ ในเวลาหนึ่งค่าเฉลี่ยของกระบวนการจะมีการแกว่งไปจากค่ากลางของข้อกำหนดเฉพาะเสมอ เนื่องจากอิทธิพลของความผันแปรที่เกิดขึ้นโดยระบบ (Perturbing Nonrandom Influences) ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นนี้อาจจะมีส่วนประกอบมาจากหลายสาเหตุด้วยกันและผลกระทบจากการเลื่อนนี้เองมีผลทำให้จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นมีเพิ่มขึ้น โดยตามแนวคิดภายใต้หลักการของซิกส์ซิกม่านั้นจะยอมให้มีการเลื่อนของกระบวนการไปได้  $\pm 1.5$  Sigma ซึ่งจะทำให้ของเสียที่เกิดขึ้นในการผลิตนั้นเท่ากับ 3.4 PPM ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสามารถของกระบวนการตามแนวทางซิกส์ซิกม่า

### ผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต

เนื่องจากซิกส์ซิกม่าเป็นการบริหารคุณภาพที่ต้องกระทำที่ทุกๆ ส่วนของธุรกิจ ดังนั้นจึงมีแนวทางมากมายในการประยุกต์ใช้ ปรัชญา ทฤษฎี แนวคิด ตลอดจนหลักการในการดำเนินการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในทุกๆ หน่วยธุรกิจ สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปเป็นประเด็นต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

การนำแนวทางซิกส์ซิกม่าเข้ามาแก้ปัญหาในกระบวนการผลิต ต้องเริ่มที่การพัฒนาบุคลากร โดยการจัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาแล้วแบ่งกลุ่มทำงานออกเป็น 3 ทีม Mulligan [1] ได้แก่

1. ทีมแก้ปัญหาในกระบวนการผลิต (Process Team)
2. ทีมแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับผู้ส่งมอบ (Supplier Team)
3. ทีมการออกแบบ (Design Team)

โดยแต่ละทีมจะมีหน้าที่ในการแก้ปัญหาของตนเองโดยมุ่งหาสาเหตุที่เป็นต้นเหตุของปัญหานั้น และพยายามลดความผันแปรของแหล่งกำเนิดที่จะส่งผลไปยังตัวผลิตภัณฑ์ ตลอดจนการนำแนวทางซิกส์ซิกม่าเข้ามาใช้ในการบริหารจัดการองค์กร Tabias [2] และการแก้ปัญหาในกระบวนการผลิต Fuller [3]

การใช้แนวทางซิกส์ซิกม่าในการควบคุมวัตถุดิบนำเข้า (Incoming Material) การที่จะผลิตสินค้าให้มีคุณภาพไม่ใช่เพียงแค่กระบวนการผลิตดีหรือมีเครื่องจักรที่ทันสมัยเท่านั้น แต่คุณภาพของวัตถุดิบนำเข้าต้องมีคุณภาพที่ดีด้วย ดังนั้นในการทำให้วัตถุดิบนำเข้ามีคุณภาพที่ดีได้นั้น จำเป็นต้องสร้างความร่วมมือที่ดีกับผู้ส่งมอบซึ่งเป็นผู้ที่จัดส่งวัตถุดิบหรือชิ้นส่วนมาให้ ตลอดจนสร้างความสัมพันธ์ที่ดีให้เปรียบเสมือนหุ้นส่วนทางธุรกิจ Fuller [4] สำหรับในการศึกษาวิจัยนี้ผู้ผลิตนั้นมีส่วนร่วมในการช่วยผู้ส่งมอบในการแก้ปัญหา โดยการนำแนวคิดในเรื่องของซิกส์ซิกม่าเข้ามาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาลดต้นทุน Cantrell [5]

การใช้แนวทางซิกส์ซิกม่าในการควบคุมกระบวนการโดยอาศัยสถิติ (Statistical Process Control) การควบคุมกระบวนการโดยอาศัยสถิติในงานวิจัยนี้ใช้แผนภูมิควบคุมเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ปัญหาระหว่างการผลิต เนื่องจากการแก้ปัญหาในกระบวนการผลิตโดยส่วนใหญ่เป็นการแก้ไขที่ปลายเหตุ การดำเนินการควบคุมกระบวนการโดยอาศัยสถิตินี้ได้นำแนวทางซิกส์ซิกม่ามาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาให้เป็นระบบเพื่อดำเนินการหาสาเหตุของปัญหา หลังจากเมื่อทราบสาเหตุแล้วจึงดำเนินการแก้ไขปัญหาคือต้นเหตุ Nixon [6]

การใช้แนวทางซิกส์ซิกม่าในการออกแบบที่แข็งแกร่ง (Robust Design) ในการออกแบบที่แข็งแกร่งนั้นในงานวิจัยนี้ได้แยกการออกแบบออกเป็นสองประเภท William [7] และ Robert [8] ได้แก่ การออกแบบผลิตภัณฑ์และการออกแบบกระบวนการ

ในขั้นตอนของการออกแบบแบบผลิตภัณฑ์นั้นต้องดำเนินการออกแบบให้ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการผลิตหรือความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นต่อลูกค้ามีค่าต่ำที่สุด (Loss Function) ในขณะที่การออกแบบกระบวนการต้องดำเนินการทุกอย่างภายใต้ข้อกำหนดที่ได้รับการออกแบบไว้ แล้วดำเนินการจัดการเพื่อลดความผันแปรในการผลิต (Reduce Variation) ให้น้อยที่สุดจึงจะได้สินค้าที่มีคุณภาพสูงสุดเพื่อสนองต่อความพึงพอใจของลูกค้า Powell [9]

### 3. ผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมดจัดอยู่ในระดับกระบวนการ ซึ่งเน้นไปที่การแก้ปัญหาในกระบวนการผลิตเป็นหลัก ผู้ที่มีบทบาทสำคัญในส่วนนี้ได้แก่คณะทำงานที่เรียกว่า แบลคเบลท์ (Black Belt) ซึ่งมีหน้าที่ในการเฝ้าพินิจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ แล้วดำเนินการ

แก้ไขเพื่อมิให้ปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นมาอีกหรือหาทางป้องกันปัญหาที่มีแนวโน้มว่าจะเกิด ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปเกี่ยวกับขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้ Harry และ Schroeder [10], Pande, Neuman และ Cavanagh [11]

### 1. ขั้นตอนการวัดผล (Measure Phase)

ในขั้นตอนการวัดผล สิ่งแรกที่ต้องทำคือการเลือกกระบวนการที่เป็นปัญหามาดำเนินการแก้ไข โดยปัญหาที่เลือกมานั้นต้องเป็นปัญหาที่วิกฤตต่อคุณภาพ (Critical to Quality) เพื่อนิยามถึงคุณลักษณะที่วิกฤตของผลิตภัณฑ์ (Critical Product Response Characteristic) แล้วดำเนินการเปลี่ยนคุณลักษณะนั้นให้เป็นตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) โดยผ่านกระบวนการวัดเพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะและพฤติกรรมของผลิตภัณฑ์ สำหรับกระบวนการที่เลือกมาดำเนินการแก้ไขผ่านแนวทางซิกส์ซิกม่าในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการทดสอบความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ขณะกำลังหมุนด้วยความเร็วรอบค่าหนึ่ง ผลการศึกษาผ่านการวิเคราะห์เรื่องความสามารถของกระบวนการทั้งในระยะสั้นและระยะยาวพบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อสิ่งรบกวน (Noise Effect) มากที่สุดได้แก่ โมเดลซีต้า 18 แอลพี ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดแนวทางในการแก้ไขอย่างไรก็ตามในการตัดสินใจจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่มีคุณภาพ นั่นคือข้อมูลต้องมีความถูกต้องและแม่นยำ ดังนั้นก่อนการวิเคราะห์ใดๆ เพื่อดำเนินการแก้ปัญหาจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ระบบการวัดก่อน ถ้าหากระบบการวัดนั้นมีปัญหา ก็หมายความว่าข้อมูลที่เก็บมาได้ไม่มีสารสนเทศเพียงพอที่จะนำมาใช้ในการตัดสินใจจำเป็นต้องหาสาเหตุแล้วดำเนินการแก้ไข สำหรับผลการวิเคราะห์ระบบการวัดความสั่นสะเทือนในกระบวนการดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าระบบการวัดความสั่นสะเทือนนี้ขาดคุณสมบัติเชิงเส้นตรง (Linearity) และคุณสมบัติความแม่นยำ (Gage R&R) ดังตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ค่าประมาณร้อยละของไบอัสที่แต่ละย่านความสั่นสะเทือน

ค่าอ้างอิง	ค่าไบอัส	$\sigma$	$6\sigma$	% ไบอัส
50	-16	55	330	4.848485
100	-5.5	55	330	1.666667
150	5	55	330	1.515152
200	15.5	55	330	4.69697
250	26	55	330	7.878788
300	36.5	55	330	11.06061
350	47	55	330	14.24242
400	57.5	55	330	17.42424
450	68	55	330	20.60606
500	78.5	55	330	23.78788
550	89	55	330	26.9697
600	99.5	55	330	30.15152

จากผลการทดลองดังตารางที่ 1 สรุปได้ว่าเมื่อระดับความสั่นสะเทือนสูงขึ้นค่าเฉลี่ยของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงของชิ้นงาน (True Value) จะมีความแตกต่างไปจากค่าเฉลี่ยที่วัดได้เพิ่มมากขึ้น โดยความแตกต่างดังกล่าวนี้เรียกว่าค่าไบอัส (Bias) ซึ่งตามเกณฑ์การตัดสินใจโดยทั่วไปแล้วสามารถยอมรับให้เกิดร้อยละของค่าไบอัสได้ไม่เกินร้อยละ 10 แต่จากผลดังตารางที่ 1

เมื่อชิ้นงานอยู่ในย่านความสั่นสะเทือนที่สูงขึ้น (ตั้งแต่ 300%ACT ขึ้นไป) ค่าไบอัสจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งจำเป็นต้องวิเคราะห์และหาแนวทางการแก้ปัญหาในขั้นต่อไป และจากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัด

### Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	36693.2	4077.03	3.04059	0.02134
Operator	2	1359.5	679.77	0.50696	0.61067
Operator*Part	18	24135.6	1340.87	4.15884	0.00002
Repeatability	60	19344.8	322.41		
Total	89	81533.2			

### Gage R&R

Source	VarComp	StdDev	5.15*Sigma
Total Gage R&R	661.90	25.7274	132.496
Repeatability	322.41	17.9559	92.473
Reproducibility	339.48	18.4251	94.889
Operator	0.00	0.0000	0.000
Operator*Part	339.48	18.4251	94.889
Part-To-Part	304.02	17.4361	89.796
Total Variation	965.92	31.0792	160.058

Source	%Contribution	%Study Var	%Tolerance
Total Gage R&R	68.53	82.78	22.34
Repeatability	33.38	57.77	15.59
Reproducibility	35.15	59.28	16.00
Operator	0.00	0.00	0.00
Operator*Part	35.15	59.28	16.00
Part-To-Part	31.47	56.10	15.14
Total Variation	100.00	100.00	26.99

Number of Distinct Categories = 1

เรื่องของความแม่นยำในระบบการวัดสรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้จากระบบวัดที่นำมาใช้ในการตัดสินใจนั้นไม่มีสารสนเทศเพียงพอที่จะเอาไปอธิบายถึงความผันแปรของกระบวนการได้ (%Study Var มีค่าเท่ากับ 82.78 ซึ่งไม่สามารถยอมรับได้ และตามเกณฑ์การตัดสินใจโดยทั่วไปแล้วจะไม่นิยมให้เกินร้อยละ 30) ทั้งนี้สามารถแยกแหล่งความผันแปรหลักที่เกิดขึ้นในระบบการวัดได้ดังนี้ ความผันแปรที่เกิดจากความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability) และความผันแปรที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลร่วมของพนักงานวัดและชิ้นงาน (Interaction Effect) ซึ่งจำเป็นต้องหาแนวทางในการแก้ไขในขั้นต่อไป และสามารถสรุปเป็นสถานภาพของปัญหาได้ดังนี้

#### ปัญหาเรื่องคุณสมบัติเชิงเส้นตรงของเครื่องมือวัด

สถานภาพปัญหา คือ ระบบการวัดความสั่นสะเทือน (ACT) ในกระบวนการผลิตสปินเดิลมอเตอร์โมเดล ซีต้า 18 แอลพี ขาดคุณสมบัติเชิงเส้นตรง โดยที่ค่าความเป็นเส้นตรงของระบบการวัดเมื่อเทียบกับความผันแปรของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 21% ซึ่งไม่สามารถยอมรับได้จำเป็นต้องระบุถึงสาเหตุแล้วดำเนินการแก้ไข

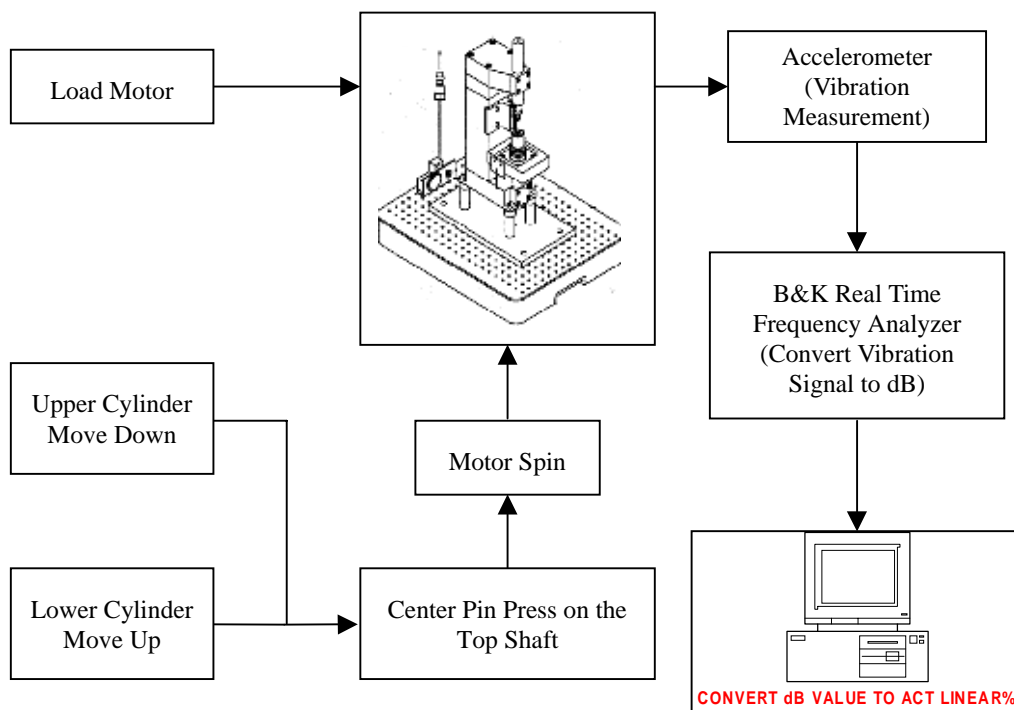
เป้าหมาย คือ ปรับปรุงคุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัดความสั่นสะเทือนจาก 21% ให้เหลือ 5%

### ปัญหาเรื่องคุณสมบัติความแม่นยำของเครื่องมือวัด

สถานภาพปัญหา คือ ระบบการวัดความสั่นสะเทือนในกระบวนการผลิตสปินเดิลมอเตอร์โมเดล ซีต้า 18 แอลพี ขาดคุณสมบัติความแม่นยำในระบบการวัด โดยที่ค่าความแม่นยำของระบบการวัด เมื่อเทียบกับความผันแปรของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 82.78% ซึ่งไม่สามารถยอมรับได้จำเป็นต้องระบุถึงสาเหตุแล้วดำเนินการแก้ไข

เป้าหมาย คือ ปรับปรุงคุณสมบัติความแม่นยำของระบบการวัดความสั่นสะเทือนจาก 82.78% ให้เหลือ 30%

ในการวิเคราะห์ปัญหา เพื่อให้เข้าใจภาพรวมของกระบวนการได้ชัดเจนขึ้นจึงต้องบรรยายผ่านแผนที่กระบวนการ (Process Mapping) ดังรูปที่ 2 โดยการระดมสมองซึ่งแผนที่กระบวนการนี้เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการนิยามความสัมพันธ์ของตัวแปรป้อนเข้าที่สำคัญต่อกระบวนการ (Key Process Input Variable) และตัวแปรป้อนออกที่สำคัญต่อกระบวนการ (Key Process Output Variable) ตลอดจนช่วยในการสร้างแผนภูมิแก๊งปลาเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา ดังรูปที่ 3



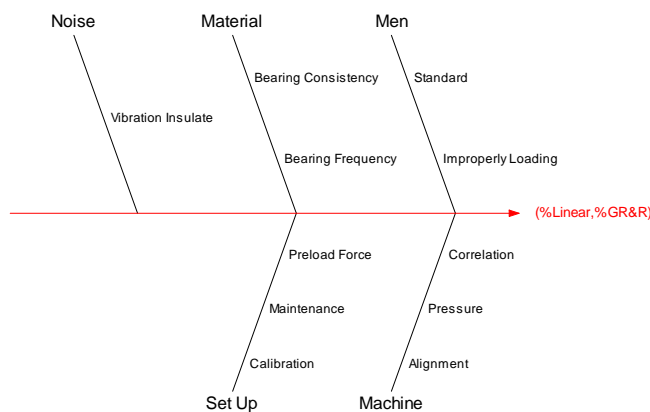
รูปที่ 2 แผนที่กระบวนการ

ประเด็นสุดท้ายในขั้นตอนของการวัดผลคือการเลือกปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการศึกษา แต่เนื่องจากภายใต้ปัญหาที่สนใจดังกล่าว ประกอบด้วยสาเหตุที่เป็นไปได้มากมาย การเลือกปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการศึกษานั้นจึงต้องได้มาอย่างมีหลักการ เครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์ปัจจัยที่น่าจะเป็นสาเหตุของปัญหาหรือปัจจัยที่มีแนวโน้มจะทำให้เกิดปัญหาได้แก่การวิเคราะห์ถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากลักษณะข้อบกพร่อง (Failure Modes and Effect Analysis) หรือที่เรียกว่า FMEA ซึ่งเป็นกลวิธีที่ใช้ในการเข้าถึงสาเหตุของปัญหาอย่างเป็นระบบ เพื่อใช้ในการศึกษาปัญหาที่เป็นไปได้เพื่อ



ป้องกันมิให้ปัญหาที่มีแนวโน้มว่าจะเกิดปรากฏขึ้นมา ซึ่งกลวิธีดังกล่าวนี้ถือว่าการเสริมทักษะในการแก้ปัญหาให้กับวิศวกรให้มีลำดับทางความคิดที่เป็นระบบมีขั้นตอนและมีการจัดลำดับก่อนหลังของการแก้ปัญหาโดยเน้นไปที่การป้องกันปัญหาที่มีโอกาสเกิด เพื่อตอบสนองต่อความพึงพอใจของลูกค้าแบบเบ็ดเสร็จ โดยในที่นี้ถือว่าการวิเคราะห์ถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากลักษณะข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต (Process FMEA) ดังตารางที่ 3 โดยสามารถสรุปถึงปัจจัยที่จะต้องวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไปได้แก่ ย่านความถี่ของแบริ่ง ความสอดคล้องกันในการประกอบแบริ่งตัวบนและตัวล่างเข้าด้วยกัน และค่าของแรงเริ่มต้น

Cause-and-Effect Diagram



รูปที่ 3 แผนภูมิแก๊งปลา

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากลักษณะข้อบกพร่อง

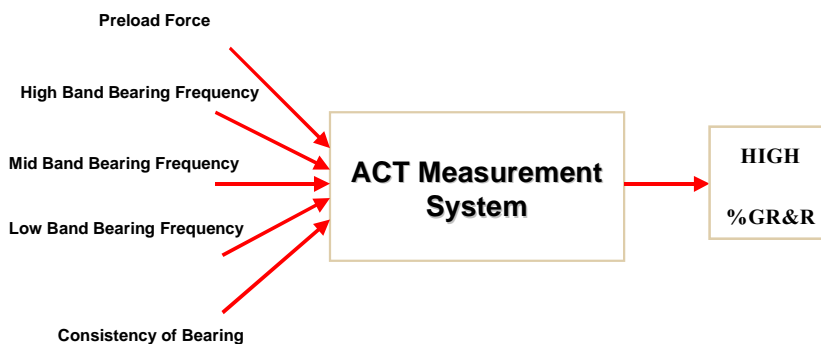
Process Step	Key Process Input	Potential Failure Mode	Potential Failure Effect	SEV	Potential Cause	OCC	Current Control	DET	RPN	Priority
Motor Assembly	Preload	Over or Under Load	Poor % Linearity	7	Force	6	Calibrate Frame	5	210	A
Motor Loading	Work Standard	Improperly Loading	Poor Reproducibility & Interaction	4	Operators	5	Training	6	120	B
Upper & Lower Cylinder Move	Pressure	Improperly Air Pressure	Poor Repeatability	3	Set Up Pressure	2	Pressure Gauge Monitoring	8	48	C
Center Pin Press on the Shaft	Alignment (Mechanism)	Misalignment	Poor Repeatability	6	Set Up Alignment	3	Maintenance	7	126	B
Motor Spin	Consistency	Consistency of Bearing Assembly	Poor % Linearity & GR&R	8	Upper & Lower Bearing Assembly	9	Bearing Sampling	4	288	A
Frequency Analyzer	Bearing Frequency	Bearing Vibration	Poor % GR&R	10	Frequency Band of Bearing	10	Supplier Control	3	300	A

## 2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analyze Phase)

ในขั้นตอนการวิเคราะห์นั้นจะต้องนำข้อมูลที่ได้จากการวัดผลซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้รับ การรวบรวมมาเพื่อเป็นสารสนเทศเกี่ยวกับทิศทางในการปรับปรุง โดยศึกษาจากอาการของปัญหา

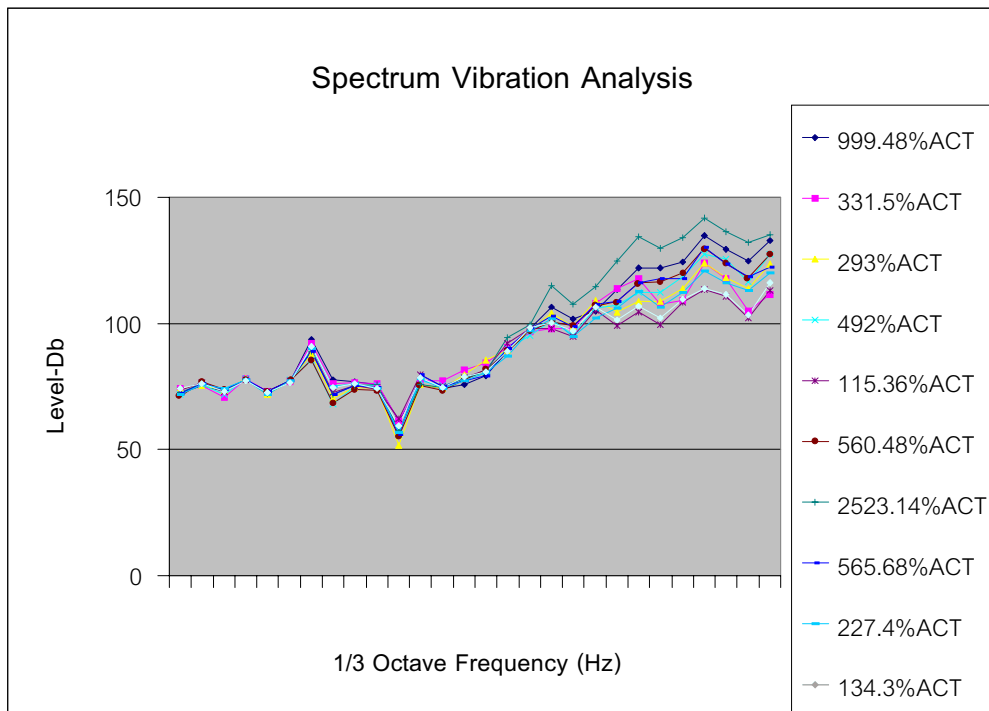
แล้วย้อนกลับไปคิดถึงสาเหตุของกระบวนการที่เป็นต้นเหตุแห่งความผันแปรเพื่อบรรยายถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการ โดยการวิเคราะห์ข้อมูลของผลิตภัณฑ์นั้นสามารถเปิดเผยถึงพฤติกรรมของกระบวนการได้ว่า สาเหตุของปัญหานั้นน่าจะมาจากปัจจัยใดบ้างสำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบการวัดความสั่นสะเทือนนี้ เนื่องจากระบบการวัดดังกล่าวขาดคุณสมบัติที่สำคัญสองประการคือคุณสมบัติเชิงเส้นตรงและคุณสมบัติความแม่นยำ จึงไม่สามารถดำเนินการแก้ไขที่กระบวนการได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การแก้ปัญหาในระบบการวัดเป็นหลัก จากผลการทดลองในขั้นตอนการวัดผลนั้นสามารถกำหนดแนวทางในการแก้ปัญหาได้คือ จะต้องหาทางกำจัดความผันแปรที่แหล่งกำเนิดความผันแปร โดยสาเหตุหลักเกิดจากความผันแปรที่เกิดจากความสามารถในการวัดซ้ำ และความผันแปรที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลร่วมของพนักงานวัดและชิ้นงาน โดยการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวผ่านแผนภูมิแม็ตริเวอรี (Multi-Vari Chart) ซึ่งสามารถกำหนดแนวทางในการแก้ปัญหาได้คือการลดความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานให้อยู่ในระดับความสั่นสะเทือนต่ำๆ จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงมีความแตกต่างไปจากค่าเฉลี่ยที่วัดได้น้อยลง ซึ่งสามารถแก้ปัญหาเรื่องคุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัดได้ สำหรับคุณสมบัติด้านความแม่นยำนั้นจากแผนภูมิแม็ตริเวอรีสรุปได้ว่าที่ระดับความสั่นสะเทือนสูง ความสามารถในการวัดซ้ำจะต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางในการแก้ปัญหาความเป็นเส้นตรง ดังนั้นแนวทางในการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้จึงได้แก่การลดความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ให้มีค่าไม่เกิน 200%ACT และจากผลการวิเคราะห์ถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากลักษณะข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตสามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์ ได้ดังรูปที่ 4

## KPIV's Matrix



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อระบบการวัด

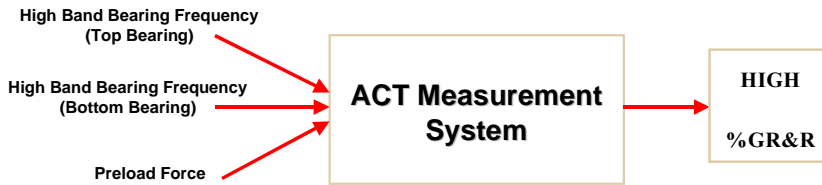
จากผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของความสั่นสะเทือนในรูปของความถี่ (Vibration Spectrum Analysis) ณ ความถี่ที่ 1/3 Octave โดยเลือกงานที่ระดับความสั่นสะเทือนต่างๆ กันมาพิจารณา ช่วงความถี่ครอบคลุมทั้งงานดีและงานเสีย สามารถสรุปผลได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การวิเคราะห์สเปกตรัมของความสั่นสะเทือน (1/3 Octave Frequency)

จากผลการวิเคราะห์พบว่าที่ความถี่ตั้งแต่ 0-2,000 เฮิร์ต งานที่ระดับความสั่นสะเทือนต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก แต่ที่ความถี่ตั้งแต่ 2,000 เฮิร์ต ขึ้นไปงานที่ระดับความสั่นสะเทือนต่างๆ เริ่มมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดและยิ่งชัดเจขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น อีกปัจจัยหนึ่งที่น่าจะมีผลต่อความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้นคือกระบวนการแรงเริ่มต้น (Preload Force) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใส่แรงกดให้กับตัวสปริงเดิลมอเตอร์ภายหลังการประกอบเพื่อกำหนดทางเดินให้กับแบริ่งชนิดกลม โดยใช้ค่าของแรงเริ่มต้นที่ 4, 5, 6, 7 ปอนด์ โดยกำหนดปัจจัยอื่นให้คงที่แล้วดำเนินการทดลองเพื่อวัดผลถึงระดับความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นแล้ววิเคราะห์ผ่านเครื่องมือทางสถิติที่เรียกว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และจากผลการทดลองสรุปได้ว่าการเปลี่ยนค่าของแรงเริ่มต้น ไม่มีผลต่อความสั่นสะเทือนอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีข้อสงสัยว่าการทดลองนี้เป็นแบบ One Factor at a Time (OFAT) จริงหรือไม่จึงนำปัจจัยดังกล่าวมาศึกษาอีกครั้ง ซึ่งวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบตัวแปรในการทดลอง และเนื่องจากส่วนประกอบของมอเตอร์นั้นประกอบด้วย แบริ่งสองตัวได้แก่แบริ่งตัวบนและแบริ่งตัวล่าง ดังนั้นผลจากการประกอบแบริ่งทั้งสอง น่าจะมีผลต่อระดับความสั่นสะเทือน ซึ่งสามารถกำหนดเป็นปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการศึกษาในขั้นตอนการวิเคราะห์ได้ ดังรูปที่ 6

### Modify KPIV's Matrix



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่นำมาศึกษาในขั้นตอนการปรับปรุง

### 3. ขั้นตอนการปรับปรุง (Improve Phase)

ในขั้นตอนของการปรับปรุงนั้นต้องตระหนักถึงการแก้ปัญหาของผลิตภัณฑ์ผ่านการปรับปรุงที่กระบวนการ และต้องมีการบ่งชี้ว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีผลกระทบต่อกระบวนการ ในขั้นตอนการปรับปรุงนี้ต้องหาปัจจัยเหล่านั้นให้ได้แล้วดำเนินการศึกษาถึงความสัมพันธ์ผ่านการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยมีปัจจัยที่จะต้องดำเนินการศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัยด้วยกันได้แก่ปัจจัย A คือ ย่านความถี่สูงของแบริ่งตัวบน ปัจจัย B คือ ย่านความถี่สูงของแบริ่งตัวล่าง และปัจจัย C คือ ค่าของแรงเริ่มต้น

การทดลองเป็นแบบสองกำลังเคแฟกทอเรียล ( $2^k$  Factorial) Montgomery [12] ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบถึงการกำหนดระดับของปัจจัยที่ศึกษาว่าต้องกำหนดไว้ในระดับไหนถึงจะทำให้ความผันแปรที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุด โดยมีแผนการทดลอง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แผนการทดลอง

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C
31	1	1	1	-1	1	1	16	25	1	1	1	1	1
14	2	1	1	1	-1	1	2	26	1	1	1	-1	-1
33	3	1	1	-1	-1	-1	26	27	1	1	1	-1	-1
13	4	1	1	-1	-1	1	23	28	1	1	-1	1	1
42	5	1	1	1	-1	-1	28	29	1	1	1	1	-1
18	6	1	1	1	-1	-1	5	30	1	1	-1	-1	1
41	7	1	1	-1	-1	-1	15	31	1	1	-1	1	1
29	8	1	1	-1	-1	1	7	32	1	1	-1	1	1
20	9	1	1	1	1	-1	4	33	1	1	1	1	-1
34	10	1	1	1	-1	-1	8	34	1	1	1	1	1
39	11	1	1	-1	1	1	27	35	1	1	-1	1	-1
44	12	1	1	1	1	-1	1	36	1	1	-1	-1	-1
35	13	1	1	-1	1	-1	37	37	1	1	-1	-1	1
12	14	1	1	1	1	-1	22	38	1	1	1	-1	1
32	15	1	1	1	1	1	21	39	1	1	-1	-1	1
45	16	1	1	-1	-1	1	48	40	1	1	1	1	1
36	17	1	1	1	1	-1	30	41	1	1	1	-1	1
25	18	1	1	-1	-1	-1	11	42	1	1	-1	1	-1
3	19	1	1	-1	1	-1	19	43	1	1	-1	1	-1
38	20	1	1	1	-1	1	40	44	1	1	1	1	1
46	21	1	1	1	-1	1	24	45	1	1	1	1	1
17	22	1	1	-1	-1	-1	10	46	1	1	1	-1	-1
47	23	1	1	-1	1	1	43	47	1	1	-1	1	-1
6	24	1	1	1	-1	1	9	48	1	1	-1	-1	-1

ซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่ามีการทดลองซ้ำหกรั้ง (6 Replicate) ทั้งนี้เนื่องจากผลการคำนวณหาขนาดของสิ่งตัวอย่างในการออกแบบการทดลองดังสมการที่ 1

$$\phi^2 = \frac{n}{[(a-1)(b-1)(c-1)]} \sum_i \sum_j \sum_k (\tau\beta\gamma/\sigma)_{ijk}^2 \quad (1)$$

เมื่อ $\phi$	หมายถึง ค่าที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่มีความเบี่ยงเบนไปจากศูนย์กลาง
a	หมายถึง จำนวนของระดับ (Level) ของปัจจัย A
b	หมายถึง จำนวนของระดับ (Level) ของปัจจัย B
c	หมายถึง จำนวนของระดับ (Level) ของปัจจัย C
n	หมายถึง จำนวนการทดลองซ้ำ (Replication)
$\sum_i \sum_j \sum_k (\tau\beta\gamma/\sigma)_{ijk}^2$	หมายถึง ผลรวมกำลังสองของความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นจากค่าเฉลี่ยของทรีตเมนต์คอมบิเนชันหนึ่งๆ กับค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

เพื่อกำหนดถึงความเสี่ยงในการยอมรับสมมุติฐานเมื่อสมมุติฐานนั้นเป็นเท็จ หรือความผิดพลาดชนิดที่ 2 (Type II error) และในขณะเดียวกันจะต้องกำหนดค่าของความผิดพลาดชนิดที่ 1 (Type I error) หรือการกำหนดความเสี่ยงในการปฏิเสธสมมุติฐานเมื่อสมมุติฐานนั้นเป็นจริงไว้ที่ค่าๆ หนึ่ง Kenett [13] ทั้งนี้เนื่องจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดลองเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้แต่สามารถควบคุมให้อยู่ในค่าที่ต้องการได้ด้วยการออกแบบ Montgomery [14] ดังนั้นในการทดลองหนึ่งๆ จะต้องมีการประเมินถึงความเสี่ยงเหล่านี้เสียก่อนสำหรับในการทดลองนี้ประกอบด้วยปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบ 3 ปัจจัย และเป็นปัจจัยแบบคงที่ (Fixed Effect Model) ซึ่งผลการคำนวณความเสี่ยง ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงเมื่อขนาดสิ่งตัวอย่างเท่ากับหก

Power and Sample Size			
2-Level Factorial Design			
Sigma = 55	Alpha = 0.05	Effect = 66	
Factors:	3	Base Design:	3, 8
Runs:	48	Replicates:	6
Blocks:	none	Center pts (total):	0
Reps:	6	Power:	0.9819

ดำเนินการเก็บข้อมูลตามแผนการทดลองดังตารางที่ 4 โดยดำเนินการทดลองให้เป็นไปอย่างสุ่มแบบสมบูรณ์ และปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้รับการกำหนดค่าของชิ้นงานที่นำมาทดลองเป็น 2 ระดับ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	Low Level (-1)	High Level (1)
A	0.3 Anderon Unit	0.8 Anderon Unit
B	0.3 Anderon Unit	0.8 Anderon Unit
C	4.5 lbs.	6.5 lbs.

เมื่อได้ผลการทดลองมาภายหลังที่ทดสอบถึงคุณภาพของข้อมูล (Performing) แล้ว จึงดำเนินการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Analysis of Variance for Average (ACT5)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main	3	10538855	10538855	3512952	19.71	0.000
2-Way	3	932094	932094	310698	1.74	0.174
3-Way	1	1035	1035	1035	0.01	0.940
Residual	40	7127919	7127919	178198		
Error	40	7127919	7127919	178198		
Total	47	18599903				

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลผ่านการวิเคราะห์ความแปรปรวนสรุปได้ว่าผลจากปัจจัยที่เกิดจากปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งต้องดำเนินการหาตัวแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความสั่นสะเทือนในรูปแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการพยากรณ์และคาดการณ์ถึงผลที่จะเกิดขึ้นโดยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ความถดถอย

Analysis of Variance for Average (ACT5)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	11470949	11470949	1911825	11.00	0.000
Linear	3	10538855	10538855	3512952	20.20	0.000
Interaction	3	932094	932094	310698	1.79	0.165
Residual	41	7128954	7128954	173877		
Lack-of-Fit	1	1035	1035	1035	0.01	0.940
Pure Error	40	7127919	7127919	178198		
Total	47	18599903				

จากผลการวิเคราะห์การถดถอยสรุปได้ว่า อิทธิพลของปัจจัยหลักสามารถอธิบายความผันแปรในระดับความสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ได้ และมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Multiple Linear Regression Model) สำหรับตัวแบบถดถอยนี้มีความสมรูป (Fit) กับข้อมูล ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ได้โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแบบถดถอย

Estimated Regression Coefficients for Average (ACT5)				
Term	Coef	StDev	T	P
Constant	934.8	60.19	15.532	0.000
A	363.6	60.19	6.041	0.000
B	279.3	60.19	4.640	0.000
C	96.9	60.19	1.609	0.115
A*B	-123.6	60.19	-2.054	0.046
A*C	6.5	60.19	0.108	0.914
B*C	64.0	60.19	1.063	0.294

กำหนดให้

$x_1$  หมายถึง ค่าความถี่สูงของแบริ่งตัวบน

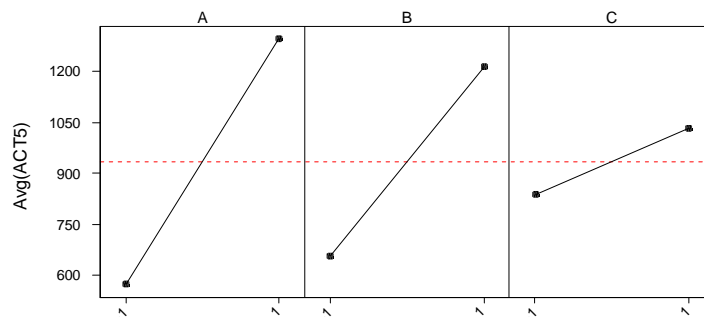
$x_2$  หมายถึง ค่าความถี่สูงของแบริ่งตัวล่าง

$y$  หมายถึง ค่าความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

จากผลการทดลองตารางที่ 7, 8 และ 9 สามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ ดังสมการที่ 2 และรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปัจจัยหลักต่อระดับความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในสปินเดิลมอเตอร์

$$y = 934.8 + 363.6x_1 + 279.3x_2 - 123.6x_1x_2 \tag{2}$$

Main Effects Plot - Data Means for Avg (ACT5)



รูปที่ 7 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อระดับความสั่นสะเทือน

วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) นั้น เป็นการพิจารณาที่ค่าเฉลี่ย แต่การแก้ปัญหาความแม่นยำของระบบการวัดนั้นเป็นการพิจารณาที่ความผันแปร ดังนั้นจึงต้องใช้ดัชนีที่เรียกว่า Signal to Noise Ratio เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจเกี่ยวกับความผันแปร โดยงานที่ได้รับการประกอบเพื่อทดลองตามแผนการทดลองดังตารางที่ 4 มาวัดใหม่ด้วยการวัดซ้ำภายในชิ้นงานเดิม 6 ครั้ง แล้วประเมิน S/N ratio ดังสมการที่ 3 ซึ่งสูตรการคำนวณดังกล่าวนี้เป็นแบบยิ่งสูงยิ่งดี (Larger is the Best) ในแต่ละปัจจัยที่ทำการทดลอง Ross [15] ดังรูปที่ 8

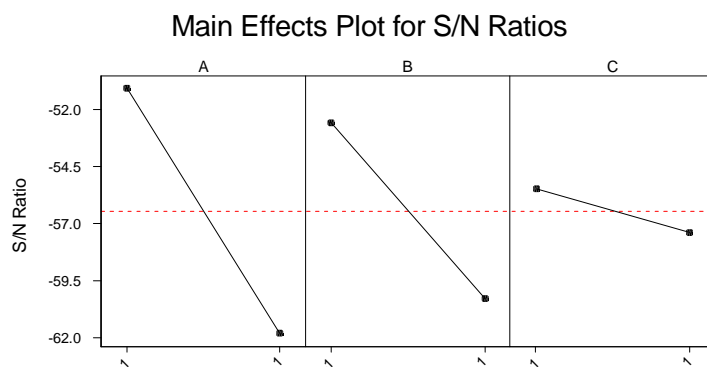
$$S/N = -10 \log\left(-\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (3)$$

เมื่อ

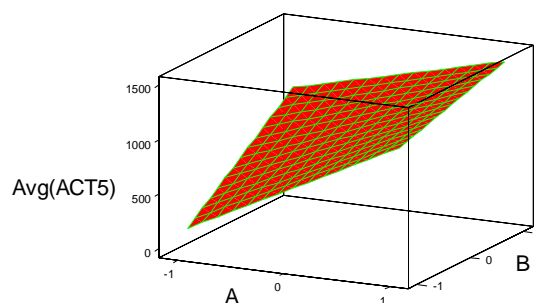
S/N หมายถึง Signal to Noise Ratio

n หมายถึง จำนวนการทดลองในแต่ละ Trial

$y_i$  หมายถึง ผลของข้อมูลใน Trail



รูปที่ 8 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อความผันแปร



รูปที่ 9 พื้นผิวตอบสนอง



จากรูปที่ 8 และรูปที่ 9 สรุปได้ว่าการกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยใหม่ ดังตารางที่ 10 เพื่อป้องกันมิให้ระดับความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นสูงจนส่งผลกระทบต่อระบบการวัดอีก ทั้งยังสามารถแก้ปัญหาทางด้านผลิตภัณฑ์ได้ในเวลาเดียวกัน ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการวัดซ้ำของเครื่องมือวัดได้ โดยการทำผลิตภัณฑ์ให้มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ที่เข้ามารบกวนระบบ (Robust Design) Taguchi [16]

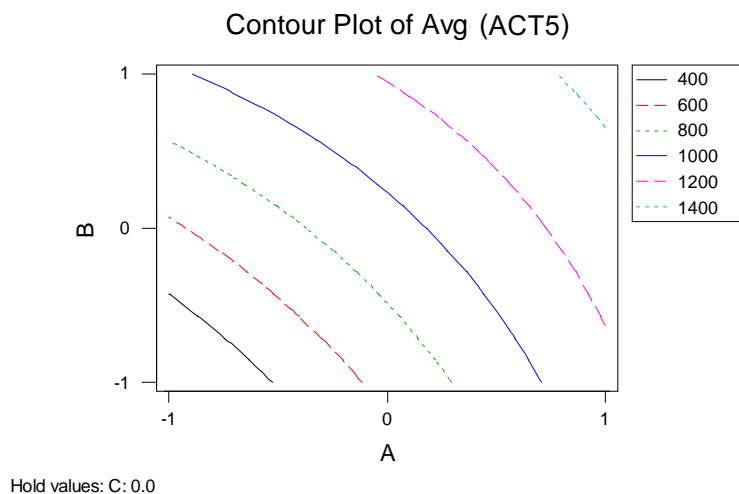
ตารางที่ 10 New Operating Point

ปัจจัย	Low Level (-1)
A	0.3 Anderon Unit
B	0.3 Anderon Unit
C	4.5 lbs.

การกำหนดระดับของปัจจัย A, B, C ไว้ที่ Low Level สามารถแก้ปัญหาของระบบการวัดได้ ทั้งเรื่องของค่าเฉลี่ยและเรื่องของความผันแปร ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นในรูปของพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) ดังรูปที่ 9 และเส้นทางเดิน (Contour Line) ดังรูปที่ 10 โดยพิจารณาที่ปัจจัย A และ B เท่านั้น เนื่องจากปัจจัย C ตามตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีผลต่อระดับความสั่นสะเทือนไม่มากนัก และในการแก้ปัญหาจะต้องดำเนินการผลิต Bearing ให้มีจุดการควบคุมผลิตภัณฑ์ใหม่ และถ้าสามารถควบคุมค่าความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในตัว Bearing ได้แล้วจะสามารถควบคุมระดับความสั่นสะเทือนได้ โดยการประมาณการตามสมการที่ 2 จะได้

$$y = 934.8 + 363.6(-1) + 279.3(-1) - 123.6(-1)(-1) = 168.3 \tag{4}$$

จากการประมาณค่าระดับความสั่นสะเทือนตามผลที่ได้จากสมการที่ 4 ถ้าหากสามารถควบคุมค่าความสั่นสะเทือนได้ที่ 168.3%ACT จะสามารถลดปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบการวัดลงได้



รูปที่ 10 เส้นทางเดินของผลิตภัณฑ์ ณ ระดับความสั่นสะเทือนหนึ่งๆ

#### 4. ขั้นตอนการควบคุม (Control Phase)

เป็นขั้นตอนของการนำสิ่งที่ได้รับการปรับปรุงมารักษาไว้ซึ่งผลที่ควรจะเป็นให้ได้ โดยการเฝ้าพินิจและติดตามถึงปัจจัยการผลิตที่ได้รับการออกแบบใหม่ว่ามีผลต่อผลิตภัณฑ์อย่างไร แล้วจึงดำเนินการเปรียบเทียบกับเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้เพื่อวัดผลที่ได้จากการปรับปรุงแก้ไข แล้วพยายามรักษาไว้ซึ่งสิ่งที่ได้ทำการปรับปรุงที่แหล่งกำเนิดและกำหนดให้เป็นมาตรฐาน แต่เนื่องจากในขั้นตอนการวิเคราะห์สรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อระดับความสั่นสะเทือนนี้เกิดจากค่าความถี่สูงของแบริ่ง ซึ่งถือเป็นส่วนประกอบที่นำเข้ามาจากผู้ผลิตต่างประเทศจึงไม่สามารถเข้าไปดำเนินการใดๆ ในการควบคุมเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวได้ จึงกำหนดเป็นแนวทางและแผนการในการควบคุมดังต่อไปนี้

ดำเนินการตรวจสอบและเฝ้าติดตามถึงผลงานจริงในปัจจุบันว่าขณะนี้มีส่วนภาพอย่างไร ซึ่งในที่นี้ก็คือให้ดำเนินการตรวจสอบถึงค่าความถี่สูงของความสั่นสะเทือนในตัวแบริ่งที่รับมาจากผู้ผลิต แล้ววิเคราะห์ถึงการแจกแจงของสิ่งตัวอย่างเพื่อตรวจสอบถึงค่าความถี่สูงของแบริ่งว่ามีผลต่อความถี่สูงของระบบอย่างไรภายหลังการประกอบ ตลอดจนสามารถนำความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่หามาได้นั้นไปใช้ในการคาดการณ์ถึงเหตุการณ์ในอนาคตว่ามีแนวโน้มอย่างไรต่อระดับความถี่สูงที่เกิดขึ้น

ต่อมาให้ดำเนินการตั้งเป้าหมายให้สอดคล้องกับสถานภาพปัจจุบันที่เผชิญอยู่ซึ่งก็คือ ต้องมีความเป็นไปได้ในการแก้ไข ดังนั้นในขั้นแรกต้องบอกให้ได้ก่อนว่าควรให้ความถี่สูงที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับใดเพื่อแก้ไขปัญหาในเรื่องของระบบการวัด (คุณสมบัติความเป็นเส้นตรง และคุณสมบัติด้านความแม่นยำของเครื่องมือวัด) โดยจากความรู้ที่ได้ศึกษามานั้นบอกได้ว่า ณ ระดับความถี่สูงต่ำๆ เครื่องมือวัดมีความถูกต้องและความแม่นยำสูงซึ่งจากผลการทดลองที่ผ่านมาสรุปได้ว่าต้องกำหนดให้ความถี่สูงที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าไม่เกิน 200%ACT ซึ่งจะสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบการวัดได้ แล้วดำเนินการเปลี่ยนผลให้เป็นเหตุโดยการกำหนดค่าความถี่สูงของแบริ่งที่ต้องการควบคุม

เปรียบเทียบผลงานจริงในปัจจุบันและเป้าหมายที่ได้วางไว้ซึ่งผลความแตกต่างระหว่างสถานะทั้งสองนี้เรียกว่าปัญหา และจะต้องดำเนินการทุกอย่างเพื่อแก้ปัญหา โดยการแก้ปัญหาในที่นี้ถือว่าการแก้ปัญหาที่แหล่งกำเนิดความผันแปร หรือการแก้ปัญหาที่ตัวกระบวนการซึ่งจะต้องดำเนินการจัดการที่ผู้ส่งมอบวัตถุดิบ โดยต้องมีการกำหนดข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์และจุดที่ใช้ในการควบคุมการผลิตใหม่ให้มีความเหมาะสม

ดำเนินการแก้ไขปัญหาในการผลิตโดยควบคุมให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในข้อกำหนดของการควบคุม และเมื่อแก้ไขปัญหได้แล้วต้องดำเนินการยืนยันถึงสมมุติฐานที่มีไว้แต่เดิม โดยนำงานเหล่านั้นมาทำการวิเคราะห์ระบบการวัดใหม่ แล้วประเมินถึงผลที่เกิดขึ้นว่าสามารถแก้ไขปัญหาในเรื่องของระบบการวัดได้มากน้อยแค่ไหน

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองบางส่วนเพื่อพิสูจน์ถึงสมมุติฐานว่ามีความคลาดเคลื่อนมากน้อยเพียงใด ซึ่งจากผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของระดับความสั่นสะเทือนที่เกิดจากย่านความถี่สูงของแบริ่งตัวบนและตัวล่างนั้นตามผลการทำนายดังสมการที่ 2 เทียบกับผลการทดลองจริงดังตารางที่ 11 พบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร ทั้งนี้เนื่องจากตัวแบบถดถอยมิได้มีความสมรูปกับข้อมูล ซึ่งจะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างค่าจริงเบี่ยงเบนไปจากการทำนายนั้นยังมีค่าที่สูงอยู่ จำเป็นต้องมีการกำหนดจุดการควบคุมความสั่นสะเทือนที่ย่านความถี่สูงที่เกิดขึ้นในแบริ่งใหม่เพื่อแก้ปัญหากระบวนการวัดในขั้นตอนการควบคุมต่อไป

ตารางที่ 11 ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าจริงกับค่าทำนาย

ลำดับที่	ย่านความถี่สูงของ แบริ่งตัวบน	ย่านความถี่สูงของ แบริ่งตัวล่าง	ค่าจริง	ค่าทำนาย	ค่าความผิดพลาด
1	0.45	0.45	147.5	-176.3	323.8
2	0.45	0.75	1447.6	661.3	786.3
3	0.75	0.45	773.5	900.7	-127.2
4	0.75	0.75	1230.3	962.3	268
5	0.60	0.30	200.4	427.2	-226.8
6	0.90	0.60	1434.2	1603.4	-169.2
7	0.30	0.60	137.6	225.4	-87.8
8	0.60	0.90	1304.6	1326.4	-21.8
9	0.60	0.60	172.1	278.4	-106.3
10	0.60	0.60	181.4	278.4	-97
11	0.60	0.60	170.4	278.4	-108
12	0.60	0.60	174.6	278.4	-103.8
13	0.60	0.60	180.5	278.4	-97.9

#### 4. สรุปผล

จากผลการวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis ; MSA) ความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นต่อสปินเดิลมอเตอร์พบว่า ความผันแปรที่เกิดขึ้นในระบบการวัดมีค่ามากจนไม่สามารถนำข้อมูลที่ได้อธิบายความผันแปรของกระบวนการได้ ดังนั้นแนวทางในการแก้ปัญหาจึงต้องดำเนินการแก้ไขที่ระบบการวัดก่อนโดยจัดการที่แหล่งกำเนิดของความผันแปร ซึ่งแบ่งความผันแปรที่เกิดขึ้นในระบบการวัดดังกล่าวออกเป็นสองแหล่งใหญ่ๆ ด้วยกันคือ ความผันแปรที่เกิดขึ้นจากการวัดซ้ำและความผันแปรร่วมระหว่างพนักงานและชิ้นงาน จากการวิเคราะห์และศึกษาถึงระบบการวัดที่ผ่านมาทำให้สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อระดับความสั่นสะเทือนนั้นมีทั้งหมดอยู่สามปัจจัยด้วยกันคือ ย่านความถี่สูงของแบริ่งตัวบน ย่านความถี่สูงของแบริ่งตัวล่าง และค่าแรงเริ่มต้น ซึ่งจะต้องทำการศึกษาถึงปัจจัยเหล่านี้เพื่อยืนยันถึงความเชื่อหรือสมมุติฐานที่ตั้งไว้ โดยการทดลองแบบสองกำลังเคแพ็กทอเรียลแล้วประเมินถึงผลของความผันแปรที่เกิดขึ้นต่อความสั่นสะเทือนด้วยวิธีการสัดส่วนสัญญาณต่อคลื่นรบกวน จากผลการวิเคราะห์พบว่าอิทธิพลของปัจจัยหลักมีผลต่อระดับความสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์

โดยตรงและมีผลต่อความสามารถในการวัดซ้ำของเครื่องมือวัดด้วย ดังนั้นในการแก้ปัญหา จึงจำเป็นต้องกำหนดระดับของปัจจัยใหม่เพื่อควบคุมค่าความผันผวนให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้โดยการเปลี่ยนจุดควบคุมของผลิตภัณฑ์ใหม่ (Operating Point) สำหรับในขั้นตอนสุดท้ายซึ่งเป็นขั้นตอนการควบคุมผู้วิจัยมิได้วิเคราะห์ไว้ เนื่องจากว่าในขั้นตอนนี้ต้องเข้าไปควบคุมการผลิตของผลิตภัณฑ์คือแบร์ริงซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่นำเข้ามาจากต่างประเทศจึงไม่สามารถทำการศึกษาในขั้นตอนนี้ได้ แต่จากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ทราบในการประกอบสปินเดิลมอเตอร์ สิ่งที่มีผลต่อระดับความผันผวนและความผันแปรของระบบการวัดนั้นคืออะไร ซึ่งถือเป็นสารสนเทศที่มีประโยชน์ในการแก้ไขปัญหาในขั้นตอนต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้รับความร่วมมือจากบริษัทซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) สาขารังสิต ในการเข้าไปศึกษาวิจัยถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งต่อความกรุณามา ณ โอกาสนี้

## เอกสารอ้างอิง

1. Mulligan, S.P., 1991, "IBM Austin Electronic Card Assembly & Test Six Sigma Process Modeling Strategy," *IEEE Engineering Management Conference*, pp. 102-104.
2. Tabias, P.A., 1991, "A Six Sigma Program Implementation," *IEEE Engineering Management Conference*, pp. 291-294.
3. Fuller, L.F., 1994, "Total Quality Manufacturing at the Rochester Institute of Technology Integrated Circuit Factory," *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, pp. 1312-1316.
4. Fuller, L.F., 1995, "Improveing Manufacturing Performance at the Rochester Institute of Technology Integrated Circuit Factory," *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, Vol. 1, pp. 350-355.
5. Cantrell, B.D., 1992, "Six Sigma Quality: Transformer Manufacturer's Road to Success," *IEEE Engineering Management Conference*, pp. 319-324.
6. Nixon, P., Conway, J., and Maimon, J., 1993, "Statistical Process Control and the Drive for Six Sigma in a VLSI Pilot Line," *IEEE Engineering Management Conference*, Vol. 1, pp. 189-194.
7. William, K.H., 1992, "Robust Designs Through Design to Six Sigma Manufacturability," *IEEE Engineering Management Conference*, pp. 241-246.

8. Robert, V.W., 1992, "An Introduction to Six Sigma With a Design Example," *IEEE Engineering Management Conference*, Vol. 1, pp. 28-35.
9. Powell, T.J., 1994, "Correlating Defect Level to Final Test Fault Coverage for Modular Structured Designs," *IEEE Engineering Management Conference*, Vol. 1, No. 2, pp. 186-192.
10. Harry, J.M. and Schroeder, R., 2000, *The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations*, New York, Currency and Doubleday, pp. 69-154.
11. Pande, P.S., Neuman, R.P., and Cavanagh, R.R., 2000, *The Six Sigma Way, How GE Motorola and Other Top Companies are Honing Their Performance*, New York, McGraw-Hill, pp. 235-324.
12. Montgomery, D.C. and Hines, W.W., 1990, *Probability and Statistics in Engineering and Management Science*, 3<sup>rd</sup> ed., New York, John Wiley & Sons, pp. 8-17, 244-558.
13. Kenett, R.S. and Zacks, S., 1998, *Modern Industrial Statistics, Design and Control of Quality and Reliability*, New York, Duxbury Press. pp. 1-41.
14. Montgomery, D.C., 1997, *Design and Analysis of Experiments*, 4<sup>th</sup> ed., New York, John Wiley & Sons, pp. 63-353.
15. Ross, P.J., 1989, *Taguchi Techniques for Quality Engineering, Loss Function Orthogonal Experiments Parameter and Tolerance Design*, Singapore, McGraw-Hill, pp. 167-205.
16. Taguchi, G., Chowdhury, S., and Taguchi, S., 2000, *Robust Engineering, Learn How to Boost Quality While Reducing Costs & Time to Market*, New York, McGraw-Hill, pp. 16-81.