บทที่ 2

การสำรวจงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้รวบรวมผลงานวิจัยในส่วนของการดำเนินการทาง ซิกซ์ ซิกม่า และการดำเนินการทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน และในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย 2 ส่วน คือ ทฤษฎีที่เกี่ยวกับหลักการถ่ายเทความร้อน โครงสร้างและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ องค์ประกอบของท่อความร้อน กระบวนการผลิตและการประกอบท่อความร้อน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทางซิกซ์ ซิกม่า ซึ่งได้กล่าวถึงการนำวิธีการและเครื่องมือต่างๆ มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 Ang (1999) ทำการศึกษาเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งที่เกิดจากการใช้ขนาดของแพลเลทเป็นครึ่งหนึ่งจากขนาดเดิม ด้วยวิธีการทางซิกซ์ ซิกม่า เป้าหมายโดยการลดน้ำหนักของแพลเลทจากเดิม คือ 16.15 กิโลกรัม เหลือ 8 กิโลกรัมต่อแพลเลท เนื่องจากน้ำหนักทั้งหมดมีความแปรผันโดยตรงกับค่าใช้จ่ายในการขนส่ง หลังจากการดำเนินการปรับปรุง สามารถที่จะลดน้ำหนักของแพลเลทเหลือ 7 กิโลกรัม ซึ่งเมื่อคิดเป็นค่าขนส่งที่สามารถประหยัดได้เท่ากับ 124,970 ดอลลาร์สหรัฐต่อปี

2.1.2 Behara และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษาถึงการวัดและการวิเคราะห์ความพึงพอใจของลูกค้าโดยการใช้ ซิกซ์ ซิกม่า ด้วยการใช้เครื่องมือทางสถิติ ซึ่งก็คือ ซิกซ์ม่า หมายถึงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลโดยเป็นการวัดความแปรปรวนของข้อมูลส่วนใหญ่ว่ามีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยมากน้อยเพียงใด ซึ่งโดยส่วนใหญ่สำหรับกระบวนการผลิตที่มีของเสียอยู่บ้างมีการแจกแจงอย่างเป็นปกติที่อยู่ในช่วง $\pm 3\sigma$ จากค่าเฉลี่ย แต่หากต้องการให้กระบวนการผลิตไม่มีของเสียนั้น ควรให้มี $\pm 6\sigma$ ที่เป็นการมุ่งไปสู่ระดับการวัดประสิทธิภาพของซิกซ์ ซิกม่า ซึ่งได้นำแนวคิดเหล่านี้ มาประยุกต์ใช้กับกรณีที่เป็นเชิงธุรกิจในขณะที่ความพึงพอใจของลูกค้าในยุคปัจจุบันไม่ได้ต้องการเพียงค่าเป้าหมายหรือมีของเสียอยู่ที่ระดับใกล้เคียงศูนย์เท่านั้น แต่ได้มุ่งไปที่ความจงรักภักดีของลูกค้าและความสูญเสียจากการเสียลูกค้า

หากนำวิธีการซิกซ์ ซิกม่า มาประยุกต์ใช้เพื่อแข่งขันทางธุรกิจ จะทำให้ได้ผลกำไรเฉลี่ยที่สูงขึ้นรวมถึงการมีส่วนแบ่งทางการตลาดที่เพิ่มมากขึ้น จึงได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณของเสียที่ระดับ $\pm 3\sigma$ นั้น มีค่าเทียบเท่ากับจำนวนที่ลูกค้าไม่พอใจ 499 ราย และที่ระดับ $\pm 4\sigma$ นั้นมีค่าเทียบเท่ากับจำนวนที่ลูกค้าไม่พอใจ 60 ราย แต่โดยประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์มีจำนวนที่ลูกค้าไม่พอใจ 439 ราย จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพยามยามลดจำนวนที่ลูกค้าไม่พึงพอใจลงด้วยวิธีการที่ง่ายที่สุด มีขั้นตอนการทำงานที่น้อยที่สุด

การประยุกต์ใช้วิธีการของซิกซ์ ซิกม่า ที่เน้นการทำงานที่เป็นพื้นฐานแต่สามารถนำไปสู่การเทียบเคียงหรือการเป็นผู้นำในธุรกิจนั้น เนื่องจาก ซิกซ์ ซิกม่า มีตัววัดผลโดยการลดความผิดพลาด หรือการที่มีจำนวนลูกค้าไม่พึงพอใจลดลง ซึ่งไม่ได้หมายถึงแค่ลูกค้าภายนอกองค์กรแต่หากยังรวมถึงลูกค้าภายในองค์กรด้วยที่สามารถเป็นตัวสะท้อนถึงความพึงพอใจของลูกค้าส่งผลให้เกิดการปรับปรุงอย่างไม่หยุดยั้ง

2.1.3 Coronado และ Antony (2002) ได้ทำการศึกษาถึง ปัจจัยที่นำไปสู่ความสำเร็จในการนำ ซิกซ์ ซิกม่า ประยุกต์ใช้ขององค์กรต่างๆ เพื่อใช้ในการปรับปรุงกลยุทธ์ทางธุรกิจ โดยการเพิ่มกำไรจากการขจัดความแปรปรวนและลดของเสียในกระบวนการรวมถึงการลดค่าใช้จ่ายทางคุณภาพทราบถึงความต้องการและความคาดหวังของลูกค้าโดยการนำเทคนิคและเครื่องมือทางสถิติอย่างเช่น Motorola ได้ใช้จ่ายในการให้ความรู้และอบรมพนักงาน $170 ล้าน แต่สามารถที่จะประหยัดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากค่าใช้จ่ายทางคุณภาพได้ถึง $ 2.2 พันล้าน ปัจจัยที่นำไปสู่ความสำเร็จ (CSFs) ได้แก่

1. การประกาศเจตนารมณ์และความมุ่งมั่นของผู้บริหารระดับสูง เช่น ในช่วงแรกผู้บริหารระดับสูงของ Allied Signal ทำการลดเป้าหมายทางการเงินลงเพื่อช่วยสนับสนุนโครงการในเบื้องต้นรวมถึงผู้บริหารระดับสูงของ GE ต้องทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผังองค์การและเปลี่ยนทัศนคติของพนักงาน

2. การเปลี่ยนแปลงวัฒนธรรมองค์การซึ่งเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของพนักงานโดยการขจัดความกลัวของพนักงานที่จะซ่อนเร้นข้อผิดพลาด หรือ การต่อต้านการเปลี่ยนแปลงให้ยอมรับการปรับปรุงพัฒนาด้วยการเพิ่มแรงจูงใจ การให้ความรู้

3. การติดต่อสื่อสาร เช่น โซนี่ อิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้ความสำคัญกับการแสดงข้อมูลต่างๆ เพื่อให้ทั้งองค์การหลีกเลี่ยงและเรียนรู้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอย่างทั่วถึงพร้อมกัน

4. การจัดโครงสร้างภายในองค์การ ซิติแบงค์ เน้นการทำงานเป็นทีม การทำงานข้ามสายงาน สามารถวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาสำคัญได้ถึง 73 เปอร์เซ็นต์

5. การฝึกอบรม โดยเน้น Belt System เพื่อช่วยทำให้เกิดการทำงานตามหลักการของซิกซ์ ซิกม่า ทั่วทั้งองค์การ

6. การเชื่อมโยง ซิกซ์ ซิกม่า สู่กลยุทธ์ทางธุรกิจ เช่น บริษัท ฟอร์ดมอเตอร์ ได้เปลี่ยนกลยุทธ์จาก TQM ที่เน้นการแก้ไขปัญหาแต่ไม่ได้พิจารณาทางค่าใช้จ่ายแต่ ซิกซ์ ซิกม่า มีการวิเคราะห์ถึงต้นทุน-กำไร ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึง $200,00– 250,000

7. การเชื่อมโยง ซิกซ์ ซิกม่า สู่ลูกค้า เพื่อช่วยลดช่องว่างระหว่างความคาดหวังของลูกค้ากับความสามารถของการทำงานที่ทำได้จริง

8. การเชื่อมโยง ซิกซ์ ซิกม่า สู่ผู้ส่งมอบ ควรสร้างความสัมพันธ์อันดีและมีผู้ส่งมอบน้อยรายเพื่อที่จะลดความแปรปรวนต่างๆ

9. การใช้เครื่องมือและเทคนิคต่างๆ ตามหลักสถิติ เช่น เครื่องมือคุณภาพ การทดสอบสมมติฐาน และอื่นๆ

10. การเลือกโครงการตามความสำคัญพิจารณาจากการแข่งขันทางธุรกิจ การได้เปรียบทางธุรกิจ รอบเวลาของกระบวนการ ผลผลิตโดยรวม เป็นต้น

2.1.4 Ferrin และคณะ (2002) ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ซิกซ์ ซิกม่า และการจำลองแบบปัญหา โดยพื้นฐานของซิกซ์ ซิกม่า จะประกอบไปด้วย เครื่องมือพื้นฐานทางสถิติหลักการของความผันแปร การนำสถิติมาควบคุมกระบวนการ ขั้นตอนต่าง ๆ ในการดำเนินการ (DMAIC) และ DFSS

กุญแจสำคัญของ ซิกซ์ ซิกม่า คือ

- ความสำคัญของความต้องการของลูกค้า
- ปริมาณของเสีย
- ความสามารถของกระบวนการ
- ความผันแปร
- กระบวนการที่มีความเสถียร

การนำเครื่องมือพื้นฐานทางสถิติมาใช้ในขั้นตอนของการดำเนินการ (DMAIC) ต่างๆ ดังนี้

- แผนภาพกระบวนการ
- ใบตรวจสอบ
- แผนภาพพาเรโต
- แผนผังสาเหตุและผล
- แผนผังการกระจาย
- ฮีสโตแกรม
- การนำสถิติมาควบคุมกระบวนการ

DFSS ได้ประกอบไปด้วยเครื่องมือ ดังต่อไปนี้

- แผนผังเชื่อมโยง
- การกระจายหน้าที่การทำงานเชิงคุณภาพ
- การออกแบบการทดลอง
- แผนผังต้นไม้
- แผนภาพความสำคัญของกิจกรรม
- แผนผังการจัดลำดับความสำคัญ
- การวิเคราะห์ลักษณะและข้อบกพร่อง
- การประเมินผลสำเร็จขององค์กร
- การวิเคราะห์ความเสี่ยง
- การจำลองแบบปัญหา

ความสำคัญที่นำการจำลองแบบปัญหาเข้ามาประยุกต์ใช้กับ ซิกซ์ ซิกม่า

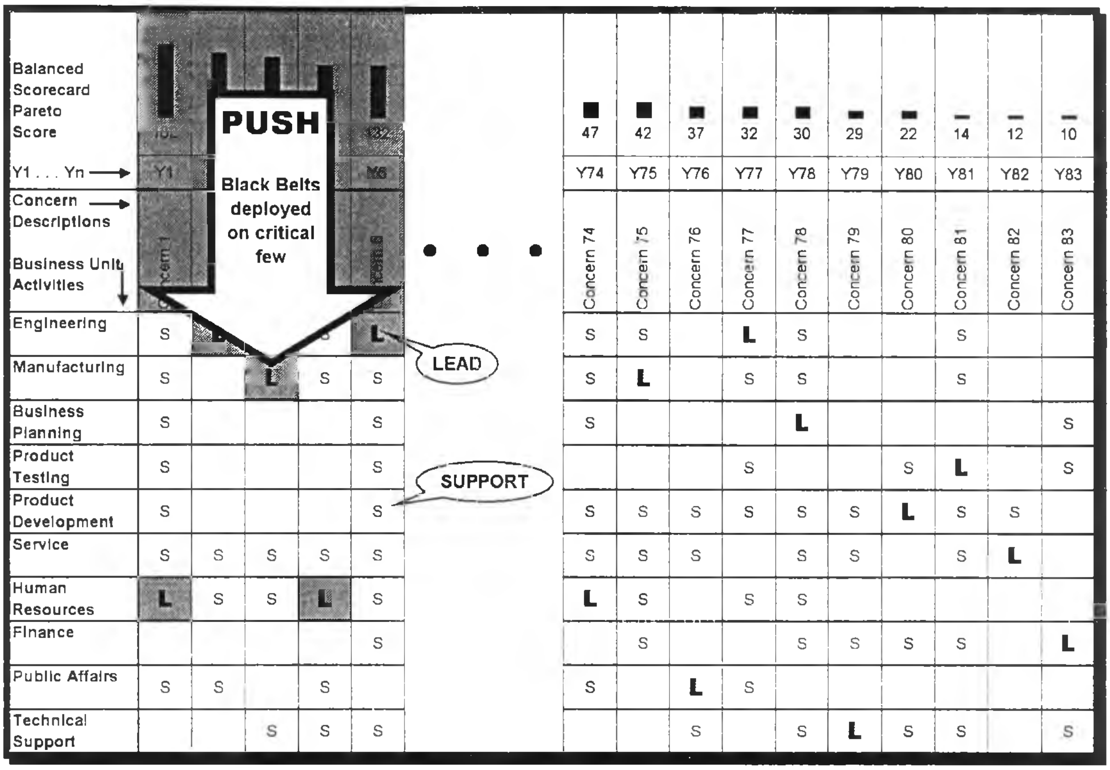
เนื่องจากในการโครงการบางประเภทที่หากดำเนินการต่างๆ ผิดพลาด แม้เพียงเล็กน้อยก็อาจทำให้เกิดความสูญเสียทั้งในด้านค่าใช้จ่ายและเวลาอย่างมาก จึงได้มีการนำการจำลองแบบปัญหามาเพื่อทดสอบว่าวิธีการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ มีความเป็นไปได้ก่อนที่จะทำการปฏิบัติการแก้ไขปัญหาจริง รวมถึงการได้มาซึ่งวิธีการที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีกว่าและหากผลจากการจำลองแบบปัญหามีแนวโน้มที่จะไม่ประสบความสำเร็จก็ได้ ซึ่งเป็นแนวทางในการเปลี่ยนแปลงแนวคิดหรือวิธีการในการปรับปรุงใหม่

2.1.5 Goh (1999) ได้ทำการศึกษาถึง สิ่งที่เกี่ยวข้องกับสถิติวิศวกรรมคุณภาพ (Statistical Quality Engineering) โดยที่สถิติวิศวกรรมคุณภาพ หมายถึง การประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดเก็บฐานข้อมูลเพื่อปรับปรุงและแก้ไขให้ความสามารถของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ดีขึ้น เนื่องจากข้อมูลในอดีตสามารถอธิบายถึงสถานะในปัจจุบันและแสดงถึงเป้าหมายในอนาคตได้ จุดประสงค์หลักของการนำสถิติมาควบคุมความสามารถของกระบวนการด้วยการพิจารณาจากแผนภาพ ซึ่งหากพลอตกราฟแล้วอยู่ในช่วงการควบคุมก็สามารถดำเนินการตามกระบวนการต่อไป แต่หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการใดๆ เลยจะไม่เกิดการพัฒนาความสามารถของกระบวนการที่ดีขึ้นด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและผลลัพธ์ของกระบวนการที่ได้จากการออกแบบการทดลองในขั้นแรกเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของกระบวนการ จากนั้นทำการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบเพื่อนำไปสู่การปรับตั้งค่าปัจจัยที่มีความสำคัญต่างๆ ตามความเหมาะสมทั้งในด้านคุณภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งนับได้ว่าสถิติวิศวกรรมคุณภาพนั้นอยู่ในส่วนของขั้นตอนการปรับปรุงของวิธีการซิกซ์ ซิกม่า

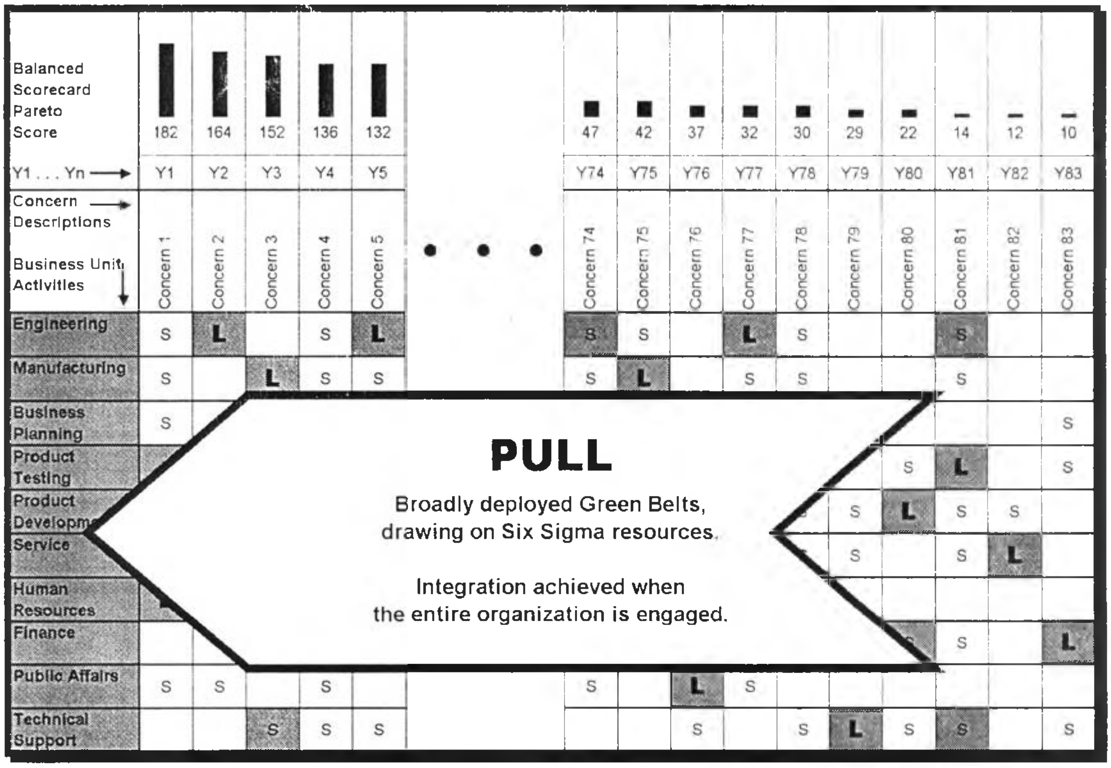
2.1.6 Johns และคณะ (2003) ได้นำวิธีการต่างๆ ของ ซิกซ์ ซิกม่า มารวบรวมให้เข้ากันโดยมุ่งเน้นในขั้นตอนของการนิยามและวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา ซึ่งได้นำหลักการดึงและผลักมาใช้เป็นกลยุทธ์ทางคุณภาพ ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2

หลักการผลัก เป็นผลมาจากการบริหารจากบนลงล่างเป็นการกำหนดกลยุทธ์ในการจัดการต่างๆ เพื่อให้การดำเนินการต่างๆ ของแต่ละโครงการมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ใช้ทรัพยากรต่างๆ อย่างคุ้มค่ามากที่สุด

หลักการดึง หมายถึง การมุ่งเน้นคุณภาพเพื่อให้บุคลากรภายในองค์กรตระหนักถึงเป้าหมายและผลตอบกลับจากลูกค้าภายใต้ความรับผิดชอบของทุกคนในองค์กรโดยการนำวิธีการและเครื่องมือต่างๆ มาประยุกต์ใช้แก้ไขปัญหาประจำวัน

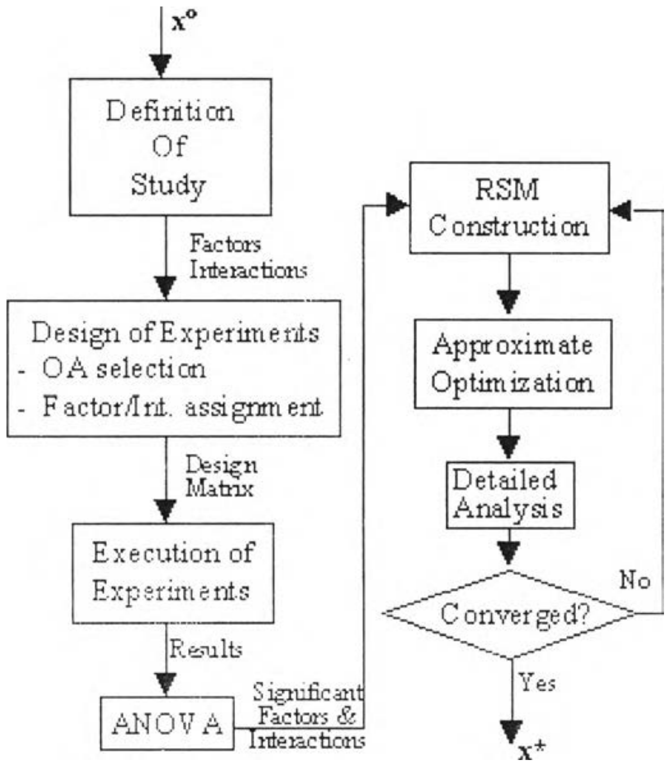


*รูปที่ **2.1** หลักการดึง*



*รูปที่ **2.2** หลักการผลัก*

2.1.7 Kodiyalam และคณะ (2003) ศึกษาถึงการออกแบบการทดลองโดยใช้พื้นผิวผลตอบ (RSM) เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาว่าปัจจัยหรือตัวแปรที่มากกว่าหนึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ ซึ่งการออกแบบการทดลองนั้นใช้ตารางการออกแบบ Orthogonal Arrays (OA) เป้าหมายของการวิจัยนี้ เพื่อแสดงวิธีการที่นำไปสู่ค่าที่เหมาะสมและถูกต้องมากที่สุดจากการวิธีการพื้นผิวผลตอบเพื่อให้ได้นัยสำคัญที่เป็นเทอมกำลังสอง เนื่องจากที่ระดับ 2 ปัจจัยจะครอบคลุมขอบเขตของค่าที่เหมาะสมดังรูปที่ 2.3



*รูปที่ **2.3** แผนภาพกระบวนการของการออกแบบการทดลอง*
*ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ **(RSM)***

การนำไปประยุกต์ใช้ จากรูปที่ 2.3

- เพื่อศึกษาถึง ปัจจัย ระดับของปัจจัย อันตรกิริยา และผลตอบสนอง
- ทำการออกแบบการทดลอง
- วิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อพิจารณาหาปัจจัยหลัก อันตรกิริยา เพื่อนำไปสู่การออกแบบที่เหมาะสม
- วิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ (RSM) โดยใช้การออกแบบของ Orthogonal Arrays (OA)
- แสดงผลของการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่ได้จากวิธีการของพื้นผิวผลตอบ (RSM)
- แสดงรายละเอียดการวิเคราะห์และการประมาณค่าการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมที่สุด
- ถ้าผลการวิเคราะห์ยังไม่ดีพอควรทำการวิเคราะห์ด้วยพื้นผิวผลตอบ (RSM) ใหม่ โดยเปลี่ยนจุดในการออกแบบและทำการวิเคราะห์ซ้ำอีกไปเรื่อยๆจนกระทั่งได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

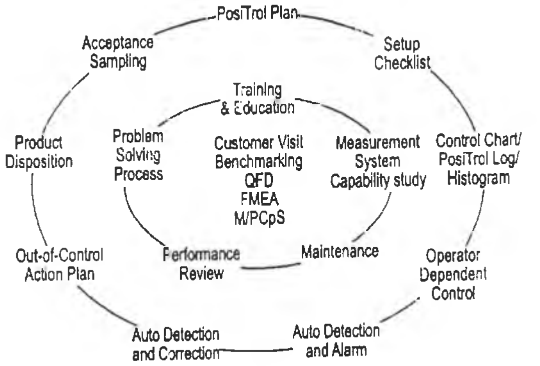
2.1.8 Kwork และ Tummala (1996) ทำการศึกษาเรื่องการควบคุมคุณภาพ และปรับปรุงระบบตามหลักการควบคุมคุณภาพโดยรวม (Total control methodology, TCM) ได้แบ่งออกเป็นระดับที่ครอบคลุมถึงการป้องกันการปรับปรุงแก้ไข การสืบค้นปัญหาต่าง ๆ ดังนี้

ระดับที่ 1 On-line quality control สามารถใช้งานง่ายในขั้นตอนการผลิตระดับควบคุมกระบวน และ คุณภาพผลิตภัณฑ์ ซึ่งประกอบด้วย รายการปรับตั้งเครื่องมือ ผังควบคุม ผังฮีสโตแกรม สัญญาณเตือนภัย การควบคุมแก้ไขสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้น การจัดวางผลิตภัณฑ์ การยอมรับสิ่งตัวอย่าง

ระดับที่ 2 Off-line quality support and reviews เป็นผลกระทบระยะยาวไม่ได้เกิดขึ้นโดยตรงทันที ประกอบด้วย การให้ความรู้ และ การฝึกอบรม การศึกษาระบบการวัด การบำรุงรักษา การตรวจติดตาม เทคนิคการแก้ไข ปัญหาต่างๆ

ระดับที่ 3 Driving force for quality improvement เป็นเครื่องมือสำหรับการวางแผนปรับปรุง เพื่อระบุหาสาเหตุและการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ ประกอบด้วย การเข้าถึงความต้องการของลูกค้า การเทียบเคียงคู่แข่ง การกระจายหน้าที่การทำงานเชิงคุณภาพ (QFD) การวิเคราะห์รูปแบบของการเสียและผลกระทบ (FMEA) การศึกษาความสามารถของเครื่องมือและกระบวนการ

การจำแนกแบบนี้ ทำให้สามารถเข้าใจโครงร่างได้ง่าย นำไปใช้งานได้จริง มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะต่าง ๆ ให้เหมาะสมอย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ได้นำเทคนิคมาใช้มากเกินไปหรือเกิดการขัดแย้งกันแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 *ระดับการควบคุมคุณภาพ*

2.1.9 Ress (2002) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ที่เหมือนกันระหว่าง ซิกซ์ ซิกม่า กับการบริหารโครงการ โดยได้กล่าวถึง ความเป็นมาของซิกซ์ ซิกม่า และประโยชน์ที่ได้รับจากการนำซิกซ์ ซิกม่า มาประยุกต์ใช้ ซึ่งได้เปรียบเทียบและยกตัวอย่างลักษณะขององค์กรธุรกิจตั้งแต่ภาคการผลิตไปจนถึงด้านการตลาดและบริษัทที่เกี่ยวกับเทคโนโลยี ซึ่งในรายละเอียดที่ได้ทำการศึกษานั้นจะกล่าวเปรียบเทียบ บ่งชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างทั้ง 5 ขั้นตอนของการดำเนินงานของซิกซ์ ซิกม่า ที่มีความสอดคล้องกับ PMI PMBOK (Project Management Body of Knowledge) โดยที่กลุ่มของ PMBOK เป็นกระบวนการของการวางแผนคุณภาพ การประกันคุณภาพ และการควบคุมคุณภาพ เห็นได้ชัดว่า เป็นส่วนสำคัญของการบริหารคุณภาพ ซึ่งในส่วนของ PMBOK นี้เอง จะเป็นโครงร่างของมาตรฐานคุณภาพระดับสูง ซึ่งจะถูกจำแนกรายละเอียดในการดำเนินการด้วย ซิกซ์ ซิกม่า กล่าวคือ ทั้งซิกซ์ ซิกม่า และ PMBOK มีลักษณะของความสัมพันธ์และรายละเอียดที่สอดคล้องและเกี่ยวเนื่องกัน

2.1.10 Yam (1999) ทำการศึกษาเพื่อลดของเสียของกระบวนการ การหยอดกาวที่ Flip-Chip ซึ่งเป็นกระบวนการเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนของ Flip-Chip โดยปัญหาที่เกิดขึ้นคือ หากทำการหยอดกาวปริมาณมากเกินไป จะทำให้โอกาสที่กาวจะไปเลอะพื้นที่สำคัญบริเวณตัวงาน เช่น Tooling Hole มีมากขึ้น แต่ถ้าปริมาณกาวน้อยเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อนั้นน้อยลง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญสองประการที่ทำให้เกิดของเสียขึ้น ผลจากการปรับปรุงกระบวนการหยอดกาวด้วยวิธีทาง ซิกซ์ ซิกม่า สามารถที่จะลดของเสียจาก 1,800 DPPM เหลือประมาณ 550 DPPM และทำให้บริษัทซีเกทสามารถที่จะลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากของเสียได้ 21,246 ดอลลาร์สหรัฐ

2.1.11 ชาญชัย บวรโชคชัย (2545) ทำการลดปริมาณของเสียที่เกิดจากค่า Pitch Static Attitude (PSA) ของแขนจับหัวอ่านโดยนำวิธีการปรับปรุงกระบวนการผลิตตามแนวทางซิกซ์ ซิกม่า มาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแปรปรวนของ PSA และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยดังกล่าวในการผลิตที่จะทำให้ค่าความแปรปรวนลดลงได้ ซึ่งก่อนการปรับปรุงกระบวนการผลิตมีปริมาณของเสียเท่ากับ 4,456 DPPM จากข้อมูลหลังการปรับปรุงกระบวนการพบว่า มีปริมาณของของเสียเกิดขึ้นประมาณ 997 DPPM ซึ่งคิดเป็น 77.63 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนของเสียที่ลดได้ก่อนการปรับปรุงกระบวนการผลิต และสามารถที่จะลดความสูญเสียได้เป็นจำนวนเงิน 2,750,580 บาท โดยประมาณการจากปริมาณการขายที่พยากรณ์ไว้ของบริษัทจากเดือนกรกฎาคม 2545 ถึงเดือนมีนาคม 2546

2.1.12 อัชริยา เก็งวินิจ (2544) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยของมุมของแขนจับยึดหัวอ่านเขียนและเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยมุมของแขนจับยึดหัวอ่านเขียน โดยวัดเป็นค่า C_{pk} ซึ่งมีค่าเริ่มแรกเท่ากับ 0.83 ซึ่งในขั้นแรกมีค่าปัจจัยที่มีอิทธิพลจากการวิเคราะห์ข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต 7 ปัจจัย จากนั้นใช้หลักการทดสอบสมมติฐานเหลือปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อมุม 4 ปัจจัย แล้วนำไปทำการทดลองแบบ 2^k พบว่าทั้ง 4 ปัจจัยรวมถึงเทอมของปฏิสัมพันธ์มีผลเมื่อทำการทดลองเปลี่ยนตามค่าของปัจจัยที่เหมาะสม พบว่าค่า C_{pk} อยู่ที่ 1.1 โดยเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.27

2.1.13 วีรพจน์ เหล่าโพธิวิหาร (2544) ทำการศึกษา ทฤษฎี ปรัชญา และขั้นตอนในการนำระบบ ซิกซ์ ซิกม่า มาใช้ปรับปรุงผลิตภาพรวมถึงกำหนดแนวทางการแก้ไขปรับปรุงสำหรับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ โดยที่บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด นำไปใช้ประกอบด้วยแผนการดำเนินงาน กระบวนการ การจัดโครงสร้างองค์กร การอบรม และเส้นทางของระบบ ซิกซ์ ซิกม่า ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต้นทุนที่ประหยัดได้ประมาณ 353,300 เหรียญสหรัฐ ซึ่งถือว่าระหยัดได้เกินว่าเป้าที่ตั้งไว้

2.1.14 พิเชษฐ ศรียวรยาตร (2543) ศึกษาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับความโค้งของกระจกรถยนต์ เพื่อสร้างความหลากหลายสำหรับเตา T-91 ซึ่งในการเพิ่มความสามารถในการปรับความโค้ง เพื่อใช้ในการผลิตทดแทนเตาอบ T-51 และ T-81 ซึ่งมีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่า โดยขั้นตอนในการศึกษา ขั้นแรกจะเป็นการกำหนดปัจจัยที่ใช้ ได้แก่ อุณหภูมิของกระจก แรงดันลมบนล่างและสีของกระจก จากนั้นจึงทำการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบการทดลอง

ภายหลังการทดลอง พบว่า เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของค่าแรงดันลมบนและล่างให้อยู่ในช่วง 800-1,200 มม.น้ำ จะทำให้กระจกทดสอบคุณภาพแตกไม่ผ่านตามมาตรฐาน และยังทำการวิเคราะห์ต้นทุนเปรียบเทียบระหว่างเตา T-91 กับ T-81 พบว่า สามารถลดต้นทุนการผลิตเป็นจำนวน 615,896 บาท

2.1.15 นวลพรรณ ใจงาม (2543) ทำการวิจัยเกี่ยวกับการลดของเสียที่เกิดจากการถ่ายเทกระแสไฟฟ้าสถิตในกระบวนการประกอบหัวอ่านโดยใช้แนวทางซิกซ์ ซิกม่า โดยหลังจากการดำเนินการปรับปรุงกระบวนการผลิต พบว่า อัตราส่วนข้อบกพร่องจากการถ่ายเทกระแสไฟฟ้าสถิตย์ ลดลงจาก 31,600 DPPM เป็น 7,890 DPPM หรือเมื่อเทียบในระดับ σ สามารถปรับปรุงจากระดับ 3.36 เป็น 3.91 และสามารถลดค่าความเสียหายและได้รับผลประโยชน์ตอบแทนจากการปรับปรุงคุณภาพ 163,999 ดอลลาร์สหรัฐภายในระยะเวลาสองไตรมาส

2.1.16 ทรงพล พิเชษฐวัฒนา (2542) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงดึงระหว่าง Slider และ Flexure ของหัวอ่านเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ และเสนอเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มคุณภาพของแรงดึงของหัวอ่านเขียนข้อมูล การศึกษาเริ่มจากการอาศัยความรู้ความชำนาญจากเอกสารจำนวนมากที่เกี่ยวข้องเพื่อระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงดึงโดยอาศัยแผนภาพแสดงเหตุและผลในการวิเคราะห์ ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนผสมของสารยึดเหนี่ยว อุณหภูมิการอบ เวลาในการอบ และชนิดของน้ำหนักกด เมื่อได้กำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องแล้ว จึงทำการทดลองพบว่ามีปัจจัยเพียง 3 ชนิดที่มีผลต่อแรงดึง ได้แก่ อัตราส่วนของสารยึดเหนี่ยว อุณหภูมิการอบ และเวลาในการอบ จากนั้นจึงทำการทดลองอีกครั้งโดยเพิ่มจำนวนของการทำซ้ำ (Replication) ของแต่ละปัจจัย เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดโดยที่ไม่ขัดต่อเงื่อนไข

ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับหัวอ่านเขียน ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้หัวอ่านเขียนมีค่าแรงดึงที่สูงสุด คือ อัตราส่วนผสม 4:1 อุณหภูมิการอบที่ 300 องศาฟาเรนไฮด์ และเวลาในการอบ 16 นาที

2.1.17 สุรพล สุรบรรเจิดพร (2542) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมดีบุก-ตะกั่วบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลอง เพื่อลดจุดบกพร่องของรอยเชื่อม และพัฒนากระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการทดลองนี้ใช้หลักการของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัย 4 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วสายพาน อุณหภูมิการอบความร้อน ค่าถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ และลักษณะการไหลของโลหะผสมโซลเดอร์ โดยมุ่งเน้นที่การตรวจสอบลักษณะจุดบกพร่องของรอยเชื่อมประเภท Excessive Solder Insufficient Solder และ Bridging

ภายหลังการศึกษา พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนจุดบกพร่อง คือ ลักษณะการไหลของโลหะผสมโซลเดอร์ และความเร็วของสายพาน ส่วนปัจจัยทางด้านอุณหภูมิในส่วนของการอบความร้อนและค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ มีอิทธิพลค่อนข้างน้อย ซึ่งภายหลังการศึกษาได้ทำการปรับลักษณะการไหลของโลหะผสมโซลเดอร์ให้มีการเคลื่อนที่ทั้ง 2 ด้านและกำหนดความเร็วของสายพานที่ 108 ซม./นาที จะสามารถลดจำนวนจุดบกพร่องได้

2.1.18 พิศิษฐ์ เจริญกิจวิวัฒน์ (2541) ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของสายเครื่องควบคุมไฟฟ้า เพื่อที่จะบรรลุความต้องการของลูกค้าในโรงงานประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยเน้นการปรับปรุงในด้านกิจกรรมโรงงานโดยการใช้เทคนิค FMEA มาใช้ในการป้องกันลดและกำจัดข้อผิดพลาดที่เคยเกิดขึ้นและข้อผิดพลาดที่มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นสำหรับสินค้าในปัจจุบัน เริ่มจากการทำพาเรโตคำร้องเรียนจากลูกค้า เพื่อนำมาเป็นเกณฑ์คุณภาพโดยพิจารณาด้านตัวเงินและการเกิดขึ้นของเกณฑ์คุณภาพ การปรับปรุงแผนการสุ่มตัวอย่างได้ถูกนำมาปรับปรุงระหว่างการดำเนินการใช้ FMEA พบว่าคำร้องเรียนของลูกค้าลดลงถึงร้อยละ 43.76

2.1.19 บุญสม ประเสริฐอัครกุล (2539) ทำการศึกษาหาวิธีการที่เหมาะสมในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติของโรงงานตัวอย่าง จากการศึกษาพบว่า บางจุดงานมีการใช้การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติอย่างไม่ถูกต้อง และ ไม่เหมาะสมโดยวัดจากความสามารถของเครื่องจักรและได้ทำการวัดค่า C_p และวัดความสามารถของกระบวนการผลิต C_{pk} เพื่อออกแบบวิธีการควบคุมกระบวนการผลิตเชิงสถิติที่เหมาะสม

จากผลการวิจัยได้ปรับปรุงวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ 2 ลักษณะ คือ การใช้แผนภูมิควบคุมเฉลี่ยและพิสัยการใช้แผนการสุ่มตัวอย่างแบบต่อเนื่องและได้ประเมินผลลัพธ์

จากค่า C_p และ C_{pk} ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ค่าความเที่ยงตรงเปอร์เซ็นต์ของเสียของชิ้นงานที่เกิดขึ้นและจำนวนการผลิตที่เกิดขึ้น พบว่า ปริมาณการผลิตลดลงก่อนที่มีการปรับปรุงและค่าความเที่ยงตรงในการตรวจสอบของจุดตรวจสอบเพิ่มขึ้นจากก่อนการปรับปรุง

2.1.20 ปรีชา กอบเกื้อชัยพงษ์ (2533) งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างและทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งพบว่า ท่อความร้อนจะไม่สามารถทำงานได้เลย ถ้าเกิดการรั่วขึ้นรวมถึงการเกิดก๊าซซึ่งไม่ควบแน่นทำให้ท่อความร้อนจะไม่สามารถทำงานได้ หรือมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากก๊าซที่อยู่ในช่วงการควบแน่นไปขีดขวางการควบแน่นของไอของไหลใช้งาน นอกจากนี้ การผุกร่อนของวัสดุท่อแม้เพียงเล็กน้อย ก็ทำให้คุณสมบัติของผิวท่อภายในเปลี่ยนไป ทำให้มุมของการเปียกผิวระหว่างของไหลใช้งานกับผิวท่อเปลี่ยนไป อีกทั้งยังอาจเกิดเศษอนุภาคของของแข็งขึ้นกีดขวางการไหลกลับของของไหลใช้งาน หรืออาจเกิดก๊าซซึ่งไม่ควบแน่นขึ้น ผลก็คือทำให้สมรรถนะของท่อความร้อนต่ำลง

2.1.21 พิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์ (2529) งานวิจัยนี้เน้นการศึกษาและการสร้างท่อความร้อนแบบไร้วิกค์ ซึ่งมีข้อดีคือ สร้างง่าย ต้นทุนการผลิตต่ำ คุณภาพการผลิตมีลักษณะค่อนข้างแน่นอนกว่าท่อความร้อนแบบธรรมดา ซึ่งขึ้นกับความแนบสนิทในการใส่ของวิกค์ ทำให้การทำนายฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux) แน่นอนกว่าความต้านการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อก็น้อยกว่า เนื่องจากไม่มีวิกค์และฟองของไอในวิกค์ซึ่งเป็นตัวต้านทานการถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิวิกฤติ

2.2 การสำรวจทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ได้ทำการรวบรวมทฤษฎีต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ทฤษฎีที่เกี่ยวกับหลักการถ่ายเทความร้อน โครงสร้างและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ องค์ประกอบของท่อความร้อน กระบวนการผลิตและการประกอบท่อความร้อน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ ซิกซ์ ซิกม่า

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับหลักการถ่ายเทความร้อน

2.2.1.1 ความสำคัญของท่อความร้อน (Heat Pipe)

เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากแหล่งพลังงาน ได้เพิ่มขึ้นอย่างมากเพื่อไม่ให้เกิดการขาดแคลนพลังงาน จึงควรนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่หรือการนำความร้อนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ซึ่งอุปกรณ์ท่อความร้อน (Heat Pipe) เป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการส่งถ่ายความร้อนสูงซึ่งท่อความร้อนแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ท่อความร้อนแบบธรรมดา หรือ กาลักความร้อน (Thermosyphon) และท่อความร้อนแบบพิเศษ

2.2.1.2 โครงสร้างและเทคโนโลยีพื้นฐาน

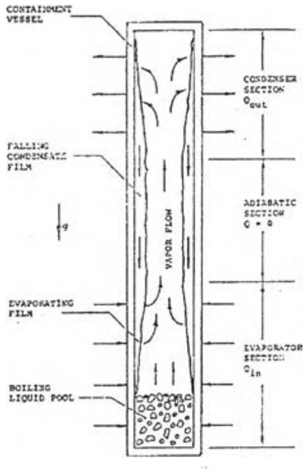
ท่อความร้อนที่ใช้กันอยู่ทั่วไปนั้นโดยมากทำจากท่อโลหะและการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนแบบธรรมดาที่ภาวะความร้อนสูงๆ นั้นจะถูกจำกัดโดยแรงดันไอ (Vapor Pressure) และขีดจำกัดที่เกี่ยวข้องกับค่าสมรรถนะของท่อความร้อน เช่น ขีดจำกัดคาปิลลารี่ (Capillary Limit) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุพรุน (Wick) ไม่สามารถนำเอาของเหลวที่เกิดจากการกลั่นตัวกลับมายังส่วนทำระเหยได้ ขีดจำกัดการพา (Entrainment Limit) เป็นผลมาจากการไหลที่สวนทางกัน (Conunter Current Flow) ของไอจากส่วนทำระเหยกับของเหลวที่กลั่นตัวจากท่อความร้อนส่วนควบแน่น และยังมีอีกปัญหาหนึ่ง คือ การประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ที่ต้องการการระบายความร้อนจำนวนมากๆ แต่มีพื้นที่ในการระบายความร้อนที่จำกัด จึงจำเป็นต้องใช้ท่อที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งในที่นี้ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์สื่อสารการนำไปใช้งาน

2.2.1.3 หลักการและทฤษฎี

หลักการทำงานคือ ความร้อนจากส่วนทำระเหยจะทำให้สารทำงานซึ่งมีสภาวะเป็นของเหลวอิ่มตัวเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ และลอยขึ้นสู่ด้านบนไปยังส่วนควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าเกิดการควบแน่นและไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วง เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานมีค่าสูงมาก ดังนั้น สารทำงานจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่งได้ โดยที่อุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

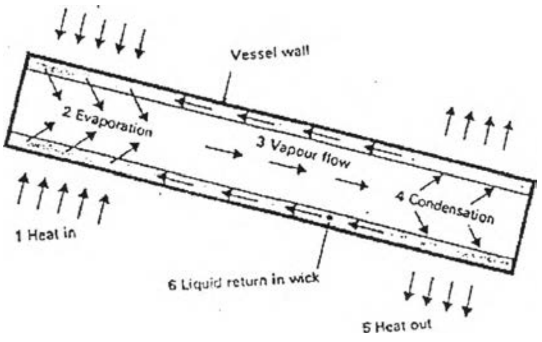
ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของท่อนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ขนาดของท่อ ลักษณะการติดตั้งท่อ ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งความเย็น

ท่อความร้อนประกอบด้วยท่อปิดผนึกที่ภายในบรรจุวิกค์ (Wick) ของไหลใช้งาน (Working Fluid) และไอของของไหลใช้งานเท่านั้นที่ช่วงการระเหยของท่อความร้อนจะถูกถ่ายเทจากแหล่งให้ความร้อนผ่านผนังของท่อไปยังวิกค์เพื่อระเหยของเหลวใช้งาน ไอที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ตามท่อไปยังช่วงของการควบแน่น ช่วงกั้นกลางระหว่างช่วงของการระเหยกับช่วงของการควบแน่นของท่อเป็นช่วงที่ไม่ได้รับความร้อนหรือคายความร้อนที่ช่วงของการควบแน่น ไอจะควบแน่นและความร้อนแฝงของการควบแน่นจะถ่ายเทออกจากท่อของเหลวจากการควบแน่นจะไหลกลับไปยังช่วงของการระเหยโดยแรงท่อรูเข็ม (Capillary Action) ของวิกค์ซึ่งมีรูพรุนเล็กๆ ดังรูปที่ 2.5



***รูปที่ 2.5** หลักการทำงานของกาลักความร้อน (เทอร์โมไซฟอน)*

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลร้อน (Hot Fluid) กับของไหลเย็น (Cold Fluid) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่รู้จักและใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เนื่องจาก ท่อความร้อนมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้สูง จึงได้มีการนำท่อความร้อนมาประกอบเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเรียกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน (Heat Pipe Heat Exchanger) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน

2.2.1.4 ข้อดีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน คือ

1. สามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าอุณหภูมิของของไหลที่แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นแตกต่างกันไม่มากนัก จึงมีการนำมาใช้ในการเก็บกลับความร้อนทิ้งซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่นทำได้ดีเท่า
2. ไม่มีส่วนเคลื่อนไหว ทำให้เครื่องไม่เกิดการสึกหรอง่าย
3. มีแผ่นกั้นกลางทำให้ของไหลไม่เกิดการไหลปนกัน
4. สามารถออกแบบเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่ายและการบำรุงรักษาก็ง่าย

2.2.1.5 ข้อจำกัดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน คือ

ข้อจำกัดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนที่สำคัญ คือ ช่วงอุณหภูมิในการทำงานจะไม่กว้างและถูกจำกัดโดยประเภทของของไหลใช้งานในท่อความร้อนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนมีใช้งานมาไม่น้อยกว่าสิบปีมาแล้วโดยเริ่มต้นและพัฒนาการใช้งานใน 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

1. เก็บกลับความร้อนจากระบบปรับอากาศซึ่งเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิที่แตกต่างกันไม่มากนัก
2. เก็บกลับความร้อนจากก๊าซของกระบวนการต่างๆ (เช่น สันดาปอบแห้ง) มาอุ่นอากาศใหม่ที่จะนำมาใช้
3. ระบายความร้อนจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

2.2.1.6 ส่วนประกอบของท่อความร้อน

1. ท่อ (Envelope) ต้องระวังไม่ให้เกิดการเสียรูป รอยเชื่อมหมวกปิดท่อจะไม่ทนทานและเกิดรูรั่วได้ง่าย
2. วิกค์ (Wick) หรือวัสดุพรุนต้องใช้ความหนาให้เหมาะสมตรงตามอัตราการถ่ายเทความร้อนในส่วนทำระเหยที่ต้องการ
3. หมวกปิดท่อ (End Cap) หมวกปิดท่อและตัวท่อต้องอยู่ในแนวตรงรอยเชื่อมต้องแข็งแรง ไม่มีรอยรั่วซึม ความหนาของรอยเชื่อมต้องมีขนาดใกล้เคียงกับความหนาของผนังท่อและรอยเชื่อมควรอยู่ระหว่างหมวกปิดท่อและตัวท่อเท่าๆ กัน
4. ท่อเติม (Fill Tube) ใช้เป็นทางดึงหรือไล่อากาศออกจากท่อความร้อนและเป็นทางเติมของไหลใช้งานเข้าท่อ
5. ของไหลทำงาน (Working Fluid) ต้องมีปริมาณมากพอและมีความบริสุทธิ์สูง

2.2.1.7 ส่วนประกอบพื้นฐาน 3 อย่างที่สำคัญของท่อความร้อน คือ

1. ของไหลทำงาน

การเลือกของไหลทำงานที่เหมาะสม คือ ช่วงอุณหภูมิไอที่ใช้ทำงาน และการพิจารณาของไหลทำงานที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้งานควรพิจารณาตามหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

- การเข้ากันได้กับวัสดุพรุนและผนังท่อ
- เสถียรภาพทางความร้อนที่ดี
- สามารถเปียกได้กับวัสดุพรุนและผนังท่อ
- ความดันไอจะต้องไม่สูงหรือต่ำเกินไปในช่วงอุณหภูมิที่ปฏิบัติการนั้น
- มีความร้อนแฝงสูง
- มีความนำความร้อนสูง
- มีความหนืดในสภาพของเหลวและไอต่ำ
- แรงตึงผิวสูง
- มีจุดเทหรือจุดเยือกแข็งที่ยอมรับได้

ปัญหาที่สำคัญของของไหลทำงาน คือ การเปลี่ยนแปลงสภาพเมื่อเจอความร้อน จึงต้องการค่าแรงตึงผิวที่สูงเพื่อที่จะให้ท่อความร้อนทำงานสวนทางกับแรงโน้มถ่วง และทำให้เกิดแรงขับคาปิลลารีสูง ดังนั้น ของไหลทำงานจึงจำเป็นที่จะต้องเปียกกับวัสดุพรุนและผนังท่อ

2. วัสดุพรุนหรือโครงสร้างคาปิลลารี

จุดประสงค์ในการใช้วัสดุพรุน คือ ทำให้เกิดความดันคาปิลลารีที่จะขนถ่ายของไหลทำงานจากส่วนควบแน่นไปยังส่วนทำระเหย และจะต้องสามารถกระจายของเหลวที่อยู่ในส่วนทำระเหยให้ออกไปสู่พื้นที่ที่มีการรับเอาความร้อนเข้ามา

ส่วนสำคัญของวัสดุพรุน คือ ความหนา เนื่องจากเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนของโครงสร้างก็จะเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนในส่วนทำระเหยนั้นเพิ่มสูงขึ้น

3. ท่อบรรจุ

หน้าที่ของท่อบรรจุ คือ กันของไหลทำงานออกจากสิ่งแวดล้อมใดๆ ต้องเป็นส่วนที่ป้องกันการรั่วไหลได้และสามารถควบคุมความแตกต่างของความดันระหว่างผนังและสามารถที่จะถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเข้าและออกจากของไหลทำงาน

การเลือกวัสดุของผนังท่อนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยดังต่อไปนี้

- ความเข้ากันได้กับของไหลทำงาน
- อัตราส่วนความแข็งแกร่งต่อน้ำหนัก
- ความนำความร้อน
- ง่ายที่จะขึ้นรูป เชื่อม กลึง ขัด และดึง
- มีความพรุนต่ำ
- ความเปียกได้

อย่างไรก็ตามหากทั้ง 3 ส่วนประกอบพื้นฐานเกิดการเข้ากันไม่ได้ก็จะเกิดการกัดกร่อนและการเกิดก๊าซที่ไม่ควบแน่น ถ้าหากวัสดุผนังหรือท่อวัสดุพรุนละลายได้ในของไหลทำงานแล้วจะเกิดการถ่ายเทมวลขึ้นในระหว่างส่วนควบแน่นและส่วนทำระเหย และจะมีส่วนที่เป็นของแข็งเกาะที่ส่วนระเหยมากทำให้เกิดจุดร้อนขึ้นหรือมีการกีดขวางในช่องทางผ่านของวัสดุพรุน และเมื่อก๊าซที่ไม่ควบแน่นนั้นสะสมอยู่ในท่อความร้อนในส่วนควบแน่นมากขึ้นจะปิดทางการถ่ายเทความร้อนและจะทำให้เกิดอุณหภูมิลดอย่างมากในส่วนของไอที่ผิวหน้านั้น

2.2.1.8 กระบวนการผลิตและการประกอบ

1. วัสดุภาชนะบรรจุ (Container Materials)

ประกอบด้วย จุดปิดปลายและหลอดเติมน้ำยา วัสดุที่ใช้ทำได้แก่ ทองแดง เหล็กไร้สนิม อลูมิเนียม

2. วัสดุที่ใช้ทำวัสดุพรุน

วัสดุพรุนแบบโครงถัก มีลักษณะเป็นเส้นลวดทอกันเป็นตาราง วัสดุที่ใช้ทำได้แก่ ทองแดง เหล็กไร้สนิม โมเนล ซึ่งสามารถม้วนและดัดงอได้ การเชื่อมวัสดุพรุนให้ติดกับท่อความร้อนทำโดยใช้วิธีเชื่อมละลายและเชื่อมจุด สิ่งที่ต้องระวังมีการเชื่อม คือ ต้องให้ทุกส่วนของวัสดุพรุนเชื่อมกับท่อความร้อนไม่เช่นนั้นจะเกิดจุดความร้อนสูง

การทำความสะอาดภาชนะบรรจุและวัสดุพรุนของท่อความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้แน่ใจว่าของไหลทำงานจะเปียกชุ่มวัสดุพรุนเสมอ และไม่เกิดการอุดตันกีดขวางทางเดินในคาปิลลารี การทำความสะอาดที่อุณหภูมิสูงๆ จะทำให้ขบวนการเป็นไปอย่างรวดเร็ว

3. กรรมวิธีไล่ก๊าซ (Material Outgassing)

ก๊าซที่อยู่ในท่อความร้อนถ้าไม่สามารถไล่ออกให้หมดก่อนปิดผนึกท่อความร้อนก๊าซเหล่านั้น ก็จะเข้าไปอยู่ในช่องว่างของการกลายเป็นไอโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับส่วนประกอบที่เป็นโลหะ

4. การใส่วัสดุพรุนและฝาครอบท่อความร้อน

การทำความสะอาดส่วนประกอบของท่อความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นก่อนที่จะบรรจุวัสดุพรุนลงไป การบรรจุวัสดุพรุนแบบตาข่ายที่ไม่ได้เชื่อมระหว่างวัสดุพรุนกับผนัง จะต้องใส่ขดลวดสปริงเพื่อแนบวัสดุพรุนให้ติดกับผนัง

การสวมฝาปิดโดยปกติจะเชื่อมด้วยอาร์กอนซึ่งเหมาะกับท่อความร้อนที่ทำด้วยทองแดง เหล็กไร้สนิม และอลูมิเนียม ผลพลอยได้ของการเชื่อมด้วยทองเหลืองหรือการบัดกรีคือไม่ทำให้เกิดสิ่งสกปรกแต่จะก่อให้เกิดออกไซด์ซึ่งเอาออกยากในภายหลัง

5. การตรวจสอบรอยรั่ว (Leak Detection)

ในส่วนของรอยเชื่อมบนท่อความร้อนควรได้รับการเช็ครอยรั่วเสมอเพราะรอยรั่วเล็กๆ จะมีผลทำให้ระบบล้มเหลวได้ในช่วง 1 เดือนใช้งาน

6. การเตรียมของไหลทำงาน

ของไหลทำงานที่ใส่เข้าไปควรมีความบริสุทธิ์สูงที่สุดกระบวนการใส่ของไหลทำงานควรกระทำที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส คือ ให้มีการไล่ก๊าซออกซึ่งจะนำก๊าซที่ไม่ต้องการออกจากของไหลทำงานได้

7. การเติมสารในท่อความร้อน มีลำดับการทำดังนี้
   - ไล่ก๊าซออกจากของไหลทำงาน
   - เติมของไหลทำงานลงในท่อความร้อน
   - ไล่ก๊าซออกจากท่อความร้อน
   - ใส่ก๊าซเฉื่อยลงในท่อความร้อน

8. การปิดผนึกท่อความร้อน

หลังจากตรวจสอบรอยรั่วและทดสอบท่อความร้อนเรียบร้อยแล้วในส่วนของท่อความร้อนจะมีท่อเติมน้ำยาที่ต้องปิดผนึกอย่างดี

2.2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ ซิกซ์ ซิกม่า

2.2.2.1 ขั้นตอนการกำหนดแผนงานในการแก้ไขปัญหา (Define Phase)

- **การกำหนดปัญหา (Problem Statement)**

ระบุปัญหาที่ต้องการทำการศึกษาและแก้ไขซึ่งปัญหานั้นๆ จะต้องสัมพันธ์กับส่วนที่มีผลกระทบต่อลูกค้าหรือทางด้านคุณภาพ (CTQ's:Critical to Quality)

- **การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Cp)**

กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ (2544) กล่าวถึง ความหมายและแนวความคิดของการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ คือ องค์ประกอบที่แน่นอนประการหนึ่งของเครื่องจักร อุปกรณ์ วิธีการ วัตถุดิบ และพนักงานที่ก่อให้เกิดการผลิต

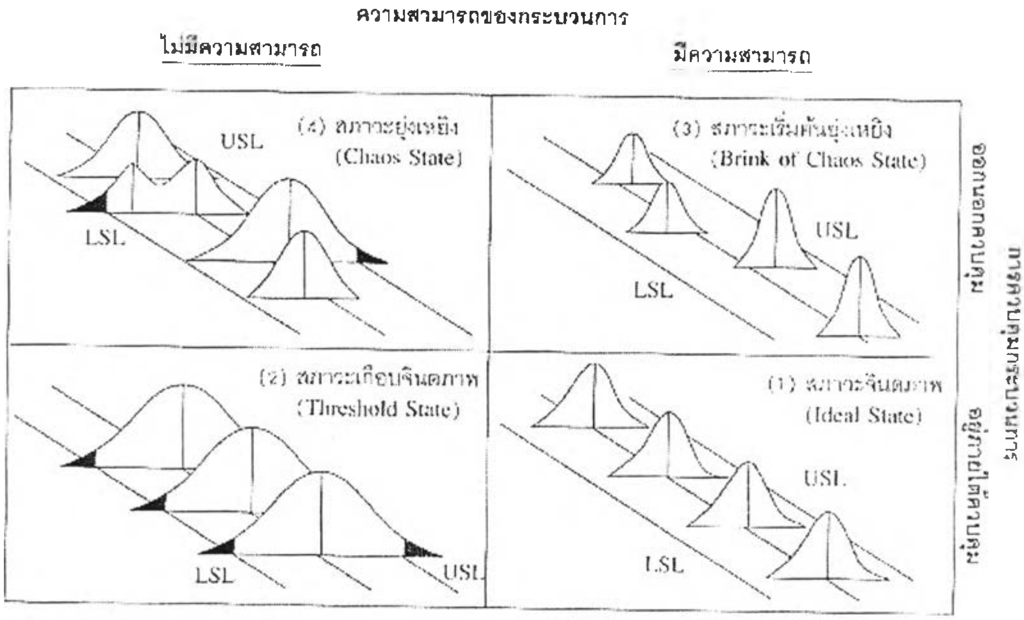
"ความสามารถของกระบวนการ" หมายความถึง ความผันแปรจากสาเหตุธรรมชาติที่ได้รับการวัดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการที่ศึกษา

"การศึกษาความสามารถของกระบวนการ" หมายถึง การกำหนดตัวพารามิเตอร์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการแล้วทำการวัดเพื่อการรวบรวมข้อมูลที่แสดงถึงค่าของพารามิเตอร์ดังกล่าว

"การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ" หมายถึง การประเมินความผันแปรของกระบวนการ และวิเคราะห์ความผันแปรนี้กับข้อกำหนดหรือข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ตลอดจนพิจารณาถึงแหล่งความผันแปรต่าง ๆ เพื่อหาทางลดความผันแปรที่ศึกษาต่อไป

ความมีเสถียรภาพของกระบวนการ

ในการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการจะมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิดกับการควบคุมกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



LSL : ขีดจำกัดข้อกำหนดเฉพาะด้านบน (Upper Specification Limit)
LSL : ขีดจำกัดข้อกำหนดเฉพาะด้านล่าง (Lower Specification Limit)

รูปที่ 2.7 *สภาวะกระบวนการ*

ในการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการที่อาศัยข้อมูลจาการวัดสิ่งตัวอย่างนั้น มีความจำเป็นต้องพิจารณาก่อนเสมอว่า ข้อมูลดังกล่าวมีความผันแปรจากสาเหตุธรรมชาติ หรือสาเหตุผิดธรรมชาติ ที่สามารถพิจารณาได้

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการนี้ จัดเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากของโปรแกรมการปรับปรุงคุณภาพโดยรวม โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการนี้ สามารถใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อาทิ

1. การคาดการณ์ว่ากระบวนการมีความสามารถในการผลิตได้ตามข้อกำหนดเฉพาะได้ดีเพียงใด
2. การช่วยเหลือนักออกแบบหรือนักวิจัยพัฒนาในการตัดสินใจเลือก หรือเปลี่ยนแปลงกระบวนการ
3. การช่วยกำหนดความถี่ของการชักสิ่งตัวอย่างเพื่อการเฝ้าพินิจกระบวนการ
4. การกำหนดความต้องการด้านสมรรถนะสำหรับอุปกรณ์ใหม่
5. การเลือกผู้ส่งมอบ และควบคุมผู้ส่งมอบ
6. การวางแผนลำดับขั้นตอนของกระบวนการผลิตเมื่อมีอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ของกระบวนการ
7. การลดความผันแปรในกระบวนการผลิต

8. การลดต้นทุนคุณภาพ (Cost of Quality) ด้วยการลดต้นทุนด้านข้อบกพร่องด้านคุณภาพ อันเองมาจากการลดปริมาณข้อบกพร่องของกระบวนการลง

ดัชนีความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการ (Potential Capability Indices)

ในการปรับปรุงคุณภาพ มีความจำเป็นต้องกำหนดตัววัดที่จะทำให้ผู้เกี่ยวข้องได้ตระหนักถึงการลดความผันแปรรอบค่าเป้าหมายอย่างต่อเนื่อง จึงได้กำหนดให้วัดความสามารถของกระบวนการในรูปของความผันแปรของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิต ซึ่งถือเป็นดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Index; PCI) โดยนิยามว่า

$$PCI = \frac{\text{ความคลาดเคลื่อนอนุโลมที่ยอมให้เกิด}}{\text{ความสามารถของกระบวนการ}}$$

โดย Osuga เรียก PCI สำหรับการศึกษาในระยะสั้นว่า ดัชนี C_p ดังนั้น

$$C_P = \frac{USL - LSL}{6\sigma_{ST}}$$

ความหมายของ USL LSL และ $6\sigma_{ST}$

สำหรับดัชนีความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการในระยะยาว จะแทนด้วยดัชนี P_P โดย

$$P_P = \frac{USL - LSL}{6\sigma_{ST}}$$

ดัชนีความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการทั้ง C_P และ P_P นี้จะมีข้อดี คือ ทำให้ผู้เกี่ยวข้องดำเนินการลดความผันแปรได้อย่างต่อเนื่อง โดยการพิจารณาจากค่าของความคลาดเคลื่อนอนุโลมของข้อกำหนดเฉพาะในรูปของความสามารถของกระบวนการ อย่างไรก็ตาม ดัชนีดังกล่าวอาจจะทำให้ผู้เกี่ยวข้องมีความเข้าใจสับสนอยู่บ้างโดยเฉพาะพนักงานระดับปฏิบัติการ ทั้งนี้เพราะว่าค่า C_P และ P_P นี้ "ยิ่งมีค่าสูง ยิ่งดี" ในขณะที่คนทั่วไปมักจะเข้าใจความผันแปรของกระบวนการในความหมายเดียวกับอัตราส่วน C_R และ P_R คือ "ยิ่งมีค่าต่ำ ยิ่งดี" นอกจากนี้แล้ว ยังมีข้อเสียเหมือนกับกรณีอัตราส่วน C_R และ P_R คือ ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากกระบวนการต้องมีการแจกแจงแบบปกติและถ้าหากผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมิได้มีการแจกแจงแบบปกติแล้วการตีความหมายก็อาจจะผิดความหมายไปบ้าง นอกจากนี้แล้ว ข้อกำหนดเฉพาะจะต้องมีความคลาดเคลื่อนอนุโลมแบบสมมาตรกัน ซึ่งจะทำให้ค่ากลางของข้อกำหนดเฉพาะอยู่ที่ตำแหน่งปรับตั้งของกระบวนการ ซึ่งจะไม่สามารถคำนวณและตีความหมายตามที่กล่าวมาแล้ว ดัชนีความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการ C_{pk} และ P_{pk}

จากที่ได้กล่าวถึงดัชนี C_p ที่เป็นตัววัดความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการมาแล้ว โดยดัชนีดังกล่าวจะสะท้อนเพียงแค่ผลจากการออกแบบ (คือ ค่าการกระจายของผลิตภัณฑ์เนื่องจากกระบวนการ) เท่านั้น แต่มิได้สะท้องถึงผลจากการควบคุม (คือ ค่าตำแหน่งของกระบวนการ) แต่เพียงอย่างใดทำให้ผู้วิเคราะห์ไม่ทราบถึงผลที่เป็นจริงจากกระบวนการ

Kane ได้กำหนดให้ใช้ดัชนีที่สะท้อนถึงค่าการเลื่อนไปจากค่ากลางของข้อกำหนดเฉพาะของตำแหน่งของกระบวนการ และเรียกว่า C_{pk} โดยที่ k มาจาก Katayori ในภาษาญี่ปุ่นที่มีความหมายถึง ความเบี่ยงเบนไป หรือการเลื่อนออกไป

เมื่อ $$k = \frac{\text{ระยะระหว่างตำแหน่งของกระบวนการจากค่ากลางของข้อกำหนด}}{\frac{1}{2}\text{ ของความคลาดเคลื่อนอนุโลม}}$$

$$= \frac{2|m-x|}{USL-LSL}$$

โดย $$m = \frac{USL+LSL}{2}$$

ดังนั้น $$C_{pk} = C_p\,(1-k)$$

การปฏิบัติการแก้ไขเมื่อกระบวนการไม่มีความสามารถด้านสมรรถนะ

ในการพิจารณาความสามารถของกระบวนการเพื่อการปฏิบัติแก้ไขกรณีกระบวนการไม่มีความสามารถนั้นสามารถสรุปได้ กล่าวคือ ในกรณีที่ความสามารถด้านสมรรถนะมีค่าต่ำและความสามารถด้านศักยภาพมีค่าต่ำด้วย ก็มีความจำเป็นต้องดำเนินการลดความผันแปรของกระบวนการลงด้วยการออกแบบใหม่เพื่อให้กระบวนการมีความมั่นคงต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือออกแบบข้อกำหนดเฉพาะของกระบวนการที่ใช้อยู่แล้วเสียใหม่ รวมถึงการออกแบบอุปกรณ์จับยึด (Jig and Fixture) เสียใหม่ รวมถึงการแก้ไขด้วยการฝึกอบรมพนักงานใหม่ด้วย ในกรณีที่ความสามารถทางด้านสมรรถนะของกระบวนการมีค่าต่ำแต่ความสามารถของกระบวนการด้านศักยภาพมีค่าสูงแล้ว แสดงว่ามีปัญหาด้านการควบคุมกระบวนการจึงมีความจำเป็นต้องหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าปรับตั้งของกระบวนการแล้วทำการปรับค่าปรับตั้งเพื่อให้ความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการมีค่าสูงขึ้น

นอกจากนี้แล้ว ในการวิเคราะห์เพื่อการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการนี้ ควรมีการพิจารณาร่วมกันถึงดัชนีความสามารถของกระบวนการทั้งการศึกษาแบบระยะสั้นและระยะยาวด้วย ซึ่งถ้าหากพบว่า C_{pk} และ P_{pk} มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำ แสดงว่ากระบวนการดังกล่าวขาดความสามารถอันเนื่องมาจากการออกแบบกระบวนการจึงมีความจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อความผันแปรของกระบวนการแล้วทำการกำหนดค่าที่เหมาะสมเพื่อลดขนาดความผันแปรของกระบวนการลงจึงถือว่าปัญหาดังกล่าวนี้เป็นปัญหาด้าน

เทคโนโลยี แต่ถ้าหากเป็นกรณีที่ P_{pk} มีค่าต่ำแต่ C_{pk} มีค่าสูงแล้ว แสดงว่ากระบวนการดังกล่าว ดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

***ตารางที่** 2.1 ลำดับของความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการตามค่าดัชนี C_p*

ค่าดัชนี C_p	ลำดับของความสามารถของกระบวนการ
$2.00 <= C_p$	ดีเหลือเชื่อ
$1.67 <= C_p <2.00$	ดีเลิศ
$1.33 <= C_p <1.67$	ดี
$1.00 <= C_p < 1.33$	พอใช้
$0.67<= C_p < 1.00$	ไม่ดี
$C_p < 0.67$	ไม่ดีมาก

***ตารางที่ 2.2** ค่าดัชนี Cp และสัดส่วนประมาณการของผลิตภัณฑ์บกพร่องของกระบวนการ*

ระดับคุณภาพของกระบวนการ (ระยะสั้น)	ดัชนี C_p	สัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่อง (PPM)	
		ข้อกำหนดเฉพาะแบบพิกัดด้านเดียว	ข้อกำหนดเฉพาะแบบพิกัดสองด้าน
6 σ	2	0.001248	0.002496
5.5 σ	1.83	0.02124	0.04248
5 σ	1.67	0.3002	0.6
4.5 σ	1.5	3.45	7
4 σ	1.33	31.79	64
3.5 σ	1.17	232.7	465
3 σ	1	1,350	2,700
2.5 σ	0.83	6,210	12,420
2 σ	0.67	22,750	45,500
1.5 σ	0.5	66,810	133,620
1 σ	0.33	158,700	317,400

■ **แผนภาพกระบวนการผลิต (Process Map)**

เป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งในการที่จะหาสาเหตุของปัญหา ซึ่งการสร้างแผนภาพของกระบวนการผลิต จะต้องทำอย่างละเอียดทุกขั้นตอนในการประกอบผลิตภัณฑ์เพื่อที่จะสามารถระบุตัวแปรสำคัญในกระบวนการผลิต (Process Input) และผลลัพธ์ในกระบวนการผลิต (Process Output) ขั้นตอนนี้จึงเปรียบเสมือนการตรวจวิเคราะห์ของกระบวนการผลิต ซึ่งอาจจะทำให้เราทราบถึงสิ่งผิดปกติหรือทราบสาเหตุที่แท้จริงของความบกพร่องในการผลิตที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งขั้นตอนนี้อาจเป็นขั้นตอนที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์ปัญหา โดยการทดลองตั้งสมมติฐานหรือโดยการใช้ข้อมูลทางด้านสถิติที่มีการเก็บรวบรวมอย่างถูกวิธี

การสร้างแผนการไหลของผลิตภัณฑ์ ต้องใช้การระดมสมองและทีมงานที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ เพื่อที่จะได้รายละเอียดที่สำคัญและครบถ้วนของกระบวนการผลิต ซึ่งแผนภาพการไหลนั้นจะต้องสามารถบอกถึงสาเหตุแห่งความบกพร่องของผลิตภัณฑ์ (Cause of Poor Quality: COPQ)

การสร้างแผนการไหลของผลิตภัณฑ์ จำเป็นอย่างยิ่งในการระบุที่มาของข้อบกพร่องและสิ่งที่ซ่อนในกระบวนการผลิต (Hidden Factory) ซึ่งสิ่งเหล่านี้ส่งผลให้สูญเสียเวลา เงินทรัพยากร และพื้นที่ในการจัดเก็บ

■ **ผลรวมของสัดส่วนของเสีย (Rolled Throughput Yield)**

ได้มาจากการคำนวณของสัดส่วนของเสียครั้งแรกและไม่รวมสัดส่วนของเสียที่ได้มาจากการซ่อมแซม การคำนวณสัดส่วนของเสียก็เพื่อเป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการควบคุมกระบวนการผลิต

■ **ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)**

วีระพงษ์ เฉลิมจิระรัตน์ (2536) กล่าวว่า ผังแสดงเหตุและผล คือ ผังที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางคุณภาพกับ ปัจจัยต่าง ๆ (ที่เกี่ยวข้อง) กล่าวคือ คุณลักษณะทางคุณภาพคือผลที่เกิดขึ้นจากสาเหตุคือปัจจัยต่างๆ ที่เป็นต้นตอของคุณลักษณะอันนั้น

การสร้างผังแสดงเหตุและผลที่จะเอื้อประโยชน์ต่อการแก้ปัญหาได้จริง ๆ ไม่ใช่เรื่องง่าย ผู้ที่สามารถสร้างผังก้างปลาได้ถูกต้อง คือ ผู้ที่มีโอกาสแก้ปัญหาทางคุณภาพได้ถูกต้อง เช่นเดียวกันข้อสังเกตเกี่ยวกับผังแสดงเหตุและผล จะต้องทำการแยกแยะและเลือกสรรเพื่อหาปัจจัยอันเป็นสาเหตุแห่งปัญหานั้นควรใช้การปรึกษาหารือในกลุ่มคนหลาย ๆ

ความคิดมาร่วมกัน เพราะการละเว้นหรือมองข้ามปัจจัยบางอย่างไปจะก่อผลเสียภายหลังได้ (อาจทำให้การแก้ปัญหาผิดจุดได้) เลือกคุณลักษณะของปัญหาและปัจจัยสาเหตุในรูปของขนาดหรือปริมาณที่สามารถใส่หน่วยวัดลงไปได้ เพราะในที่สุดแล้วผลสรุปจากผังก้างปลาจะต้องนำไปแก้ไขปรับปรุงตัวแปรต่างๆ ในการผลิต

การนำผังแสดงเหตุและผลไปใช้งานจะต้องก่อนสรุปปัญหา ควรใส่น้ำหนักหรือคะแนนให้กับปัจจัยสาเหตุแต่ละตัว เพื่อจะได้ใช้การจัดลำดับความสำคัญของปัญหา ซึ่งแนวทางเสนอแนะนี้จะนำไปผังแสดงเหตุและผลที่ได้ไปเชื่อมโยงกับ FMEA

- **ประเภทของการวิเคราะห์สาเหตุและผล 2 ประเภท**

1. แผนภาพก้างปลา (Fishbone Diagram)
   - การเข้าสู่วิธีการระดมสมอง ที่ถือปฏิบัติกันมาแล้วเขียนเป็นแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลโดยแผนภาพนี้ จะเป็นเครื่องมือที่ดีมาก เมื่อทราบว่าผลกระทบที่สำคัญเพียงประการเดียวที่จะวิเคราะห์คืออะไร

2. ตารางสาเหตุและผล (Cause-Effect Matrix)
   - แผนภาพในรูปแบบตารางที่แสดงถึง ความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างผลของกระบวนการ (Y's) KPOV และปัจจัยป้อนเข้ากระบวนการ (X's) KPIV

วิธีการสร้างตาราง C-E

1. กำหนดรายการของตัวแปรที่แสดงผลิตภัณฑ์ของกระบวนการ (Y's) ที่ด้านบนของตาราง โดยรายการเหล่านี้จะต้องเป็นสิ่งที่คณะทำงาน และ/หรือ ลูกค้าเชื่อว่ามีความสำคัญ โดยรายการเหล่านี้อาจจะเป็นส่วนหนึ่ง (Subset) ของรายการ Y's ที่บ่งชี้ผ่านแผนภาพแสดงการไหลของกระบวนการ (Process Map)
2. จัดอันดับของตัวแปรแต่ละตัวให้เป็นตัวเลขโดยใช้สเกลที่สมเหตุสมผล (โดยทั่วไป มักใช้สเกล 1-10) โดย Y ที่มีความสำคัญมากที่สุดจะได้คะแนนรวมมากที่สุด
3. บ่งชี้ถึงปัจจัยป้อนเข้าที่มีแนวโน้มจะเป็นสาเหตุ (potential cause) หรือ X's ทั้งหมดที่เป็นไปได้ในช่องซ้ายมือของตาราง
4. ให้อัตราเป็นตัวเลข (ความสัมพันธ์ร่วม) แสดงอิทธิพลของ X แต่ละตัวที่มีต่อ Y แต่ละตัวภายใต้กรอบในตารางที่พิจารณา โดยการกำหนดเกณฑ์นี้จะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของคณะทำงาน
5. ใช้คอลัมน์ทั้งหมดของตารางในการวิเคราะห์และจัดอันดับสำคัญก่อนหลัง เพื่อหาจุดเน้นในการสร้าง FMEA เบื้องต้น

2.2.2.2 ขั้นตอนการวัดเพื่อระบุสาเหตุของปัญหา (Measure Phase)

- **การวิเคราะห์ความล้มเหลวในการผลิต (FMEA)**

ธนากร เกียรติบรรลือ (2543) กล่าวว่า FMEA คือเทคนิคทางวิศวกรรมที่ใช้ในการกำหนดการบ่งชี้และการขจัดปัญหาความล้มเหลวและความผิดพลาดต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นมาแล้วในระบบงานของการออกแบบของกระบวนการและการบริการก่อนที่จะถึงลูกค้า

ลักษณะสำคัญ ของ FMEA

ต้องมีการแสดงให้เห็นถึงรูปแบบของความล้มเหลวปัญหา และความผิดพลาดต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นแล้วจากระบบงาน การออกแบบ การผลิตและการบริการอย่างชัดเจน และมีการประเมินผลจะต้องมีการบ่งชี้การกระทำ สำหรับการลดหรือขจัดโอกาสของความล้มเหลวปัญหาและความผิดพลาดนั้นๆ ที่จะเกิดขึ้นมาอีก

ต้องมีการบันทึกลงบนแบบฟอร์มมาตรฐาน โดยปกตินิยมใช้ FMEA 2 ชนิดคือ Design FMEA สำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีการนำเอาปัญหาสำคัญและข้อบกพร่องต่างๆ จากผู้ใช้หรือลูกค้ามาศึกษาและหาวิธีการปรับปรุงแก้ไขและอีกชนิดหนึ่งคือ Process FMEA สำหรับการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการผลิตซึ่งมีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เพื่อป้องกันไม่ให้มีของเสียและขจัดหรือลดปัญหาจากการผลิตที่จะส่งต่อไปยังกระบวนการผลิตถัดไปและลูกค้า

ประโยชน์ของ FMEA

ช่วยพิจารณาทางเลือกตั้งแต่ขั้นตอนแรกของการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ซึ่งเพิ่มศักยภาพของการผลิตและความเชื่อถือสร้างความมั่นใจว่ารูปแบบของความล้มเหลวความผิดพลาดและปัญหาต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ รวมถึงผลกระทบที่อาจตามมาได้รับการพิจารณาอย่างละเอียดถี่ถ้วนมาก่อนแสดงรายการของปัญหาหลักต่างๆ และระดับความรุนแรงของผลกระทบเมื่อเกิดปัญหานั้นขึ้นมา FMEA สามารถแสดงบันทึกผลของการปรับปรุงหลังจากมีมาตรฐานการแก้ไขให้ถูกต้องอย่างใดอย่างหนึ่งได้ทันที เป็นพื้นฐานสำหรับการกำหนดรายการทดสอบเพิ่มเติมระหว่างการพัฒนาผลิตภัณฑ์และการผลิต ช่วยรวบรวมข้อมูลในอดีตสำหรับเป็นเอกสารอ้างอิงในอนาคต โดยนำมาใช้วิเคราะห์รูปแบบของปัญหาหรือความล้มเหลวต่างๆ สำหรับการพิจารณาเรื่องความเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตทำให้เกิดความมั่นใจได้ว่าการปรับปรุงและพัฒนาต่างๆ มีผู้รับผิดชอบหรือช่วยให้วิศวกรประจำ

กระบวนการผลิตสร้างระบบการป้องกันปัญหาที่สามารถประเมินผลได้เมื่อมีการประชุมทบทวนขั้นสุดท้ายของการพัฒนาผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิต

ชนิดของ FMEA และการนำไปใช้งาน Failure Mode and Effect Analysis หรือ FMEA เป็นวิธีการวิเคราะห์ปัญหาหรือความล้มเหลวอย่างเป็นระบบมีขั้นตอนสำหรับการค้นหาสาเหตุของความผิดพลาดก่อนที่จะเกิดขึ้นจริงเพื่อเป็นการป้องกันก่อนที่จะเกิดปัญหาร้ายแรงขึ้นมาภายหลังและเป็นการลดความเสี่ยงของการเกิดปัญหา FMEA

งานเอกสารของ FMEA

การวิเคราะห์ปัญหาหรือความล้มเหลวที่เกิดขึ้นโดยวิธีการ FMEA ถือว่าเป็นการวางระบบเตือนภัยล่วงหน้าและเป็นเทคนิคการป้องกันปัญหาชนิดหนึ่ง ซึ่งมีส่วนช่วยวิศวกรกระบวนการในการศึกษาสาเหตุและผลกระทบต่างๆ ก่อนที่การออกแบบหรือวิธีการกระบวนการผลิตจะสรุปผลขั้นสุดท้ายทุกเรื่องทุกด้านที่มีการวิเคราะห์ร่วมกันจะถูกบันทึกแบบฟอร์มมาตรฐานของ FMEA เริ่มต้นจากหน้าที่อย่างใดอย่างหนึ่งของกระบวนการผลิตจะถูกนำมาพิจารณาอย่างละเอียดว่ามีชนิดหรือรูปแบบของปัญหาและความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นหรือเคยเกิดขึ้นมาแล้วมีอะไรบ้างมีสาเหตุมาจากเรื่องใดและจะมีผลกระทบอย่างไรหลังจากนั้นจะมีการประมาณตัวเลขระดับความเสี่ยงหรือที่เรียกกันว่าค่า RPN ซึ่งมาจากคำว่า Risk Priority Number ให้กับแต่ละปัญหาการคำนวณค่า RPN ได้มาจากผลคูณค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ O x S x D เมื่อ

O= Occurrence คือ ระดับความเสี่ยงของการเกิดปัญหาความล้มเหลว หรือความผิดพลาด

S = Severity คือ ระดับความรุนแรงของผลกระทบเมื่อเกิดปัญหานั้นขึ้น

D = Detection คือ ระดับความสามารถในการตรวจจับปัญหานั้นก่อนที่จะส่งมอบงานหรือผลิตภัณฑ์ไปให้ลูกค้า

ค่า O, S และ D นิยมใช้เป็นตัวเลขจำนวนเต็ม มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง10 ดังนั้น ค่าระดับความเสี่ยงต่ำสุดของการเกิดปัญหา คือ ค่า RPN = 1 ซึ่งมาจาก 1 x 1 x 1 หมายความว่าความถี่ของการเกิดปัญหานี้มีน้อยมากและความรุนแรงของผลกระทบเมื่อเกิดปัญหานี้มีน้อยมากเช่นกัน และสามารถตรวจจับปัญหานี้ได้ก่อนส่งมอบให้แก่ลูกค้าอย่างสมบูรณ์ส่วนค่าระดับความเสี่ยงสูงสุดของการเกิดปัญหา คือ ค่า RPN = 1000 ซึ่งมาจาก 10 x 10 x 10 หมายความว่า ความถี่ของการเกิดปัญหานี้มีมากเช่นพบทุกวัน และ ระดับความรุนแรงของผลกระทบ

เมื่อเกิดปัญหานี้ก็มีมากเช่นกระบวนการผลิตต้องหยุดทั้งหมดหรือลูกค้าต้องยกเลิกสัญญาสั่งซื้อ เป็นต้น และยังไม่มีวิธีการตรวจจับปัญหานี้ก่อนส่งมอบให้แก่ลูกค้าเลย

I 20697181

■ **การวิเคราะห์ความถูกต้องและแม่นยำของระบบการวัด**

ในระบบการวัดมีความสำคัญมาก การวัดเป็นเสมือนกลไกในการควบคุมผลิตภัณฑ์และเป็นการควบคุมกระบวนการ เพื่อเป็นการประกันคุณภาพสู่ลูกค้ากระบวนการวัดมีองค์ประกอบหลักๆ คือ เครื่องมือวัด พนักงานวัดซึ่งมีสาเหตุมาจาก ทักษะ ความชำนาญ และระดับการฝึกฝน วิธีการวัดชิ้นงานที่วัดสิ่งแวดล้อมในการวัดซึ่งมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิ ความชื้นและธรรมชาติ เนื่องจากแต่ละองค์ประกอบมีความไม่เท่ากัน จึงเกิดความผันแปรในระบบการวัด

การวิเคราะห์ระบบความแม่นยำของเครื่องมือวัดมีความสำคัญมาก เนื่องจากการแก้ปัญหาทางด้านคุณภาพหรือการป้องกันปัญหาอย่างมีประสิทธิภาพนั้น ต้องมีความมั่นใจในความเสถียรของเครื่องมือวัดซึ่งการวิเคราะห์ระบบการวัดมีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของระบบการวัดในกระบวนการผลิตว่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้หรือไม่โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงสถิติของระบบการวัด เพื่อทำการแยกแหล่งความผันแปรออกเป็นชิ้นงาน (Part–to-Part Variation) พนักงานวัด (Appraiser Variation) ความผันแปรร่วม (Interaction Variation)

ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย (2538) ได้นิยามคำว่าความแม่นยำและความเที่ยงตรง ดังนี้

ความแม่นยำ (Precision) คือ ความสามารถในการวัดที่ให้ผลค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ค่าไม่ กระจัดกระจายและจะให้ความแม่นยำไม่เปลี่ยนค่ามากไม่มีการปรับวิธีการหรือปรับเครื่องมือวัด

ความเที่ยงตรง (Accuracy) คือ ความสามารถในการวัดที่ให้ค่าใกล้ความจริงมาก ผลต่างของค่าจริงและค่าวัดโดยเฉลี่ยน้อยมาก

กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ (2542) กล่าวว่า การวิเคราะห์ความแม่นยำมุ่งพิจารณา 2 ประเด็นหลัก คือ คุณสมบัติเชิงสถิติของค่าวัดมีความไวต่อเทคนิคของพนักงานวัดหรืออุปกรณ์การวัดหรือไม่ และระบบการวัดที่พิจารณามีความสามารถในการตรวจจับความผันแปรของผลิตภัณฑ์ที่แสดงความผันแปรของกระบวนการผลิตหรือไม่ คุณสมบัติด้านความแม่นยำนี้ถ้าหากมีการจำแนกตามช่วงเวลาที่เกิดขึ้นแล้วจะได้รับการ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)และความสามารถในการทำเหมือน(Reproducibility) โดยที่ความสามารถในการทำซ้ำของระบบการวัด หมายถึง ค่าความแตกต่างในการวัดอย่างต่อเนื่องกับชิ้นงานเดียวกันด้วยเครื่องมือเดียวกันและด้วยพนักงานคนเดียวกัน ซึ่งโดยปกติจะใช้ความสามารถในการทำซ้ำในการประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดในระยะสั้น (Short – Term Measurement)

ส่วนความสามารถในการทำเหมือนของระบบการวัด หมายถึง ค่าความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของการวัดงานชิ้นเดียวกันด้วยเครื่องมือเดียวกันแต่ต่างพนักงานกัน และโดยปกติจะใช้ความสามารถในการทำเหมือนในการประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดในระยะยาว (Long–Term Measurement) นอกจากนี้ อาจจะกล่าวอย่างสั้นๆได้ว่าความสามารถในการทำซ้ำ คือ ความผันแปรภายในเงื่อนไขการวัดด้วยกันในขณะที่ใช้ความสามารถในการทำเหมือน คือ ความผันแปรระหว่างเงื่อนไขของการวัดโดยเงื่อนไขที่กล่าวนี้อาจจะหมายถึง พนักงานวัด อุปกรณ์จับยึด (จิ๊กและฟิกซ์เจอร์) และเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม เป็นต้น

ในการประเมินผลความสามารถในการทำซ้ำและความสามารถในการทำเหมือนของระบบการวัด (GR&R - Gage Repeatability and Reproducibility) จะหมายถึง การประเมินผลค่าผันแปรอันเนื่องมาจากการวัดค่าจริงของงานหนึ่งแบบซ้ำๆ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันแล้วมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขเดียวกัน การวางแผนศึกษาความสามารถในการทำซ้ำและความสามารถในการทำเหมือนของระบบการวัดวิธีการและเวลาที่จะมีการสอบเทียบเครื่องมือวัดการสอบเทียบเครื่องมือวัดถือเป็นการดำเนินการที่มีความสำคัญมากต่อการพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนด้านความถูกต้องในระบบการวัดโดยปกติแล้วจะต้องมีการสอบเทียบก่อนการศึกษาความสามารถในการทำซ้ำและความสามารถในการทำเหมือน จะเริ่มต้นขึ้นและไม่ควรจะมีการสอบเทียบใหม่ ถ้าหากการศึกษายังไม่สิ้นสุดเพราะถ้าหากมีการสอบเทียบใหม่ในระหว่างการศึกษาทำให้เกิดความผันแปรจากการสอบเทียบรวมอยู่กับประเมินผลความสามารถในการทำซ้ำของระบบการวัดด้วย

จำนวนพนักงานวัดที่ใช้สำหรับการศึกษา GR & R ในการกำหนดจำนวนพนักงานวัดที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาก่อนว่าในระบบการผลิตมีพนักงานวัด (คือ ผู้ใช้เครื่องมือวัดในการกำหนดค่าตัวเลขกับชิ้นงานเพื่อการตัดสินใจ) ในกรณีที่ระบบการวัด มีพนักงานวัดจำนวนหลายคน ให้ทำการสุ่มพนักงานวัดมาทำการศึกษาอย่างน้อย 2 คน โดยพนักงานวัดทุกคนต้องผ่านการฝึกอบรมและปฏิบัติงานเกี่ยวกับงานวัดในอุปกรณ์วัดที่ทำการศึกษาสำหรับงานประจำ

จำนวนสิ่งตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา GR & R จำนวนสิ่งตัวอย่างที่จะใช้ในการศึกษานั้น โดยปกติจะแนะนำไว้ที่ 10 สิ่งตัวอย่าง ซึ่งถ้าหากไม่สามารถดำเนินการได้จะต้องพยายามให้ (จำนวนของสิ่งตัวอย่าง) x (จำนวนของพนักงานวัด) มากกว่า 15 และถ้าหากไม่สามารถดำเนินการได้ให้เพิ่มจำนวนซ้ำของการวัดในแต่ละสิ่งตัวอย่างและสิ่งตัวอย่างที่จะใช้ในการวัดนี้ต้องเป็นสิ่งตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และในกรณีที่จะทำให้ระบบการวัดมีคุณภาพด้านความผันแปรเพียงพอต่อการตรวจจับความผันแปรของชิ้นงานในกระบวนการแล้วจะต้องทำให้ข้อมูลแบ่งแยกได้ไม่ต่ำกว่า 5 กลุ่ม (ชิ้น)

จำนวนครั้งในการวัดซ้ำสำหรับสิ่งตัวอย่างแต่ละชิ้นโดยปกติแล้วมักจะแนะนำให้ทำการวัดซ้ำที่แต่ละสิ่งตัวอย่างด้วยจำนวนซ้ำเท่า ๆ กัน (เรียกการทดลองแบบนี้ว่า Balance Design) ซึ่งโดยทั่วไป จะกำหนดให้มีการวัดซ้ำสำหรับพนักงานวัดแต่ละคนด้วยจำนวน 2-3 ครั้งต่อชิ้นงาน แต่ละชิ้น

วิธีการลดความผันแปรภายในสิ่งตัวอย่างของการศึกษา GR &R บางกรณีจะไม่สามารถกำจัดความผันแปรภายในสิ่งตัวอย่างออกจากการวัดซ้ำ จึงต้องมีความพยายามเลือกงานในล็อตให้มีความใกล้เคียงกันให้มากที่สุด

วิธีการประเมินผลรีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้มีทั้งหมด 3 วิธี

วิธีอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) วิธีนี้เหมาะกับการวิเคราะห์ผลการศึกษาที่ได้มาจากการออกแบบการทดลองเพื่อพิจารณาว่าพนักงานและชิ้นงานเป็นสาเหตุความผันแปรอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ และวิธีการนี้จะสามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้นงาน และพนักงานวัดออกจากค่ารีพีททะบิลิตี้ได้ แต่อย่างไรก็ดี วิธีการนี้มีข้อเสียตรงที่ยุ่งยากในการคำนวณแต่ส่วนใหญ่วิธีการนี้จะใช้กับกรณีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการช่วยคำนวณ

ในการตีความหมายผลการวิเคราะห์จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จะต้องเริ่มจากการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ระหว่างพนักงานและชิ้นงานก่อนเสมอ ซึ่งถ้าพบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างพนักงานและชิ้นงานมีนัยสำคัญแสดงว่า เมื่อเปลี่ยนชิ้นงานให้พนักงานคนเดิมทำการวัดแล้วผลการวัดจะเปลี่ยนไป ซึ่งจะพบว่าอิทธิพลร่วมมีผลมากและในกรณีที่อิทธิพลร่วมมีนัยสำคัญนี้ก็ไม่มีความจำเป็นต้องตีความหมายจากอิทธิพลหลัก (Main Effect) ของพนักงานวัดหรือชิ้นงานอีกเพราะว่าแม้อิทธิพลหลักของพนักงานวัดจะดูเหมือนมีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญแต่แท้จริงแล้วมีอิทธิพลมาก

2.2.2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อระบุสาเหตุของปัญหา (Analyze Phase)

- **สถิติและการควบคุมคุณภาพ**

สถิติ คือ ศาสตร์แขนงหนึ่งที่ใช้ตัดสินใจเหตุการณ์ภายใต้ความผันแปรโดยการตัดสินใจประกอบด้วยการรวบรวมการวิเคราะห์ตลอดจนการสรุปผลเพื่อดำเนินการจากข้อมูล

- **การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ (Hypothesis Testing)**

จากที่กล่าวมาแล้ว ในลำดับขั้นตอนการออกแบบการทดลองว่าในการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีทางสถิตินั้นจะมีความเสี่ยงเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่เสมอ ดังนั้น การตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลจึงต้องอยู่ภายใต้ความเสี่ยงดังกล่าว

การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบจะตั้งสมมติฐานใน 2 ทางเลือก คือ

H_o : ระดับของปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการผลิต

H_1 : ระดับของปัจจัยมีผลต่อกระบวนการผลิต

ทั้งนี้ภายใต้ความเสี่ยง 2 ตัวคือ α และ β

α หมายถึง ความเสี่ยงในการไม่ยอมรับสมมุติฐานหลัก (Null Hypothesis) ทั้งที่สมมติฐานหลักเป็นจริง หมายถึง ความเสี่ยงในการยอมรับสมมติฐานหลักทั้งที่สมมติฐานหลักไม่เป็นจริงจากความเสี่ยงของทั้ง 2 แบบนี้เองจึงต้องมีการกำหนดจำนวนซ้ำที่ใช้ในการทดลองเพื่อให้มีความเชื่อมั่นหรือมีความเสี่ยงตามที่กำหนดไว้และในการทำการวิเคราะห์ก็มักจะให้ค่าของ α คงที่ และ ให้ค่า β น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

2.2.2.4 ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improve Phase)

- **การออกแบบการทดลอง (Design of experiments)**

การออกแบบการทดลองเพื่อตรวจดูว่าปัจจัย (Factor) ใดหรือตัวแปร (Input Variable) ใดที่มีผลต่อสิ่งที่ให้ความสำคัญ (หรือความสนใจ) ในผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Output Response) ปัจจัยในการผลิตสามารถแบ่งได้เป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต

การออกแบบการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ได้ว่าปัจจัยใดมีผลต่อผลิตภัณฑ์หรือไม่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับ แล้วทำการทดลองจากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) คือ การพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริงหรือความเชื่อจากประสบการณ์หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต ค้นหา ข้อเท็จจริง (Exploration) คือ การศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีผลต่อกระบวนการ

คำจำกัดความ (Definition)

อิทธิพลหรือผล (Effect) หมายถึง ผลของตัวแปรต้นที่มีต่อตัวแปรตาม

ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่งที่คิดว่ามีอิทธิพลต่อผลการทดลองของคุณสมบัติในตัวผลิตภัณฑ์

ระดับของปัจจัย (Level of Factor) หมายถึง สภาวะต่าง ๆ ของปัจจัยหนึ่ง ๆ ที่ทำการกำหนดในการทดลอง

ปัจจัยรบกวน (Noise Factor) หมายถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบเล็ก ๆ น้อย ๆ และไม่สามารถควบคุมได้

หลักในการออกแบบการทดลอง

การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวเท่า ๆ กันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ให้กับทุกระดับที่ศึกษาให้เท่า ๆ กัน

การทำซ้ำ (Replication) คือ การทำการทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูล เพื่อกำจัดเอาผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออก

การบล็อก (Blocking) คือ การจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วง เพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ แต่ไม่จำเป็นที่จะต้องมีการทำเสมอไป

ลำดับขั้นการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

การนิยามปัญหา เป็นการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวโยงไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองการเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับปัจจัยเป็นการใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์ที่เคยปฏิบัติมาในการผลิตเพื่อระบุว่ามีปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองเป็นอย่างไร เพื่อระบุระดับของปัจจัยในการทดลองสุดท้ายคือระบุว่าระดับที่ใช้เป็นแบบใดในรูปแบบต่อไปนี้

แบบกำหนด (Fixed Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุม หรือกำหนดค่าได้แน่นอน

แบบสุ่ม (Random Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุม หรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน

แบบผสม (Mixed Levels) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดได้และแบบสุ่ม

การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้ทำการทดลอง จะต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาและการวัดค่านั้นจะต้องแม่นยำรวมทั้งความถูกต้องของเครื่องวัดด้วย

การเลือกแบบทดลองจะต้องพิจารณาถึงจำนวนข้อมูลที่ทำซ้ำในการทดลองความเหมาะสมข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomiztion) และการบล็อก (Blocking) ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวโยงกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลองสำหรับการเลือกปัจจัย

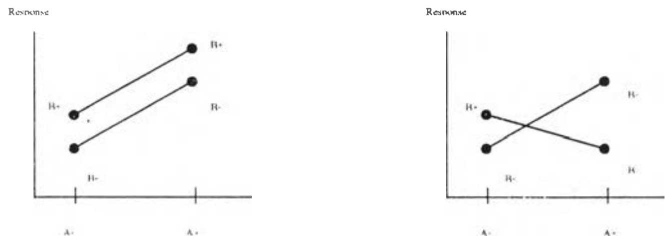
การทำการทดลอง ในขณะทำการทดลอง จะต้องปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้ นั่นคือ ต้องมีการสุ่ม การทำซ้ำ ข้อควรระวังในขณะทำการทดลอง คือ ความถูกต้องของเครื่องมือวัดและความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้ความผิดพลาด (Error) ที่ออกมามีน้อยที่สุด

การวิเคราะห์ข้อมูล ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้ความรู้ทางสถิติมาวิเคราะห์และสรุปผลรวมทั้งตัดสินความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้นก่อนที่จะตีความข้อมูล วิธีทางสถิติไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยใดมีผล (Effect) เท่าใดได้แน่นอน แต่เป็นเพียงเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่นเป็นเปอร์เซนต์ ในการสรุปผลและข้อเสนอแนะเมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว จะต้องสรุปผลของการวิเคราะห์ ซึ่งอาจแสดงในรูปกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ

แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design)

การทดลองแบบแฟกทอเรียล เป็นการศึกษาผลที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนองในทุกๆ ระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ (Treatment Combination) ที่มีจำนวน 2 ปัจจัยขึ้นไปโดยทุกๆ ระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญของปัจจัยนำเข้าทุกตัวจะได้รับการศึกษาไปพร้อมๆ กัน

ผลกระทบจากปัจจัยนำเข้า จะนิยามด้วยการตรวจสอบค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองที่ศึกษาที่เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับของปัจจัยนำเข้านี้เรียกว่า “อิทธิพลหลัก (Main Effect)" ส่วนอิทธิพลร่วม (Interaction) จะหมายถึงค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองในระดับของปัจจัยนำเข้าตัวหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันในระดับต่างๆ ของปัจจัยนำเข้าตัวอื่นๆ ซึ่งแสดงได้ โดยพิจารณาจากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองในรูปที่ 2.8



ก) ข)

รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงปัจจัยร่วมในการทดลอง

ก) ปัจจัยร่วมไม่มีผล ข) ปัจจัยร่วมมีผล

ประโยชน์ของการทดลองแบบแฟกทอเรียล

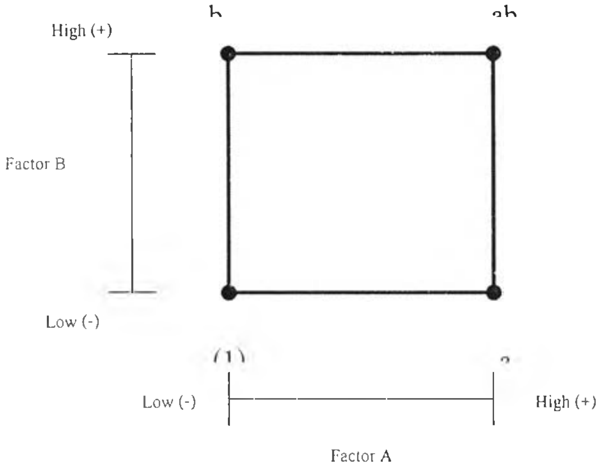
- ในกรณีที่ต้องการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยนำเข้าจำนวนหลายตัวจะใช้จำนวนสิ่งตัวอย่างในการทดลองจำนวนที่น้อยกว่าการทดลองทีละ 1 ปัจจัย (One-factor-at-a-time)
- ใช้เวลาการทดลองที่น้อยกว่า เนื่องจากเป็นการศึกษาปัจจัยหลายตัวพร้อมๆ กัน
- ผลสรุปจากการทดลองแบบแฟกทอเรียล สามารถที่จะสรุปผลได้ครอบคลุมมากกว่าเนื่องจากสามารถพิจารณาในส่วนของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยในการทดลองด้วย

รูปแบบต่าง ๆ ของการทดลองการทดลองแบบแฟกทอเรียล มีดังนี้

- General Full Factorial Designs: จะกำหนดค่าของปัจจัยนำเข้าในระดับต่างๆ ที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลอง และทำการทดลองในทุกๆ ระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ

- Fractional Factorial Designs: เป็นสับเซตของการทดลอง General Full Factorial Design คือ จะลดจำนวนของการทดลองลง โดยพิจารณาเลือกจำนวนการทดลองจาก Treatment Combination ในผลกระทบที่ระดับสูงของตัวแปรซึ่งเรียกว่า “Generator”

- 2^k Factorial Designs: เป็นการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นแบบ Full Factorial หรือเป็นแบบ Fractional Factorial Design โดยในแต่ละปัจจัยนำเข้าจะกำหนดค่าเพียง 2 ระดับในการทดลอง และทำการทดลองในทุกๆ ระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของตัวแปรตอบสนองในการวิจัย ตัวอย่างภาพแสดงระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญของการทดลองแบบ 2^k Factorial Designs ในรูปที่ 2.9



*รูปที่ **2.9** แผนภาพแสดง Treatment Combination ใน 2^k Factorial Design*

ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ซึ่งเป็นการทดลองที่มีหลายปัจจัย (Multiple Factor Experiment) และเนื่องจากปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้น นอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้ว ยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Inteaction Effect) ได้ด้วย

อิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) คือ ผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้อิทธิพล (Effect) ของอีกปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงด้วย ดังตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วมหรือปฏิสัมพันธ์ ซึ่งเมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดัง (1) และเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดัง (2) โดย A และ B คือ ปัจจัย 2 ปัจจัย

เหตุที่ใช้ เนื่องจากการออกแบบ 2^k แฟกทอเรียลนั้น เหมาะสมกับรูปแบบ (Model) ที่มีความเป็นเส้นตรง (Linearity) จึงจะมีความถูกต้องในการตีความข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นหากว่าอิทธิพลของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองมีความเป็นเส้นตรง (Linearlity) ไม่ดีแล้วจะหันมาใช้แบบ 3^k แฟกทอเรียลแทนจะเหมาะสมกว่า

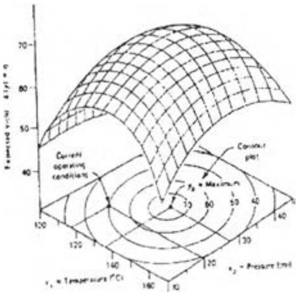
แผนการทดลองแบบแฟรกชั่นนอลแฟกทอเรียล (Fractional Factorial Design) เป็นการประยุกต์จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟรกชั่นนอลแฟกโทเรียล จะใช้กับการทดลองหลายปัจจัยที่มีปัจจัยเป็นจำนวนมากจึงต้องทำการตัดปัจจัยบางตัวออกโดยอาศัยหลักการคอนฟาวด์ (Confound)

การคอนฟาวด์ (Confound) เป็นเทคนิคที่ใช้ช่วยในการออกแบบทำให้ขนาดของบล็อกเล็กลงจากเดิม ซึ่งในการออกแบบนี้จะเกิดผลทำให้สารสนเทศเกี่ยวกับอิทธิพลของทรีตเมนต์ (Treatment Effect) รวมปะปนอยู่กับอิทธิพลของบล็อก (Block Effect) เสมอ การเลือกอิทธิพลของทรีตเมนต์ที่จะทำการคอนฟาวด์ (Confound Effect) จะเลือกจากความรู้ในกระบวนการผลิตเป็นตัวกำหนดโดยเลือกทรีตเมนต์ที่คาดว่าจะมีผลน้อยต่อตัวผลิตภัณฑ์

การประมาณการทดสอบเอฟ (Approximate F-test) ในการทดลองแบบแฟกทอเรียลที่มีปัจจัย 3 ปัจจัยหรือมากกว่า ซึ่งจะเป็นรูปแบบกำหนดรูปแบบอื่น ๆ และการออกแบบที่ซับซ้อนบ่อยครั้ง พบว่าไม่สามารถทดสอบทางสถิติได้อย่างถูกต้องในบางอิทธิพลของทรีตเมนต์ซึ่งการแก้ไขหนทางหนึ่งที่เป็นไปได้คือการตั้งสมมุติฐานว่าในบางปฏิสัมพันธ์บางอิทธิพลสามารถที่จะละเลยได้

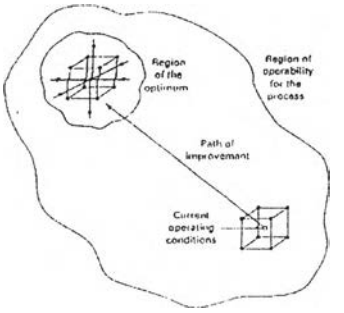
- **พื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM)**

ปารเมศ ชุติมา (2545) กล่าวถึง วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยผลที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ ตัวอย่างของกราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ

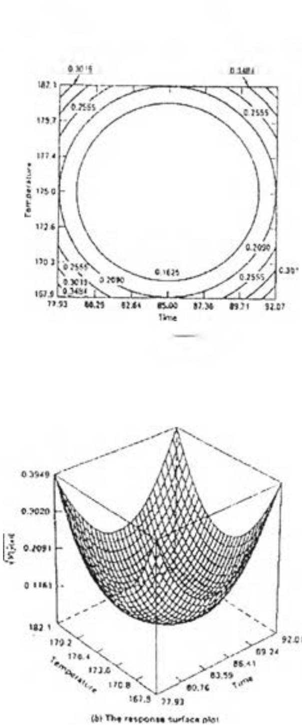
จากรูปที่ 2.11 พบว่า การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบเปรียบเสมือนกับการปีนภูเขา ซึ่งยอดเขาจะเป็นจุดที่มีผลตอบสูงสุด จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ คือ การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีทีสุดสำหรับระบบ หรือ เพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยก่อให้เกิดการทำงานอย่างน่าพอใจ



*รูปที่ **2.11** วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ*

ผลตอบหลายตัว

การพิจารณาผลตอบหลายตัวพร้อมๆ กันทำได้โดยการสร้างแบบจำลองของพื้นผิวผลตอบที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแต่ละตัว และหลังจากนั้นเราหาเซ็ตของเงื่อนไขการทำงานที่จะทำให้ผลตอบทั้งหมดมีค่าที่ดีที่สุดหรืออย่างน้อยสุดให้ผลตอบทั้งหมดอยู่ภายใต้ของเขตที่ยอมรับได้ดังแสดงตัวอย่างกราฟเส้นโครงร่างและพื้นผิวผลตอบของผลตอบหลายตัวในรูปที่ 2.12



*รูปที่ **2.12** กราฟเส้นโครงร่างและพื้นผิวผลตอบของผลตอบหลายตัว*

การออกแบบการทดลองสำหรับฟิตพื้นผิวผลตอบ

การฟิตและวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะทำได้ง่ายขึ้น ถ้าเราเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมในส่วนนี้ จะขออธิบายเกี่ยวกับแนวทางในการเลือกการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับฟิตพื้นผิวผลตอบ เมื่อจะเลือกการออกแบบพื้นผิวผลตอบลักษณะของการออกแบบที่ต้องการบางประการที่ควรพิจารณา คือ

1. ทำให้เกิดการแจกแจงหรือการกระจายที่เหมาะสมของจุดของข้อมูลตลอดบริเวณที่อยู่ในความสนใจ
2. ทำให้สามารถตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง และ Lack of Fit ได้
3. ทำให้การทดลองสามารถเกิดขึ้นได้ในบล็อก
4. ทำให้การออกแบบที่มีอันดับ (Order) สูงขึ้นสามารถสร้างขึ้นได้ตามลำดับ
5. ให้ค่าประมาณภายในของความผิดพลาด
6. ไม่ต้องรันการทดลองเป็นจำนวนมาก
7. ไม่ต้องมีหลายระดับของตัวแปรอิสระ
8. คำนวณพารามิเตอร์ในแบบจำลองได้ง่าย

ลักษณะสมบัติที่ต้องการเหล่านี้ในบางครั้งอาจจะขัดแย้งกันได้ ดังนั้น จะต้องมีการไตร่ตรองอย่างดีก่อนที่จะเลือกการออกแบบที่จะนำมาใช้งาน

2.2.2.5 ขั้นตอนการควบคุมกระบวนการผลิต (Control Phase)

- **แผนภูมิควบคุม**

วีระพงษ์ เฉลิมจิระวัฒน์ (2541) ได้อธิบายความหมายของแผนภูมิควบคุม (Control Chart) ดังนี้

แผนภูมิควบคุม คือ แผนภูมิหรือกราฟที่จัดทำขึ้นล่วงหน้า โดยอาศัยข้อมูลจากขอบเขตที่กำหนด (Specification) ที่ระบุคุณสมบัติทางคุณภาพข้อใดข้อหนึ่งของชิ้นงานที่ดำเนินการผลิตและต้องการจะควบคุม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการติดตามผลการผลิตจากกระบวนการผลิตขั้นตอนใดตอนหนึ่ง โดยการตรวจวัดคุณภาพของชิ้นงานซึ่งในการวัดข้อมูลอาจจะอยู่ในลักษณะ 2 แบบ คือ ข้อมูลที่ได้จากการวัด (Variable Data) และข้อมูลที่ได้จากการนับ (Attribute Data) จากนั้นเขียนบันทึกลงในแผนภูมินั้นๆ ซึ่งโดยปกติจะมีเส้นควบคุม 3เส้น ได้แก่ เส้นขอบเขตกลาง คือ เส้นที่แสดงขนาด หรือจำนวนที่เป็นข้อกำหนดหรือเป้าหมายในการผลิตเส้นขอบเขตควบคุมบนและเส้นขอบเขตควบคุมล่างเป็นค่าที่อนุญาตให้มีความ

คลาดเคลื่อนในการผลิตเกิดขึ้นได้ และหากอยู่ในขอบเขตนี้ก็ถือว่าผลการผลิตยอมรับได้ แต่หากว่าค่าที่ได้อยู่นอกเหนือขอบเขตควบคุม (ไม่ว่าในทางมากกว่าหรือต่ำกว่า) ถือว่าการผลิตในขณะนั้นยอมรับไม่ได้จะต้องมีการปรับปรุงแก้ไขจุดบกพร่องโดยทันที

โดยธรรมชาติของกระบวนการผลิตทั้งหลายย่อมมีความผันแปร (Variation) เกิดขึ้นกับชิ้นงานหรือผลผลิตได้ โดยความผันแปรบางชนิดเป็นเรื่องปกติและอนุญาติ หรือยอมให้เกิดขึ้นได้ในการผลิตโดยไม่ก่อความเสียหายต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่ความผันแปรบางชนิดมีผลกระทบมากและมีผลเสียหายต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เพราะทำให้ขนาดของชิ้นงานหรือคุณสมบัติบางประการผิดไปจากมาตรฐานที่กำหนดดังนั้นการเข้าใจในสาเหตุแห่งความผันแปรจึงเป็นสิ่งสำคัญโดยสาเหตุความผันแปรต่าง ๆ มีผลมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ชนิดคือ

สาเหตุที่เป็นปกติวิสัย หรือเป็นธรรมชาติของการผลิต (Chance Cause) เป็นลักษณะสาเหตุของความผันแปรที่ไม่มีความรุนแรง และไม่มีผลต่อคุณภาพของสินค้าที่ผลิตได้เกิดจากความผันแปรหรือความแตกต่างเล็ก ๆ น้อย ๆ ของวัตถุดิบและปัจจัยการผลิตต่าง ๆ ซึ่งแน่นอนว่าไม่มีของสองสิ่งที่เหมือนกันทุกประการ วัตถุดิบ 100 ชิ้น ที่มีขนาดตรงกันตามข้อกำหนดทั้ง 100 ชิ้นก็จะมีขนาดแต่ละชิ้นที่แตกต่างกันออกไปเพียงแต่ว่าความแตกต่างเหล่านั้น อยู่ในพิกัดที่ขอบเขตข้อกำหนดได้อนุญาตเอาไว้แล้วในค่าพิกัดความเผื่อ (Tolerance) ของชิ้นงาน ฉะนั้น ความผันแปรในคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากสาเหตุที่เป็นปกติวิสัยของการผลิตจึงเป็นสิ่งที่ยอมรับได้ในการควบคุมคุณภาพด้วยแผนภูมินี้ นั่นคือ กระบวนการผลิตที่เขียนแสดงด้วยแผนภูมิควบคุมแล้วไม่มีจุดใดจุดหนึ่งอยู่นอกเส้นควบคุม

สาเหตุที่ระบุได้หรือสาเหตุที่กำจัดได้ (Assignable Cause) เป็นลักษณะสาเหตุของความผันแปรที่เกิดจากความผิดพลาด ความผิดปกติ ความชำรุด ความไม่ได้เกณฑ์ ฯลฯ ของปัจจัยการผลิตต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และไม่ใช่เป็นปกติวิสัยหรือธรรมชาติของการผลิตนั้น ๆ จำเป็นจะต้องได้รับการกำจัดหรือแก้ไขจึงจะทำให้คุณภาพของงานผลิตกลับเข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้งได้

ในแผนภูมิควบคุมเมื่อมีจุด (ซึ่งเขียนจากการเก็บข้อมูลและวัดค่าชิ้นงานตัวอย่างจากการผลิต) ปรากฏว่าอยู่นอกเส้นขอบเขตควบคุมย่อมแสดงได้ว่าเกิดมีสาเหตุที่ระบุได้เกิดขึ้นมาในกระบวนผลิตนั้นแล้วและเรียกสภาวะการผลิตนั้นว่ากระบวนการผลิตอยู่นอกควบคุม

ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย (2538) ได้อธิบายว่าแผนภูมิควบคุมคิวซี เป็นคิวซีเทคนิคอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ควบคุมการผลิตในระหว่างการผลิต เพื่อตรวจสอบว่ากระบวนการผลิตมีจุดใดเปลี่ยนแปลงหรือไม่ หรือการเปลี่ยนแปลงนั้น ๆ ยังอยู่ในพิกัดควบคุมหรือไม่ ปกติจะใช้แผนภูมิควบคุมกับระบบการผลิตสภาพปกติ หรือมีการผลิตสม่ำเสมอจะไม่ใช้กับผิดปกติโดยเด็ดขาด จุดมุ่งหมายที่ใช้เทคนิคของแผนภูมิควบคุมมีดังนี้

- เพื่อหาเป้าหมาย หรือมาตรฐานของการผลิต
- เพื่อใช้เป็นเครื่องมือตรวจสอบว่า การผลิตอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานหรือไม่
- เพื่อใช้เป็นเครื่องมือเพื่อให้ได้เป้าหมายที่วางแผนล่วงหน้าไว้แล้ว

เส้นควบคุมข้อกำหนด (Specification Limit) หมายถึง ค่าขอบเขตข้อกำหนดของสินค้าหรือชิ้นงานที่โรงงานหรือรัฐบาลเป็นผู้กำหนดขึ้น ทั้งนี้เส้นควบคุมข้อกำหนดขึ้นอยู่กับ ดุลยพินิจของผู้ออกแบบว่าต้องการเสี่ยงหรือความปลอดภัย (Safety Factor) ไว้ที่ระดับเท่าใด

เส้นควบคุมขีดความสามารถ (Process Capability Limit) หมายถึง ค่าขอบเขตความสามารถจริงของกระบวนการ โดยทั่วไป คำนวณจากค่าพารามิเตอร์ของประชากร หรือคำนวณจากกลุ่มตัวอย่างที่จำนวนมาก เส้นควบคุมขีดความสามารถมีขนาดความกว้างเท่ากับค่าห่างจากค่าเฉลี่ยของประชากร $\pm 3\sigma$ และกำหนดเส้นขอบเขตควบคุมสำหรับเป็นสัญญาณเตือนว่าการผลิตเริ่มออกจากการควบคุมหรือยังกำหนดในช่วงค่าเฉลี่ย $\pm 2\sigma$

การใช้งานแผนภูมิควบคุม การใช้แผนภูมิควบคุมในกระบวนการผลิต ควรมีเทคนิคต่อไปนี้ เลือกบริเวณที่จะควบคุมก่อนอื่นก็คือปัญหาอะไรที่จะต้องทำ และเรามีจุดมุ่งหมายอะไรจากการตัดสินใจในปัญหา ทำให้ทราบทันทีอย่างชัดแจ้งว่าต้องการข้อมูลอะไรพิจารณาการใช้แผนภูมิควบคุมแบบไหนอาจจะเป็นแผนภูมิ แบบ $\bar{x} - R$, x, pn, p, c หรือ u Chart ก็ได้ ขึ้นอยู่กับโรงงานและผลิตภัณฑ์แต่ละแห่งทำแผนภูมิควบคุม

สำหรับการวิเคราะห์เก็บข้อมูลในช่วงเวลาที่เหมาะสม แล้วใช้ข้อมูลที่ผ่านมาทำแผนภูมิ ถ้ามีจุดใด ๆ ผิดปกติ ต้องทำการค้นหาเหตุผลที่ทำให้คุณภาพเปลี่ยนไปทันที แล้วทำการแก้ไขสร้างแผนภูมิควบคุมสำหรับการควบคุมในโรงงาน หากว่าต้นเหตุที่ทำให้คุณภาพเปลี่ยนได้ขจัดหมดสิ้นแล้วจากในข้อ 3 และกระบวนการผลิตก็คงที่ให้พิจารณาดูอีกครั้งว่าผลิตภัณฑ์ได้มาตรฐานตามที่กำหนดไว้หรือไม่ หลังจากนั้นถ้าทุกอย่างเรียบร้อยก็ให้สรุปผลทั้งหมดเพื่อทำมาตรฐานวิธีการทำงาน (Standardize Working Procedure) หรืออาจจะมีการปรับปรุงให้ดีขึ้น ถ้าจำเป็นต่อเส้นควบคุมของแผนภูมิออกไป จากนั้นพลอตข้อมูลที่ถูกเก็บได้ในแต่ละวันก่อนไปควบคุมกระบวนการผลิต ถ้าการทำงานของคนงานและวิธีการผลิตเป็นแบบมาตรฐาน

แล้วแผนภูมิควบคุมจะชี้แสดงออกให้เห็นว่าสภาวะที่โรงงานอยู่ภายใต้การควบคุมที่ดีหรือไม่แต่ถ้าปรากฏว่ามีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้น ต้องการค้นหาสาเหตุทันทีแล้วแก้ไขให้ถูกต้องด้วยการคำนวณใหม่ ถ้าเครื่องจักรหรือมาตรการทำงานเปลี่ยนแปลงเส้นควบคุมต้องนำมาคำนวณใหม่ ถ้าการควบคุมของกระบวนการผลิตในโรงงานยังดีตลอดระดับคุณภาพที่แสดงบนแผนภูมิ จะปรับดีเพิ่มด้วยในกรณีเช่นนี้ให้สังเกตแผนภูมิควบคุมเป็นระยะในการคำนวณเส้นควบคุมให้สังเกตกฎต่อไปนี้

- ข้อมูลที่จุดผิดปกติซึ่งค้นพบสาเหตุหรือไม่มีการแก้ไขควรจะรวมเข้าไปในการคำนวณใหม่
- ข้อมูลที่จุดผิดปกติแต่ไม่พบสาเหตุหรือไม่มีการแก้ไขควรจะรวมเข้าไปในการคำนวณใหม่

▪ วิธีการอ่านแผนภูมิควบคุม

วีระพงษ์ เฉลิมจิระรัตน์ (2537) กล่าวว่า สิ่งที่สำคัญที่สุดของการควบคุมคุณภาพโดยใช้แผนภูมิ คือ การอ่านหรือตีความหมายจากภาพที่ปรากฏบนแผนภูมิเพื่อโยงเหตุผลไปที่สภาวะของกระบวนการผลิตซึ่งได้ผลิตข้อมูลที่เราได้นำมาเขียนเป็นแผนภูมิควบคุมเพราะอาการผิดปกติต่างๆ ในกระบวนการผลิตที่จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะแสดงออกให้เป็นรูปธรรมที่แผนภูมิควบคุมนี้เอง และเมื่อตรวจพบความผิดปกติของกระบวนการผลิตโดยอ่านจากแผนภูมิควบคุมนี้แล้ว จะได้ไปทำการแก้ไขที่สาเหตุของความผันแปรใดๆ ในกระบวนการผลิตนั้นเพื่อปรับสภาวะการผลิตให้กลับสู่สภาวะที่อยู่ในควบคุม (In-Controlled) ได้ต่อไป

ข้อแนะนำเกี่ยวกับ 6 ลักษณะอาการสำคัญเพื่อการอ่านแผนภูมิควบคุมอยู่นอกควบคุมพบได้ชัดเจน คือ มีจุดในแผนภูมิปรากฏอยู่นอกเส้นขอบเขตควบคุม เรียกว่า จุดอยู่นอกควบคุม (Out of control) อาจอยู่นอกค่าสูงหรือค่าต่ำก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13

การรัน (Run)

เมื่อปรากฏติดต่อกันบนซีกใดซีกหนึ่งของเส้นค่ากลาง เรียกว่า เกิดรันความยาวของรันแต่ละชุดนับจากจำนวนจุดในชุดนั้น และรันที่มีความยาวตั้งแต่ 7 จุดขึ้นไปตีความได้ว่าได้เกิดความผิดปกติขึ้นแล้วในการผลิตช่วงที่เกิดนั้น

การเกิดแนวโน้ม

การมีจุดต่อเนื่องกันไปในทิศทางเดียวกันอย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการสลับฟันปลาเลยมีผลทำให้เส้นต่อจุดเหล่านั้นคล้ายๆ เส้นตรงพาดขึ้นหรือพาดลงเช่นนี้ เรียกว่า มีการเกิดแนวโน้ม (Trend) ขึ้นในแผนภูมิควบคุมแนวโน้มที่ว่านี้ คือ แนวโน้มที่กำลังบอกว่าค่าเฉลี่ยของขนาดควบคุมที่ผลิตได้จากกระบวนการผลิตนั้นกำลังมีปัญหา หรือ มีแนวโน้มจะเคลื่อนไปจากขนาดที่ได้กำหนดไว้ตั้งเอาไว้แต่แรก

การเกิดการเข้าใกล้เส้นขอบเขตควบคุม

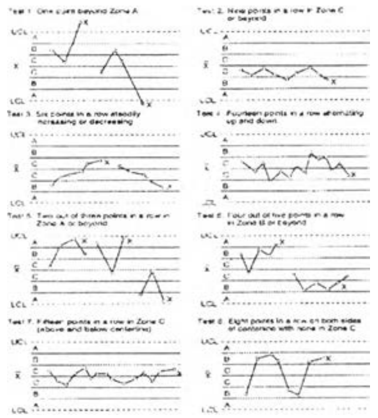
หากแบ่งระยะ 3 ซิกม่า (3σ) จากเส้นค่ากลางออกเป็นเส้น 2σ แล้วพบว่ามี 2 จุด ใน 3 จุดที่ต่อเนื่องกันในแต่ละช่วงได้ตกไปอยู่ในพื้นที่ระหว่างเส้น 2σ กับเส้นขอบเขตควบคุม (3σ) ถือได้ว่า เกิดการเข้าใกล้เส้นขอบเขตควบคุมแล้ว และเป็นการบอกว่ามีความผิดปกติขึ้นในกระบวนการผลิตแล้ว

การเกิดการเข้าใกล้เส้นค่ากลาง

หากพบว่าเส้นกราฟทั้งหมดตกอยู่ในระหว่างเส้น 1.5σ นับจากเส้นค่ากลางขึ้นไปและลงมาแล้วไม่ได้ หมายความว่ากระบวนการผลิตนั้นอยู่ในควบคุมแต่กลับ แสดงว่าคงจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในการกำหนดขนาดของกลุ่มย่อยข้อมูลอาจมีการปะปนกันของข้อมูลที่นำมาจากต่างประชากรกันและเกิดการปะปนกัน

การเกิดวัฏจักร

มีลักษณะ คือ ค่าในเส้นกราฟจะเปลี่ยนแปลงขึ้นๆ ลงๆ มีลักษณะเป็นวงจรวงรอบหรือวัฏจักรที่เกือบจะทำนายลักษณะเส้นกราฟในช่วงต่อๆไปได้ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิดวัฏจักร (Periodicity)



รูปที่ 2.13 *แสดง กฎ 8 ข้อของ Control Chart*

2.3 สรุปการสำรวจงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้รวบรวมผลงานวิจัยในส่วนของการดำเนินการทาง ซิกซ์ ซิกม่า และการดำเนินการทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน ซึ่งได้ทำการรวบรวมเพื่อศึกษาจุดเด่นของแต่ละงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในแต่ละหัวข้อของงานวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้สะดวกในการพิจารณาว่าในแต่ละงานวิจัยได้ศึกษาโดยเน้นหัวข้อใด ได้ผลที่เป็นจุดเด่นเช่นไร รวมถึงแต่ละงานวิจัยมีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใดดังสรุปเป็นตารางที่ 2.3 และในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย 2 ส่วนคือ ทฤษฎีที่เกี่ยวกับหลักการถ่ายเทความร้อน โครงสร้างและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ องค์ประกอบของท่อความร้อน กระบวนการผลิตและการประกอบท่อความร้อน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทางซิกซ์ ซิกม่า เพื่อให้สามารถประยุกต์เครื่องมือต่างและวิธีการๆ ให้เหมาะสมกับขั้นตอนการดำเนินงาน

***ตารางที่ 2.3** ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง*

ผู้แต่ง	หัวข้องานวิจัย	งานวิจัย	จุดเด่น
Ang	วิธีการทาง ซิกซ์ ซิกม่า	การศึกษาเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งที่เกิดจากการใช้ขนาดของแพลเลทเป็นครึ่งหนึ่งจากขนาดเดิมด้วยวิธีการทางซิกซ์ ซิกม่า	สามารถที่จะลดน้ำหนักของแพลเลท เหลือ 7 กิโลกรัม ซึ่งเมื่อคิดเป็นค่าขนส่งที่สามารถประหยัดได้เท่ากับ 124,970 ดอลลาร์สหรัฐต่อปี
Behara และคณะ	วิธีการทางซิกซ์ ซิกม่า	ได้ทำการศึกษาถึงการวัดและการวิเคราะห์ความพึงพอใจของลูกค้าโดยการใช้ ซิกซ์ ซิกม่า ด้วยการใช้เครื่องมือทางสถิติ	ปริมาณของเสียที่ระดับ $\pm 3\sigma$ นั้นมีค่าเทียบเท่ากับจำนวนที่ลูกค้าไม่พอใจ 499 ราย และที่ระดับ $\pm 4\sigma$ นั้นมีค่าเทียบเท่ากับจำนวนที่ลูกค้าไม่พอใจ 60 ราย แต่โดยประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์มีจำนวนที่ลูกค้าไม่พอใจ 439 ราย จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพยามยามลดจำนวนที่ลูกค้าไม่พึงพอใจลงด้วยวิธีการที่ง่ายที่สุด มีขั้นตอนการทำงานที่น้อยที่สุด

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง	หัวข้องานวิจัย	งานวิจัย	จุดเด่น
Coronado และ Antony	วิธีการทางซิกซ์ ซิกม่า	ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่นำไปสู่ความสำเร็จในการนำซิกซ์ซิกม่าประยุกต์ใช้ขององค์กรต่าง ๆเพื่อใช้ในการปรับปรุงกลยุทธ์ทางธุรกิจ	โดยการเพิ่มกำไรจากการขจัดความแปรปรวนและลดของเสียในกระบวนการรวมถึงการลดค่าใช้จ่ายทางคุณภาพทราบถึงความต้องการและความคาดหวังของลูกค้าโดยการนำเทคนิคและเครื่องมือทางสถิติจาก 1,800 DPPM เหลือประมาณ 550 DPPM และทำให้บริษัทซีเกทสามารถที่จะลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากของเสียได้ 21,246 ดอลลาร์สหรัฐ
Ferrin และคณะ	วิธีการทางซิกซ์ ซิกม่า	ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ซิกซ์ ซิกม่า และการจำลองแบบปัญหา	การนำการจำลองแบบปัญหามาเพื่อทดสอบว่าวิธีการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ มีความเป็นไปได้ก่อนที่จะทำการปฏิบัติการแก้ไขปัญหาจริง รวมถึงการได้มาซึ่งวิธีการที่ดีที่สุดซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีกว่า
Goh	สถิติและการควบคุมคุณภาพ	ได้ทำการศึกษาถึงสิ่งที่เกี่ยวข้องกับสถิติวิศวกรรมคุณภาพ (Statistical Quality Engineering)	การประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดเก็บฐานข้อมูลเพื่อปรับปรุงและแก้ไขให้ความสามารถของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ดีขึ้น
Johns และคณะ	วิธีการทางซิกซ์ ซิกม่า	ได้นำวิธีการต่าง ๆ ของ ซิกซ์ ซิกม่า มารวบรวมให้เข้ากันโดยมุ่งเน้นในขั้นตอนของการนิยามและวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา ซึ่งได้นำหลักการดึงและผลัก	หลักการผลักมาจากการบริหารจากบนลงล่างเป็นการกำหนดกลยุทธ์ในการจัดการต่าง ๆ เพื่อให้การดำเนินการต่าง ๆของแต่ละโครงการมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ใช้ทรัพยากรต่าง ๆอย่างคุ้มค่ามากที่สุดหลักการดึงหมายถึงการมุ่งเน้นคุณภาพเพื่อให้บุคลากรภายในองค์กรตระหนักถึงเป้าหมายและผลตอบกลับจากลูกค้าภายใต้ความรับผิดชอบของทุกคนในองค์กร

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง	หัวข้องานวิจัย	งานวิจัย	จุดเด่น
Kodiyalam และคณะ	วิธีการทางซิกซ์ ซิกม่า	ศึกษาถึงการออกแบบการทดลองโดยใช้พื้นผิวผลตอบ (RSM)	เพื่อแสดงวิธีการที่นำไปสู่ค่าที่เหมาะสมและถูกต้องมากที่สุดจากการวิธีการพื้นผิวผลตอบเพื่อให้ได้นัยสำคัญที่เป็นเทอมกำลังสอง เนื่องจากที่ระดับ 2 ปัจจัยจะครอบคลุมขอบเขตของค่าที่เหมาะสม
Kwork และ Tummala	การควบคุมคุณภาพ	ทำการศึกษาเรื่องการควบคุมคุณภาพและปรับปรุงระบบตามหลักการควบคุมคุณภาพโดยรวม	การจำแนกแบบนี้ทำให้สามารถเข้าใจโครงร่างได้ง่ายนำไปใช้งานได้จริงมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะต่างๆให้เหมาะสมอย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ได้นำเทคนิคมาใช้มากเกินไปหรือเกิดการขัดแย้งกัน
Ress	วิธีการทางซิกซ์ ซิกม่า	ทำการศึกษาความสัมพันธ์ที่เหมือนกันระหว่าง ซิกซ์ ซิกม่า กับการบริหารโครงการ	เปรียบเทียบ บ่งชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างทั้ง 5 ขั้นตอนของการดำเนินงานของซิกซ์ ซิกม่า ที่มีความสอดคล้องกับ PMI PMBOK (Project Management Body of Knowledge) โดยที่กลุ่มของ PMBOK เป็นกระบวนการของการวาง แผนคุณภาพ การประกันคุณภาพ และการควบคุมคุณภาพ จะเห็นได้ชัดว่าเป็นส่วนสำคัญของการบริหารคุณภาพ กล่าว คือ ทั้งซิกซ์ ซิกม่า และ PMBOK มีลักษณะของความสัมพันธ์และรายละเอียดที่สอดคล้องและเกี่ยวเนื่องกัน

***ตารางที่ 2.3 (ต่อ)** ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง*

ผู้แต่ง	หัวข้องานวิจัย	งานวิจัย	จุดเด่น
Yam	วิธีการทางซิกซ์ ซิกม่า	ทำการศึกษาเพื่อลดของเสียของกระบวนการ การหยอดกาวที่ Flip-chip	ผลจากการปรับปรุงกระบวนการหยอดกาวด้วยวิธีทาง ซิกซ์ ซิกม่า สามารถที่จะลดของเสียจาก 1,800 DPPM เหลือประมาณ 550 DPPM และทำให้บริษัทซีเกทสามารถที่จะลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากของเสียได้ 21,246 ดอลลาร์สหรัฐ
ชาญชัย บวรโชคชัย	วิธีการทางซิกซ์ ซิกม่า	ลดปริมาณของเสียที่เกิดจากค่า PitchStatic Attitude (PSA) ของแขนจับหัวอ่านโดยนำวิธีการปรับปรุงกระบวนการผลิตตามแนวทางซิกซ์ ซิกม่า	มีปริมาณของเสียเท่ากับ 4,456 DPPMจากข้อมูลหลังการปรับปรุงกระบวนการพบว่ามีปริมาณของของเสียเกิดขึ้นประมาณ 997 DPPM สามารถที่จะลดความสูญเสียได้เป็นจำนวนเงิน 2,750,580 บาท
อัชริยา เก็งวินิจ	การออกแบบการทดลอง	ทำการศึกษาปัจจัยที่มิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยมุมของแขนจับยึดหัวอ่านเขียนและเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยมุมของแขนจับยึดหัวอ่านเขียน	เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนตามค่าของปัจจัยที่เหมาะสมพบว่าค่า C_{pk} อยู่ที่ 1.1 โดยเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.2
วีรพจน์ เหล่าโพธิวิหาร	วิธีการทางซิกซ์ ซิกม่า	ทำการศึกษา ทฤษฎี ปรัชญา และขั้นตอนในการนำระบบ ซิกซ์ ซิกม่ามาใช้ปรับปรุงผลิตภาพรวมถึงกำหนดแนวทางการแก้ไขปรับปรุงสำหรับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์	สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต้นทุนที่ประหยัดได้ประมาณ 353,300 เหรียญสหรัฐ
พิเชษฐ ศรียวรยาตร	การออกแบบการทดลอง	ศึกษาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับความโค้งของกระจกรถยนต์	การปรับค่าพารามิเตอร์ของค่าแรงดันลมบนและล่างให้อยู่ในช่วง 800-1,200 มม.น้ำ จะทำให้กระจกทดสอบคุณภาพแตกไม่ผ่านตามมาตรฐานและยังทำการวิเคราะห์ต้นทุนเปรียบเทียบระหว่างเตาT-91 กับ T-81 พบว่าสามารถลดต้นทุนการผลิตเป็นจำนวน 615,896 บาท

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง	หัวข้องานวิจัย	งานวิจัย	จุดเด่น
นวลพรรณ ใจงาม	วิธีการทางซิกซ์ซิกม่า	ทำการวิจัยเกี่ยวกับการลดของเสียที่เกิดจากการถ่ายเทกระแสไฟฟ้าสถิตในกระบวนการประกอบหัวอ่านโดยใช้แนวทางซิกซ์ซิกม่า	สามารถลดค่าความเสียหายและได้รับผลประโยชน์ตอบแทนจากการปรับปรุงคุณภาพ 163,999 ดอลลาร์ สหรัฐ
ทรงพล พิเชษฐวัฒนา	การออกแบบการทดลอง	ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงดึงระหว่าง Slider และ Flexure ของหัวอ่านเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟและเสนอเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มคุณภาพของแรงดึงของหัวอ่านเขียนข้อมูล	สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้หัวอ่านเขียนมีค่าแรงดึงที่สูงสุดคืออัตราส่วนผสม 4:1 อุณหภูมิการอบที่ 300 องศาฟาเรนไฮต์ และเวลาในการอบ 16 นาที
สุรพล สุรบรรเจิดพร	การออกแบบการทดลอง	ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมดีบุก-ตะกั่วบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติและหาเงื่อนไขที่เหมาะ สมจากการทดลอง	ทำการปรับลักษณะการไหลของโลหะผสมโซลเดอร์ให้มีการเคลื่อนที่ทั้ง 2 ด้านและกำหนดความเร็วของสายพานที่ 108 ซม./นาที จะสามารถลดจำนวนจุดบกพร่องได้
พิศิษฐ์ เจริญกิจวิวัฒน์	FMEA	ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของสายเครื่องควบคุมไฟฟ้า	ระหว่างการดำเนินการใช้ FMEA พบว่าคำร้องเรียนของลูกค้าลดลงถึงร้อยละ 43.76
บุญสม ประเสริฐอัครกุล	การควบคุมคุณภาพ	การศึกษาหาวิธีการที่เหมาะสมในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ	พบว่าปริมาณการผลิตลดลงก่อนที่มีการปรับปรุงและค่าความเที่ยงตรงในการตรวจสอบของจุดตรวจสอบเพิ่มขึ้นจากก่อนการปรับปรุง
ปรีชา กอบเกื้อชัยพงษ์	ท่อความร้อน	การสร้างและทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ที่อุณหภูมิต่ำ	สาเหตุต่างๆที่ทำให้ประสิทธิภาพของท่อความร้อนไม่ดีเท่าที่ควร
พิชัย ตั้งสถาพร พาณิชย์	ท่อความร้อน	การศึกษาและการสร้างท่อความร้อนแบบไร้วิกค์	สร้างง่ายต้นทุนการผลิตต่ำ คุณภาพการผลิตมีลักษณะค่อนข้างแน่นอนกว่าท่อความร้อนแบบธรรมดา