บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่นำมาประยุกต์ใช้ในการดำเนินการวิจัย จะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย 2 ส่วนคือ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทางซิกซ์ ซิกมา ซึ่งได้กล่าวถึงการนำวิธีการและเครื่องมือต่างๆ มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับขั้นตอนการดำเนินงาน และทฤษฎีการชุบทองแดงโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้าและใช้กระแสไฟฟ้า รายละเอียดมีดังนี้

3.1 ความหมายและประวัติความเป็นมาของซิกซ์ ซิกมา [13,14]

ซิกซ์ ซิกมา คือระบบที่จะทำให้องค์กรสามารถที่จะนำความรู้และประยุกต์ใช้เครื่องมือทางสถิติต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์สำเร็จมีคุณภาพตามที่ลูกค้าต้องการ ซิกซ์ ซิกมาได้ถูกเริ่มใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1980 โดยบริษัทโมโตโรล่านำเสนอโดย Robert W. Galvin เพื่อที่จะใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการผลิตโทรศัพท์เคลื่อนที่และเพจเจอร์ และในปี ค.ศ. 1986 วิธีการทางซิกซ์ ซิกมาก็ได้ถูกพัฒนาโดย Dr. Mikel J. Harry ซึ่งเป็นพนักงานของบริษัทโมโตโรล่าเช่นเดียวกัน จนในปี ค.ศ. 1988 หลังจากที่บริษัทโมโตโรล่าได้ใช้ปรัชญาทางซิกซ์ ซิกมา เพื่อการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในองค์กร ทำให้บริษัทโมโตโรล่าได้รับรางวัลชนะเลิศทางด้านคุณภาพ Malcolm Baldrige National Quality Award

กลยุทธ์ในการปรับปรุงคุณภาพของโมโตโรล่าได้กลายเป็นจุดสนใจขององค์กรต่างๆ ทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมเกี่ยวกับยานยนต์ และอุตสาหกรรมอิเลคทรอนิคส์ องค์กรต่างๆได้มีความสนใจที่จะนำวิธีการนี้มาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อที่จะสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ตรงตามเป้าหมาย หนึ่งในนั้นคือบริษัทไอบีเอ็ม ซึ่งเป็นบริษัทแรกที่นำวิธีการนี้มาใช้ในองค์กร โดยประยุกต์ใช้กับหน่วยงาน Application Business Systems Division ซึ่งหลังจากประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้วิธีการทางซิกซ์ ซิกมาเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ทำให้บริษัทไอบีเอ็มได้รับรางวัลชนะเลิศทางคุณภาพ Malcolm Baldrige National Quality Award ในปี 1990

3.2 ตัววัดระดับของคุณภาพ [13]

ในการเลือกตัววัดระดับคุณภาพของกระบวนการผลิตเพื่อที่จะบ่งบอกถึงคุณภาพของกระบวน การนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายทางเลือก เช่น Yield, Rolled throughput yield, ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ Cp, Cpk, อัตราของของเสียที่เกิดขึ้นต่อล้านหน่วย (Part Per Million: PPM) หรือค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากคุณภาพที่ไม่ดีของผลิตภัณฑ์ (Cost of poor quality) และค่า Sigma Quality Level เป็นต้น

ในแนวคิดทางซิกซ์ ซิกมานี้มักจะอ้างอิงถึงค่า Sigma Quality Level เพื่อบ่งบอกถึงระดับของคุณภาพของกระบวนการ ซึ่งต่างจากคำว่า Sigma ที่หมายถึงค่าของความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการกระจายตัวของข้อมูลในทางสถิติ กล่าวคือค่าระดับ Sigma Quality Level นี้ยิ่งมีค่าที่มากขึ้น จะบ่งบอกถึงโอกาสในการเกิดของของเสียในกระบวนการผลิตที่มีน้อยลง โดยที่ระดับคุณภาพ ที่ 6 Sigma จะมีของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนเท่ากับ 0.002 ชิ้นต่อหนึ่งล้านหน่วยผลิตเมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยของกระบวนการอยู่ตรงจุดกึ่งกลาง และเมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยของกระบวนการเลื่อนไปจากจุดกึ่งกลางเท่ากับ $\pm 1.5\sigma$ จะมีของเสียเกิดขึ้นเป็นจำนวน 3.4 ชิ้นต่อหนึ่งล้านหน่วยผลิต รายละเอียดจำนวนของเสียที่ เกิดขึ้นเทียบกับค่า Sigma quality level แสดงดังตารางที่ 3.1

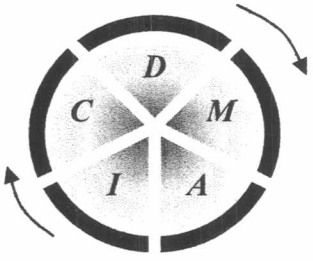
ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนของของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละ Sigma quality level

Sigma quality level	Mean at Center		Mean shifted 1.5s	
	Percentage	DPPM	Percentage	DPPM
1	68.27	317300	30.23	697700
2	95.45	45500	69.13	308700
3	99.73	2700	93.32	66810
4	99.9937	63	99.379	6210
5	99.999943	0.57	99.9767	233
6	99.9999998	0.002	99.99966	3.4

หรือหากคำนวณเป็นค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการจะได้ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการที่ 6 Sigma มีค่าเท่ากับ Cp = 2.0 และ Cpk = 1.5 (คิดที่ค่าเฉลี่ยของข้อมูลเลื่อนไปจากจุดกึ่งกลางของการกระจายเท่ากับ $\pm 1.5\sigma$) ซึ่งรายละเอียดของการคำนวณค่า Cp และ Cpk ที่ระดับคุณภาพเท่ากับ 6 Sigma แสดงในภาคผนวก ก

3.3 การปรับปรุงกระบวนการผลิตตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา [13,14]

ในการที่จะบรรลุวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำให้เกิดความสำเร็จตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ตามวิธีการทางซิกซ์ ซิกมา จะต้องมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องในทุกๆ จุดของการปฏิบัติงาน ซึ่งจะต้องอาศัยกลยุทธ์ในการประยุกต์ใช้วิธีการต่างๆ ในวิชาสถิติ ซึ่งในวิธีการทางซิกซ์ ซิกมานี้ จะประยุกต์ใช้กลยุทธ์ทั้ง 5 ขั้นตอนที่สำคัญในการปรับปรุงกระบวนการผลิต (Five-phase Improvement Model) คือ Define phase, Measure phase, Analyze phase, Improve phase และ Control phase ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 Five-phase improvement model cycle

ทั้ง 5 ขั้นตอนสำหรับการปรับปรุงกระบวนการผลิตนี้ มีพื้นฐานมาจากขั้นตอนที่เสนอโดย W. Edwards Deming คือ Plan, Do, Check และ Act (P-D-C-A) แต่มีข้อแตกต่างกันคือขั้นตอนต่างๆ ใน D-M-A-I-C เหล่านี้ไม่ได้เป็นรูปแบบที่เรียงตัวกันอย่างเส้นตรงโดยแท้จริง กล่าวคือเมื่อกลุ่มสมาชิกเริ่มทำการทดลอง, เก็บรวบรวมข้อมูล ฯลฯ อาจทำให้สามารถค้นพบกับปัญหาและกระบวนการต่างๆ ที่เป็นสาเหตุของปัญหาที่ไม่ได้คาดคิดว่าจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิต สิ่งที่ค้นพบนี้จะทำให้เราสามารถที่จะพิจารณาแก้ไขเป้าหมายของโครงงานใหม่ได้ แม้ว่าการทดลองจะได้ผลลัพธ์ออกมาแล้วก็ตาม หรือหลังจากที่ทำการทดสอบผลลัพธ์แล้วก็ตาม ทางกลุ่มผู้ทดลองควรที่จะทำการวิเคราะห์ผลเพิ่มต่อไป

โดยทั่วไปกลุ่มผู้ทำการทดลองสามารถที่จะบันทึกความก้าวหน้าของโครงงาน โดยอ้างอิงกับวงล้อ D-M-A-I-C ได้ แต่ในแต่ละขั้นตอนจะเป็นกิจกรรมที่สามารถทำซ้ำภายในตัวเองได้ โดยรายละเอียดและเครื่องมือทางสถิติที่นำมาประยุกต์ใช้ในแต่ละกิจกรรมทั้ง 5 ขั้นตอนมีดังนี้คือ

3.3.1 DEFINE PHASE (การนิยามปัญหา)

การนิยามปัญหา เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการทางซิกซ์ ซิกมา และเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญในการกำหนดจุดเริ่มต้นและทิศทางของการวิจัย โดยในขั้นตอนการนิยามนี้จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาความสามารถของกระบวนการผลิตเทียบกับความต้องการของลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ของบริษัท ซึ่งทำให้บริษัททราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้น และได้ข้อมูลสนับสนุนในการพิจารณาคัดเลือกถึงปัญหาที่จะทำการแก้ไขและขีดความสามารถในการปรับปรุงกระบวนการที่สามารถปฏิบัติได้จริง

นอกจากนี้ยังเป็นการกำหนดภาพรวมของการทำวิจัยอื่นๆ คือ วัตถุประสงค์หรือเป้าหมาย, แนวทางและวิธีการในการปฏิบัติ, ระยะเวลาในการทำการวิจัย, การกำหนดสมาชิกและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

3.3.2 MEASURE PHASE (การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา)

เป็นขั้นตอนถัดจากการนิยามปัญหา ซึ่งจะศึกษาเกี่ยวกับรายละเอียดของกระบวนการผลิตในทุกๆ ขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ที่ทำการวิจัย จากนั้นจะทำการศึกษาแหล่งที่มาของสาเหตุของปัญหารวมถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในสาเหตุต่างๆ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญในแต่ละสาเหตุที่เป็นไปได้เพื่อที่จะเลือกสาเหตุที่คาดว่าจะมีผลกระทบรุนแรงต่อกระบวนการผลิตมาทำการแก้ไขต่อไป

นอกจากนี้จะทำการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดที่ใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อที่จะประกันความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการวัด เพื่อลดความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการวัดในการเก็บข้อมูลและจากการทดลองต่างๆ ซึ่งความรู้และเครื่องมือทางสถิติที่เกี่ยวข้องในการศึกษากระบวนการในขั้นตอนนี้มีรายละเอียดดังนี้คือ

3.3.2.1 การระดมความคิด (Brainstorming Session) [15]

เป็นวิธีในการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยระดมความคิดจากบุคคลที่มีความรู้ ความชำนาญในแต่ละจุดการทำงานต่างๆ ภายในกระบวนการผลิตที่ทำการศึกษา ซึ่งในขั้นตอนนี้จุดมุ่งหมายอยู่ที่ปริมาณของความคิดเห็นที่ได้รับ เพื่อที่จะนำมาวิเคราะห์ความสำคัญด้วยเครื่องมืออื่นๆ ในขั้นตอนต่อไป

3.3.2.2 แผนภาพกระบวนการผลิต (Process Flowcharting) [15]

คือแผนภาพที่แสดงโครงสร้างและความสัมพันธ์ของขั้นตอนในกระบวนการผลิต ซึ่งจะบอกถึงลำดับของกิจกรรมแรกที่เริ่มต้นจนถึงกิจกรรมสุดท้ายตามลำดับ เพื่อประโยชน์ในการศึกษาถึงกระบวนการผลิต ทำให้สมาชิกในกลุ่มมีความเข้าใจในกระบวนการ

ผลิตที่ทำการศึกษาโดยละเอียดและเป็นไปในแนวทางเดียวกัน, นอกจากนี้ประโยชน์ของแผนภาพกระบวนการผลิตจะช่วยในการประเมินความสามารถของกระบวนการในแต่ละขั้นตอน , ชี้ให้เห็นถึงขั้นตอนที่เป็นคอขวดของกระบวนการผลิต, ชี้ให้เห็นถึงขั้นตอนหรือกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดคุณค่ากับผลิตภัณฑ์ (non-value added activities) ซึ่งสามารถที่จะทำการพิจารณากำจัดออกหรือทำการเปลี่ยนแปลงแก้ไข และอธิบายถึงกิจกรรมในการตรวจสอบ ทำให้การวางแผนการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นไปอย่างถูกต้อง ไม่เกิดข้อผิดพลาด

3.3.2.3 แผนภาพอิชิกาวา (Ishikawa or Cause-and-Effect Diagram) [15]

เป็นแผนภาพที่ประกอบไปด้วยผลกระทบของปัญหาและกลุ่มของสาเหตุต่างๆ ที่เป็นไปได้ของปัญหาที่ทำการศึกษา เป็นเครื่องมือหนึ่งในระบบการควบคุมคุณภาพที่มีประสิทธิภาพในกระบวนการแก้ไขปัญหา (Problem-solving process) แผนภาพนี้ได้ถูกคิดค้นและใช้โดย ดร. อิชิกาวา (Dr. K. Ishikawa) ณ มหาวิทยาลัยโตเกียว ในกลางปี 1940 โดยทั่วไปจะพิจารณาแยกสาเหตุของปัญหาออกเป็นหัวข้อหลัก 6 กลุ่มเพื่อให้ง่าย และเกิดประสิทธิภาพในการระดมความคิดเกี่ยวกับสาเหตุของปัญหาที่มาจากแหล่งที่มาต่างๆ ดังนี้คือ

- สาเหตุที่เกิดจากพนักงาน (Man)
- สาเหตุจากเครื่องจักร (Machine)
- สาเหตุจากวัตถุดิบ (Material)
- สาเหตุจากวิธีการทำงาน (Method)
- สาเหตุจากระบบการวัด (Measurement) และ
- สาเหตุจากสภาพแวดล้อมในกระบวนการผลิต (Environment)

นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงลักษณะของสาเหตุต่างๆ ว่าเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้, ตัวแปรที่เป็นสิ่งรบกวน และตัวแปรที่มีความสำคัญต้องทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ข้อเท็จจริง (C = Controllable factors, N = Noise factors และ X = Experimental factors) ขั้นตอนในการสร้างแผนภาพอิชิกาวา มีรายละเอียดดังนี้คือ

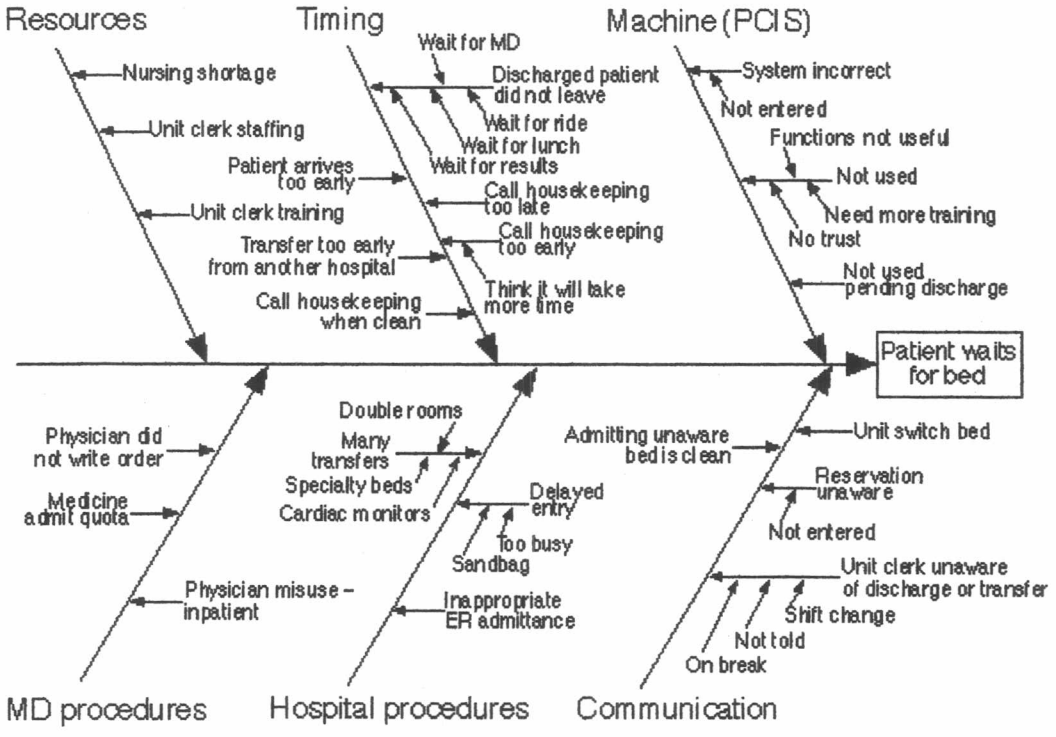
- พิจารณาลักษณะทางคุณภาพ หรือผลกระทบของปัญหาที่ทำการพิจารณาโดยใส่ไว้ในช่องขวาสุดของแกนในแนวนอน

- ทำการระดมความคิด เพื่อกำหนดสาเหตุหลักของปัญหาออกเป็นหมวดหมู่ คือ สาเหตุที่เกิดจากพนักงาน, เครื่องจักร, วัตถุดิบ, วิธีการทำงาน, ระบบการวัด และสภาพแวดล้อมในกระบวนการผลิต และอื่นๆ โดยเขียนหมวดหมู่ของสาเหตุต่างๆ นี้ในช่องสี่เหลี่ยมที่ต่อออกมาจากเส้นแกนหลักในแนวนอน

- ในแต่ละหมวดหมู่ ให้ระดมความคิดแจกแจงปัจจัยหรือสาเหตุต่างๆ ที่เกี่ยวข้องภายในหมวดหมู่ที่กำหนดไว้

- ทบทวนกระบวนการผลิตด้วยแผนภาพกระบวนการผลิต เพื่อให้แน่ใจว่าได้พิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดแล้ว

ตัวอย่างแผนภูมิอิชิกาวาแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างแผนภูมิอิชิกาวาของปัญหาการรอคอยเตียงรักษาของคนไข้ในโรงพยาบาล

3.3.2.4 Cause and Effect Matrix [13,15]

เป็นตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองที่ทำการศึกษา (KPOV) กับปัจจัยนำเข้าที่สำคัญต่างๆ ที่ได้จากการระดมความคิดโดยใช้แผนภูมิอิชิกาวา โดยจะวิเคราะห์ถึงระดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญนี้ที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองต่างๆ ที่พิจารณาผ่านความรู้ความชำนาญและประสบการณ์ในการปฏิบัติงานของผู้ร่วมระดมความคิด ผลลัพธ์ที่สำคัญของการทำ Cause and Effect Matrix นี้จะได้แผนภูมิพาเรโตซึ่งเรียงปัจจัยตามลำดับผลกระทบที่มีต่อปัญหาที่ทำการพิจารณา ทำให้สามารถที่จะพิจารณาเลือกปัจจัยนำเข้าที่สำคัญในระดับต้นๆ มาทำการแก้ไขก่อน หรือนำผลที่ได้มาใช้ในการประเมินแผนการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิตได้ ซึ่งขั้นตอนต่อไปคือการพิจารณาปัญหาด้วยวิธีการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis : FMEA)

วิธีการสร้าง Cause and Effect Matrix มีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ

- แจกแจงตัวแปรตอบสนองที่สนใจในการศึกษา ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อความพึงพอใจของลูกค้าหรือกลุ่มผู้ทำการวิเคราะห์ให้ความสำคัญ โดยเขียนไว้ในส่วนบนของตาราง

- ทำการจัดลำดับความสำคัญของตัวแปรตอบสนองที่ได้แจกแจงนี้ โดยการให้คะแนนในระหว่าง 1 ถึง 10 (ตัวเลขที่มีค่ามาก จะแสดงถึงตัวแปรตอบสนองที่มีความสำคัญต่อความพึงพอใจของลูกค้ามากเช่นเดียวกัน)

- ทำการแจกแจงปัจจัยนำเข้าที่สำคัญต่างๆ และเขียนไว้ในส่วนซ้ายของตาราง ซึ่งปัจจัยนำเข้าที่สำคัญเหล่านี้จะได้มาจากการระดมความคิดของกลุ่มสมาชิก โดยใช้แผนภาพอิชิกาวาช่วยในการพิจารณา

- ให้คะแนนลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อ ตัวแปรตอบสนองต่างๆ ที่ได้แจกแจงไว้ในส่วนบนของตาราง โดยเกณฑ์การให้คะแนนจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 คะแนน (คะแนนยิ่งมีค่าสูง หมายถึงปัจจัยนำเข้าที่สำคัญนั้นมีผลกระทบอย่างมากต่อตัวแปรตอบสนองนั้น) ซึ่งการให้คะแนนนี้จะขึ้นกับความรู้ความชำนาญและประสบการณ์ของกลุ่มผู้ทำการวิเคราะห์

- รวบรวมคะแนน และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง โดยใช้แผนภูมิพาเรโตช่วยในการวิเคราะห์ผล

- นำผลลัพธ์ที่ได้ไปทำการศึกษาต่อด้วย เครื่องมืออื่นๆ เช่น การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ หรือนำผลไปเพื่อใช้ในการวางแผนการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิต เป็นต้น

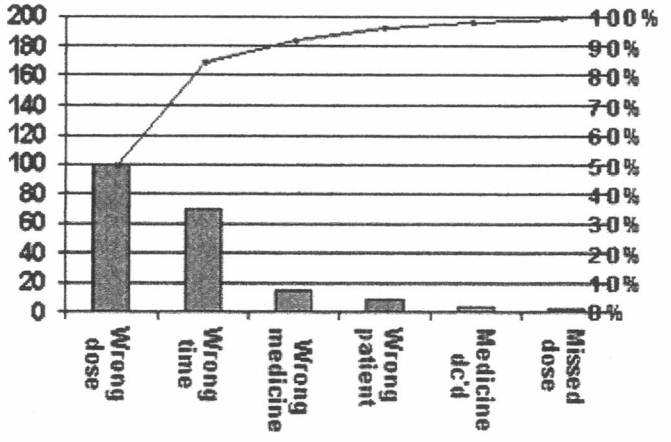
ตัวอย่างตารางการวิเคราะห์ปัญหาด้วย Cause and Effect Matrix แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างตาราง Cause and Effect Matrix

	Rating of Importance to Customer	9	9	7	10	10	9	3	2	6							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Process Inputs		Gel Time	Viscosity	Cleanliness	Color	Homogeneity	Consistency	Digets Time	Temperature	Solids							Total
1	Scales Accuracy	9	8	2	1	1	9	1	1	8							321
2	Preheating DICY TK	1	1	1	1	1	1	1	1	1							65
3	DMF Load Accuracy	3	8	1	1	1	8	1	3	8							255
4	DMF Cleanliness	1	1	4	2	1	2	1	1	1							105
5	DMF Raw Materials	1	1	1	1	1	2	1	1	1							74
6	DICY Load Accuracy	9	7	1	1	1	9	1	1	2							269
7	DICY Envir. Factors	8	5	3	1	1	8	1	1	2							247
8	DICY Raw Materials	8	5	1	1	1	9	1	1	2							242
9	DICY Mixer Speecd	1	1	1	1	7	1	1	1	1							125

3.3.2.5 แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) [15]

คือแผนภูมิแท่งที่แสดงถึงระดับความสำคัญของแหล่งที่มาของปัญหาในกระบวนการผลิต โดยหลักในการพิจารณาระดับผลกระทบของแหล่งที่มาของปัญหาคือ หลัก 20 : 80 หมายถึงลักษณะปัญหาของกระบวนการผลิตจะมีประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ (Vital Few) ที่เป็นแหล่งที่มาของปัญหาที่มีผลกระทบเป็นส่วนมากต่อปัญหาทางคุณภาพที่ทำการศึกษา ในขณะที่จำนวนลักษณะปัญหาของกระบวนการผลิตส่วนใหญ่จำนวน 80 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ (Trivial Many) จะเป็นแหล่งที่มาของปัญหาที่มีผลกระทบเป็นสัดส่วนที่น้อยกว่าต่อปัญหาที่ทำการศึกษา ตัวอย่างของแผนภูมิพาเรโตแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภูมิพาเรโตแสดงข้อบกพร่องในการใช้ยา

ขั้นตอนในการสร้างแผนภูมิพาเรโต มีวิธีการดังต่อไปนี้

- กำหนดปัญหาและคุณลักษณะของกระบวนการที่จะทำการศึกษาให้ชัดเจน
- กำหนดช่วงระยะเวลาสำหรับการเก็บข้อมูลการศึกษา
- นับจำนวนความถี่ในการเกิดปัญหาคุณลักษณะของกระบวนการ
- ทำการจัดลำดับคุณลักษณะดังกล่าว โดยเรียงลำดับจากคุณลักษณะที่มีจำนวนความถี่มากไปน้อย
- พล็อตกราฟแต่ละคุณลักษณะดังกล่าวตามความถี่ในการเกิดขึ้นจากมากไปน้อย
- วิเคราะห์ผลจากแผนภูมิพาเรโต โดยพิจารณาถึงคุณลักษณะหรือปัญหาที่มีความถี่มากตามลำดับในการแก้ปัญหา แต่อย่างไรก็ตามปัญหาที่มีความถี่ไม่มากแต่อาจจะมีความสำคัญก็ควรที่จะพิจารณาด้วย

3.3.2.6 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) [13,15]

FMEA เป็นเครื่องมือหนึ่ง ในระบบการวางแผนการควบคุมคุณภาพ ซึ่งเป็นกลุ่มกิจกรรมเพื่อใช้ในการศึกษาและวินิจฉัยลักษณะข้อบกพร่องของสาเหตุต่างๆ (Potential Failure Mode) ที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตอย่างมีระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้ตามข้อกำหนดของลูกค้า หรือกระบวนการไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้ตามข้อกำหนดของทั้งลูกค้าภายในและลูกค้าภายนอก

โดยทั่วไป FMEA มักจะนำมาประยุกต์ใช้ในระหว่างขั้นตอนการออกแบบกระบวนการหรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ โดยผ่านกระบวนการระดมความคิดของกลุ่มสมาชิกที่ได้จัดตั้งขึ้น และรวมถึงใช้เป็นเครื่องมือในการจัดการกิจกรรมในการลดของเสียหรือข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังใช้ FMEA มาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ

- เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตหรือลักษณะของผลิตภัณฑ์บางอย่าง
- เมื่อผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตปัจจุบัน ถูกนำไปใช้งานในลักษณะที่แตกต่างจากเดิม หรือในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างออกไป

3.3.2.6.1 จุดประสงค์ในการทำ FMEA มีดังนี้

- เพื่อที่จะทำการวินิจฉัย, วิเคราะห์, จัดลำดับความสำคัญของข้อบกพร่องที่มีความเป็นไปได้อย่างมีระบบเกี่ยวกับชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิต
- พิจารณาวิธีการป้องกันและแก้ไขข้อบกพร่องเหล่านี้เพื่อกำจัด หรือลดโอกาสในการเกิดของข้อบกพร่องเหล่านี้ในอนาคต
- จัดทำเอกสารเพื่อใช้ในการอ้างอิง ในแผนการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์ในอนาคต

3.3.2.6.2 ขั้นตอนการปฏิบัติ แบ่งเป็น 2 ระดับคือ

ก่อนเริ่มทำ FMEA ควรปฏิบัติดังนี้คือ

- รวบรวมกลุ่มสมาชิกที่จะร่วมกันทำการศึกษา FMEA ซึ่งควรจะประกอบด้วยสมาชิกจากหลายหน่วยงานที่แตกต่างกัน และทำการเลือกผู้ที่จะเป็นหัวหน้ากลุ่ม

- กำหนดกระบวนการ หรือผลิตภัณฑ์ หรือตัวแปรตอบสนองที่จะทำการศึกษาให้ชัดเจน

- กำหนดขอบเขตของการศึกษาให้ชัดเจน ได้แก่ ระยะเวลาในการศึกษา, ข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์, รายจ่ายต่างๆที่เกิดขึ้น, ทรัพยากรที่จะต้องใช้สนับสนุน, รูปแบบการรายงานผลรวมทั้งวิธีการเผยแพร่ข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้ และข้อจำกัดอื่นๆ ที่ต้องการ

- ควรพิจารณาขนาดของปัญหาที่ทำการศึกษา หากมีขนาดที่ใหญ่สำหรับการทำ FMEA 1 โครงการ ควรจะแยกให้เป็นปัญหาย่อยๆ และทำการศึกษา FMEA แยกในแต่ละปัญหาย่อยนี้

ขั้นตอนการปฏิบัติ FMEA

ขั้นตอนการปฏิบัติ FMEA จะกระทำโดยการระดมความคิดเห็นของกลุ่มสมาชิกที่ได้จัดตั้งขึ้น ตั้งแต่เริ่มกระบวนการจนเสร็จสิ้นขั้นตอนสุดท้ายของการปฏิบัติ แสดงดังรูปที่ 10.5 และมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังนี้คือ

- ศึกษากระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกสำหรับการทำ FMEA สำหรับกระบวนการผลิตจะใช้เครื่องมือช่วยในการศึกษาคือ แผนภาพกระบวนการผลิต (Process Flow Diagram) ส่วนผลิตภัณฑ์มักจะใช้ตัวต้นแบบหรือภาพการออกแบบของตัวผลิตภัณฑ์นั้นช่วยในการศึกษา เพื่อให้กลุ่มสมาชิกได้ทราบถึงรายละเอียดของกระบวนการผลิต หรือผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

- พิจารณาแจกแจงปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ หรือ "KPIV" ที่มีความเกี่ยวข้องกับปัญหาในแต่ละกระบวนการย่อย หรือชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษา โดยอาศัยเครื่องมือช่วยในการศึกษาได้แก่ แผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram) ซึ่งจะพิจารณา PIVs จากแหล่งที่มาทั้ง 6 แหล่ง ได้แก่ ผู้ปฏิบัติงาน (Man) เครื่องจักร (Machine) วัตถุดิบ (Material) วิธีการทำงาน (Method) ระบบการวัด (Measurement) และสภาพแวดล้อม (Environment)

ซึ่งหากเป็นกระบวนการผลิต KPIV อาจกำหนดเป็นกระบวนการย่อยในขั้นตอนต่างๆ ที่อาจจะมีผลต่อปัญหาที่เป็นหัวข้อของ FMEA ที่ศึกษาอยู่ แต่ถ้าเป็นผลิตภัณฑ์ KPIV อาจกำหนดเป็นชิ้นส่วนย่อยของผลิตภัณฑ์ที่อาจจะมีผลต่อปัญหาดังกล่าว

- พิจารณาแจกแจง Potential Failure Mode หรือ "PFM" สำหรับแต่ละ KPIV ที่ได้พิจารณาจากขั้นตอนที่แล้ว โดยอธิบายลักษณะของความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งควรที่จะพิจารณาถึงลักษณะความผิดปกติดังกล่าวของกระบวนการในขั้นตอนหรือชิ้นส่วนย่อยที่

กำลังพิจารณานี้ ที่อาจเป็นสาเหตุของลักษณะความผิดปกติในกระบวนการถัดไปด้วย รวมทั้งพิจารณาลักษณะความผิดปกติในระดับนี้ ซึ่งเป็นผลกระทบมาจากกระบวนการก่อนหน้า PFMs ที่พิจารณาเป็นได้ทั้งลักษณะความผิดปกติทั้งทางกายภาพและทางเทคนิค

ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาค่อนข้างมาก วิธีหนึ่งที่จะช่วยให้การระดมความคิดในขั้นตอนนี้เกิดประสิทธิภาพคือ หัวหน้ากลุ่มควรจะให้สมาชิกทุกคนได้คิดถึงลักษณะของข้อบกพร่องตามความคิดของแต่ละคนที่มี ก่อนทำการประชุมเพื่อทำการระดมความคิด ซึ่งจะทำให้ได้จำนวนความคิดเห็นเกี่ยวกับ PFMs หรือลักษณะของข้อบกพร่องที่มากกว่า และรวดเร็วกว่า

แนวทางหนึ่งที่ใช้พิจารณาลักษณะของข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต คือ การศึกษาผลลัพธ์ (Output) ของแต่ละขั้นตอนย่อยในกระบวนการผลิต (จากแผนภาพกระบวนการผลิต) และพิจารณาว่ากระบวนการจะทำให้ผลลัพธ์ดังกล่าวไม่ได้ตามต้องการ หรือข้อกำหนดอย่างไร สำหรับผลิตภัณฑ์ จะแยกออกเป็นส่วนประกอบหลักๆ และพิจารณาข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนหลักดังกล่าว

เมื่อจบขั้นตอนนี้แล้ว จะได้ตาราง FMEA ที่ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการผลิต หรือส่วนประกอบต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ที่อาจมีผลกระทบต่อปัญหาที่ทำการศึกษา รวมถึงปัจจัยนำเข้าที่สำคัญและ Potential Failure Modes ที่สัมพันธ์กับกระบวนการผลิตหรือส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์นั้นๆ

- พิจารณาแจกแจง Potential Failure Effects ของ Potential Failure Mode แต่ละตัวที่ได้จากขั้นตอนที่แล้ว โดยจะเป็นการพิจารณาถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้ที่มีผลต่อการทำงานของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาที่ทำการศึกษา โดย PFMs แต่ละตัวอาจจะทำให้เกิดผลกระทบขึ้นจำนวน 1 ผลกระทบหรือมากกว่าหนึ่งก็ได้

- การให้คะแนนความร้ายแรง (Severity Score: SEV) เป็นการประเมินความร้ายแรงที่เกิดขึ้นของผลกระทบในแต่ละ Potential Failure Modes ที่มีต่อชิ้นส่วนระบบ หรือกระบวนการถัดไป ซึ่งอาจจะมาจากการประเมินผลจากข้อมูลที่มีอยู่ หรือหากเป็นผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตใหม่ จะต้องอาศัยความรู้และความชำนาญทางวิศวกรรมช่วยในการวิเคราะห์

โดยทั่วไปการประเมินคะแนนของความร้ายแรงที่มีของแต่ละผลกระทบดังกล่าว มักจะอยู่ในช่วงคะแนน 1 ถึง 10 ซึ่งขึ้นกับการประยุกต์ใช้ในแต่ละลักษณะปัญหาที่ทำการศึกษา วิธีการสร้างช่วงของคะแนนความร้ายแรงสามารถอ้างอิงจากตารางที่ 3.3 ซึ่งคะแนนที่มีค่ามาก จะบอกถึงลักษณะของผลกระทบที่มีความรุนแรงมากตามลำดับคะแนน โดยทั่วไปการแก้ไขเพื่อลดระดับความรุนแรงของผลกระทบสามารถทำได้โดยการแก้ไขการออกแบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

- พิจารณาสาเหตุของแต่ละ Potential Failure Mode (Potential Cause of Failure) เป็นการบอกถึงจุดด้อยของการออกแบบที่เป็นสาเหตุของการเกิดลักษณะ

ข้อบกพร่องนั้น จะต้องประกอบด้วยรายละเอียดที่บ่งบอกถึงสาเหตุที่แท้จริงอย่างรัดกุมและสมบูรณ์ เครื่องมือหนึ่งที่นำมาใช้พิจารณาสาเหตุของปัญหาคือ Fault Tree Analysis (FTA) ซึ่งจะมุ่งพิจารณาที่สาเหตุโดยการหาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันในกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้เครื่องมือที่ช่วยในการพิจารณาสาเหตุของปัญหาคือ แผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram) ซึ่งในกรณีนี้จะกำหนดว่า Potential Failure Mode หรือลักษณะของข้อบกพร่องเป็นผลกระทบของปัญหาที่เกิดขึ้น (หัวของแผนภูมิก้างปลา) และ Potential Cause หรือสาเหตุของปัญหาก็คือสิ่งที่ทำให้ลักษณะข้อบกพร่องเหล่านี้เกิดขึ้น

- ศึกษากระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกสำหรับการทำ FMEA สำหรับกระบวนการผลิตจะใช้เครื่องมือช่วยในการศึกษาคือ แผนภาพกระบวนการผลิต (Process Flow Diagram) ส่วนผลิตภัณฑ์มักจะใช้ตัวต้นแบบหรือภาพการออกแบบของตัวผลิตภัณฑ์นั้นช่วยในการศึกษา เพื่อให้กลุ่มสมาชิกได้ทราบถึงรายละเอียดของกระบวนการผลิต หรือผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

- พิจารณาแจกแจงปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ หรือ "KPIV" ที่มีความเกี่ยวข้องกับปัญหาในแต่ละกระบวนการย่อย หรือชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษา โดยอาศัยเครื่องมือช่วยในการศึกษาได้แก่ แผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram) ซึ่งจะพิจารณา PIVs จากแหล่งที่มาทั้ง 6 แหล่ง ได้แก่ ผู้ปฏิบัติงาน (Man) เครื่องจักร (Machine) วัตถุดิบ (Material) วิธีการทำงาน (Method) ระบบการวัด (Measurement) และสภาพแวดล้อม (Environment)

ซึ่งหากเป็นกระบวนการผลิต KPIV อาจกำหนดเป็นกระบวนการย่อยในขั้นตอนต่างๆ ที่อาจจะมีผลต่อปัญหาที่เป็นหัวข้อของ FMEA ที่ศึกษาอยู่ แต่ถ้าเป็นผลิตภัณฑ์ KPIV อาจกำหนดเป็นชิ้นส่วนย่อยของผลิตภัณฑ์ที่อาจจะมีผลต่อปัญหาดังกล่าว

- พิจารณาแจกแจง Potential Failure Mode หรือ "PFM" สำหรับแต่ละ KPIV ที่ได้พิจารณาจากขั้นตอนที่แล้ว โดยอธิบายลักษณะของความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งควรที่จะพิจารณาถึงลักษณะความผิดปกติดังกล่าวของกระบวนการในขั้นตอนหรือชิ้นส่วนย่อยที่กำลังพิจารณานี้ ที่อาจเป็นสาเหตุของลักษณะความผิดปกติในกระบวนการถัดไปด้วย รวมทั้งพิจารณาลักษณะความผิดปกติในระดับนี้ ซึ่งเป็นผลกระทบมาจากกระบวนการก่อนหน้า PFMs ที่พิจารณาเป็นได้ทั้งลักษณะความผิดปกติทั้งทางกายภาพและทางเทคนิค

ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาค่อนข้างมาก วิธีหนึ่งที่จะช่วยให้การระดมความคิดในขั้นตอนนี้เกิดประสิทธิภาพคือ หัวหน้ากลุ่มควรจะให้สมาชิกทุกคนได้คิดถึงลักษณะของข้อบกพร่องตามความคิดของแต่ละคนที่มี ก่อนทำการประชุมเพื่อทำการระดมความคิด ซึ่งจะทำให้ได้จำนวนความคิดเห็นเกี่ยวกับ PFMs หรือลักษณะของข้อบกพร่องที่มากกว่า และรวดเร็วกว่า

แนวทางหนึ่งที่ใช้พิจารณาลักษณะของข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต คือ การศึกษาผลลัพธ์ (Output) ของแต่ละขั้นตอนย่อยในกระบวนการผลิต (จากแผนภาพ

กระบวนการผลิต) และพิจารณาว่ากระบวนการจะทำให้ผลลัพธ์ดังกล่าวไม่ได้ตามต้องการ หรือข้อกำหนดอย่างไร สำหรับผลิตภัณฑ์ จะแยกออกเป็นส่วนประกอบหลักๆ และพิจารณาข้อ บกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนหลักดังกล่าว

เมื่อจบขั้นตอนนี้แล้ว จะได้ตาราง FMEA ที่ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการผลิต หรือส่วนประกอบต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ที่อาจมีผลกระทบต่อปัญหาที่ทำการศึกษา รวมถึงปัจจัยนำเข้าที่สำคัญและ Potential Failure Modes ที่สัมพันธ์กับกระบวนการผลิตหรือส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์นั้นๆ

- พิจารณาแจกแจง Potential Failure Effects ของ Potential Failure Mode แต่ละตัวที่ได้จากขั้นตอนที่แล้ว โดยจะเป็นการพิจารณาถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้ที่มีผลต่อการทำงานของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาที่ทำการศึกษา โดย PFMs แต่ละตัวอาจจะทำให้เกิดผลกระทบขึ้นจำนวน 1 ผลกระทบหรือมากกว่าหนึ่งก็ได้

- การให้คะแนนความร้ายแรง (Severity Score : SEV) เป็นการประเมินความร้ายแรงที่เกิดขึ้นของผลกระทบในแต่ละ Potential Failure Modes ที่มีต่อชิ้นส่วน ระบบ หรือกระบวนการถัดไป ซึ่งอาจจะมาจากการประเมินผลจากข้อมูลที่มีอยู่ หรือหากเป็นผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตใหม่ จะต้องอาศัยความรู้และความชำนาญทางวิศวกรรมช่วยในการวิเคราะห์

โดยทั่วไปการประเมินคะแนนของความร้ายแรงที่มีของแต่ละผลกระทบดังกล่าว มักจะอยู่ในช่วงคะแนน 1 ถึง 10 ซึ่งขึ้นกับการประยุกต์ใช้ในแต่ละลักษณะปัญหาที่ทำการศึกษา วิธีการสร้างช่วงของคะแนนความร้ายแรงสามารถอ้างอิงจากตารางที่ 3.3 ซึ่งคะแนนที่มีค่ามาก จะบอกถึงลักษณะของผลกระทบที่มีความรุนแรงมากตามลำดับคะแนน โดยทั่วไปการแก้ไขเพื่อลดระดับความรุนแรงของผลกระทบสามารถทำได้โดยการแก้ไขการออกแบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

ตารางที่ 3.3 แสดงเกณฑ์การให้คะแนนความร้ายแรง (Severity Score)

Rating	Severity of Effect	Likelihood of Occurrence	Ability to Detect
10	Hazardous without warning	Very high: Failure is almost inevitable	Can not detect
9	Hazardous with warning		Very remote chance of detection
8	Loss of primary function	High: Repeated failures	Remote chance of detection
7	Reduced primary function performance		Very low chance of detection
6	Loss of secondary function	Moderate: Occasional failures	Low chance of detection
5	Reduced secondary function performance		Moderate chance of detection
4	Minor defect noticed by most customers		Moderately high chance of detection
3	Minor defect noticed by some customers	Low: Relatively few failures	High chance of detection
2	Minor defect noticed by discriminating customers		Very high chance of detection
1	No effect	Remote: Failure is unlikely	Almost certain detection

- พิจารณาสาเหตุของแต่ละ Potential Failure Mode (Potential Cause of Failure) เป็นการบอกถึงจุดด้อยของการออกแบบที่เป็นสาเหตุของการเกิดลักษณะข้อบกพร่องนั้น จะต้องประกอบด้วยรายละเอียดที่บ่งบอกถึงสาเหตุที่แท้จริงอย่างรัดกุมและสมบูรณ์ เครื่องมือหนึ่งที่นำมาใช้พิจารณาสาเหตุของปัญหาคือ Fault Tree Analysis (FTA) ซึ่งจะมุ่งพิจารณาที่สาเหตุโดยการหาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันในกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้เครื่องมือที่ช่วยในการพิจารณาสาเหตุของปัญหาคือ แผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram) ซึ่งในกรณีนี้จะกำหนดว่า Potential Failure Mode หรือลักษณะของข้อบกพร่องเป็นผลกระทบของปัญหาที่เกิดขึ้น (หัวของแผนภูมิก้างปลา) และ Potential Cause หรือสาเหตุของปัญหาก็คือสิ่งที่ทำให้ลักษณะข้อบกพร่องเหล่านี้เกิดขึ้น

ข้อสังเกตคือ Potential Failure Mode แต่ละตัวสามารถที่จะมาจากสาเหตุที่มากกว่าหนึ่งสาเหตุได้ และจากตาราง FMEA จะได้ว่าคอลัมน์ของ Potential Cause of Failure นี้จะเป็นอิสระจากคอลัมน์ของ Potential Failure Effect และคะแนนของความรุนแรง (SEV) นั่นคือ Potential Failure Effect และ SEV สามารถที่จะพิจารณาหลังจากที่ได้ใส่สาเหตุของปัญหาแล้ว

- การให้คะแนนความถี่ในการเกิด (Occurrence Score : OCC) เป็นการคาดคะเนความน่าจะเป็นที่สาเหตุของปัญหาที่ระบุจะเกิดขึ้น ซึ่งควรที่จะมาจากข้อมูลในอดีตที่เป็นจริง แต่หากเป็นการศึกษา FMEA สำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่ จะต้องใช้ความรู้ทางวิศวกรรม, การคาดคะเน หรือถ้าเป็นไปได้อาจมาจากผลการทดลอง (Design of Experiment) แต่ไม่ว่าจะใช้วิธีการใดในการพิจารณาก็ตาม ช่วงของคะแนนความถี่นี้ควรที่จะเป็นช่วงของตัวเลขที่เหมือนกับการสร้างช่วงคะแนนของความร้ายแรง ดังตัวอย่างในตารางที่ 10.3

- พิจารณาระบบการตรวจจับในปัจจุบัน (Current Design Control) เป็นการอธิบายการควบคุมที่สามารถจะป้องกันไม่ให้ Potential Failure Mode เกิดขึ้นหรือตรวจจับการเกิดขึ้นของ Potential Failure Mode เพื่อที่จะพิจารณาหรือกำจัดสาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นก่อนที่ผลิตภัณฑ์จะออกจากหน่วยการผลิตไปสู่ลูกค้า ซึ่งเครื่องมือที่ใช้มีอยู่หลายชนิด เช่น ใบตรวจสอบ, แผนภูมิควบคุมและ Poke-Yoke เป็นต้น

- การให้คะแนนการตรวจจับ (Detection Score : DET) เป็นการประเมินคะแนนของความสามารถของการหลุดลอดจากการตรวจจับ Potential Failure Mode ของระบบการควบคุมที่ได้ระบุไว้ คะแนนนี้จะทำให้เห็นประสิทธิภาพของระบบการควบคุมที่ใช้ในปัจจุบันในการตรวจจับข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นก่อนที่ผลิตภัณฑ์จะออกจากหน่วยการผลิต ตัวอย่างการกำหนดช่วงคะแนนการตรวจจับแสดงดังในตารางที่ 10.3

- คำนวณคะแนน RPN (Risk Priority Number) ในแต่ละแถวของตาราง FMEA ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างคะแนน SEV, OCC และ DET ในแต่ละแถว

RPN = SEV * OCC * DET

เมื่อได้คะแนน RPN ในแต่ละแถวแล้ว ให้ทำการรวมคะแนนทั้งหมดเป็นคะแนน RPN รวม ซึ่งจะนำไปใช้วิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

- จัดเรียงลำดับ Potential Failure Mode และ Potential Cause of Failure ตามคะแนน RPN ที่ได้ คะแนน RPN ที่มีค่ามากจะบอกถึง Failure Mode และ Cause ที่มีความวิกฤตมาก และเนื่องจาก RPN เป็นการวัดค่าความวิกฤตรวมของขั้นตอนการผลิตหรือชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ จึงได้ว่าคะแนน RPN ที่มีค่ามาก ลำดับความสำคัญในการแก้ไขจะต้องมาก่อนขั้นตอนการผลิตหรือชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีคะแนน RPN ที่น้อยกว่า เครื่องมือที่นำมาใช้ช่วยในการพิจารณาลำดับ Failure Mode/Cause ด้วยคะแนน RPN จะใช้แผนภูมิพาเรโตช่วยในการพิจารณา

- กำหนดกิจกรรมเพื่อทำการลดระดับค่าคะแนนของ SEV, OCC และ/หรือ DET ของ Failure Mode โดยเริ่มจากค่า RPN สูงสุดจากแผนภูมิพาเรโต ซึ่งจากหลักการของพาเรโตคือจะเลือกจำนวน Failure Mode/Cause ที่มีค่าคะแนน RPN เป็น 80 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับคะแนน RPN รวมของทั้งหมด ตัวอย่างเช่น การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของ Failure Mode ต่างๆ ซึ่งสามารถนำผลไปทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อที่จะลดผลกระทบหรือโอกาสในการเกิดของ Failure Mode เหล่านี้ได้ ดังนั้นกลุ่มสมาชิกจึงควรที่จะพิจารณาเลือกกิจกรรมที่จะนำไปสู่การป้องกันข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น (หรือลดคะแนน OCC) มากกว่าที่จะปรับปรุงระบบการควบคุมเพื่อตรวจจับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น (หรือลดคะแนน DET)

- หลังจากที่ได้กำหนดกิจกรรมในการลดค่าคะแนนทั้งสามแล้ว ให้จัดทำเอกสารสำหรับกิจกรรมเหล่านี้ในรูปแบบของ FMEA และพิจารณาแผนในการนำกิจกรรมเหล่านี้ไปใช้ รวมทั้งคำนวณค่าของคะแนน RPN ใหม่ตามแผนการแก้ไขปัญหานี้ ซึ่งทำให้

สามารถที่จะประเมินผลการปรับปรุงได้จากการหาค่าความแตกต่างระหว่างคะแนน RPN เดิม และคะแนน RPN ตามแผนการแก้ไขที่วางไว้

นอกจากนี้ยังรวมถึงการกำหนดผู้ที่รับผิดชอบในแต่ละกิจกรรมรวมถึงระยะเวลาในการดำเนินการแก้ไขปรับปรุงด้วย

3.3.2.7 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis) [13,16]

การวิเคราะห์ระบบการวัด มีจุดประสงค์สำคัญในการวิเคราะห์ถึงแหล่งที่มาของความคลาดเคลื่อนในระบบการวัด เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องและความแม่นยำของข้อมูลที่ได้จากการวัดก่อนทำการทดลอง โดยทั่วไปจะทดสอบความแม่นยำของระบบการวัดโดยวิธีการที่เรียกว่า เกจรีพีททะบิลิตี้ และเกจรีโปรดิวซิบิลิตี้ (Gage Repeatability and Reproducibility : GR&R) โดยพิจารณาความผันแปรใน 2 ลักษณะคือ

- รีพีททะบิลิตี้ (Repeatability) ซึ่งหมายถึงความแตกต่างของระบบการวัดภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยเป็นความแตกต่างในการวัดอย่างต่อเนื่องกับชิ้นงานชิ้นเดียวกันด้วยเครื่องมือเดียวกัน และด้วยพนักงานคนเดียวกัน
- รีโปรดิวซิบิลิตี้ (Reproducibility) ซึ่งหมายถึงความแตกต่างของระบบการวัดภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยเป็นค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในการวัดกับชิ้นงานเดียวกันด้วยเครื่องมือเดียวกัน แต่ต่างพนักงานกัน

ขั้นตอนในการวางแผนเพื่อศึกษา GR&R ของระบบการวัด มีประเด็นในการพิจารณาก่อนการศึกษาดังนี้คือ

- โดยปกติจะต้องมีการสอบเทียบเครื่องมือวัดก่อนการศึกษา GR&R ของระบบการวัดที่ทำการศึกษา และในระหว่างการทำ GR&R ไม่ควรที่จะมีการสอบเทียบใหม่ เพราะจะทำให้เกิดความผันแปรของการสอบเทียบรวมอยู่กับค่ารีพีททะบิลิตี้ของการศึกษา GR&R ด้วย
- ในการเลือกจำนวนพนักงานวัดที่จะใช้ในการศึกษา GR&R จะต้องพิจารณาว่าในการใช้งานปกตินี้ ระบบการวัดที่ต้องการศึกษามีพนักงานอยู่กี่คน หากมีพนักงานคนเดียวหรือไม่มีการใช้พนักงานวัดเลย แสดงว่าความผันแปรในระบบการวัดมิได้มาจากสาเหตุด้านพนักงานวัดเลย ส่วนในกรณีระบบการวัดมีพนักงานหลายคน จะต้องทำการสุ่มตัวแทนอย่างน้อย 2 คนมาทำการศึกษา GR&R โดยพนักงานที่ได้เลือกมานี้จะต้องเป็นพนักงานที่มีความรู้ความเข้าใจในวิธีการวัดเป็นอย่างดี และปฏิบัติงานเกี่ยวกับงานวัดในอุปกรณ์ที่ทำการศึกษาสำหรับงานประจำ
- จำนวนสิ่งตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา GR&R โดยทั่วไปจะแนะนำไว้ที่ 10 สิ่งตัวอย่าง หากไม่สามารถปฏิบัติได้ จะต้องพยายามให้ (จำนวนของสิ่งตัวอย่าง) * (จำนวนของ

พนักงานวัด) มากกว่า 15 และสิ่งตัวอย่างที่เลือกมานี้จะต้องมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และควรที่จะแบ่งแยกได้ไม่ต่ำกว่า 5 กลุ่ม

- การกำหนดจำนวนครั้งในการวัดซ้ำสำหรับสิ่งตัวอย่างแต่ละชิ้น โดยปกติจะแนะนำให้มีการวัดซ้ำสำหรับพนักงานวัดแต่ละคนด้วยจำนวน 2 ถึง 3 ครั้งต่อชิ้นงานแต่ละชิ้น

การวิเคราะห์ผลของการศึกษา GR&R จะมีวิธีการในการวิเคราะห์แบ่งเป็น 3 วิธีการคือ วิธีการอาศัยค่าพิสัย (R), วิธีการอาศัยค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย (X-bar R) และวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance : ANOVA) ซึ่งในการวิจัยนี้จะเลือกวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการศึกษา GR&R เนื่องจากจะให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำกว่าอีก 2 วิธีที่ได้กล่าวมา โดยการวิเคราะห์จะแบ่งความผันแปรตามสาเหตุต่างๆ เป็น 3 องค์ประกอบคือ

- ความผันแปรจากสาเหตุของสิ่งตัวอย่างงาน
- ความผันแปรจากสาเหตุด้านพนักงาน หรือรีโปรดิวซิบิลิตี้ ซึ่งจะรวมระหว่างความผันแปรที่เกิดจากสาเหตุด้านพนักงานวัด และสาเหตุร่วมของพนักงานวัดกับสิ่งตัวอย่าง
- ความผันแปรจากสาเหตุของตัวอุปกรณ์วัดเอง หรือรีพีททะบิลิตี้

โดยทั่วไป การกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจเกี่ยวกับระบบการวัดนั้น ควรที่จะทำการประเมินความผันแปรของระบบการวัดนี้เทียบกับความผันแปรของกระบวนการผลิต (Precision-to-Total Variation : P/TV) หรือเทียบกับความคลาดเคลื่อนอนุโลมของข้อกำหนดเฉพาะ (Precision-to-Tolerance Ratio : P/T)

$$P/TV = \frac{GR\&R}{\text{ความผันแปรของกระบวนการผลิต}} * 100\ \%$$

$$P/T = \frac{GR\&R}{USL-LSL} * 100\ \%$$

และจะกำหนดให้มีการยอมรับความสามารถของระบบการวัด ถ้าหากค่า P/T หรือ P/TV มีค่าน้อยกว่า 10% และจะไม่มีการยอมรับหากมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 30% แต่หากมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 30% การตัดสินใจจะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น การประยุกต์ใช้ระบบการวัดตลอดจนค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น เป็นต้น

ในการวิเคราะห์ GR&R ของระบบการวัดด้วยวิธี ANOVA นี้ จะเป็นการทดลองแบบ Balance Design โดยมีพนักงานวัดคือปัจจัยที่ทำการศึกษา และชิ้นงานคือบล็อก ทำการ

ทดลองอย่างสุ่มภายในบล็อก (ชิ้นงาน) จนครบทุกชิ้นงานแล้วบันทึกผลลงในตารางบันทึกผล และทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ด้วยสูตรการคำนวณดังนี้

$$SS_T = \sum_{i}^{n}\sum_{j}^{k}\sum_{m}^{r} Y_{ijm}^2 - \frac{Y_{...}^2}{nkr} \qquad \text{ด้วย df = nkr-1}$$

$$SS_P = \sum_{i}^{n} \frac{Y_{i..}^2}{kr} - \frac{Y_{...}^2}{nkr} \qquad \text{ด้วย df = n-1}$$

$$SS_O = \sum_{i}^{n} \frac{Y_{.i.}^2}{nr} - \frac{Y_{...}^2}{nkr} \qquad \text{ด้วย df = k-1}$$

$$SS_{OP} = \sum_{i}^{n}\sum_{j}^{k} \frac{Y_{ij.}^2}{r} - \frac{Y_{...}^2}{nkr} - SS_P - SS_O \qquad \text{ด้วย df = (n-1)(k-1)}$$

$$SS_E = SS_T - SS_P - SS_O - SS_{OP} \qquad \text{ด้วย df = nk(r-1)}$$

เมื่อ SS_T = ผลรวมกำลังสองของข้อมูลทั้งหมด (Total Sum of Square)

SS_P = ผลรวมกำลังสองของชิ้นงาน (Part Sum of Square)

SS_O = ผลรวมกำลังสองของพนักงาน (Appraiser Sum of Square)

SS_{OP} = ผลรวมกำลังสองของอิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานกับพนักงาน (Interaction of Part and Appraiser Sum of Square)

SS_E = ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error Sum of Square)

และนำผลที่ได้มาสรุปไว้ในตาราง ANOVA ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตาราง ANOVA สำหรับการวิเคราะห์ระบบการวัด

แหล่งความผันแปร	Sum of Square	DF	Mean Square
พนักงานวัด	$\sum_{i}^{n}\frac{Y_{i..}^2}{nr} - \frac{Y_{...}^2}{nkr}$	k-1	$MS_O = SS_O/(k-1)$
ชิ้นงาน	$\sum_{i}^{n}\frac{Y_{i..}^2}{kr} - \frac{Y_{...}^2}{nkr}$	n-1	$MS_P = SS_P/(n-1)$
พนักงาน * ชิ้นงาน	$\sum_{i}^{n}\sum_{j}^{k}\frac{Y_{ij.}^2}{r} - \frac{Y_{...}^2}{nkr} - SS_P - SS_O$	(n-1)(k-1)	$MS_{OP} = SS_{OP}/(n-1)(k-1)$
รีพีททะบิลิตี้	$SS_T - SS_P - SS_O - SS_{OP}$	nk (r-1)	$MS_E = SS_E/nk(r-1)$
ผลรวม	$\sum_{i}^{n}\sum_{j}^{k}\sum_{m}^{r}Y_{ijm}^2 - \frac{Y_{...}^2}{nkr}$	nkr-1	

3.3.3 ANALYZE PHASE (การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา)

ในขั้นตอนนี้ เป็นขั้นตอนในการทดลองเพื่อหาผลสรุปในปัจจัยนำเข้าที่สำคัญต่างๆ ที่ได้เรียบเรียงจากการระดมความคิด โดยใช้ Cause and Effect Matrix และ FMEA เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ตามลำดับ เพื่อเป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ เหล่านี้กับลักษณะทางคุณภาพที่เป็นเป้าหมายของการวิจัย

ข้อมูลที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ต่างๆในขั้นตอนนี้จะทำให้ทราบถึงแหล่งที่มาของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตและสามารถที่จะคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่จะทำการศึกษาต่อไป ซึ่งเป็นประโยชน์ในการกำหนดแนวทางในการปรับปรุงกระบวนผลิตตามเป้าหมายที่ได้วางไว้ ความรู้และเครื่องมือต่างๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้ในขั้นตอนนี้ ได้แก่ การทดสอบสมมติฐาน, การวิเคราะห์ความแปรปรวน และการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการถดถอยเชิงเส้น

3.3.3.1 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) [15,16,17]

เป็นวิธีในการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ ซึ่งสามารถที่จะทดสอบในระหว่างกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มที่นำมาพิจารณา ซึ่งตัวสถิติที่ทำการเปรียบเทียบสามารถเป็นได้ทั้ง ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างหนึ่งกลุ่มเทียบกับค่าเฉลี่ยที่กำหนด, ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม, ค่าความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างหนึ่งกลุ่มเทียบกับค่าความแปรปรวนที่กำหนด และค่าความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม นอกจากนี้ยังมีการทดสอบสมมติฐานของสัดส่วนของเสียอีกด้วย ซึ่งในแต่ละการทดสอบจะใช้ตัวสถิติสำหรับการทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบนั้นๆ ในการตัดสินใจด้วยวิธีการทดสอบสมมติฐานนี้ จะดำเนินการได้ตามขั้นตอนดังนี้คือ

-ตั้งสมมติฐานหลักตามสิ่งที่ต้องการจะทดสอบ (Null Hypothesis : H_0) ซึ่งอาจจะเป็นสมมติฐานแบบสองด้าน หรือสมมติฐานแบบด้านเดียว

-ตั้งสมมติฐานรองหรือสมมติฐานทางเลือก (Alternative Hypothesis : H_a)

-กำหนดค่าความเสี่ยง α (โดยทั่วไปจะกำหนดที่ค่า 0.05)

-กำหนดวิธีการตัดสินใจ ด้วยการพิจารณาถึงตัวสถิติสำหรับการทดสอบ (Test Statistic) ตัวพารามิเตอร์ แล้วพิจารณาถึงการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวสถิติดังกล่าวด้วยทฤษฎีของการแจกแจงสิ่งตัวอย่าง ซึ่งอธิบายถึงขนาดความผันแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระหว่างเงื่อนไขของการทดลองหรือ Reproducibility จากนั้นให้กำหนดช่วงแห่งการปฏิเสธและช่วงแห่งการยอมรับของตัวสถิติภายใต้ค่าความเสี่ยง (α) ที่กำหนด

-ออกแบบการทดลอง ด้วยการกำหนดค่าขนาดของสิ่งตัวอย่างจากเส้นโค้งโอซีเมื่อทราบความเสี่ยง β (θ_1)

-ดำเนินการทดลองภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

-ตัดสินใจตามวิธีการตัดสินใจที่กำหนด กล่าวคือ ถ้าหากตัวสถิติสำหรับการทดสอบที่ได้จากการคำนวณอยู่ในบริเวณแห่งการยอมรับ ให้ทำการยอมรับสมมติฐานหลัก หรือสรุปว่าไม่มีเหตุผลในการปฏิเสธสมมติฐานหลัก เนื่องจากข้อมูลอยู่ภายในช่วงความผันแปรที่เกิดจากสาเหตุด้าน Reproducibility ของการทดลอง แต่ถ้าหากตัวสถิติสำหรับการทดสอบ อยู่ในบริเวณแห่งการปฏิเสธให้ทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก

3.3.3.1.1 One-Sample Z-test and Confidence Interval

เป็นการทดสอบสมมติฐานและหาช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยประชากรเทียบกับค่าเฉลี่ยที่กำหนด เมื่อรู้ค่าความแปรปรวนของประชากร โดยสมมติฐานที่ต้องการทดสอบคือ

$H_0: \mu = \mu_0$ กรณีทดสอบแบบสองด้าน

$H_a: \mu \neq \mu_0$

$H_0: \mu \geq \mu_0$ หรือ $H_0: \mu \leq \mu_0$ กรณีทดสอบแบบด้านเดียว

$H_a: \mu < \mu_0$ $H_a: \mu > \mu_0$

ตัวสถิติสำหรับการทดสอบคือ

$$Z_0 = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}}$$

ตัวแจกแจงทางสถิติคือ

$Z_{\alpha/2}$ สำหรับการทดสอบแบบสองด้าน

Z_{α} สำหรับการทดสอบแบบด้านเดียว

ช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ย

$\bar{x} - Z_{\alpha/2}\left(\sigma/\sqrt{n}\right)$ ถึง $\bar{x} + Z_{\alpha/2}\left(\sigma/\sqrt{n}\right)$ กรณีสองด้าน

$\bar{x} - Z_{\alpha}\left(\sigma/\sqrt{n}\right)$ หรือ $\bar{x} + Z_{\alpha}\left(\sigma/\sqrt{n}\right)$ กรณีด้านเดียว

3.3.3.1.2 One-Sample t-test and Confidence Interval

เป็นการทดสอบสมมติฐานและหาช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยประชากรเทียบกับค่าเฉลี่ยที่กำหนด เมื่อไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร ซึ่งขั้นตอนและวิธีการในการทดสอบจะเหมือนกับกรณีรู้ค่าความแปรปรวนของประชากร แต่จะแตกต่างกันโดยจะใช้ t-distribution เป็นการแจกแจงในการพิจารณา

3.3.3.1.3 Two-Sample t-test and Confidence Interval

เป็นการทดสอบสมมติฐานและหาช่วงความเชื่อมั่นของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรสองชุด เมื่อไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร โดยสมมติฐานที่ต้องการทดสอบคือ

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

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

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

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

ตัวสถิติสำหรับการทดสอบคือ

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

ตัวแจกแจงทางสถิติคือ

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

$t_{\alpha,\upsilon}$ สำหรับการทดสอบแบบด้านเดียว

ช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ย

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

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

3.3.3.1.4 Paired t-test and Confidence Interval

เป็นการทดสอบสมมติฐานและหาช่วงความเชื่อมั่นของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของข้อมูลภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน คู่ต่อคู่ ตัวอย่างเช่น การทดสอบสมมติฐานของความแตกต่างระหว่างเครื่องวัด 2 เครื่องด้วยสิ่งตัวอย่างเดียวกันที่เลือกมา ดังนั้นการทดสอบสมมติฐานแบบนี้จะให้ผลที่มีความแม่นยำกว่า เพราะได้ควบคุมอิทธิพลจากสาเหตุอื่นๆ

ที่สามารถควบคุมได้ เช่น ชิ้นงานเดียวกันและสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่เหมือนกัน โดย สมมติฐานที่ต้องการทดสอบคือ

$$H_0: \quad \mu_d = \mu_0$$
$$H_a: \quad \mu_d \neq \mu_0$$

ตัวสถิติสำหรับการทดสอบคือ

$$t = \frac{\bar{d} - \mu_0}{(s_d / \sqrt{n})}$$

ตัวแจกแจงทางสถิติคือ

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

ช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ย

$$\bar{d} - t_{\alpha/2}(s_d / \sqrt{n}) \quad \text{ถึง} \quad \bar{d} + t_{\alpha/2}(s_d / \sqrt{n})$$

โดย $$s_d = \sqrt{\frac{\sum(d - \bar{d})^2}{(n-1)}}$$

3.3.3.1.5 Test for Equal Variance

เป็นการทดสอบสมมติฐานและหาช่วงความเชื่อมั่นของความแตกต่างระหว่างค่าความแปรปรวนของประชากรสองชุด โดยสมมติฐานที่ต้องการทดสอบคือ

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ กรณีทดสอบแบบสองด้าน
$H_a: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ กรณีทดสอบแบบด้านเดียว
$H_a: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$

ตัวสถิติสำหรับการทดสอบคือ

$$F_0 = \frac{S_1^2}{S_2^2}$$

ตัวแจกแจงทางสถิติคือ

$F_{\alpha/2,\ n_1-1,\ n_2-1}$ สำหรับการทดสอบแบบสองด้าน

$F_{\alpha,\ n_1-1,\ n_2-1}$ สำหรับการทดสอบแบบด้านเดียว

3.3.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) [16,17,18]

ในหัวข้อที่แล้วเป็นการทดสอบสมมติฐานของประชากรหนึ่งกลุ่มกับค่าคงที่ที่กำหนด หรือระหว่างประชากร 2 กลุ่มเท่านั้น หากต้องการทดสอบความแตกต่างของกลุ่มประชากรที่มีมากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไปในค่าตัวแปรตอบสนองที่สนใจ จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน หรือ "ANOVA" เพื่อทำการทดสอบ โดยหลักการและวิธีการวิเคราะห์ผล มีแนวทางเช่นเดียวกับการทดสอบสมมติฐานในหัวข้อที่ 10.3.3.1

หลักการของ ANOVA คือเป็นการหาความแปรปรวนโดยรวม แล้วทำการพิจารณาแยกความแปรปรวนดังกล่าวนี้ออกเป็นสาเหตุย่อยๆ เนื่องจากระดับของปัจจัยที่ควบคุมได้ หรือ "ทรีทเมนต์" และความแปรปรวนจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ แล้วทำการเทียบความแปรปรวนจากแหล่งทั้งสองนี้

3.3.3.2.1 One-Way Analysis of Variance

เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว กล่าวคือมีปัจจัยที่ต้องการจะศึกษาเพียงตัวเดียว แสดงได้ด้วยตัวแบบทางสถิติเชิงเส้นตรง (Linear Statistical Model) คือ

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij}$$

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \; ; \; i = 1,2,3,....a \; ; \; j = 1,2,3,...n$$

โดยที่

Y_{ij} = ผลจากการทดลองของทรีทเมนต์ i ในการทำซ้ำครั้งที่ j

μ = พารามิเตอร์ร่วมสำหรับทุกทรีทเมนต์ หรือค่าเฉลี่ยทั้งหมด

τ_i = ผลจากทรีทเมนต์ i

ε_{ij} = ความคลาดเคลื่อน

สมมติฐานที่ต้องการทดสอบ สามารถกำหนดได้ดังนี้

H_0 = $\mu_1 = \mu_2 = ... = \mu_a$

H_a = $\mu_1 \neq \mu_j$ อย่างน้อยหนึ่งค่าของ (i,j) ที่ $i \neq j$

สมการในการคำนวณ

$$Y_{..} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n} Y_{ij} \quad \text{และ} \quad \frac{Y_{..}}{an} = \bar{Y}_{..}$$

$$Y_{.j} = \sum_{i=1}^{a} Y_{ij} \quad \text{และ} \quad \frac{Y_{.j}}{a} = \bar{Y}_{.j}$$

$$Y_{i.} = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} \quad \text{และ} \quad \frac{Y_{i.}}{n} = \bar{Y}_{i.}$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}\left(Y_{ij} - \bar{Y}_{..}\right)^2$$

$$SS_{Tr} = n\sum_{i=1}^{a}\left(\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..}\right)^2$$

$$SS_E = SS_T - SS_{Tr} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}\left(Y_{ij} - \bar{Y}_{i.}\right)^2$$

จะปฏิเสธสมมติฐานเพื่อยืนยันว่าปัจจัยที่พิจารณามีผลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ

$$F_0 = \frac{MS_{Tr}}{MS_E} > F_{\alpha;a-1,a(n-1)}$$

สามารถสรุปเป็นตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตาราง One-way ANOVA

Source of Variation	Sum of Square	Degrees of Freedom	Mean Square	F0
Treatment	SS_{Tr}	a-1	$\frac{SS_{Tr}}{a-1}$	$\frac{MS_{Tr}}{MS_E}$
Error	SS_E	N-a	$\frac{SS_E}{N-a}$	
Total	SS_T	N-1		

3.3.3.3 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการถดถอยเชิงเส้น (Correlation and Simple Linear Regression) [15,17,18]

3.3.3.3.1 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามใดๆ คือการพิสูจน์และหาว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง 2 ตัวแปรนั้นมีมากน้อยเพียงใด เรียกว่า "Correlation Coefficient" (r) ซึ่งหาได้จากสมการคือ

$$r = \frac{\Sigma(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x_i - \bar{x})^2 \Sigma(y_i - \bar{y})^2}}$$

โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง –1, 1 จะหมายถึงตัวแปรมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงในทางบวกอย่างสมบูรณ์ –1 จะหมายถึงตัวแปรมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงในทางลบอย่างสมบูรณ์ ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ตัวแสดงดังรูปที่ 3.4 ส่วนสมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบนี้จะกำหนดเป็น

$$H_0 : \rho = 0$$

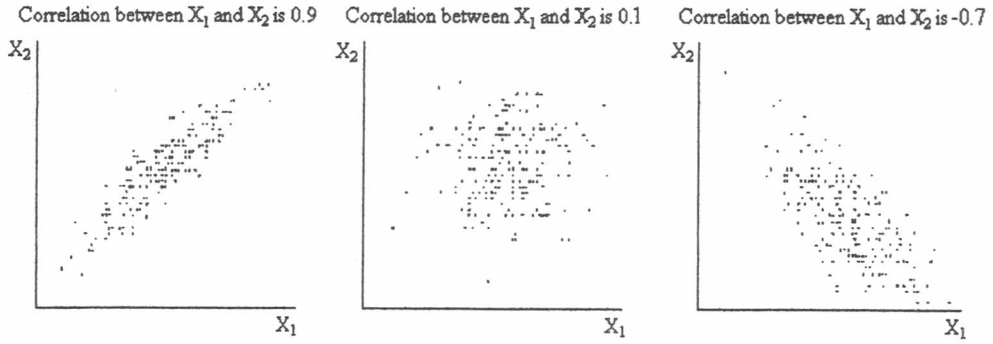
$$H_a : \rho \neq 0$$

และตัวสถิติสำหรับการทดสอบคือ

$$t_0 = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

จะปฏิเสธสมมติฐานเพื่อยืนยันว่าปัจจัยที่พิจารณามีผลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ

$$|t_0| > t_{\alpha/2,n-2}$$



รูปที่ 3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปร

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

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์คือ

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

และสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวแบบได้ตามสมการดังนี้คือ

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

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

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

- การทดสอบความมีนัยสำคัญของตัวแบบถดถอย โดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแบบ ซึ่งจะทำให้สามารถแยกความแปรปรวนออกเป็นความผันแปรของตัวแบบถดถอยและความคลาดเคลื่อนจากสาเหตุโดยธรรมชาติ ดังสมการ

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

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

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

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

และตัวสถิติสำหรับการทดสอบคือ

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

จะปฏิเสธสมมติฐานเพื่อยืนยันว่าปัจจัยที่พิจารณามีผลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ

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

- การทดสอบความไม่สมรูปของตัวแบบกับข้อมูล เพื่อเป็นการทดสอบว่าตัวแบบถดถอยดังกล่าวมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ จึงมีความจำเป็นต้องทดสอบเทียบความกลมกลืนกันของตัวแบบถดถอยดังกล่าว ด้วยการพิจารณาจากค่าเศษเหลือของข้อมูลที่เกิดจากตัวแบบถดถอยว่ามีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งสมมติฐานที่ต้องการทดสอบคือ

H_0 : ตัวแบบถดถอยมีความสมรูป (Fit) กับข้อมูล

H_a : ตัวแบบถดถอยไม่มีความสมรูปกับข้อมูล

และใช้ตัวสถิติสำหรับการทดสอบคือ

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

- การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบถดถอย เพื่อเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของการทดลองภายในเงื่อนไข 3 ประการคือ

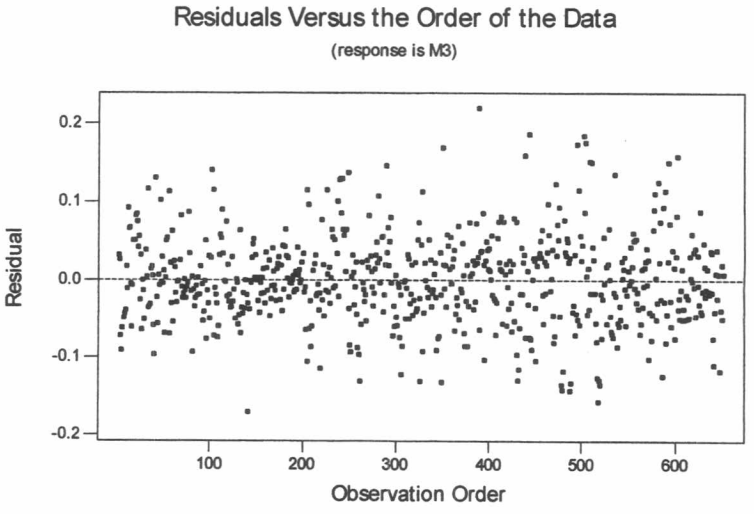
ประการที่ 1 : ความเป็นอิสระ (Time Sequence) หมายความว่า ข้อมูลทุกจุดในการทดลอง จะต้องเป็นอิสระต่อกันโดยสุ่ม

ประการที่ 2 : ความเป็นปกติ (Normality Assumption) หมายความว่า ข้อมูลทุกจุดในการทดลองจะต้องเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ นั่นคือจะมีแนวโน้มเข้าหาค่าค่าหนึ่งที่คงที่ และมีการกระจายรอบค่าคงที่ดังกล่าวอย่างสมมาตร

ประการที่ 3 : ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) หมายความว่า ความแตกต่างของข้อมูลทุกจุดในการทดลองจะต้องเกิดจากสาเหตุโดยธรรมชาติในระบบที่ทำการทดลองเท่านั้น

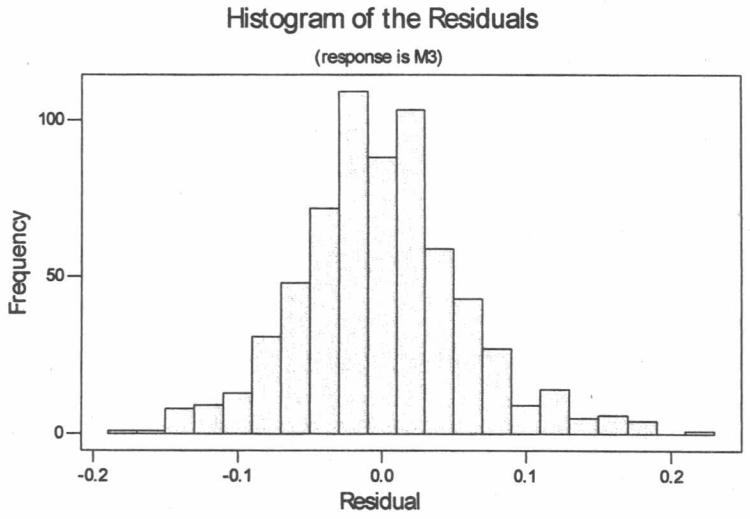
การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบถดถอยตามสมมติฐานทั้ง 3 ประการนี้จะใช้วิธีในการวิเคราะห์คือ การวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual Analysis) ดังมีรายละเอียดวิธีการพิจารณาดังนี้คือ

- การวิเคราะห์เศษเหลือสำหรับความเป็นอิสระของข้อมูล (Time Sequence) โดยการสร้างแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษเหลือกับลำดับความต่อเนื่องในการเก็บข้อมูล ซึ่งแผนภาพไม่ควรที่จะมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม ควรที่จะกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังรูปที่ 3.5

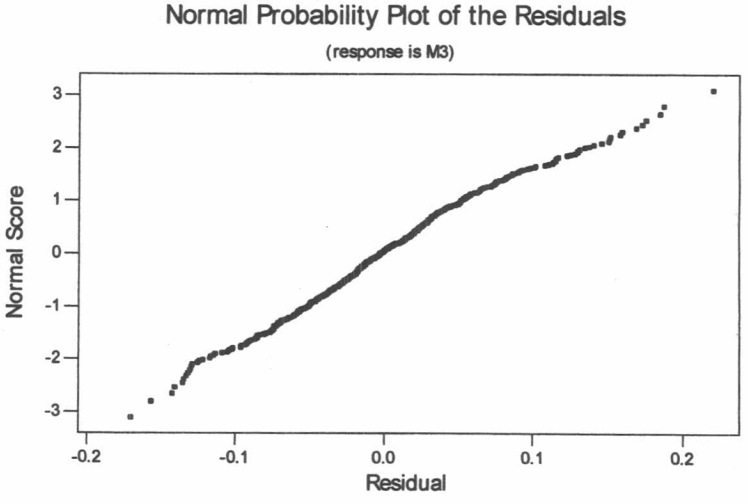


รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษเหลือและลำดับของข้อมูล

- การวิเคราะห์เศษเหลือสำหรับความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Assumption) โดยวิธีการสร้างแผนภาพฮีสโตแกรมของค่าเศษเหลือ ซึ่งควรที่จะมีการกระจายตัวเป็นรูประฆังคว่ำแบบสมมาตร หรือใช้วิธีการพล็อตค่าเศษเหลือในกระดาษ NOPP (Normality Paper Plot) ซึ่งหากค่าเศษเหลือมีการกระจายแบบปกติ จะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ตัวอย่างของฮีสโตแกรมและการพล็อตค่าเศษเหลือ แสดงในรูป 3.6 ก และ ข ตามลำดับ



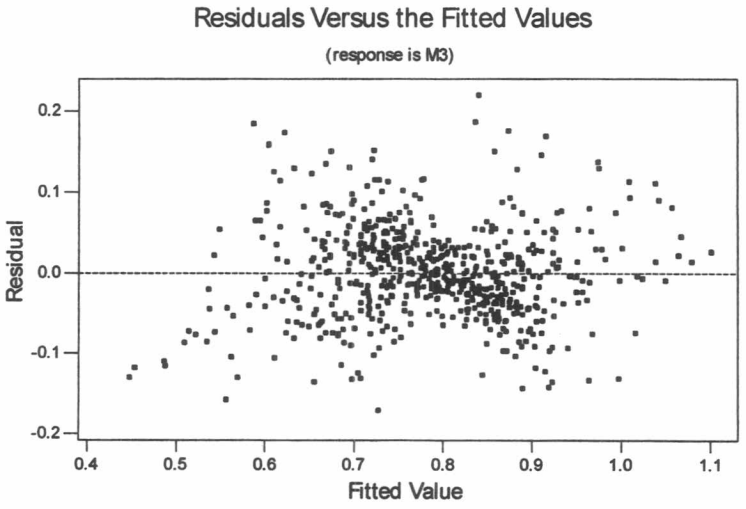
ก) ฮีสโตแกรม



ข) Normal Probability Plot

รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษเหลือและลำดับของข้อมูล
ก) ฮีสโตแกรม ข) Normal Probability Plot

- การวิเคราะห์เศษเหลือสำหรับความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน โดยการสร้างแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษเหลือกับค่าตัวแปรตามที่ได้จากสมการตัวแบบถดถอย ซึ่งแผนภาพไม่ควรที่จะมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม ควรที่จะกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษเหลือและค่า Fitted value

- สัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) เป็นการพิจารณาว่าตัวแบบถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ สามารถที่จะอธิบายสัดส่วนความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนองได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งมีสมการดังนี้

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

เช่น R^2 มีค่าเท่ากับ 0.80 นั่นหมายถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของความผันแปรในตัวแปรตอบสนองที่สามารถที่จะอธิบายได้จากตัวแบบถดถอย

3.3.4 IMPROVE PHASE (การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ)

ขั้นตอนนี้จะเป็นการนำปัจจัยนำเข้าที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะทางคุณภาพของลูกค้าที่ได้จากการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่แล้ว มาทำการศึกษาถึงความสามารถของกระบวนการที่ค่าต่างๆ ของตัวแปรเหล่านี้ ซึ่งสามารถที่จะทำการกำหนดค่าของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่มีผลทำให้กระบวนการผลิตสามารถที่จะผลิตงานที่มีค่าของลักษณะทางคุณภาพได้ตรงตามเป้าหมายที่ลูกค้ากำหนด, มีความเบี่ยงเบนที่น้อยที่สุด และมีประสิทธิภาพสูงสุด

ความรู้และเครื่องมือต่างๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ของขั้นตอนนี้จะเกี่ยวข้องกับความรู้ในเรื่องของการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) โดยการออกแบบการทดลองเป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรตามที่สนใจใน

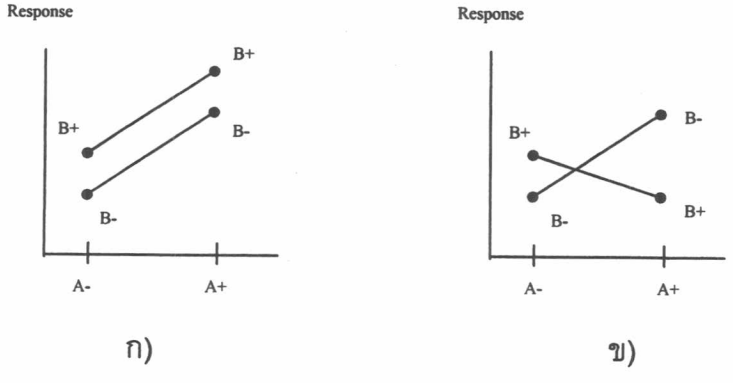
สภาวะต่างๆ ของระบบหรือของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามที่ได้กำหนดไว้ (Treatment Combination) ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินการทดลองมีดังนี้

- นิยามปัญหา
- กำหนดปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ (KPIV) ที่จะใช้ในการทดลอง รวมทั้งการพิจารณาระดับของค่าของปัจจัยต่างๆ ดังกล่าว
- กำหนดเลือกตัวแปรตอบสนองที่ต้องการศึกษา (KPOV)
- เลือกแบบของการทดลอง ซึ่งรวมถึงการพิจารณาขนาดของสิ่งตัวอย่างที่ใช้ (Replication), ลำดับการทดลอง และตัวแปรอื่นๆ ที่ต้องควบคุม
- ทำการทดลองตามแผนที่ได้วางไว้
- วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการทางสถิติ
- สรุปผลการทดลอง

3.3.4.1 แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) [19,20]

การทดลองแบบแฟคทอเรียล เป็นการศึกษาผลที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนองในทุกๆ ระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ (Treatment Combination) ที่มีจำนวน 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยทุกๆ Treatment combination ของปัจจัยนำเข้าทุกตัว จะได้รับการศึกษาไปพร้อมๆ กัน

ผลกระทบจากปัจจัยนำเข้าจะนิยามด้วยการตรวจสอบค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองที่ศึกษาที่เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับของปัจจัยนำเข้านี้ เรียกว่า "อิทธิพลหลัก (Main Effect)" ส่วนอิทธิพลร่วม (Interaction) จะหมายถึงค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองในระดับของปัจจัยนำเข้าตัวหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันในระดับต่างๆ ของปัจจัยนำเข้าตัวอื่นๆ ซึ่งแสดงได้โดยพิจารณาจากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงปัจจัยร่วมในการทดลอง **ก)** ปัจจัยร่วมไม่มีผล **ข)** ปัจจัยร่วมมีผล

ประโยชน์ของการทดลองแบบแฟคทอเรียล

- ในกรณีที่ต้องการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยนำเข้าจำนวนหลายตัว จะใช้จำนวนสิ่งตัวอย่างในการทดลองจำนวนที่น้อยกว่าการทดลองทีละ 1 ปัจจัย (One-factor-at-a-time)

- ใช้เวลาการทดลองที่น้อยกว่า เนื่องจากเป็นการศึกษาปัจจัยหลายตัวพร้อมๆ กัน

- ผลสรุปจากการทดลองแบบแฟคทอเรียล สามารถที่จะสรุปผลได้ครอบคลุมมากกว่า เนื่องจากสามารถพิจารณาในส่วนของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยในการทดลองด้วย

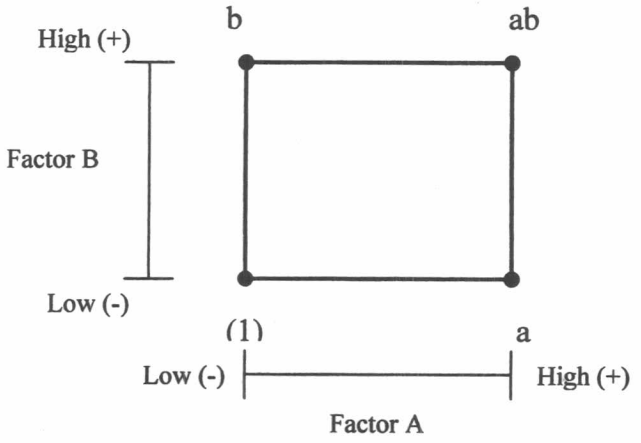
การทดลองแบบแฟคทอเรียล

แบบต่างๆ ของการทดลอง มีดังนี้

- General Full Factorial Designs : จะกำหนดค่าของปัจจัยนำเข้าในระดับต่างๆ ที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลอง และทำการทดลองในทุกๆ Treatment Combination.

- Fractional Factorial Designs : เป็นสับเซตของการทดลอง General Full Factorial Design คือจะลดจำนวนของการทดลองลง โดยพิจารณาเลือกจำนวนการทดลองจาก Treatment Combination ในผลกระทบที่ระดับสูงของตัวแปรซึ่งเรียกว่า " Generator "

- 2^k Factorial Designs : เป็นการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นแบบ Full Factorial หรือเป็นแบบ Fractional Factorial Design โดยในแต่ละปัจจัยนำเข้าจะกำหนดค่าเพียง 2 ระดับในการทดลอง และทำการทดลองในทุกๆ Treatment Combination เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของตัวแปรตอบสนองในการวิจัย ตัวอย่างภาพแสดง Treatment combination ของการทดลองแบบ 2^k Factorial Designs ในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดง Treatment Combination ใน 2^k Factorial Design

โดยสามารถคำนวณอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมของปัจจัยนำเข้าได้ดังนี้คือ

$$\text{อิทธิพลหลักของปัจจัย A} = \frac{1}{2n}\{[ab-b]+[a-(1)]\}$$

$$\text{อิทธิพลหลักของปัจจัย B} = \frac{1}{2n}\{[ab-a]+[b-(1)]\}$$

$$\text{อิทธิพลร่วมของปัจจัย AB} = \frac{1}{2n}\{[ab-b]-[a-(1)]\}$$

การทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้า สามารถพิจารณาด้วยหลักการการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.3.2

3.3.4.2 การแปลงรูปข้อมูลโดยวิธี Box-Cox (The Box-Cox Method) [19,20]

หากข้อมูลหรือตัวแปรตอบสนองที่นำมาวิเคราะห์ไม่เป็นไปตามสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ซึ่งมักจะสัมพันธ์กับข้อมูลที่มีการแจกแจงไม่เป็นแบบปกติ โดยทั่วไปการแปลงรูปข้อมูลนี้มีจุดประสงค์เพื่อ 1) ข้อมูลมีการกระจายเข้าใกล้การกระจายแบบปกติมากที่สุด 2) เพื่อให้ข้อมูลมีความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน และเพิ่มความแม่นยำของตัวแบบที่ได้จากการวิเคราะห์กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง วิธีการที่จะกล่าวถึงเพื่อนำมาใช้ในการแปลงรูปของข้อมูลคือ วิธีการของ Box-Cox โดยจะทำการแปลงรูปของข้อมูลตามสมการ

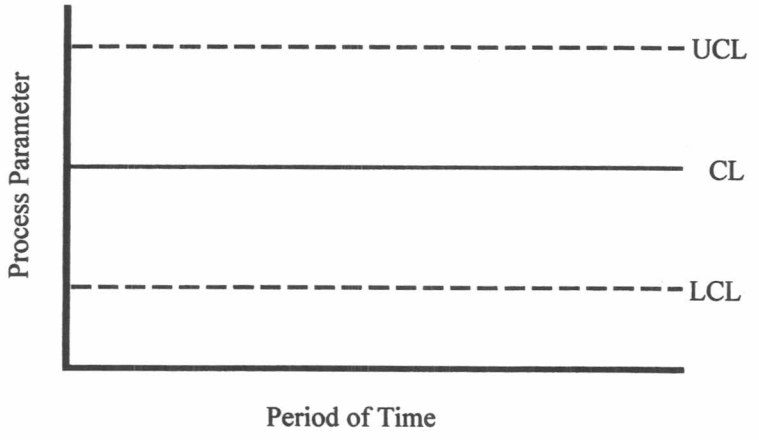
$$y^* = y^{\lambda}$$

โดยที่ y^* คือค่าตัวแปรตอบสนองที่ถูกแปลงรูปแล้ว และค่า λ คือค่า power family ของการแปลงรูป พิจารณาค่าที่เหมาะสมของ λ โดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $SS_E(\lambda)$ กับค่า λ และทำการเลือกค่า λ ที่ทำให้ค่า $SS_E(\lambda)$ มีค่าต่ำที่สุดจากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว

3.3.5 CONTROL PHASE (การควบคุมกระบวนการผลิต)

เป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการซิกซ์ ซิกมา เพื่อจุดประสงค์ในการตรวจสอบและควบคุมปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญที่ได้จากการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่แล้ว และได้ทดสอบเพื่อยืนยันผลการสรุปเรียบร้อยแล้ว โดยการนำความรู้และเครื่องมือเกี่ยวกับการควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการทางสถิติ (Statistical Process Control) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งประเภทของแผนภูมิควบคุม (Control Chart) มีรายละเอียดดังนี้คือ

แผนภูมิควบคุมใช้ในการตรวจสอบกระบวนการ สร้างโดยการนำข้อมูลมาพล็อตตามเวลาที่เก็บ ซึ่งกลุ่มของข้อมูลโดยทั่วไปจะใช้ขนาดสิ่งตัวอย่างจำนวน 5 ข้อมูลต่อกลุ่ม (Subgroup) ทั้งนี้ขึ้นกับประเภทของแผนภูมิควบคุมที่นำมาประยุกต์ใช้และลักษณะตัวแปรที่เกี่ยวข้อง จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาเส้นกลาง (Center line), เส้นควบคุมล่าง (Lower control limit : LCL) และเส้นควบคุมบน (Upper control limit : UCL) โครงสร้างโดยทั่วไปของแผนภูมิควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.10 และจำนวนข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณเส้นควบคุมจะต้องมีไม่ต่ำกว่า 20 จุด



รูปที่ 3.10 รูปแบบทั่วไปของแผนภูมิควบคุม

3.3.5.1 แผนภูมิควบคุม $\overline{X}$ - R Chart และ $\overline{X}$ - S Chart [15]

เป็นแผนภูมิควบคุมของข้อมูลเชิงผันแปร โดยแยกออกเป็นแผนภูมิแสดงค่าเฉลี่ยของข้อมูลซึ่งจะแสดงความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม และแผนภูมิที่แสดงค่าพิสัยของข้อมูลซึ่งจะแสดงความแปรปรวนภายในกลุ่ม โดยเส้นควบคุมต่างๆ สามารถที่จะคำนวณได้ดังสมการ

$\overline{X}$: CL = $\overline{\overline{X}}$ UCL = $\overline{\overline{X}} + A2\overline{R}$ LCL = $\overline{\overline{X}} - A2\overline{R}$

UCL = $\overline{\overline{X}} + A3\overline{S}$ LCL = $\overline{\overline{X}} - A3\overline{S}$

R : CL = $\overline{R}$ UCL = $D4\overline{R}$ LCL = $D3\overline{R}$

S : CL = $\overline{S}$ UCL = $B4\overline{S}$ LCL = $B3\overline{S}$

3.3.5.2 แผนภูมิควบคุม p Chart และ np Chart [15]

เป็นแผนภูมิควบคุมที่แสดงข้อมูลของสัดส่วนของของเสียและจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นต่อเวลา สำหรับ p Chart และ np Chart ตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนของของเสีย (p) สำหรับแต่ละกลุ่มตัวอย่างคำนวณได้จาก

$$p = \frac{x}{n}$$

โดยที่ x คือจำนวนของของเสียที่ตรวจพบ และ n คือจำนวนสิ่งตัวอย่างทั้งหมดที่ทำการตรวจสอบ และสำหรับเส้นควบคุมต่างๆ คำนวณได้จากสมการ

$$CL = \bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^{m} p_i}{m}$$

$$UCL = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}\left(1-\bar{p}\right)}{m}}$$

$$LCL = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}\left(1-\bar{p}\right)}{m}}$$

สำหรับ np Chart เส้นควบคุมต่างๆ คำนวณได้ดังนี้คือ

$$CL = n\bar{p}$$

$$UCL = n\bar{p} + 3\sqrt{n\ \bar{p}\ (1-\bar{p})}$$

$$LCL = n\bar{p} - 3\sqrt{n\ \bar{p}\ (1-\bar{p})}$$

3.3.5.3 แผนภูมิควบคุม XmR Chart หรือ ImR Chart [15]

เป็นแผนภูมิควบคุมที่ประกอบด้วยแผนภูมิที่แสดงถึงข้อมูลแต่ละตัว (Individual) และค่า moving Range (mR) เป็นแผนควบคุมที่เหมาะกับกระบวนการทางเคมีที่มีการผลิตแบบ Batch หรือกระบวนการทางเคมีที่มีความต่อเนื่องหรือกระบวนการแบบอัดขึ้นรูป (Extrusion) โดยเส้นควบคุมต่างๆ สามารถที่จะคำนวณได้ดังสมการ

แผนภูมิ X หรือ I

$$LCL = \bar{X} - E_2\bar{R}$$
$$CL = \bar{X}$$
$$UCL = \bar{X} + E_2\bar{R}$$

แผนภูมิ mR

$$LCL = D_3\bar{R}$$
$$CL = \bar{R}$$
$$UCL = D_4\bar{R}$$

เมื่อ

$$\hat{\sigma} = \bar{R}/d_2$$

นอกจากนี้ยังมีแผนภูมิควบคุม c Chart (Number of Nonconformities) คือแผนภูมิควบคุมที่แสดงถึงจำนวนข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นต่อหน่วยที่วัด เช่น จำนวนจุดเชื่อมที่มีข้อบกพร่องต่อแผ่นวงจร, u Chart (Nonconformities per Unit) คือ แผนภูมิควบคุมที่แสดงจำนวนของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นต่อหน่วยวัดเช่นเดียวกับ u Chart แต่ใช้ในกรณีที่ขนาดของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง (Subgroup) ไม่เท่ากันตลอดการเก็บข้อมูล

3.4 ทฤษฎีการชุบทองแดง [21]

การชุบทองแดงบนแผ่น PCB แบ่งตามกรรมวิธีการชุบได้ 2 แบบคือ การชุบโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า (Electroless Plating) และการชุบด้วยกระแสไฟฟ้า (Electroplating)

3.4.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า

การชุบทองแดงโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้าสำหรับการผลิตแผ่น PCB มีจุดประสงค์เพื่อการชุบทองแดงผ่านรูที่เจาะบนแผ่น PCB เพื่อเป็นตัวนำไฟฟ้าเชื่อมระหว่างแผ่นวงจรแต่ละชั้นสำหรับแผ่น PCB ประเภท สองหน้า (Double side) และประเภทหลายชั้น (Multi-layer) ซึ่งชั้นทองแดงที่เกิดขึ้นนี้จมีลักษณะเป็นชั้นบางๆ มีความหนาประมาณ 1-2 ไมครอน (μm) หลังจากนั้นจะนำไปชุบเพิ่มความหนาด้วยการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าต่อไป

กรรมวิธีการชุบทองแดงโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้ามีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

3.4.1.1 การกำจัดไขมัน (Degreasing)

เมื่อชิ้นงานที่เจาะรูมาแล้วจะต้องนำมากำจัดไขมันที่ผิวออกให้หมด โดยการล้างด้วยไตรคลอโรเอททีลีน

3.4.1.2 ล้างด้วยน้ำสะอาด

3.4.1.3 การกัดผิว (Etching) ขั้นตอนนี้สำคัญมาก การกัดผิวนี้กระทำเพื่อให้ผิวของแผ่นวงจรนั้นมีความหยาบขึ้นที่ผิวโดยการกัดด้วยน้ำยา เพื่อให้มีการซึมซับของสารเคมีในขั้นตอนต่อๆ ไป

3.4.1.3.1 การกัดผิวแบบใช้แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต

3.4.1.3.2 การกัดผิวแบบใช้คอปเปอร์คลอไรด์

3.4.1.4 ล้างด้วยน้ำสะอาด

3.4.1.5 จุ่มกรดกำมะถัน (Sulfuric acid, H_2SO_4) กรดกำมะถันที่ใช้จะมีความเข้มข้นประมาณ 25%

3.4.1.6 ล้างด้วยน้ำสะอาด

3.4.1.7 จุ่มในกรดเกลือ (Hydrochloric acid, HCl) 25%

3.4.1.8 เซ็นซิไทซิ่ง (Sensitizing) เป็นการเร่งผิวให้ไวต่อปฏิกิริยาโดยใช้กรดเกลือกับสแตนนัสคลอไรด์

3.4.1.9 ล้างด้วยน้ำกลั่นหรือน้ำ ดีไอออนไนซ์ (Deionized water, DI water)

3.4.1.10 แอคทิเวทติง (Activating) เป็นการกระตุ้นผิวให้ไวต่อปฏิกิริยา โดยใช้พาราเดียมคลอไรด์กับกรดเกลือ

3.4.1.11 ล้างด้วยน้ำกลั่น

3.4.1.12 ชุบทองแดงแบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้า โดยมีปฏิกิริยาเคมีดังนี้

$$CuSO_4 + 2HCHO + 4NaOH \longrightarrow 2HCO_2Na + H_2 + 2H_2O + Na_2SO_4$$

3.4.1.13 ล้างด้วยน้ำสะอาด

3.4.1.14 จุ่มกรดกำมะถัน 5%

3.4.1.15 ล้างด้วยน้ำสะอาด

3.4.2 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า

3.4.2.1 น้ำชุบโลหะ (Electrolytes)

จากการวิจัยของนักวิทยาศาสตร์ ได้พบว่าตัวนำไฟฟ้าแบ่งได้เป็น 2 พวกคือ

1) พวกที่หนึ่ง เป็นตัวนำไฟฟ้าโดยตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นแต่เพียงสะพานเพื่อให้ไฟฟ้าผ่านได้เท่านั้น เช่น โลหะต่างๆ และแกรไฟต์

2) พวกที่สอง เป็นตัวนำไฟฟ้าโดยตัวเองแยกสลายออกเป็นอนุภาคเล็กๆ ในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวของมัน เช่น สารละลายกรด และสารละลายเกลือต่างๆ เป็นต้น ตัวนำไฟฟ้า ซึ่งเรียกตัวนำพวกนี้ว่า Electrolytes ซึ่งตัวนำชนิดนี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าโดยตรง

เมื่อเราผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายของอีเล็คโตรไลท์ที่ใช้แผ่นแพลทินัมเป็นขั้วอีเล็คโตรด อนุภาคเล็กๆ ของอีเล็คโตรไลท์จะวิ่งไปยังแคโทด (Cathode) หรือขั้วลบ ซึ่งอนุภาคเล็กๆ ที่วิ่งไปยังขั้วบวกหรือขั้วลบเหล่านี้เรียกว่า อิออน (Ions) แต่ละอิออนจะมีประจุไฟฟ้าประจำตัวทุกตัว อิออนที่วิ่งไปยังขั้วบวกเรียกว่า "แอนอิออน" (Anions) จะมีประจุไฟฟ้าลบ (-) ส่วนอิออนที่วิ่งไปยังขั้วลบเรียกว่า "แคทอิออน" (Cathions) จะมีประจุไฟฟ้าบวก (+) ขณะที่เกิดการแยกสารละลายดังกล่าวในสารละลายนั้นเราจะมองไม่เห็นปฏิกิริยาใดๆ เกิดขึ้นในสารละลายนั้นเลย แต่จะไปเห็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ขั้วลบ หรือขั้วบวก เช่นในสารละลายอีเล็คโตรไลท์บางชนิด ที่ใช้แผ่นแพลทินัมเป็นขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อต่อแผ่นขั้วทั้งสองให้ครบวงจร จะปรากฏว่ามีฟองแก๊สอ๊อกซิเจนเกิดขึ้นที่ขั้วบวก และไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่ขั้วลบ

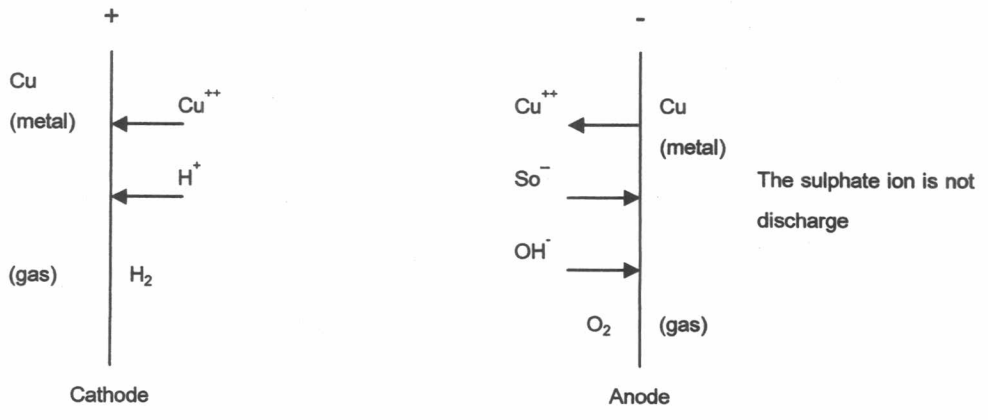
3.4.2.2 ตัวอย่างการแยกสลายของน้ำยาสารละลายของคอปเปอร์ซัลเฟต

เมื่อเอาสารละลายของคอปเปอร์ซัลเฟตมาทำการแยกสลายด้วยไฟฟ้า ใช้แผ่นแพลทินัมเป็นขั้วลบโดยต่อเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่ ใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์เป็นขั้วบวก โดยต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$CuSo_4 \quad ---> \quad Cu^{++} \quad + \quad So_4^{-}$$

คอปเปอร์ซัลเฟตที่มีอยู่ในน้ำยาจะแยกสารสลายออกเป็นอนุภาคเล็กๆ 2 ส่วน คือ อนุภาคทองแดง (Cu^{++}) มีประจุไฟฟ้าบวก (+) และซัลเฟต (So_4^{-}) มีประจุไฟฟ้าลบ (-) เมื่อต่อกระแสไฟฟ้าให้ครบวงจร อนุภาคเล็กๆของทองแดงจะวิ่งไปหาแพลทินัม (ขั้วลบ) เกาะติดเป็นผงสีแดงอยู่บนแผ่นแพลทินัม ส่วนอนุภาคเล็กๆของซัลเฟตจะวิ่งไปหาแผ่นทองแดง (ขั้วบวก) และทำปฏิกิริยากับแผ่นทองแดง เป็นเหตุให้ทองแดงละลายเป็นคอปเปอร์ซัลเฟตแทนที่ตัวก่อนที่หมดไป คอปเปอร์ซัลเฟตตัวหลังนี้จะแยกสลายออกเป็น 2 ส่วนอีก คืออนุภาค

ทองแดง (Cu^{++}) และอนุภาคซัลเฟต (So_4^{-}) โดยอนุภาคทองแดงจะวิ่งไปขั้วลบ เกาะติดอยู่ที่ขั้วลบ และอนุภาคซัลเฟตวิ่งไปที่ขั้วบวกทำปฏิกิริยากับขั้วบวกกลายเป็นคอปเปอร์ซัลเฟต ขึ้นมาแทนที่อีก ปฏิกิริยาจะเกิดหมุนเวียนเช่นนี้ตลอดไปตราบทียังคงต่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จากการค้นพบกฎเกณฑ์อันนี้เราจึงนำเอาไปใช้ประโยชน์ในทางชุบเคลือบผิวโลหะ (Electro Plating) และการแยกโลหะบริสุทธิ์ (Refinery) เช่นถ้าเรามีทองแดงไม่บริสุทธ์อยู่ เราก็เอาทองแดงนี้ไปทำเป็นขั้วบวกแล้วจุ่มในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSo_4$) เมื่อไฟฟ้าไหลผ่านครบวงจรทองแดงบริสุทธิ์จะไปเกาะจะไปเกาะติดบนแผ่นขั้วลบซึ่งเราจะได้ทองแดงบริสุทธิ์ตามต้องการ



รูปที่ 3.11 แสดงปฏิกิริยาอีเล็คโตรไลท์ของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต

3.4.2.3 กฎของฟาราเดย์

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายอีเล็คโตรไลท์โดยผ่านขั้วแคโทดและแอโนด โลหะจะละลายจากแอโนดหรือมีออกซิเจนเกิดขึ้นที่แอโนด และจะได้โลหะเกาะจับที่แคโทดหรือมีไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่แคโทด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมากหรือน้อยมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลาย และระยะเวลาของการปล่อยกระแสผ่าน ไมเคิลฟาราเดย์ ได้ตั้งกฎความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสอง, ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้และระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไว้ดังนี้

กฎข้อที่หนึ่ง น้ำหนักของอิออนที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระโดยกระแสไฟฟ้าย่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของไฟฟ้าที่ใช้

กฎข้อที่สอง น้ำหนักของอิออนชนิดต่างๆ ที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระโดยปริมาณไฟฟ้าเท่าๆ กันย่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสมมูลย์เคมีของอิออนเหล่านั้น

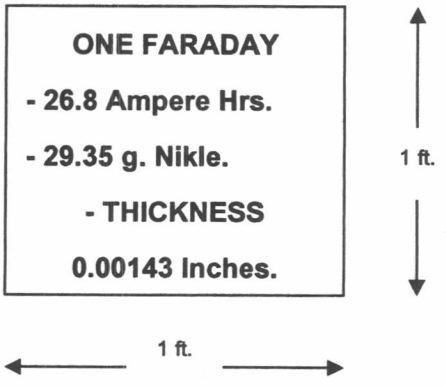
จากกฎข้อที่ 1 เราสามารถนำมาใช้ในการชุบโลหะได้ คือถ้าเราต้องการให้โลหะมาเกาะจับมีความหนาจำนวนหนึ่ง เราอาจจะทำได้ 2 วิธีคือ ใช้กระแสไฟฟ้าน้อยๆ แล้วใช้เวลานานๆ หรือเราอาจจะใช้กระแสไฟฟ้ามากๆ แต่เวลาสั้นๆ ก็จะได้โลหะไปเกาะจับที่แคโทดมีปริมาณเท่ากัน

จากกฎข้อที่ 2 เราทราบได้ว่าโลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติการแยกสลายไม่เหมือนกัน กล่าวคือ ในปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เท่าๆกัน โลหะแต่ละชนิดจะแยกสลายออกมามีปริมาณไม่เท่ากัน โลหะบางชนิดจะแยกสลายออกมาน้อย โลหะบางชนิดจะแยกสลายออกมามาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติประจำตัวหรือสมมูลย์เคมีของโลหะนั้นๆ

3.4.2.4 ประสิทธิภาพของขั้วลบและขั้วบวก

ตามกฎของฟาราเดย์ข้อที่หนึ่ง ในน้ำยาชุบโลหะนิเกิล ถ้ากระแสไฟฟ้าจำนวน 1 ฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 26.8 แอมแปร์ ไหลผ่านสารละลายนิเกิลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามทฤษฎีควรจะได้โลหะนิเกิลที่แคโทดมีน้ำหนัก 29.35 กรัม

แต่จากการทดลองจริงๆ ผลปรากฏว่า ได้โลหะนิเกิลเกาะที่แคโทดเพียง 27.9 กรัม เท่านั้น จากการทดสอบจึงพบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไปในน้ำยาชุบนิเกิล ไม่ได้สิ้นเปลืองไปในการแยกสลายนิเกิลไปเกาะที่แคโทดแต่อย่างเดียว หากแต่ยังต้องสิ้นเปลืองไปกับการแยกสลายสิ่งอื่นๆ ที่มีอยู่ในน้ำยาอีก เช่น แกสไฮโดรเจน เป็นต้น ถ้าเรานำเอาน้ำหนักของนิเกิลที่ไปเกาะที่ขั้วลบอย่างแท้จริงมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักของนิเกิลที่ควรจะไปเกาะที่ขั้วลบตามทฤษฎีก็จะสามารถทราบ "ประสิทธิภาพของขั้วลบ" ได้



รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า และเวลาที่ใช้ของปฏิกิริยาอีเล็คโตรไลท์ต่อปริมาณโลหะนิเกิลที่เกิดขึ้นตามกฎของฟาราเดย์

ตัวอย่าง

น้ำหนักของนิเกิลที่ไปเกาะที่ขั้วลบอย่างแท้จริง	27.9	กรัม
น้ำหนักของนิเกิลที่ควรจะไปเกาะที่ขั้วลบ	29.35	กรัม
ประสิทธิภาพของขั้วลบ	$\frac{27.9}{29.35} x100$	= 95%

นั่นคือปริมาณของกระแสไฟฟ้า 26.8 แอมแปร์ที่ไหลผ่านน้ำยาชุบโลหะนิเกิลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะมีกระแสเพียง 95% เท่านั้นที่ใช้สิ้นเปลืองไปในการแยกสลายให้โลหะไป

เกาะที่ขั้วลบ ส่วนอีก 5% จะเป็นปริมาณกระแสที่สูญเสียไปกับการแยกสลายของของกาซไฮโดรเจน เราจึงเรียกว่านิเกิลมีประสิทธิภาพของขั้วลบ 95%

ประสิทธิภาพของขั้วลบของน้ำยาชนิดต่างๆ จะแตกต่างกันออกไป เช่น น้ำยาชุบโครเมียมจะมีประสิทธิภาพต่ำมาก คือประมาณ 10-25% เท่านั้น น้ำยาชุบเงินมีประสิทธิภาพขั้วลบสูงมากคือเกือบ 100% เต็ม และในน้ำยาชุบดีบุกมีประสิทธิภาพของขั้วลบประมาณ 50-75% เป็นต้น

ที่แอโนดกระแสไฟฟ้าที่ไปช่วยให้แอดโนดละลายก็ไม่ได้หมดไปในการละลายแอโนดแต่อย่างเดียว กระแสไฟฟ้าต้องสูญเสียไปกับสิ่งอื่นๆ อีก เช่น ต้องเอาชนะความต้านทานที่เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยายาเคมี มีลักษณะเป็นเยื่อบางๆ รอบๆ แท่งแอโนด, ต้องสูญเสียไปกับการละลายสิ่งเจือปนอื่นๆ ที่มีผสมอยู่ที่แอโนด ฯลฯ เป็นต้น จากการสูญเสียดังกล่าวจึงต้องคำนวณหาประสิทธิภาพของแอโนดด้วย แต่วิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพของแอโนดมักจะคำนวณโดยการเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของแคโทดหรือคำนวณโดยวิธีเดียวกันกับการหาประสิทธิภาพของขั้วลบ

ในการประกอบการชุบโลหะโดยทั่วๆ ไป ถ้าประสิทธิภาพของแคโทดและแอโนดต่างก็มีประสิทธิภาพดีเลิศคือ 100% เท่ากัน นั่นคือมีโลหะไปเกาะที่แคโทดเท่าใด ที่แอโนดก็จะมีจะต้องมีโลหะละลายลงไปในน้ำยามีจำนวนเท่ากัน ถ้าน้ำยาชุบใดๆ เป็นเช่นนี้ ก็จะมีลักษณะดีเลิศ ไม่มีปัญหายุ่งยากใดๆ จะต้องแก้ไขเลย แต่น้ำยาชุบโลหะทุกชนิดไม่มีลักษณะเป็นเช่นนั้น น้ำยาทุกชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็วมาก ประสิทธิภาพของขั้วบวกและขั้วลบหรือกล่าวโดยง่าย การละลายของขั้วบวกและการเกาะจับของโลหะที่ขั้วลบจะแตกต่างกันอยู่ตลอดเวลาด้วยเหตุนี้เอง น้ำยาชุบโลหะแต่ละชนิดจึงจำเป็นต้องประกอบด้วยสารเคมีหลายๆ อย่าง เพื่อให้สารเหล่านั้นทำหน้าที่ต่างๆ กัน เช่นตัวที่หนึ่งมีหน้าที่ปล่อยโลหะออกมา ตัวที่สองมีหน้าที่ช่วยให้แอโนดละลายสม่ำเสมอ ช่วยเป็นสื่อไฟฟ้า ตัวที่สามมีหน้าที่ช่วยควบคุมไม่ให้น้ำยาเป็นกรดหรือเป็นด่างมากเกินไป ฯลฯ เป็นต้น ทั้งนี้มีจุดมุ่งหมายให้ขั้วบวกและขั้วลบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้นั่นเอง

น้ำยาแต่ละชนิด ประกอบด้วยสารเคมีแตกต่างกันออกไป ผู้ใช้จึงต้องศึกษาเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในการชุบโลหะ

3.4.2.5 ค่าของพีเอช (pH Values)

หนึ่งโมเลกุลของน้ำประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม สูตรโมเลกุลของน้ำคือ H_2O น้ำบริสุทธิ์ เมื่อมีการแตกแยกจะได้ ไฮโดรเจนอิออน และ ไฮดรอกซิลอิออนเล็กน้อยดังสมการ

H_2O	$\Leftrightarrow$	H^+	+	OH^-
Water		Hydrogen ions		Hydroxyl ions

ในน้ำบริสุทธิ์ ค่าของไฮโดรเจนอิออนและค่าของไฮดรอกซิลอิออน จะมีค่าเท่ากันในสภาพเช่นนี้ น้ำนั้นจะมีสภาพเป็นกลาง คือไม่เป็นกรดหรือด่าง แต่ถ้าในน้ำมีไฮโดรเจนอิออนมากกว่าไฮดรอกซิลอิออน น้ำนั้นจะมีสภาพเป็นกรด และในทางตรงข้าม ถ้าในน้ำใดมีไฮดรอกซิลอิออนมากกว่าไฮโดรเจนอิออน น้ำนั้นก็จะมีสภาพเป็นด่าง ในการวัดค่า pH ของน้ำยาชุบจะถือค่า pH 7 เป็นค่าที่น้ำยามีสภาพเป็นกลาง ค่า pH ตั้งแต่ 7 ลงมาถึง 1 เป็นค่าที่น้ำยามีสภาพเป็นกรด ตั้งแต่ 7 ถึง 13 เป็นค่าที่น้ำยามีสภาพเป็นด่าง

ค่าของ pH มีอิทธิพลต่อน้ำยาชุบมาก กล่าวคือถ้าค่าของ pH น้อย แสดงว่าน้ำยามีสภาพเป็นกรดมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแคโทดลดต่ำลง ถ้าค่าของ pH มาก แสดงว่าน้ำยามีสภาพเป็นด่างมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแอโนดลดต่ำลงเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้การควบคุมค่าของ pH จึงสำคัญมาก น้ำยาทุกชนิดจะมีค่า pH ที่เหมาะสมโดยเฉพาะอยู่ที่ค่าหนึ่ง ฉะนั้นจึงควรพยายามควบคุมให้ค่า pH อยู่ในขอบเขตตามที่กำหนดให้ได้ น้ำยาชุบชนิดใดควรมีค่า pH เป็นเท่าใด จะทราบได้จากคู่มือการใช้น้ำยาชนิดนั้นๆ

3.4.2.6 ความหนาแน่นของกระแส (Current Density)

ความหนาแน่นของกระแสของขั้วลบ คือกระแสที่ช่วยให้เกิดการเคลือบที่ขั้วลบต่อหนึ่งหน่วยเนื้อที่ ปกติมักจะใช้แอมแปร์ต่อตารางฟุต หรือแอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร การคำนวณหาพื้นที่ของแคโทด เพื่อทราบว่าจะจ่ายความหนาแน่นของกระแสแตกต่างกันออกไปและงานแต่ละชิ้นก็มีพื้นที่ต่างกัน ด้วยเหตุนี้กระแสและพื้นที่จึงควรต้องพิจารณาเป็นอันดับแรกเสมอ ก่อนที่จะจุ่มชิ้นงานลงในถังเพื่อทำการชุบ ความหนาแน่นของกระแสดูได้จากคู่มือการใช้น้ำยาแต่ละชนิด โดยสอบถามจากผู้จำหน่าย ในการชุบโลหะถ้ากวนน้ำยาโดยใช้เครื่องกวนหรือใช้ลมเป่า และเพิ่มอุณหภูมิของน้ำยาตามคู่มือการใช้น้ำยา จะช่วยให้สามารถใช้ความหนาแน่นของกระแสได้มากขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้ระยะเวลาของการชุบลดสั้นลงได้ โดยได้ความหนาของผิวที่เท่ากัน

3.4.2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของชิ้นงานและกำลังการเคลือบผิว

รูปร่างของชิ้นงานที่จะต้องทำการชุบเคลือบผิวนั้นมักจะมีรูปร่างต่างๆ กันออกไป เช่น กลม, แบน, โค้งงอ, กลวง ฯลฯ รูปร่างต่างๆ เหล่านี้จะชุบให้มีการเกาะจับหนาเท่ากันโดยตลอดทั่วชิ้นงานย่อมยากมาก

จากการศึกษาถึงธรรมชาติการเดินทางของกระแสในการชุบโลหะพบว่า กระแสเดินทางไปยังจุดที่ใกล้เคียงที่สุดอย่างหนาแน่น จุดที่ห่างออกไปจะมีกระแสเบาบางลงไปด้วย เหตุที่การเดินทางของกระแสก็คือการเดินทางของแคทอิออนไปยังขั้วลบนั่นเอง ดังนั้นส่วนใดที่มีกระแสเดินไปหาอย่างหนาแน่น ย่อมมีการเกาะจับหนามาก ส่วนที่มีกระแสเดินไปหาเบาบางก็มีการเกาะจับบาง