บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านคุณภาพ (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)

การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis) เป็นวิธีการป้องกันที่ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต เพื่อทำให้เชื่อมั่นได้ว่าจะสามารถออกแบบและผลิตสินค้าได้ตามความต้องการของลูกค้า ในการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของข้อบกพร่องของการออกแบบและกระบวนการนั้น จะต้องมีการจัดตั้งทีมงานที่ทำหน้าที่หาข้อบกพร่องทางด้านศักยภาพที่ลูกค้าไม่พอใจ โดยในที่นี้ คำว่า "ลูกค้า" หมายรวมถึง ผู้บริโภคขั้นสุดท้าย, สายงานผลิตและประกอบ, แผนกบริการและแผนกอื่นๆรูปแบบตารางการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบจะช่วยบอกว่าข้อบกพร่องใดที่มีคะแนนความเสี่ยงสูง เพื่อนำมาจัดลำดับว่าควรจะปรับปรุงการออกแบบหรือกระบวนการใดก่อน โดยมีจุดมุ่งหมายในการปรับปรุง คือ ลดคะแนนความเสี่ยงและโอกาสการเกิดลักษณะบกพร่องรวมถึงลดความรุนแรงของผลอันเกิดจากลักษณะของข้อบกพร่อง

2.1.1 ประเภทของของ FMEA

FMEA แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

1. FMEA ในระบบงาน (System FMEA) ใช้ในการวิเคราะห์ระบบและระบบย่อยต่างๆในขั้นตอนการออกแบบแนวคิด (Concept Design) โดย FMEA ในงานระบบจะเน้นที่การวิเคราะห์หาข้อบกพร่องแนวโน้มที่เกิดกับการทำงาน (Function) ของระบบอันเนื่องจากความไม่มีประสิทธิภาพของระบบ ทั้งนี้จะครอบคลุมถึงการศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างระบบกับองค์ประกอบต่างๆของระบบด้วย
2. FMEA ในการออกแบบ (Design FMEA) ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบได้ก่อนให้ฝ่ายผลิตดำเนินการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป โดย FMEA ประเภทนี้จะเน้นถึงข้อบกพร่องอันเนื่องจากความไม่มีประสิทธิภาพของการออกแบบ
3. FMEA ในกระบวนการผลิต (Process FMEA) ใช้ในการวิเคราะห์การผลิตและกระบวนการประกอบ โดย FMEA ประเภทนี้จะเน้นถึงข้อบกพร่องอันเนื่องจากความไม่มีประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตและการประกอบ
4. FMEA ในการบริหาร (Service FMEA) ใช้ในการวิเคราะห์ถึงกระบวนการบริการก่อนจะส่งมอบให้กับลูกค้า FMEA ประเภทนี้จะเน้นถึงข้อบกพร่อง (ความผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อน) อันเนื่องจากความไม่มีประสิทธิภาพของระบบและกระบวนการ

2.1.2 การนำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบไปใช้งาน

การนำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบไปใช้งานมีดังนี้

1. ใช้เมื่อมีการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตใหม่ เพื่อชี้บ่งและหลีกเลี่ยงข้อบกพร่องที่มีโอกาส หรือแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นจากการออกแบบ
2. เมื่อต้องการหาสาเหตุในการเกิดข้อขัดข้องในระบบที่มีอยู่และหาวิธีการแก้ไข
3. ช่วยในการตัดสินใจหาทางเลือกที่เป็นไปได้โดยพิจารณาเลือกค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้และประโยชน์ที่ได้จากการเลือกนั้น
4. ใช้ในการวางแผนปฏิบัติการเพื่อชี้บ่งความเสี่ยงในแผนและหาวิธีที่จะหลีกเลี่ยงความเสี่ยงนั้น

2.1.3 การพัฒนาการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ

การวิเคราะห์ลักษณะและผลกระทบมีทั้งการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านการออกแบบ (Design Failure Mode and Effect Analysis: DF

MEA) และการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านกระบวนการผลิต (Process Failure Mode and Effects Analysis: PFMEA) มีขั้นตอนในการวิเคราะห์แบบเดียวกันเพื่อความสะดวกในการจัดทำเอกสารในการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลที่ได้ จึงได้มีการพัฒนาแบบฟอร์มกระบวนการ FMEA ขึ้นมาใช้เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์โดยแบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

1. เลือกหัวข้อที่สนใจจะทำการวิเคราะห์และกำหนดขอบเขตรายละเอียดให้ชัดเจน โดยอาจพิจารณาจากลักษณะปัญหาที่เมื่อเกิดแล้วมีผลกระทบต่อบริษัทและลูกค้าสูง หรือ อาจเป็นหัวข้อปัญหาที่มักพบเกิดขึ้นบ่อยๆ
2. ระบุวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ 4 วิธี คือ
    - การวิเคราะห์แบบบนลงล่าง (Top – down Analysis) โดยทำการวิเคราะห์ระบบโดยรวม แล้วจึงแยกพิจารณาในส่วนย่อยของระบบ เช่นพิจารณาจากรถยนต์ทั้งคันก่อน หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ ประตู กระจก คานกันกระแทก ตามลำดับ
    - การวิเคราะห์แบบล่างขึ้นบน (Bottom – up Analysis) โดยทำการวิเคราะห์ระบบย่อยแต่ละส่วน จากนั้นจึงพิจารณาระบบโดยรวม เช่นพิจารณาจากชิ้นส่วนเล็กๆ ไปหาชิ้นส่วนที่ใหญ่ที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนเล็ก วิธีการนี้จะตรงกันข้ามกับวิธีแรก
    - การวิเคราะห์ระดับชิ้นส่วน (Component Analysis) โดยทำการวิเคราะห์ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นส่วน แล้วนำข้อกำหนดของชิ้นส่วน (Component Specification) มาเป็นตัวกำหนดระดับข้อบกพร่อง

- การวิเคราะห์หน้าที่การทำงาน (Function Analysis) โดยทำการวิเคราะห์หน้าที่การทำงานของระบบ พิจารณาข้อบกพร่องที่เกิดกับผู้ใช้ตัวผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ (Product Specification) มาเป็นตัวกำหนดระดับข้อบกพร่อง

ในขั้นตอนนี้จะมีการพิจารณาการวิเคราะห์ความวิกฤติ ซึ่งเป็นการจัดลำดับผลกระทบข้อบกพร่อง โดยทำการเปรียบเทียบกับผลกระทบข้ออื่นๆ โดยจะได้ผลลัพธ์เป็นค่าเชิงปริมาณเพื่อพิจารณาหาลำดับความสำคัญในการแก้ไขข้อบกพร่องและผลกระทบของข้อบกพร่อง ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ควรใช้ข้อมูลจริงที่ได้จากการเก็บบันทึกของเสียจากอดีตที่ผ่านหรือรายงานของเสียจากลูกค้า โดยลักษณะข้อบกพร่องของระบบ ระบบย่อย หรือ อุปกรณ์ที่มีผลกระทบจากลักษณะบกพร่องรุนแรงที่สุดจะถูกเลือกมาเป็นอันดับแรก ในการนำมาวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

3. กำหนดขอบเขตของข้อบกพร่องที่จะวิเคราะห์ เพื่อเป็นขอบเขตในการตรวจสอบ
4. ออกแบบตารางที่เหมาะสมเพื่อทำการเก็บข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างรวมเข้าด้วยกัน เช่น ได้มีการวัดความวิกฤติหรือไม่ และถ้ามีวัดอย่างไร
5. ระบุข้อบกพร่องของอุปกรณ์หรือระบบย่อยที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ (Potential Failure Mode) ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้
6. วิเคราะห์หาผลกระทบของข้อบกพร่องที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ (Potential Effects of Failure)
7. กำหนดเกณฑ์การให้คะแนนความรุนแรงของผลกระทบของข้อบกพร่อง (Severity) และทำการให้คะแนน และระบุ Class ซึ่งเป็นจุดสำคัญจุดอันตรายที่ถูกลูกค้าระบุใน Drawing ให้ดูแล/ควบคุม เป็นพิเศษ
8. ค้นหาสาเหตุของแต่ละข้อบกพร่อง (Potential Cause of Failure)
9. กำหนดโอกาสในการเกิด (Occurrence) ของแต่ละข้อบกพร่องและกำหนดเกณฑ์สำหรับให้คะแนนโอกาสในการเกิด
10. วิเคราะห์หาวิธีการในการตรวจสอบหาข้อบกพร่อง Detection Method และกำหนดเกณฑ์สำหรับให้คะแนนการตรวจพบข้อบกพร่อง
11. คำนวณค่า Risk Priority Number (RPN) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$RPN = S \times O \times D$$

12. เรียงลำดับผลกระทบตามคะแนน RPN จุดใดที่มีคะแนนสูงให้ทำการแก้ไขก่อน
13. ดำเนินการหาวิธีป้องกันเพื่อลดค่าความวิกฤติลง
14. ติดตามผลการปฏิบัติการและทบทวนการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ

ค่า PRN (Risk Priority Number) หรือดัชนีความเสี่ยง เป็นค่าที่ใช้กำหนดความสำคัญของ Failure Mode ที่เกิดจากผลคูณของตัวเลขสามค่า คือ

S = ค่าความร้ายแรงของข้อบกพร่อง (Severity)

O = ค่าความถี่ในการเกิดข้อบกพร่อง (Occurrence)

D=ค่าความสามารถในการตรวจพบข้อบกพร่องก่อนส่งถึงมือลูกค้า (Detection)

เกณฑ์การจัดลำดับค่า RPN จะขึ้นกับช่วงความเชื่อมั่นทางสถิติ ถ้าคะแนน RPN เท่ากันให้พิจารณาลำดับก่อนหลังจาก S ถ้าคะแนนSเท่ากันอีก ให้พิจารณาลำดับก่อนหลังจาก D การประเมินค่า RPN เริ่มต้นจากการประเมินความหมายของคำว่า "ความเสี่ยง (Risk)"

- ความเสี่ยงเล็กน้อย (Minor) ไม่ต้องมีการปฏิบัติแก้ไข
- ความเสี่ยงปานกลาง (Moderate) อาจจะมีการปฏิบัติการแก้ไขบ้าง
- ความเสี่ยงสูง (High) จะต้องมีการปฏิบัติการแก้ไขและป้องกัน และประเมินผลพร้อมตรวจสอบความถูกต้องด้วยวิธีการที่เหมาะสม
- ความเสี่ยงวิกฤติ (Critical) จะต้องมีการปฏิบัติการแก้ไขและป้องกัน พร้อมทั้งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างจริง

2.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านกระบวนการผลิต(Process Failure Mode and Effect Analysis: PFMEA)

การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านกระบวนการผลิต มีความแตกต่างจากการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านการออกแบบ กล่าวคือ จะทำการวิเคราะห์ผลกระทบของข้อบกพร่องอันเนื่องมาจากเครื่องมือ เครื่องจักร กระบวนการประกอบและขั้นตอนการผลิตของบริษัทในการผลิตสินค้า การวิเคราะห์จะกระทำภายใต้สมมติฐานที่ว่าชิ้นส่วนทุกชิ้นส่วนได้รับการออกแบบมาอย่างถูกต้อง ไม่มีปัญหาข้อบกพร่องอันเนื่องมาจากกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ ลักษณะการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านกระบวนการผลิตประกอบไปด้วยขั้นตอนดังนี้ คือ

1. มีการบ่งชี้ผลผลิตอันเป็นผลเกี่ยวเนื่องจากลักษณะข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต
2. ประเมินผลกระทบอันเกิดจากลักษณะข้อบกพร่อง
3. บ่งชี้สาเหตุที่เป็นไปได้ของกระบวนการผลิต หรือการประกอบ และบ่งชี้ตัวแปรของกระบวนการโดยให้ความสำคัญต่อการควบคุมเพื่อลดการเกิดขึ้นหรือการตรวจพบลักษณะข้อบกพร่อง

4. พัฒนาลำดับของข้อบกพร่องที่ได้จัดอันดับไว้ จากนั้นจัดตั้งระบบเบื้องต้นสำหรับการพิจารณาปฏิบัติการเชิงแก้ไข
5. จัดทำเอกสารแสดงผลกระบวนการผลิตและการประกอบ

2.1.5 ลักษณะของแบบฟอร์มที่ใช้ประกอบการทำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านกระบวนการผลิต

ภายหลังการออกแบบตารางในการเก็บข้อมูลสำหรับทำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ ซึ่งกระทำในขั้นตอนการเตรียมการสำหรับการทำ FMEA แล้วกระบวนการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและกระทบด้านกระบวกการผลิตจะเริ่มต้นด้วยการทำแผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต แผนภูมินี้ควรชี้บ่งลักษณะของผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการระหว่างผลิต ซึ่งแผนภูมิการไหลแสดงขั้นตอนการทำงานในกระบวนการผลิตทุกขั้นตอนดังกล่าวจะกล่าวจะเป็นรายการที่ต้องนำไปเติมในแถวแรกของตารางที่ออกแบบจากขั้นตอนการทำ PFMEA

จากการพิจารณากระบวนการผลิต จะพิจารณาตามลำดับขั้นตอนต่อไปนี้เพื่อทำการวิเคราะห์และเติมในตารางจากการทำ PFMEA ลักษณะแบบฟอร์มกระบวนการ FMEA ที่ได้พัฒนาขึ้นโดยมีรายละเอียดดังนี้

1. หมายเลข FMEA
   ระบุหมายเลขเอกสาร FMEA ซึ่งอาจนำไปใช้ในการติดตามต่อไปภายหลัง
2. วัสดุ
   กรอกชื่อและเลขหมายของระบบ ระบบย่อย หรือส่วนประกอบ ของกระบวนการผลิตที่ทำการวิเคราะห์
3. ความรับผิดชอบด้านกระบวนการ
   ใส่ชื่อของฝ่ายหรือกลุ่ม หรืออาจรวมถึงชื่อผู้ส่งมอบด้วย ด้านกระบวนการที่ทำการวิเคราะห์
4. จัดทำโดย
   กรอกชื่อหมายเลขโทรศัพท์และชื่อบริษัทของวิศวกรผู้รับผิดชอบในการจัดทำกระบวนการ FMEA
5. ปี/รุ่น

กรอกชื่อปี รุ่น รวมทั้งสายการผลิตยานยนต์ที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งจะเป็นประโยชน์หรือได้รับผลกระทบจากการออกแบบ

6. วันที่ป้อน
   ระบุวันที่เริ่มต้นทำการวิเคราะห์กระบวนการ FMEA ซึ่งไม่ควรช้ากว่าวันที่เริ่มต้นการผลิตตามกำหนดการ
7. วันที่ของ FMEA
   ระบุที่จัดทำต้นฉบับ FMEA รวมทั้งวันที่ที่ได้รับการทบทวนครั้งล่าสุด
8. คณะผู้ทำงานหลัก
   กรอกรายชื่อบุคคลและแผนกซึ่งเป็นผู้รับผิดชอบและผู้มีอำนาจหน้าที่ในการกำหนดหรือดำเนินการวิเคราะห์กระบวนการ (ขอเสนอแนะให้ระบุชื่อ แผนก หมายเลขโทรศัพท์ ที่อยู่ ฯลฯ ของสมาชิกในคณะทีมงานทั้งหมด)
9. หน้าที่ของกระบวนการและข้อกำหนด
   กรอกรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการหรือการปฏิบัติงานที่ทำการวิเคราะห์ เช่น การกลึงรูป การเจาะ การเคาะ การเชื่อม การประกอบ เป็นต้น เพื่อเป็นการกำหนดจุดประสงค์ ลักษณะข้อความที่ใช้นั้นควรที่จะกระทัดรัดและเข้าใจง่าย ในกรณีกระบวนการหรือการปฏิบัติงานที่การวิเคราะห์มีหลายขั้นตอนและมีข้อบกพร่องที่แตกต่างกันแต่ละกระบวนการ
10. ลักษณะข้อบกพร่องด้านศักยภาพ
    โดยคณะทีมงานจะต้องทำการวิเคราะห์ขั้นตอนการผลิตแต่ละขั้นตอนว่าจะเกิดความผิดพลาดไม่เป็นไปตามหน้าที่ที่กำหนดในการออกแบบไว้ได้อย่างไร อาจเป็นสาเหตุหนึ่งร่วมกับอีกสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องในการปฏิบัติงานอันดับก่อนหน้านี้หรือถัดไป ทั้งนี้โดยกำหนดสมมติฐานว่าข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ที่ได้กำหนดขึ้นอย่างถูกต้องเหมาะสมทั้งในขั้นตอนการออกแบบ การจัดซื้อวัสดุ และกระบวนการอื่นๆ ก่อนหน้านี้ได้จัดทำอย่างถูกต้องมาตั้งแต่เบื้องต้นแล้ว ลักษณะสาเหตุของข้อบกพร่องที่มักเกิดขึ้นได้อาจมีสาเหตุดังต่อไปนี้ การโค้งงอ การแตกร้าว การลงดิน การยึดติดกัน การเสียรูปทรง การเปิดวงจร การเลือนจาง ความสกปรก การลัดวงจร การใช้งานชำรุด กรปรับตั้งไม่ถูกต้อง การหมดสภาพของเครื่องมือ
11. ผลกระทบของข้อบกพร่องด้านศักยภาพ
    คณะทีมงานต้องทำการหาคำตอบว่าจะเกิดผลกระทบอย่างไร หากจุดบกพร่องที่ทีมงานได้ระบุไว้ในข้อ 10 ได้เกิดขึ้น โดยจุดบกพร่องหรือลักษณะอย่างหนึ่ง อาจ

เกิดผลกระทบได้หลายรูปแบบ สิ่งที่สำคัญคือ ทีมงานจะต้องพยายามใช้จินตนาการหรือความคิดในการค้นหารูปแบบของผลกระทบอันเกิดจากลักษณะข้อบกพร่องที่มีผลต่อคุณภาพให้ได้มากและครอบคลุมทั้งหมด

12. ภาวะความรุนแรง (S)

ภาวะความรุนแรงของผลกระทบ (Severity of Effect) คณะทีมงานจะต้องทำการวิเคราะห์และประเมินความรุนแรงของผลที่เกิดจากลักษณะข้อบกพร่อง ที่มีต่อลูกค้า ภาวะความรุนแรงที่กล่าวถึงนี้ควรได้รับการประเมินไว้เป็นสเกลตั้ง 1 ถึง 10 ดูตารางประกอบ

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรง (S) สำหรับ PFMEA

ผลกระทบ	**เกณฑ์: ความรุนแรงของผลกระทบ**การจัดระดับนี้จะใช้เมื่อแนวโน้มความล้มเหลวที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องต่อลูกค้าหรือในการผลิต/ประกอบของลูกค้า กรณีที่เกิดเหตุการณ์ได้ทั้ง 2 ลักษณะ ให้เลือกใช้ค่าความรุนแรงที่มากกว่า **(ผลกระทบต่อลูกค้า)**	**เกณฑ์: ความรุนแรงของผลกระทบ**การจัดระดับนี้จะใช้เมื่อแนวโน้มความล้มเหลวที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องต่อลูกค้าหรือในการผลิต/ประกอบของลูกค้า กรณีที่เกิดเหตุการณ์ได้ทั้ง 2 ลักษณะ ให้เลือกใช่ค่าความรุนแรงที่มากกว่า **(ผลกระทบต่อการผลิต/ประกอบ)**	ระดับคะแนน
อันตรายร้ายแรงโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า	อันดับความรุนแรงสูงมาก เมื่อแนวโน้มความล้มเหลว ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย การทำงานของยานยนต์และ/หรือไม่สดคล้องกับกฎระเบียบของรัฐโดยไม่มีการเตือน	หรืออาจส่งผลอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน (เครื่องจักร, การประกอบ) โดยไม่มีการเตือน	10
อันตรายร้ายแรงแต่มีการเตือนล่วงหน้า	อันดับความรุนแรงสูง เมื่อแนวโน้มความล้มเหลว ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการทำงานของยานยนต์ และ/หรือไม่สอดคล้องกับกฎระเบียบของรัฐโดยมีการเตือน	หรืออาจส่งผลอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน (เครื่องจักร, ประกอบ) โดยมีการเตือน	9
สูงมาก	ความบกพร่องซึ่งทำให้ยานยนต์/ส่วนประกอบไม่สามารถใช้งานได้ (สูญเสียความสามารถในการทำงานตามดจุดประสงค์พื้นฐาน)	หรือ ผลิตภัณฑ์ต้องถูกกำจัดทิ้ง (100%) หรือ ยานยนต์/ส่วนประกอบต้องถูกซ่อมในหน่วยงาน ซ่อมด้วยระยะเวลาเกิน 1 ชั่วโมง	8
สูง	ความบกพร่องซึ่งทำให้ยานยนต์/ส่วนประกอบสมรรถนะการทำงานที่ลดลง แต่ยังใช้งานได้ ทำให้ลูกค้าไม่พอใจอย่างมาก	หรือ อาจต้องมีการคัดแยกผลิตภัณฑ์ และบางส่วนต้องถูกกำจัดทิ้ง (น้อยกว่า 100%) หรือ ยานยนต์/ส่วนประกอบต้องถูกซ่อมในหน่วยงานซ่อม	7
ปานกลาง	ความบกพร่องซึ่งยานยนต์/ส่วนประกอบทำงานได้แต่ส่วนประกอบที่เกี่ยวกับความสะดวกสบายไม่สามารถใช้งานได้ ทำให้ลูกค้าไม่พอใจ	หรือ ส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ (น้อยกว่า 100%) อาจต้องถูกกำจัดทิ้ง โดยไม่ต้องคัดแยก หรือ ยานยนต์/ส่วนประกอบ ต้องถูกซ่อมในหน่วยงานซ่อมด้วยระยะเวลาไม่เกินครึ่งชั่วโมง	6

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรง (S) สำหรับ PFMEA (ต่อ)

ผลกระทบ	**เกณฑ์: ความรุนแรงของผลกระทบ**การจัดระดับนี้จะใช้เมื่อแนวโน้มความล้มเหลวที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องต่อลูกค้าหรือในการผลิต/ประกอบของลูกค้า กรณีที่เกิดเหตุการณ์ได้ทั้ง 2 ลักษณะ ให้เลือกใช้ค่าความรุนแรงที่มากกว่า **(ผลกระทบต่อลูกค้า)**	**เกณฑ์: ความรุนแรงของผลกระทบ**การจัดระดับนี้จะใช้เมื่อแนวโน้มความล้มเหลวที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องต่อลูกค้าหรือในการผลิต/ประกอบของลูกค้า กรณีที่เกิดเหตุการณ์ได้ทั้ง 2 ลักษณะ ให้เลือกใช่ค่าความรุนแรงที่มากกว่า **(ผลกระทบต่อการผลิต/ประกอบ)**	ระดับคะแนน
ต่ำ	ความบกพร่องซึ่งยานยนต์/ส่วนประกอบทำงานได้ แต่ส่วนประกอบที่เกี่ยวกับความสะดวกสบายมีสมรรถนะการทำงานที่ลดลง แต่ใช้งานได้	หรือ ผลิตภัณฑ์ (100%) อาจถูกแก้ไข, หรือยานยนต์/ส่วนประกอบถูกซ่อมนอกสายการผลิตโดยไม่ต้องส่งไปยังหน่วยงานซ่อม	5
ต่ำมาก	ส่วนประกอบมีความไม่สอดคล้องในด้านความพอดี, การตกแต่ง, เสียงสั่นดัง ลูกค้าส่วนใหญ่ (มากกว่า 75%) สังเกตได้	หรือ ผลิตภัณฑ์อาจถูกคัดแยก และบางส่วน (น้อยกว่า 100%) ถูกแก้ไขได้โดยไม่ต้องกำจัดทิ้ง	4
เล็กน้อย	ส่วนประกอบมีความไม่สอดคล้องในด้านความพอดี, การตกแต่ง, เสียงสั่นดัง ลูกค้าส่วนหนึ่ง (มากกว่า 50%) สังเกตได้	หรือ ผลิตภัณฑ์บางส่วน (น้อยกว่า 100%) ถูกแก้ไขโดยไม่มีการกำจักทิ้ง, โดยการแก้ไขกระทำในสายการผลิตแต่นอกหน่วยผลิต	3
เล็กน้อยมาก	ส่วนประกอบมีความไม่สอดคล้องในด้านความพอดี, การตกแต่ง, เสียงสั่นดี ลูกค้าส่วนน้อย (น้อยกว่า 25%) สังเกตได้	หรือ ผลิตภัณฑ์บางส่วน (น้อยกว่า 100%) ถูกแก้ไขโดยไม่มีการกำจัดทิ้ง, โดยการกระทำในสายการผลิตและหน่วยผลิต	2
ไม่มีเลย	ไม่มีผลใดๆ	หรือ เกิดความไม่สะดวกต่อกระบวนการ, ผู้ปฏิบัติงาน หรือไม่มีผลกระทบ	1

13. การจัดประเภท

คณะทีมงานอาจจะมีการจัดประเภทของระบบ ระบบย่อย หรือส่วนประกอบเพื่อการชี้บ่งว่าระบบดังกล่าวทำให้เกิดจุดวิกฤติหรือจุดสำคัญต่อระบบการทำงานเพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตเพิ่มเติม เมื่อมีการจัดประเภทในกระบวนการผลิตจะต้องแจ้งต่อผู้รับผิดชอบด้านการออกแบบ ทำการแก้ไขเอกสารที่เกี่ยวข้องเชิงวิศวกรรมต่างๆ เพื่อใช้เป็นจุดควบคุมต่อไป

14. สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องด้านศักยภาพและกลไก

การวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่อง ถือได้ว่าในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการจัดทำ FMEA เนื่องจากการหาสาเหตุได้อย่างถูกต้องจะสามารถนำไปสู่การแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขั้นตอนนี้จะต้องมีการระมัดระวังไม่ให้เกิดการ

สับสนระหว่างสาเหตุของลักษณะข้อบกพร่อง และผลกระทบของลักษณะข้อบกพร่อง โดยทีมงานจะต้องทำการเขียนสาเหตุทุกสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องอย่างละเอียดมาแต่ละข้อ ซึ่งสาเหตุจากคน เครื่องจักร วัตถุดิบ หรือ ขั้นตอนวิธีการทำงาน การวิเคราะห์การเกิดข้อบกพร่องถือว่าการผลิตชิ้นส่วนจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่ถูกระบุอยู่ในแบบของชิ้นส่วน สำหรับสาเหตุของข้อบกพร่องโดยทั่วไปอาจมีสาเหตุมาจากแรงบิดไม่ถูกต้องอาจจะสูงหรือต่ำเกินไป การเชื่อมไม่ถูกต้อง เช่น ค่ากระแส เวลา แรงดัน ความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดกรรมวิธีการให้ความร้อนไม่ถูกต้อง เช่น เวลา อุณหภูมิ การปิดกั้น การระบายที่ไม่เพียงพอ การหล่อลื่นไม่เพียงพอ ชิ้นส่วนประกอบไม่ครบหรือใส่ชิ้นส่วนผิดตำแหน่ง เป็นต้น

15. โอกาสที่ข้อบกพร่องเกิดขึ้น (O)

โอกาสที่ข้อบกพร่องเกิดขึ้น ได้แก่ แนวโน้มหรือโอกาสของสาเหตุที่อาจจะเกิดความเสียหายได้ในระหว่างกระบวนการผลิต หลังจากที่คณะทีมงานได้ทำการหาสาเหตุและผลกระทบอันเกิดจากลักษณะข้อบกพร่องแล้ว คณะทีมงานจะต้องทำการประเมินความเสี่ยงของลักษณะข้อบกพร่องในแต่ละข้อ ในขั้นตอนนี้คณะทีมงานจะต้องจัดทำสเกลขึ้นมาเพื่อจัดระดับความเสี่ยง โดยปกติแล้ว การกำหนดสเกลที่มีจำนวนระดับมากๆสมาชิกในทีมจะต้องใช้ในการแบ่งระดับให้กับลักษณะข้อบกพร่องแต่ละข้อ ทำให้กระบวนการวิเคราะห์มีประสิทธิภาพลดลง โดยส่วนใหญ่ในการใช้งานแบบสเกล 1 ถึง10 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.2

ตารางที่2.2 เกณฑ์การประเมินความถี่ในการเกิด (O) สำหรับ PFMEA

ความน่าจะเป็นของการเกิดความล้มเหลว	โอกาสการเกิด	ระดับ
สูงมาก: เกิดความล้มเหลวบ่อยมาก	> 700 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	10
	350 ครั้งต่อ 1,000 ชิ้น	9
สูง: เกิดความล้มเหลวถี่	160 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	8
	80 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	7
ปานกลาง: เกิดความล้มเหลวเป็นครั้งคราว	40 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	6
	20 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	5
	10 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	4
ต่ำ: เกิดความล้มเหลวน้อยครั้ง	5 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	3
	2 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	2
แทบไม่เกิด: ความล้มเหลวไม่น่าจะเกิดขึ้นเลย	< 1 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	1

16. การควบคุมกระบวนการปัจจุบัน

การควบคุมกระบวนการปัจจุบันเป็นการระบุรายละเอียดที่ต้องการควบคุม เพื่อป้องกันมิให้เกิดข้อบกพร่องหรือการตรวจสอบว่ามีข้อบกพร่องเกิดขึ้นหรือไม่

17. โอกาสการตรวจพบลักษณะข้อบกพร่อง (D)

โอกาสการตรวจพบลักษณะข้อบกพร่อง (Detection) ได้แก่ การประเมินความสามารถของการควบคุมกระบวนการผลิตในปัจจุบันว่ามีประสิทธิภาพเพียงใด ซึ่งทีมงานจะต้องทำการประเมินว่าถ้ามีลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต กระบวนการควบคุมปัจจุบันจะสามารถตรวจพบลักษณะบกพร่องได้มากน้อยเพียงใด โดยการจัดลำดับของโอกาสในการตรวจพบจะอยู่ในลักษณะตรงข้ามกับการจัดลำดับโอกาการเกิดลักษณะข้อบกพร่อง และความรุนแรงของผลกระทบจากลักษณะข้อบกพร่อง กล่าวคือ ถ้าโอกาสในการตรวจพบมีน้อย ค่าคะแนนหรือรับจะมีค่ามาก ดูรายละเอียดจากตารางที่ 2.3

ตารางที่2.3 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) สำหรับ PFMEA

การตรวจพบ	เกณฑ์	ประเภทของการตรวจสอบ			การควบคุมที่ใช้เพื่อให้ตรวจพบ	ระดับ
		A	B	C		
แทบเป็นไปไม่ได้	ไม่สามารถตรวจพบได้			X	ไม่สามารถตรวจพบหรือไม่มีการตรวจพบ	10
เป็นไปได้ยากมาก	เป็นไปได้ยากมากที่การควบคุมจะตรวจพบ			X	การควบคุมมีเพียงการตรวจสอบ ทางอ้อม หรือการสุ่มตรวจสอบเท่านั้น	9
เป็นไปได้ยาก	เป็นไปได้ยากที่การควบคุมจะตรวจพบ			X	การควบคุมมีเพียงการตรวจสอบด้วยสายตาเท่านั้น	8
ต่ำมาก	เป็นไปได้ยากที่การควบคุมจะตรวจพบ			X	การควบคุมมีเพียงการตรวจสอบด้วยสายตา 2 ครั้งเท่านั้น	7
ต่ำ	การควบคุมอาจตรวจพบได้		X	X	การควบคุมมีการใช้ผังควบคุม เช่น SPC (การควบคุมกระบวนการด้วยกลวิธีทางสถิติ)	6
ปานกลาง	การตรวจพบอาจตรวจพบได้		X		มีการใช้เกณฑ์ต่างๆ ตรวจสอบหลังจากชิ้นงานออกจากหน่วยผลิต หรือมีการใช้ Go/On Go เกณฑ์ตรวจสอบ 100% สำหรับชิ้นงานที่ออกจากหน่วยผลิต	5
ปานกลางถึงค่อนข้างสูง	การควบคุมมีโอกาสสูงที่ตรวจพบ	X	X		ตรวจสอบข้อบกพร่องในกระบวนการย่อยต่างๆได้ หรือใช้เกณฑ์การตรวจสอบการตั้งเครื่องและชิ้นงานแรก (สำหรับการตั้งเครื่องเท่านั้น)	4

ตารางที่2.3 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) สำหรับ PFMEA (ต่อ)

การตรวจพบ	เกณฑ์	ประเภทของการตรวจสอบ			การควบคุมที่ใช้เพื่อให้ตรวจพบ	ระดับ
		A	B	C		
สูง	การควบคุมมีโอกาสสูงที่จะตรวจพบ	X	X		ตรวจสอบข้อข้อบกพร่องในจุดปฏิบัติงาน หรือตรวจพบในกระบวนการย่อยต่างๆได้ โดยมีการกรองเพื่อยอมรับในหลายระดับ: การจัดหา, คัดเลือก, ติดตั้ง, ทวนสอบ โดยไม่มีการยอมรับชิ้นงานบกพร่อง	3
สูงมาก	การควบคุมมีโอกาสค่อนข้างแน่นอนที่จะตรวจพบ	X	X		ตรวจพบข้อบกพร่องในจุดปฏิบัติงาน (มีการใช้เกณฑ์อัตโนมัติร่วมกับการหยุดอัตโนมัติ) ไม่สามารถที่จะส่งชิ้นงานเสียได้	2
สูงมาก	การควบคุมแน่นอนที่ตรวจพบ	X			ไม่สามารถเกิดชิ้นงานที่บกพร่องได้ เนื่องจากมีการป้องกันความผิดพลาดโดยกระบวนและการออกแบบผลิตภัณฑ์	1

ชนิดของการตรวจสอบ

A = ตัวป้องกันความผิดพลาด

B = ใช้เครื่องมือตรวจสอบ

C = การตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน

18. ค่าตัวเลขระดับความเสี่ยงชี้นำ (RPN)

ค่าตัวเลขระดับความความเสี่ยงชี้นำ หรือบางครั้งเรียกว่า Criticality Index นี้ ช่วยให้ทีมงานทราบว่าลักษณะข้อบกพร่องใดที่จะทำให้กระบวนการผลิตประสบความผิดพลาดหรือล้มเหลวได้ การเปรียบเทียบค่า RPN ของลักษณะข้อบกพร่องในแต่ละข้อสามารถให้ทีมงานจัดลำดับลักษณะข้อบกพร่องที่มีความสำคัญจากมากไปน้อยในการพิจารณาดำเนินการเลือกลำดับก่อนหลังในการปฏิบัติการแก้ไขได้อย่างไรก็ตาม เมื่อภาวะรุนแรงสูงในกระบวนการผลิตทีมงานจะต้องทำการแก้ไขข้อบกพร่องอย่างเร่งด่วน โดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงผลลัพธ์ของค่า RPN โดย RPN = S x O x D วิธีการกำหนดค่าความรุนแรงของผลกระทบ โอกาสเกิด และความสามารถในการตรวจจับ

ข้อบกพร่อง การให้คะแนนหรือกำหนดค่าความรุนแรงของผลกระทบ โอกาสเกิด และความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่องในกระบวนการที่นิยมใช้กันมี 2 เกณฑ์ คือ ระดับคะแนน 1-5 คะแนน และระดับคะแนน 1-10 คะแนน (ใช้มากในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์) โดยถ้าชิ้นส่วนใด กระบวนการใด ขั้นตอนใด ระบบใด มีความรุนแรงของผลกระทบน้อย โอกาสเกิดข้อบกพร่องต่ำ และมีความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่องได้สูง คะแนนก็จะอยู่ในระดับต่ำ 1-2 แต่ในทางกลับกัน ความรุนแรงของผลกระทบมีมาก โอกาสเกิดข้อบกพร่องสูง และมีความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่องได้น้อย คะแนนก็จะอยู่ในระดับ 4-5 (สำหรับเกณฑ์ 1-5 คะแนน) และ 8-10 (สำหรับเกณฑ์ 1-10 คะแนน)

19. ปฏิบัติการเสนอแนะ

ทำการปฏิบัติการแก้ไขและป้องกันหลังจากที่ได้ทำพิจารณาค่า RPN ซึ่งการดำเนินการนี้จะสามารถช่วยในการกำจัดลักษณะข้อบกพร่องหรือสามารถลดคะแนนตัวเลข RPN ลงได้ การแก้ไขควรพิจารณาจากสาเหตุข้อบกพร่องที่มีค่าRPN อันดับสูงสุดก่อน โดยมุ่งหมายที่จะลดภาวะความรุนแรงที่เกิดขึ้น และโอกาสการตรวจพบของข้อบกพร่อง โดยทีมงานจะต้องทำการพัฒนาทางเลือกในการแก้ปัญหาได้มากกว่า 1 ทางเลือกสำหรับแต่ละสาเหตุของลักษณะข้อบกพร่อง โดยปฏิบัติการแก้ไขป้องกันที่จัดทำขึ้นเพื่อกำจัดสาเหตุของการเกิดลักษณะข้อบกพร่องที่จะทำลักษณะข้อบกพร่องถูกกำจัดไปด้วยทันทีเช่นกัน หากไม่สามารถคิดปฏิบัติการป้องกันได้ พิจารณาหาวิธีในการลดค่า RPN ด้วย การอาจจะลดโอกาสที่ลักษณะข้อบกพร่องจะเกิดขึ้น ลดความรุนแรงของผลกระทบจากลักษณะข้องบกพร่อง และ เพิ่มโอกาสในการตรวจพบลักษณะข้อบกพร่อง ในกรณีที่ไม่มีปฏิบัติการเสนอแนะให้ระบุว่า "ไม่มี"

20. ความรับผิดชอบ (สำหรับปฏิบัติการที่เสนอแนะ)

ระบุชื่อบุคคลหรือหน่วยงานซึ่งเป็นผู้รับผิดชอบสำหรับปฏิบัติการที่เสนอแนะรวมทั้งวันที่ ที่กำหนดให้ดำเนินการแก้ไขเสร็จสิ้นตามเป้าหมาย

21. ปฏิบัติการที่ดำเนินการ

หลังจากปฏิบัติการได้รับการนำไปปฏิบัติตามแล้วให้ระบุรายละเอียดโดยย่อของปฏิบัติการที่ดำเนินการจริงพร้อมทั้งระบุวันที่ที่ได้ดำเนินการ

22. ผลการปฏิบัติการด้านค่า RPN

ในกระบวนการผลิต FMEA บางครั้งรวมเอาการทวนการคำนวณค่า RPN เข้าไปด้วยเพื่อวัดผลการปฏิบัติการแก้ไขต่อกระบวนการผลิตด้วยเมื่อปฏิบัติการแก้ไขเสร็จสิ้นลง

จะต้องมีการบันทึกค่า RPN ก่อนและหลังการดำเนินการปฏิบัติการแก้ไข โดยค่า RPN ที่ลดลงเป็นหลักฐานยืนยันถึงประโยชน์จากการดำเนินการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบต่อคุณภาพ

การติดตามผลงานผู้รับผิดชอบกระบวนการผลิตจะต้องสามารถประกันได้ว่าการปฏิบัติการเสนอแนะทั้งหมดจะต้องได้รับการนำไปปฏิบัติตาม หรือได้รับการระบุรายละเอียดไว้อย่างเพียงพอแล้วเอกสาร FMEA เป็นเอกสารใช้งานซึ่งควรแสดงให้เห็นถึงระดับการเปลี่ยนแปลงการออกแบบครั้งล่าสุดเสมอ รวมทั้งระดับปฏิบัติการครั้งล่าสุดที่เกี่ยงข้อง ทีมงานผู้รับผิดชอบในกระบวนการผลิตจะต้องสามารถหาวิธีการหลายๆวิธี เพื่อแสดงให้เห็นว่าข้อกำหนดในกระบวนการผลิตและปฏิบัติการเสนอแนะต่างๆได้รับการนำไปแก้ไขและปฏิบัติตามเป้าหมายพื้นฐานของการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านกระบวนการหรือการทำProcess FMEA คือ เพื่อการกระตุ้นให้เกิดปฏิบัติการแก้ไขป้องกันซึ่งช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิตในครั้งต่อไป ดังนั้นกิจกรรมนี้จะประสบความสำเร็จลุล่วงตามขั้นตอนได้ก็ต่อเมื่อบริษัทได้มีการดำเนินการปฏิบัติตามปฏิบัติการแก้ไขและป้องกันซึ่งทางทีมงาน FMEA ได้เสนอไว้

2.1.6 ขั้นตอนการทำ FMEA

1. จัดตั้งทีมงาน FMEA
2. วิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ
3. ระดมสมองหาลักษณะข้อบกพร่องที่มีโอกาสเกิดขึ้น
4. ประเมินผลกระทบต่อระบบและหาสาเหตุของข้อบกพร่องแต่ละรายการพร้อมวิธีการตรวจจับหาข้อบกพร่อง
5. ประเมินตัวเลขความเสี่ยงชี้นำ (Risk Priority Number) โดย RPN = ผลคูณของระดับความรุนแรงของผลกระทบ และ โอกาสหรือความถี่ของสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง และระดับความสามารถในการตรวจจับ
6. วางมาตรการปรับปรุงโดยจัดลำดับความสำคัญตามค่า RPN จากค่ามากไปค่าน้อย (ตัวเลขยิ่งน้อยยิ่งดี ถ้ายิ่งมากยิ่งต้องรีบหามาตรการดำเนินการแก้ไข/ป้องกัน)
7. ทำการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง โดยมีการติดตามผลและทบทวนค่า RPN ใหม่

2.1.7 ประโยชน์ของการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ

ช่วยในการตัดสินใจหาทางเลือกที่เป็นไปได้ของการออกแบบและกระบวนการในการผลิตผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาเลือกค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้

1. ใช้ในการวางแผนปฏิบัติการคุณภาพเพื่อระบุความเสี่ยงในแต่ละแผนและช่วยในการเตรียมการค้นหาวิธีในการหลีกเลี่ยงปัญหาต่างๆ
2. มีประโยชน์สำหรับกรณีที่มีการออกแบบสินค้า หรือกระบวนการผลิตใหม่ๆ โดยช่วยชี้บ่งและระบุข้อหลีกเลี่ยงข้อบกพร่องอันมีโอกาสเกิดขึ้นได้จากการออกแบบและกระบวนการผลิต
3. ช่วยลดจุดอันตรายและช่วยในการวางแผน ค้นหาวิธีการในการตรวจสอบคุณภาพ เพื่อยืนยันว่ากระบวนการผลิตมีความน่าเชื่อถือและสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้คุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด
4. ช่วยในการกำหนดข้อจำกัดในการปฏิบัติงาน และการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเครื่องมือและเครื่องจักรต่างๆที่ใช้ในกระบวนการผลิต
5. ช่วยในการชี้จุดหรือบริเวณที่มีปัญหาในกระบวนการผลิตซึ่งในการปฏิบัติงานจะต้องใช้ความระมัดระวังและให้ความสนใจเป็นพิเศษ
6. นำเสนอการจัดลำดับความสำคัญก่อนกลังสำหรับปฏิบัติการแก้ไขและปรับปรุงกระบวนการผลิต
7. เป็นเครื่องมือที่ช่วยส่งเสริมการทำงานเป็นทีมช่วยในการรวบรวมข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการวางแผน

2.2 ทฤษฎีการปรับปรุงคุณภาพ

ปัญหามากมายมักเกิดขึ้นเพราะความไม่รู้มาตรฐานและแม้จะรู้จักมาตรฐาน แต่อาจล้มเหลวในการปฏิบัติตามมาตรฐาน หรือปฏิบัติตามมาตรฐานที่ไม่เหมาะสม ผลิตภัณฑ์จะพัฒนาขึ้นเมื่อมีการสร้างมาตรฐานใหม่ให้น่าเชื่อถือ สอนให้คนปฏิบัติตามมาตรฐานและทำการแก้ไขมาตรฐานที่ไม่เหมาะสมนั้น การบริหารโดยใช้มาตรฐานที่เป็นรากฐานสำหรับการพัฒนากิจกรรมในองค์กรเพื่อปรับปรุงงานให้มีประสิทธิภาพ ต้องมีการทำงานที่น่าเชื่อถือและกิจกรรมทั้งหลายต้องมีความสอดคล้องกับมาตรฐาน ในองค์กรที่ขาดมาตรฐานนั้นจะล้มเหลวในการปรับปรุงคุณภาพทั้งระบบ ระบบที่ขาดมาตรฐานจะอยู่ได้ไม่นานเพราะวิธีการที่ใช้ถูกลืมไปเมื่อมีการเปลี่ยนคนใหม่ แม้แต่ความชำนาญชั้นยอดที่ได้ทำการพัฒนากันมาก็ยังสูญหายได้หากไม่ได้ถูกเก็บไว้เป็นเอกสาร เมื่อผู้รับผิดชอบได้ย้ายออกไปแล้ว ความก้าวหน้าทางเทคนิคก็จะไม่สามารถพัฒนาได้แต่ในทางตรงกันข้ามการพัฒนาจะเกิดขึ้นรวมทั้งระดับความสามารถทางเทคนิคจะเพิ่มขึ้นเมื่อมาตรฐานได้รับการแก้ไขปรับปรุงโดยใช้บทเรียนจากข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นมาก่อนหน้านี้มาเป็นแนวทาง

อย่างไรก็ตามการมีมาตรฐานโดยตัวของมันเองจะไม่ส่งผลต่อการปรับปรุงองค์กรเลย โดยจะไม่พบแรงจูงใจในการปรับปรุงในกิจกรรมที่ใช้มาตรฐานควบคุมแต่การปรับปรุงจะเกิดขึ้น เมื่อคนมองปัญหาโดยไม่รู้จักหยุดและไม่พอใจในสถานการณ์ที่เป็นอยู่ รวมทั้งมีพลังและมีชีวิตชีวาที่จะปรับปรุงสิ่งนี้ขึ้นอยู่กับทัศนคติของแต่ละบุคคลเป็นอย่างมาก

Juran J.M. (1993) ได้ให้ความหมายของการบริหารคุณภาพ ไว้ดังนี้ว่า หมายถึงกระบวนการของการบ่งชี้และการบริหารกิจกรรมต่างๆ ที่ซึ่งมีความจำเป็นต่อการดำเนินการให้บรรลุจุดประสงค์ด้านคุณภาพขององค์กร (Quality management is the process of identifying and administering the activities needed to achieve the quality objectives of an organization.) โดยกระบวนการในการบ่งชี้และการบริหารกิจกรรมประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลัก คือ การวางแผนคุณภาพ (Quality Planning) การควบคุมคุณภาพ (Quality Control) และการปรับปรุงคุณภาพ (Quality Improvement)

2.2.1 การวางแผนคุณภาพ (Quality Planning) หมายถึงการกำหนดไว้ซึ่งเป้าหมายที่จะบรรลุสู่ความคาดหมายของลูกค้าที่กำหนด แล้วทำการจัดสรรทรัพยากรที่มีอย่างจำกัดต่อวิธีการที่จะทำให้เกิดความมั่นใจว่าผลจากวิธีการดังกล่าวทำให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจ โดยมีขั้นตอนทั่วไปของการวางแผนคุณภาพ ประกอบด้วย

1. การบ่งชี้ลูกค้าซึ่งโดยปกติแล้วหมายถึงลูกค้าภายนอก

2. พิจารณาถึงความต้องการของลูกค้าโดยประเมินจากผลิตภัณฑ์ใหม่ที่จะทำการตอบสนองความจำเป็น (Need) ของลูกค้า และความคาดหมาย (ที่ครอบคลุม Quality, Cost และ Service) ของลูกค้าดังกล่าว

3. กำหนดคุณภาพในการออกแบบหรือลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยผ่านแปรความต้องการของลูกค้า (อาจเรียกกระบวนการนี้ว่าการแปรหน้าที่คุณภาพ : Quality Function Deployment – QFD)

4. การกำหนดเป้าหมายของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะได้รับ นโยบายของผู้บริหารและเป้าหมายคุณภาพ (Quality Target) ประกอบกับคุณภาพในการออกแบบตามขั้นตอนที่ 3

5. ทำการออกแบบและพัฒนากระบวนการ (กำหนดวิธีการภายใต้ทรัพยากรที่จำกัด) ที่จะทำให้คุณลักษณะที่เกิดขึ้นจริงของผลิตภัณฑ์ บรรลุตามเป้าหมายของผลิตภัณฑ์

การวางแผนคุณภาพนี้ถือว่าเป็นกระบวนการต้นน้ำ (Upstream Process) ของกระบวนการบริหารคุณภาพ ดังนั้นถ้าการวางแผนคุณภาพได้รับการดำเนินการอย่างไม่สมบูรณ์จะทำให้เป็นสาเหตุสำคัญของความไม่มีคุณภาพด้านความถูกต้องในการผลิต หรือความไร้ประสิทธิภาพในด้านคุณภาพ (Quality Deficiencies) นอกจากนี้จะพบว่ามาตรการต่างๆในการ

ปรับปรุงคุณภาพ (Quality Improvement) มักจะเป็นการวางแผนใหม่ (Replanning) เกี่ยวกับคุณภาพเสมอ

2.2.2 การควบคุมคุณภาพ (Quality Control) หมายถึงการเฝ้าพินิจผลจากกระบวนการเพื่อเปรียบเทียบกับความคาดหมายของลูกค้า ถ้าหากพบว่าผลการดำเนินการตามกระบวนการมิได้เป็นไปตามความคาดหมายที่ส่งผลให้ลูกค้าเกิดความไม่พอใจ แล้วจะต้องค้นหาสาเหตุของความไม่พอใจดังกล่าวเพื่อจะแก้ไขให้ถูกต้อง โดยมีขั้นตอนทั่วไปของการควบคุมคุณภาพประกอบไปด้วย

(1) การเลือก หัวข้อควบคุม เพื่อจะได้ทราบถึงประเด็นที่จะควบคุม ซึ่งหมายถึงความคาดหมายของลูกค้า

(2) การเลือกหน่วยที่ใช้วัดหรือประเมินหัวข้อควบคุมดังกล่าว

(3) จัดระบบการวัดหรือประเมินผล

(4)จัดทำมาตรฐานของตัววัดผลงานหรือมาตรฐานของสมรรถนะ (Standards of Performance)

(5) ทำการวัดหรือประเมินผลงาน หรือ สมรรถนะที่เกิดขึ้นจริง (Actual Performance) แล้วเปรียบเทียบกับมาตรฐานของสมรรถนะ

(6)ในกรณีที่มีความแตกต่างระหว่างสมรรถนะที่เกิดขึ้นจริงกับมาตรฐานของสมรรถนะจะถือว่าเป็น "ปัญหาด้านคุณภาพ"

(7) ให้วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้านคุณภาพเพื่อกำจัดทิ้งไป

2.2.3 การปรับปรุงคุณภาพ (Quality Improvement) มีความหมายเท่ากับการคาดการณ์ "ใหม่" ของลูกค้าสำหรับผลิตภัณฑ์เดิมหรือการค้นหา "ความจำเป็น" ของลูกค้าสำหรับการพิจารณาผลิตภัณฑ์ใหม่ แล้วทำการวางแผนใหม่ ตลอดจนควบคุมใหม่เพื่อให้บรรลุเป้าหมายใหม่ หรืออาจกล่าวได้ว่า ในขณะที่ "การควบคุมคุณภาพ" เป็นการ "รักษา" สภาพเดิมให้เป็นไปตามที่กำหนด แต่ "การปรับปรุงคุณภาพ" เป็นการ "ทำลาย" สภาพเดิมและสร้างระบบใหม่ขึ้นมาเพื่อให้บรรลุตามเป้าหมายใหม่ของคุณภาพ โดยมีขั้นตอนทั่วไปของการปรับปรุงคุณภาพประกอบด้วย

(1) การชี้บ่งโครงการเพื่อการปรับปรุงคุณภาพ โดยทั่วไปแล้วจะได้มาจากการสำรวจความจำเป็นของลูกค้าภายนอก

(2) การจัดคณะทำงานเพื่อการปรับปรุงคุณภาพ (Quality Improvement Team) โดยทั่วไปจะกำหนดให้คณะทำงานประกอบด้วยพนักงานระดับจัดการขององค์กรและมักเป็นการบริหารแบบข้ามสายงาน (Cross Function Team)

(3) การวินิจฉัยสาเหตุจากระบบ

(4) พัฒนาการแก้ไขสาเหตุจากระบบ

(5) ทวนสอบถึงความมีประสิทธิภาพของวิธีการแก้ไขสาเหตุจากระบบ

(6) ทำการประเมินถึงแรงต่อต้านการเปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปประกอบด้วยแรงต่อต้าน 2 ประการ คือ แรงต่อต้านทางสังคม (Social Resistance) และ แรงต่อต้านทางเทคโนโลยี (Technological Resistance) แล้วหาทางแก้ไขเพื่อเอาชนะแรงต่อต้านดังกล่าว

(7) จัดทำระบบควบคุมขึ้นใหม่ และพิจารณาถึงประโยชน์ที่พึงได้รับ

2.2.4ข้อแตกต่างระหว่างการวางแผนคุณภาพการควบคุมคุณภาพและการปรับปรุงคุณภาพ

การวางแผนคุณภาพ เป็นการวางเป้าหมายที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตและพยายามค้นหาแนวทางหรือวิธีการในการดำเนินการให้บรรลุเป้าหมายนั้นๆ ซึ่งผลจากการวางแผนมี 2 ทาง คือ

(1)แผนนั้นสามารถใช้ได้ดีในทางปฏิบัติ

(2)จากแผนที่ได้วางไว้เมื่อนำไปใช้งานอาจทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในกระบวนการผลิตได้เช่นกัน ดังนั้น จึงต้องดำเนินการหาวิธีการแก้ไขโดยการทบทวน และทำการวางแผนใหม่

การควบคุมคุณภาพ เป็นการดำเนินการผลิตให้ตรงกับเป้าหมายที่ได้ตั้งปรากฏไว้อยู่แล้วรวมไปถึงการตรวจติดตามกระบวนการผลิต เพื่อตรวจจับความแตกต่างระหว่างกระบวนการจริงกับเป้าหมายที่ตั้งไว้ รวมถึงการแก้ไขเพื่อรักษาสถานะของระบบไว้ไม่ให้เกิดความเปลี่ยนแปลงไปจากเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้

การปรับปรุงคุณภาพ เป็นการพิจารณาปรับปรุงกระบวนการผลิตที่มีอยู่เดิมโดยมุ่งความสนใจไปยังปัญหาของความบกพร่อง ขณะที่การวางแผนคุณภาพมุ่งเป้าหมายความสนใจไปยังการค้นหาความต้องการของลูกค้าและการดำเนินการ โดยมุ่งตอบสนองความต้องการนั้นๆ การปรับปรุงคุณภาพ มีการวิเคราะห์ค้นหาสาเหตุ และแนวทางในการกำจัดสาเหตุของปัญหาที่ปรากฏมีอยู่ในกระบวนการผลิตเดิม ในบางครั้งการปรับปรุงคุณภาพอาจต้องมีการดำเนินการวางแผนคุณภาพใหม่ด้วย

ความหมายของการปรับปรุงคุณภาพ

การปรับปรุง (Improvement) หมายถึง การยกระดับเป้าหมายให้สูงขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปจะได้มาจากการทบทวนผลการปฏิบัติงานเดิมแล้วดำเนินการวางแผนใหม่ (Re-planning) และการควบคุมใหม่ (Re-control) เพื่อให้ผลงานเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนด

การปรับปรุงคุณภาพ (Quality Improvement) คือ กิจกรรมที่เป็นวิธีการ เป็นระบบและกระทำอย่างต่อเนื่องในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับความบกพร่องทางคุณภาพ มีการตั้งเป้าหมายและมีการชี้แจงอย่างชัดเจนถึงเป้าหมายนั้น มีการวางแผนงานเพื่อให้ไปถึงเป้าหมายที่วางไว้ มีการนำแผนงานมาปฏิบัติ มีการตรวจสอบผลลัพธ์ และมีการปฏิบัติการแก้ไขเมื่อจำเป็น

กิจกรรมการปรับปรุงที่เป็นระบบซึ่งเป็นไปตามวงจร PDCA จะประกอบด้วย การวางแผน การนำไปปฏิบัติ การตรวจสอบ และการปฏิบัติการแก้ไข ซึ่งจะเริ่มจากการทำการวางแผน การนำแผนที่วางไว้มาปฏิบัติ ตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ และถ้าผลลัพธ์ไม่ได้ตามที่คาดหมายไว้จะมีการทบทวนแผนการเริ่มต้นใหม่อีกครั้งหนึ่ง ดังนั้น การปรับปรุงสามารถอธิบายได้อีกแบบหนึ่ง คือ การทำการวางแผน การกระทำการตรวจสอบ และการแก้ไขซ้ำอีก การทำตามวงจร PDCA อย่างตั่งใจและถูกต้องจะช่วยให้เกิดความเชื่อมั่นในการทำงาน เมื่อหมุนวงจร PDCA ซ้ำๆ จะทำให้เกิดการปรับปรุงและทำให้ระดับของผลลัพธ์สูงขึ้นเรื่อยๆ การกระทำตามวงจร PDCA นี้จะสร้างคุณภาพที่น่าเชื่อถือให้เกิดขึ้น

วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงคุณภาพ

1. เพื่อทำการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองต่อความพอใจและความต้องการของลูกค้า
2. ขยายส่วนแบ่งทางการตลาดในตลาดเดิมและสร้างตลาดใหม่
3. แก้ไข ปรับปรุง และป้องกันข้อผิดพลาดในระยะสั้นโดยมุ่งความสนใจในการหาทางลดอัตราข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต
4. ภายหลังจากการดำเนินการในระยะสั้นแล้ว ทำการพิจารณาปรับปรุงในระยะยาว โดยมุ่งความสนใจไปยังการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตรงกับความต้องการของลูกค้าโดยไม่ให้มีข้อบกพร่อง (Zero defect)
5. การลดต้นทุน

2.3 แผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart)

2.3.1 ความหมายของแผนภูมิพาเรโต

แผนภูมิพาเรโตเป็นเครื่องมือสำหรับที่จะตรวจสอบปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในสถานประกอบการ เช่น จำนวนสินค้าคุณภาพไม่ดี ข้อบกพร่อง คำร้องเรียนจากลูกค้า อุบัติเหตุ เป็นต้น โดยการนำปรากฏการณ์หรือสาเหตุเหล่านั้นมาแบ่งแยกประเภท แล้วเรียงลำดับความสำคัญของข้อมูลจากมากไปหาน้อย โดยแสดงขนาดความมากน้อยด้วยกราฟแท่ง และแสดงค่าสะสมด้วยกราฟเส้น

2.3.2 ขั้นตอนการจัดทำแผนภูมิพาเรโต

1. กำหนดหัวข้อที่จะทำการสำรวจ แล้วรวบรวมข้อมูลเหล่านั้น

- กำหนดช่วงระยะเวลาและวิธีการในการเก็บรวบรวมข้อมูล ช่วงระยะเวลานั้นอาจจะกำหนดเป็นสัปดาห์ หรือเดือนเป็นต้น ให้ตัดตอนเป็นช่วงโดยให้ระยะความสั้นยาวขึ้นกับสภาพปัญหา

- นำใบตรวจสอบ (Check Sheet) มาใช้เพื่อสำรวจปัญหา ไม่เพียงแต่จำนวนของปัญหาแต่ยังสามารถสำรวจสาระและสาเหตุของปัญหาได้ด้วย

2. จำแนกและรวบรวมข้อมูลตามสาเหตุหรือปรากฏการณ์ โดยพยายามจำแนกตามต่อไปนี้

- จำแนกและรวบรวมข้อมูลตามสาเหตุ : วัตถุดิบ เครื่องจักร ผู้ปฏิบัติงาน วิธีการทำงานเป็นต้น

- จำแนกตามปรากฏการณ์ : หัวข้อของเสีย สถานที่ กระบวนการผลิต เวลา เป็นต้น

- จัดแจงข้อมูลให้เหมาะสมแล้วคำนวณปริมาณสะสม

- ให้เรียงหัวข้อตามลำดับจำนวนข้อมูลที่มีปริมาณมากไปสู่น้อย แล้วเติมจำนวนข้อมูลของแต่ละหัวข้อลงไป ต่อจากนั้นให้เขียน อื่นๆ ลงเป็นหัวข้อสุดท้าย

- ทำการคำนวณปริมาณสะสม โดยเริ่มจากหัวข้อที่มีข้อมูลมากแล้วคำนวณไปเรื่อยๆ

- ที่แกนนอนให้เขียนเติมชื่อหัวข้อเรื่องโดยเรียงลำดับจากหัวข้อที่มีจำนวนข้อมูลมากไปสู่น้อย โดยเรียงจากซ้ายไปขวา

- ที่แกนตั้งให้เขียนลักษณะสมบัติที่เรากำลังสำรวจโดยจัดทำสเกลให้สามารถครอบคลุมจำนวนของข้อมูลทั้งหมดได้ ควรกำหนดสเกลและระยะช่องไฟเพื่อให้ขนาดความยาวของแกนตั้งกับแกนนอนนั้นเป็น 1:1 –2:2 (โดยให้แผนภูมิพาเรโตที่ได้มีขนาดเกือบเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัส)

- เขียนจำนวนข้อมูลออกเป็นกราฟแท่งเรียงตามลำดับจากซ้ายไปขวาโดยให้มีความกว้างของกราฟแต่ละแท่งแยกออกจากกันควรจัดช่องไฟแต่ละแท่งให้เท่ากันด้วย

- เติมเส้นกราฟค่าสะสมลงทางด้านขวามือของกราฟแท่งแล้วโยงจุดเหล่านั้นโดยเรียกกราฟนี้ว่ากราฟสะสม

2.3.3 ประโยชน์ของแผนภูมิพาเรโต

1. สามารถบ่งชี้ให้เห็นได้ว่าหัวข้อใดมีปัญหามากที่สุด
2. สามารถเข้าใจลำดับความสำคัญมากน้อยของปัญหาได้ทันที
3. สามารถเข้าใจว่าแต่ละหัวข้อมีอัตราส่วนเพียงใดในส่วนทั้งหมด
4. เนื่องจากใช้กราฟแท่งบ่งชี้ขนาดของปัญหาทำให้สามารถโน้มน้าวจิตใจได้ดี
5. ไม่ต้องใช้การคำนวณที่ยุ่งยากก็สามารถจัดทำได้

2.4 แผนภาพเหตุและผล (Cause & Effect Diagram)

2.4.1 ความหมายของแผนภาพสาเหตุและผล

แผนภาพสาเหตุและผล คือ แผนภาพที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่ง(ผล)กับองค์ประกอบหรือสาเหตุต่างๆ(เหตุ) ที่มีผลทำให้เกิดคุณลักษณะนั้นๆไว้อย่างเป็นระบบ โดยรวบรวมในแผนภาพที่มีลักษณะคล้ายก้างปลาจึงเรียกชื่อกันว่า ผังก้างปลา และเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายผู้คิดค้นขึ้นมาคือ ดร. อิชิกาวา

ผลผลิตหรือผลงานของขบวนการผลิตแต่ละหน่วย ย่อมประกอบขึ้นมาจากองค์ประกอบต่างๆ เหล่านั้น โดยองค์ประกอบหรือสาเหตุหลักโดยทั่วไปไม่ว่าจะอยู่ในหน่วยงานการผลิตหรือสำนักงานมักใช้เหมือนกัน

- Man = คน
- Machine = เครื่องมือ เครื่องจักร
- Material = วัตถุดิบ
- Method = วิธีการทำงาน

การรวบรวมองค์ประกอบหรือสาเหตุต่างๆ ให้เป็นระบบในรูปแบบงานแผนภาพสาเหตุและผลช่วยให้เราสามารถค้นหา วิเคราะห์ปัญหาได้ง่ายขึ้น ว่าองค์ประกอบใดสาเหตุใดที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของผลผลิตหรือผลงาน จะได้ควบคุมปรับปรุงสาเหตุหรือองค์ประกอบนั้นๆต่อไป

2.4.2 ขั้นตอนการสร้างแผนภาพสาเหตุและผล

ขั้นที่ 1 ชี้ลักษณะคุณภาพที่เป็นปัญหาออกมาให้ชัดเจน ตัวอย่างเช่นความผิดพลาดในการทำงาน

ขั้นที่ 2 ที่ริมขวาสุดของกระดาษเขียนคุณลักษณะคุณภาพลงไป ตีกรอบสี่เหลี่ยมแล้วลากเส้นราบหนาจากซ้ายมือมายังกรอบนี้เรียกว่าเส้นกระดูกสันหลังแล้วเติมเป็นลูกศร

ขั้นที่ 3 แบ่งสาเหตุหรือองค์ประกอบที่สำคัญออกเป็น 4-8 หัวข้อ จากนั้นลากเส้นก้างใหญ่จากซ้ายมือเอียงเข้าหากระดูกสันหลังแล้วเขียนสาเหตุสำคัญต่างๆข้างต้น ที่ลูกศรและล้อมกรอบสี่เหลี่ยม

ขั้นที่ 4 พยายามหาสาเหตุที่ส่งผลให้เป็นสาเหตุใหญ่เขียนเป็นก้างปลา หาสาเหตุย่อยที่ส่งผลให้เป็นสาเหตุเขียนเป็นก้างเล็ก และในที่สุดหามูลเหตุซึ่งส่งผลให้เกิดสาเหตุย่อยเขียนเป็นก้างฝอย ซึ่งวิธีการดังกล่าวช่วยให้มองเห็นวิธีการแก้ไขได้ชัดเจนมากขึ้น

ขั้นที่ 5 สำรวจแผนภาพสาเหตุและผลอีกครั้ง ว่ามีสาเหตุอื่นๆเพิ่มเติมหรือไม่ถ้ามีให้เขียนเพิ่มเติมลงไป

ขั้นที่ 6 ต่อจากนั้นให้จัดลำดับความสำคัญต่างๆ ในการกำหนดความสำคัญมากน้อยดังกล่าวอาจใช้วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ถกเถียงร่วมกัน ใช้แผนภูมิพาเรโต หรือเปิดอภิปรายทั่วไปเป็นต้น โดยจะล้อมกรอบหรือเติมวงกลมสีแดงข้างหน้าสาเหตุที่สำคัญกว่าเพื่อให้แบ่งชัดเจนขึ้น

ขั้นที่ 7 เติมหัวข้อที่เกี่ยวข้องลงไป

-ชื่อผลิตภัณฑ์

-ขั้นตอนการผลิต

-วัน เดือน ปี ที่เขียน

2.4.3 ข้อเสนอแนะในการสร้างแผนภาพสาเหตุและผล

1.แผนภาพสาเหตุและผลจะมีประโยชน์และใช้งานได้ดีต้องมีการเข้าร่วมของบุคคลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกันมาทำการถกเถียงกัน ถึงจุดมุ่งหมายที่แท้จริงแล้วจึงแสดงความคิดเห็นออกมา ในการแสดงความคิดเห็น ห้ามมิให้มีการคัดค้านว่าไม่ถูกต้องหรือใช้ไม่ได้อย่างเด็ดขาด ไม่ว่าจะเป็นความคิดเห็นของสมาชิกจะเป็นอย่างไรให้ใส่ลงในแผนภาพสาเหตุและผลให้มากที่สุด

2. กำหนดลักษณะคุณภาพได้อย่างชัดเจนและเป็นรูปธรรมที่สุด ถ้าหากลักษณะคุณภาพดังกล่าวถูกกำหนดขึ้นมาอย่างกว้างๆ แผนภาพสาเหตุและผลที่ได้จะใช้ประโยชน์ไม่ได้มากนัก วิธีที่ดีคือการจำแนกประเภทของลักษณะคุณภาพให้เล็กลงเป็นหลายๆประเภท เช่น แทนที่จะพูดว่าคุณภาพสินค้าไม่ดี หากสามารถจำแนกให้ชัดเจนได้ว่าหัวข้อคุณภาพที่ไม่ดีนั้นมีอะไรบ้างเช่น ขนาดของความผิดพลาด มีรอยขีดข่วน แล้วนำหัวข้อนั้นๆมาสร้างข้อละแผนภาพจะได้ประโยชน์มากกว่า

3. ขุดคุ้ยสาเหตุต่างๆออกมาให้ครบ เพราะจุดมุ่งหมายของการเขียนแผนภาพสาเหตุและผลไม่ได้อยู่ที่การใช้ ดั้งนั้นต้องพยายามทำแผนภาพสาเหตุและผลให้จุดของปัญหาเด่นชัดขึ้นมาให้ได้

4. ไม่ควรใช้สมองเพียงอย่างเดียว ควรอาศัยข้อเท็จจริงจากแหล่งงานด้วย ทั้งที่เคยเห็นในอดีตและปัจจุบันเป็นพื้นฐาน แล้วทำภาพสาเหตุและผลพื้นฐานข้อเท็จจริงดังกล่าวรายงานตัวเองซ้ำๆว่า ทำไม

5. การที่สามารถเขียนแผนภาพสาเหตุและผลได้ดี แสดงว่าเข้าใจเนื้อหาของงานนั้นๆดี

6. พยายามให้ทุกคนมีส่วนร่วมในการแสดงความคิดเห็น

2.4.4 ประโยชน์ของแผนภาพสาเหตุและผล

นอกเหนือจากการใช้วิเคราะห์สาเหตุหรือองค์ประกอบของปัญหาเพื่อนำไปสู่การแก้ไขปรับปรุงแล้วแผนภาพสาเหตุและผลยังมีประโยชน์ด้านอื่นๆอีก เช่น

1. จากการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นโดยสมาชิกทุกคนในกลุ่ม คือ สาเหตุของการกระจายตัวประสบการณ์การทำงานและความชำนาญของแต่ละคนจะถูกเปิดเปิดเผยออกมาทำให้เพื่อนร่วมงานทราบ นับเป็นการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นและประสบการณ์ต่อกันเป็นอย่างดี

2.แผนภาพสาเหตุและผลทำให้การประชุมเป็นไปได้ถูกทิศทางและมีประสิทธิภาพและผลเป็นตัวนำทางสำหรับการปรึกษาหารือ แต่ถ้าประชุมโดยมีแนวทางตามแผนภาพสาเหตุและผล กำหนดการหารือจะอยู่ในแนวทางเดียวกันอย่างใจจดใจจ่อ

3. แผนภาพสาเหตุและผลใช้ได้กับงานทุกชนิด ไม่เพียงใช้ได้เฉพาะในการผลิตเท่านั้นแต่ใช้ได้กับงานทุกประเภท

4. ใช้ในการอธิบายเรื่องงานและใช้อบรมพนักงานใหม่ด้วย

2.5 วิวัฒนาการของเทคนิคการเชื่อมและการนำมาใช้

การเชื่อมโดยการใช้อาร์คด้วยโลหะหรือที่เรารู้จักกันว่า การเชื่อมไฟฟ้ามีส่วนช่วยให้การออกแบบโครงสร้างสมัยปัจจุบัน มักเป็นโครงสร้างที่ใช้เหล็กรวมไปถึงงานต่อเรือ การผลิตตู้โดยสารรถไฟ สะพานโครงเหล็ก และอื่น ๆ ทำให้มองเห็นได้ว่าประวัติศาสตร์ในการที่เรือเดินสมุทรถูกสร้างขึ้นเป็นครั้งแรกที่มีการเชื่อมทั้งลำในปี พ.ศ. 2464 (ค.ศ. 1921) การทำคานสะพานรถไฟที่นำแผ่นเหล็กมาเชื่อมทั้งอันที่ เทอเทิล กรีก (Turtle Creek) ในรัฐเพ็นซิลวาเนีย สหรัฐอเมริกา ในปี พ.ศ. 2470 (ค.ศ. 1927) ในปีเดียวกันนี้ อาคารชารอน (Sharon) ซึ่งเป็นอาคารที่ใหญ่แห่งแรกที่ใช้เหล็กโครงที่ใช้การเชื่อมทั้งหมดในโลกของสหรัฐได้สร้างขึ้น โฉมหน้าที่ทำให้เกิดจุดสนใจในการสร้างโครงสร้างโดยการเชื่อมพร้อมไปกับเทคนิคและกระบวนการเชื่อมได้ก้าวหน้าขึ้นอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2463 (ค.ศ. 1920) การเชื่อมถูกประยุกต์ในการต่อประสานติดกัน ถ้าพิจารณายังเปรียบได้ว่าเป็นสิ่งที่เป็นความสำคัญชั้นรอง ถ้าเราพิจารณาถึงความแข็งแรงหรืองานซ่อมในรายแรกที่เทคนิคการเชื่อมถูกวิวัฒนาการขึ้น หลังจากที่มีประสบการณ์ในทางปฏิบัติมันเป็นสิ่งที่มีความกว้างขวางในทางประยุกต์ที่จะใช้โครงสร้างที่มีการเชื่อม กระบวนการที่ถูกนำไปใช้ในการเชื่อมเป็นสิ่งสามัญธรรมดาในทุก ๆ ประเทศ

เหตุในการแตกร้าวที่เกิดขึ้นหลายครั้งในรอยเชื่อมของสะพาน และรอยเชื่อมเรือในช่วงปี 1940 ระหว่างก่อนและหลังการนำการเชื่อมไปใช้ในทางการเชื่อมทั้งหมด บางโครงสร้างที่ทำขึ้นเหล็กที่มีค่าแรงเค้นดึงสูงก็ถูกนำมาใช้ในโครงสร้างที่ใช้การเชื่อมจากสถิติจุดที่การแตกร้าวที่เกิด

เป็นเหตุ ที่ไม่กว้างขวางนัก แต่การแตกร้าวก็เป็นปัญหาที่จะขบคิดพิจารณากัน จุดที่ศึกษากันมาก หรือคิดกันมาก คือการหาคุณสมบัติที่เหมาะสมของเหล็กที่สามารถในการเชื่อมที่เหมาะแก่ภาวะ

การเชื่อมและตัดโลหะเป็นวิธีการที่สำคัญสำหรับงานสร้าง (fabrication) ซึ่งปัจจุบันถ้าไม่มีวิธีการเชื่อมและตัดโลหะแล้วอาจทำงานไม่สะดวก หรือทำไม่ได้ จากสภาพการณ์เช่นนี้จึงมีผลทำให้เทคนิคการเชื่อมและตัดโลหะได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วจึงทำให้เกิดวิธีการเชื่อมและตัดโลหะขึ้นหลายแบบ

2.5.1 การจำแนกประเภทวิธีการเชื่อมและตัดโลหะ

การเชื่อมโลหะมีหลายวิธี ถ้าแยกประเภทโดยยึดเอาจุดสำคัญต่าง ๆ เป็นเกณฑ์ จะมีจุดสำคัญที่ใช้ในการแยกประเภทได้มากกว่า 40 วิธี โดยเหตุนี้จึงไม่มีวิธีแยกประเภทวิธีใดที่จะทำให้ทุกคนยอมรับว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุดได้ ปัจจุบันการแยกประเภทวิธีการเชื่อมและตัดโลหะตามปกติจะแยกประเภทวิธีการเชื่อมได้กว้างโดยถือหลักการแยกประเภทจากกลไกทำงานในการเชื่อม หรืออีกทางหนึ่งจะแยกประเภทตามพลังงานที่ใช้ในการเชื่อม การแยกประเภทวิธีการเชื่อมตามปกติจะแยกออกเป็นหมู่ใหญ่ ๆ ได้คือ การเชื่อมโดยโลหะถูกหลอมละลาย (fusion welding) การเชื่อมใช้แรงกดดัน (pressure welding) การบัดกรีแข็ง (brazing) และอื่น ๆ ซึ่งจะจำแนกย่อยออกเป็นหมู่ ๆ ของการใช้พลังงาน คือ พลังงานไฟฟ้า พลังงานเคมี พลังงานกล และอื่น ๆ รายละเอียดของการแยกประเภทการเชื่อมจะแบ่งเป็นหมู่ได้หลายหมู่

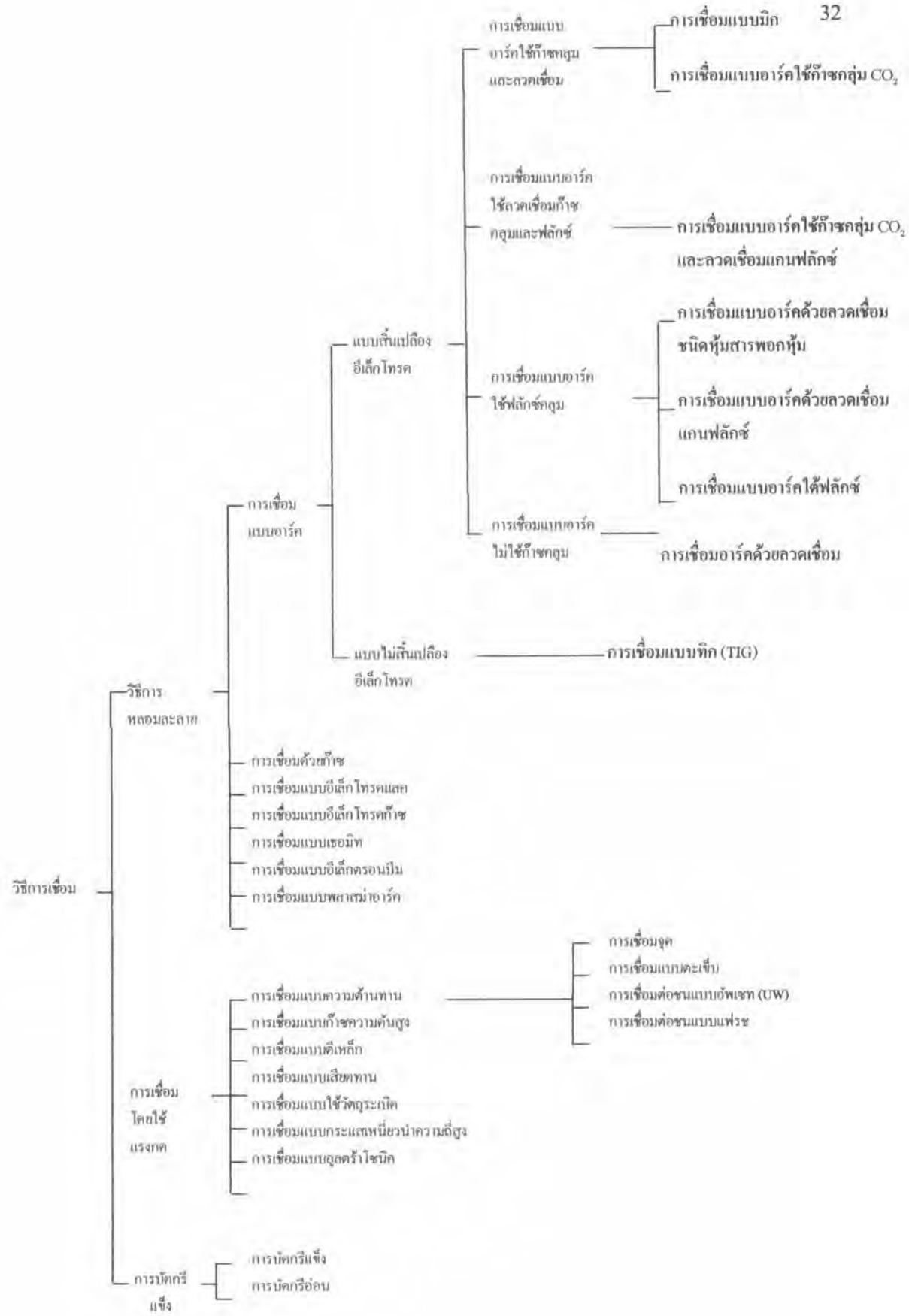
ในระหว่างหมู่วิธีการเชื่อมที่แยกไว้นั้น วิธีการเชื่อมถูกแยกประเภทเป็นวิธีการเชื่อมต่าง ๆ ตามกลไกวิธีการเชื่อมตามปกติหรือคล้าย ๆ กัน ฉะนั้นประเภทของวิธีการเชื่อมแบบต่าง ๆ ที่จะกล่าวในนี้จะมีพื้นฐานการแยกประเภทตามวิธีที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น ในตารางที่ 6 แสดงการจำแนกประเภทของการเชื่อมแบบต่าง ๆ

การจำแนกประเภทวิธีการเชื่อมอย่างกว้าง ๆ จะแยกออกเป็น 3 หมู่ คือ

1) การเชื่อมโดยโลหะถูกหลอมละลาย การเชื่อมวิธีนี้ส่วนที่เป็นรอยต่อจะถูกหลอมละลายด้วยความร้อนจากการอาร์ค (arc) หรือเปลวก๊าซ (inflammable gas) การเชื่อมวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แรงกดกับรอยเชื่อม

2) การเชื่อมโดยใช้แรงกด การเชื่อมวิธีนี้จะใช้ความร้อนกับแรงกด

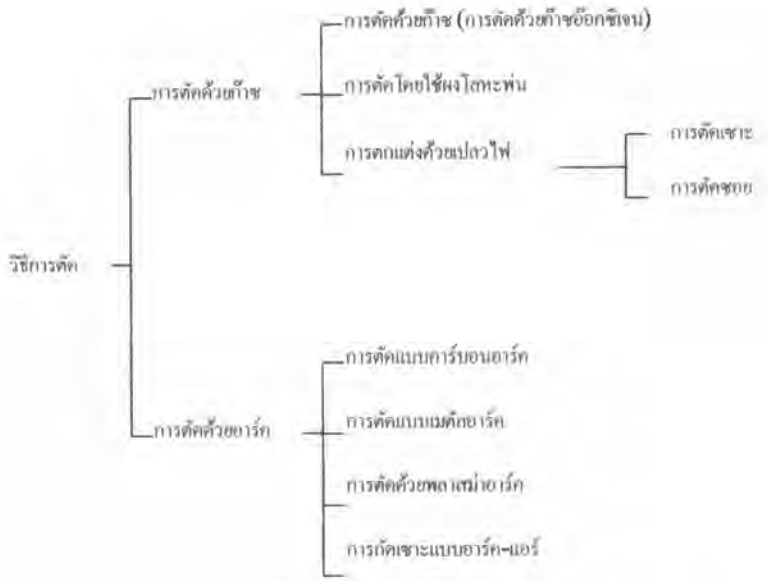
3) การบัดกรีแข็ง เป็นวิธีประสานโลหะด้วยโลหะเจือ (alloy) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่วบัดกรี(solder) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้โลหะงานติดกัน การประสานโลหะวิธีนี้โลหะงานจะไม่ถูกหลอมละลาย



รูปที่2.1 แสดงการแยกประเภทวิธีการเชื่อม

ในตอนต่อไปจะนำวิธีการเชื่อมแบบที่นิยมแพร่หลาย 2-3 แบบ มาอธิบาย

เมื่อนำวิธีการตัดโลหะซึ่งใช้กับงานสร้างขึ้นมาพิจารณาการตัดโลหะด้วยออกซิเจน (oxygen cutting) และการตัดด้วยอาร์ค (arc cutting) เป็นวิธีการตัดโลหะที่แพร่หลายมากที่สุด การจำแนกประเภท วิธีการตัดโลหะแบบต่าง ๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบันจะแสดงไว้ในตารางที่ 7



รูปที่2.2 การจำแนกประเภทวิธีการตัดโลหะ

2.5.2 การเชื่อมแบบความต้านทาน (Resistance welding)

การเชื่อมแบบความต้านทานเป็นวิธีซึ่งใช้แรงกดดันกับพื้นผิวเหล็กแผ่น ซึ่งสัมผัสเมื่อพื้นผิวงานนั้นถูกทำให้ร้อนโดยความต้านทานของกระแส การเชื่อมแบบความต้านทานแบ่งออกเป็นหมู่ใหญ่ ๆ ได้สองหมู่ คือ การเชื่อมแบบความต้านทานบนรอยต่อเกย (lap resistance welding) และการเชื่อมแบบความต้านทานบนรอยต่อชน (butt resistance welding)

การเชื่อมแบบต้านทานบนรอยต่อเกย ส่วนใหญ่จะใช้เป็นวิธีเชื่อมโลหะแผ่นบาง ซึ่งจะแบ่งออกเป็นการเชื่อมจุด (spot welding) และการเชื่อมแนวตะเข็บ (seam welding) การเชื่อมแบบนี้แผ่นโลหะสองแผ่นซึ่งจัดให้เกยทับกันจะถูกกดด้วยคู่ของแท่งอีเล็กโทรดทองแดงเจือ มีกระแสสูงไหลผ่านด้วยช่วงเวลาอันสั้น เมื่อกระแสไหลผ่านจากอีเล็กโทรดตัวหนึ่งผ่านโลหะงานไปยังอีเล็กโทรดอีกตัวหนึ่ง จะมีความต้านทานของกระแสขึ้นกับโลหะงานเกิดเป็นความร้อนตรงจุดที่ผิวหน้าของอีเล็กโทรดสัมผัส ผิวหน้าโลหะงานจะเริ่มต้นหลอมเหลวและเมื่อมีแรงกดมากระทำกับพื้นผิว

งาน โลหะงานจะเชื่อมต่อกันเป็นจุด ความต้านทานกระแสก็จะเกิดระหว่างอีเล็กโทรดกับโลหะงานเช่นเดียวกัน แต่จะมีอุณหภูมิไม่สูงเนื่องจากอีเล็กโทรดมีน้ำหล่อเย็นไว้

การเชื่อมแนวตะเข็บ จะใช้ลูกล้อทองแดงเจือสองลูกทำหน้าที่เป็นอีเล็กโทรดและเป็นล้อกดแผ่นโลหะงานให้เชื่อมติดกัน ขณะที่มีกระแสและแรงกดกับแผ่นโลหะงานให้เชื่อมติดกัน การเชื่อมวิธีนี้ใช้กับการเชื่อมงานซึ่งต้องการไม่ให้ตะเข็บรอยต่อรั่วหรือซึม หลักการเชื่อมพื้นฐานจะเหมือนกับการเชื่อมจุด แต่จะใช้กระแสสูงกว่า 1.5-2 เท่าของขนาดกระแสที่ใช้กับการเชื่อมจุด และใช้แรงกดมากกว่าประมาณ 1.2-1.6 เท่า ตัวอย่างเช่นเหล็กกล้าละมุนแผ่นหนา 0.8 มม. ใช้กระแส 1,500 แอมแปร์และแรงกด 300 กก.

การเชื่อมแบบความต้านทานชนิดรอยต่อชน เป็นวิธีการเชื่อมสำหรับงานเชื่อมแท่งโลหะรูปต่าง ๆ ท่อหรือแผ่นโลหะ ในลักษณะต่อเพิ่มความยาวโดยให้กระแสและแรงกดกับงานตามแนวยาวของงานจนกระทั่งรอยต่อหลอมเหลวเชื่อมต่อกันโดยความร้อน เนื่องจากความต้านทานกระแส การเชื่อมวิธีนี้แบ่งออกเป็นสองแบบ คือ การเชื่อมแบบ flush butt welding และแบบ upset welding การเชื่อมวิธีแรกกระแสไฟเชื่อมจะทำให้เกิดการสปาร์ค (spark) ขึ้นที่ปลายชิ้นงานที่นำมาต่อกันจนกระทั่งร้อนแล้วจึงใช้แรงกดเพื่อทำให้โลหะเชื่อมต่อกัน เมื่อกระแสไหลผ่านรอยต่อซึ่งเป็นส่วนปลายของชิ้นงานซึ่งสัมผัสกันเพียงเบา ๆ โลหะจะร้อนจัดและในขั้นสุดท้ายก็จะเกิดเป็นแสงสว่างของสปาร์คขึ้น เมื่อใช้แรงกดดันชิ้นงานเข้าหากันปลายชิ้นงานซึ่งร้อนจัดอยู่แล้วจะเชื่อมต่อกัน

การเชื่อมวิธี upset ถูกจัดอยู่ในวิธีการเชื่อมแบบต่อชนเช่นเดียวกัน การเชื่อมวิธีนี้โลหะงานจะถูกเชื่อมโดยแรงกดสูง หลังจากพื้นผิวงานส่วนที่สัมผัสกันถูกทำให้ร้อนขึ้นเนื่องจากความต้านทานกระแส โลหะงานจะถูกกดด้วยแรงกดสูงตามแนวยก การเชื่อมวิธี Upset นี้ขอบโลหะซึ่งใช้เป็นรอยต่อจะต้องตกแต่งและทำความสะอาด เพื่อป้องกันไม่ให้มีสารเจือปนที่ไม่ต้องการ เช่น สารอ๊อกไซด์ เข้าไปอยู่ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม การเชื่อมวิธีนี้ความร้อนจะเกิดขึ้นช้าเสียเวลาเชื่อมมากกว่าการเชื่อมแบบ Flush butt ซึ่งมีผลบริเวณรอยเชื่อมมีขนาดใหญ่และเป็นการเชื่อมโลหะมีคุณภาพค่อนข้างต่ำ

2.5.3 การบัดกรีแข็ง (Brazing)

การบัดกรีแข็งเป็นวิธีการประสานโลหะโดยใช้โลหะบัดกรีแข็ง (brazing-filler-metal) หลอมเหลวฉาบหน้าผิวโลหะงานส่วนที่เป็นรอยต่อ โลหะบัดกรีเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะงาน โลหะบัดกรีมีสองชนิด คือ โลหะบัดกรีอ่อน (solder) มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า 450 องศาเซลเซียส และโลหะบัดกรีแข็ง (hard solder) มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส การบัดกรีแข็งซึ่งใช้โลหะบัดกรีเป็นวัสดุประสานจะเรียกการบัดกรีแข็งชนิดนี้ว่าการบัดกรีหรือการบัดกรีอ่อน (soldering) รอยต่อสำหรับการบัดกรีแข็งควรมีระยะเว้นน้อยที่สุด

โลหะบัดกรีควรมีคุณสมบัติไหลได้ดี เพื่อให้ไหลซึมเข้าในระยะเว้นรอยต่อได้โดยการดึงดูดของอณูโลหะ นี่คือคุณสมบัติเบื้องต้นที่โลหะบัดกรีควรมี นอกจากคุณสมบัติดังกล่าวแล้ว โลหะบัดกรีต้องมีคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพตามกำหนด โลหะบัดกรีแข็งชนิดที่ใช้ทั่ว ๆ ไป คือ โลหะเงือเงินทองแดง ทองเหลืองและทองแดง นอกจากนี้จะใช้โลหะเงือตะกั่ว-เงิน บิสมัส-ดีบุก และบิสมัส-ดีบุก-สังกะสี เป็นโลหะบัดกรีอ่อน การบัดกรีแข็งมีวิธีการแตกต่างกัน 7 วิธี คือ

1) การบัดกรีแข็งโดยอาร์ค (arc brazing) เป็นวิธีบัดกรีแข็งโดยใช้ความร้อนจากการอาร์คด้วยแท่งคาร์บอน หรือการเชื่อมแบบทิก
2) การบัดกรีแข็งโดยเปลวไฟก๊าซ (gas brazing) เป็นวิธีบัดกรีแข็งโดยใช้ความร้อนจากเปลวไฟก๊าซ
3) การบัดกรีด้วยหัวแร้ง (iron soldering) เป็นวิธีบัดกรีด้วยหัวแร้ง
4) การบัดกรีแข็งด้วยเตา (furnace brazing) เป็นวิธีบัดกรีแข็งโดยใช้เตาอบให้ความร้อนกับโลหะงาน
5) การบัดกรีแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำ (induction brazing) เป็นวิธีการบัดกรีแข็งโดยใช้ความร้อนจากกระแสเหนี่ยวนำความถี่สูง (high frequency induction)
6) การบัดกรีแข็งด้วยความต้านทาน (resistance brazing) เป็นวิธีการบัดกรีแข็งโดยใช้ความร้อนจากความต้านทานกระแส (electric resistance)
7) การบัดกรีแข็งโดยวิธีจุ่ม (dip brazing) เป็นวิธีการบัดกรีแข็งโดยจุ่มชิ้นงานลงในอ่างหลอมเหลวโลหะบัดกรี

การบัดกรีอ่อนและแข็งจะใช้ฟลักซ์หรือน้ำประสาน หรือควบคุมบรรยากาศ เพื่อให้คุณภาพของรอยบัดกรีสูงขึ้น

2.5.4 การเชื่อมแบบอีเล็กตรอนบีม (Electron beam welding)

เทคนิคการเชื่อมแบบใหม่ ๆ ซึ่งได้รับการพัฒนาให้สามารถเชื่อมโลหะได้ผลดีเป็นที่น่าสนใจมากคือการเชื่อมแบบอีเล็กตรอนบีม การเชื่อมแบบพลาสมาอาร์ค (plasma arc welding) และการเชื่อมด้วยแสงเลซอร์ (laser welding) ถึงแม้ว่าการเชื่อมแบบใหม่เหล่านี้ยังไม่แพร่หลาย แต่จะมีใช้เฉพาะการเชื่อมงานบางด้านเท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นวิธีการเชื่อมสำหรับอนาคตอยู่ แต่วิธีการเชื่อมแบบอีเล็กตรอนบีม วิธีการที่เหมาะที่สุดสำหรับการเชื่อมที่พิเศษที่โลหะมีคุณสมบัติไว้ต่อการทำปฏิกิริยามีจุดหลอมตัวสูง และเป็นโลหะต่างชนิดกัน

การเชื่อมแบบอีเล็กตรอนบีมเป็นการเชื่อมซึ่งเร่งอีเล็กตรอนให้มีความเร็วสูงพุ่งลงสู่โลหะงานที่จะเชื่อม ในขอบเขตของสุญญากาศ โลหะจะถูกเชื่อมโดยความร้อนที่เกิดจากอีเล็กตรอนพุ่งชนโลหะงานการกำเนิดอีเล็กตรอนทำได้โดยจุดไส้ (filament) ทังสเตนในช่องที่เป็นสุญญากาศ

อย่างสมบูรณ์ (ประมาณ 10^{-5} มม. ปรอท) อีเล็กตรอนที่เกิดนั้นจะถูกเร่งให้มีความเร็วซึ่งกระแสที่มีแรงเคลื่อนสูงแล้วจึงถูกบังคับลำให้รวมกลุ่มเป็นลำอีเล็กตรอนโดยอีเล็กโตรแมคนีติก เลนซ์ (electromagnetic lense) ลำอีเล็กตรอนจะมีขนาดผ่าศูนย์กลางเพียง 2-3 ไมครอน (micron) อีเล็กตรอนที่ถูกบังคับรวมกลุ่มเป็นลำจะถูกขับให้พุ่งชนโลหะงานที่เชื่อม เนื่องจากเป็นการเชื่อมที่มีพลังงานสูงและรุนแรง การซึมลึกในรอยเชื่อมสูง โดยเหตุนี้จึงสามารถเชื่อมโลหะหนา ๆ ได้โดยการเชื่อมเพียงครั้งเดียว และสามารถเชื่อมโลหะงานที่มีจุดหลอมตัวสูงได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากเป็นการเชื่อมซึ่งกระทำในแชมเบอร์ที่เป็นสุญญากาศอย่างสมบูรณ์ จึงสามารถเชื่อมโลหะที่มีคุณสมบัติไวต่อการทำปฏิกิริยา

ข้อเสียของการเชื่อมแบบนี้ คือต้องเชื่อมในแชมเบอร์สุญญากาศ โดยเหตุนี้การเชื่อมแบบนี้จึงใช้เฉพาะการเชื่อมโลหะพิเศษ ชิ้นส่วนของเครื่องจักร หรือโครงสร้างขนาดเล็ก เพื่อทำให้การเชื่อมแบบอีเล็กตรอนบีมเป็นวิธีการเชื่อมใช้ได้แพร่หลายมากขึ้น ถ้าสามารถเชื่อมได้ในบรรยากาศปกติ

2.5.5 ปัญหาในการเชื่อม

(1) ขีดความสามารถของการเชื่อม

ขีดความสามารถในการเชื่อมของโรงงานผลิตเป็นตัวสำคัญที่จะทำให้ โครงสร้างที่ใช้การเชื่อมมีคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้ในการออกแบบ ผู้ออกแบบจะต้องมีความเข้าใจเป็นอย่างดี ถึงขนาดของอุปกรณ์และเครื่องมือเชื่อมที่มีใช้ในโรงงานและในสถานที่ติดตั้ง และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานด้วยเช่นเครื่องมือตัด, ประกอบ และอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ รวมทั้งความสามารถของวิศวกร คนงาน การจัดการและควบคุมการเชื่อมในการที่จะให้ได้งานที่มีคุณภาพตรงตามต้องการจะต้องมีองค์ประกอบทั้งห้าของการผลิต (5 M) ที่ดีและสมบูรณ์กันนั่นคือ คน (man), เครื่องจักร (machine), วัสดุ (material), วิธีการ (method), และการจัดการ (management) องค์ประกอบเหล่านี้ยกเว้นเรื่องวัสดุแล้ว อีกสี่ประการล้วนแต่เกี่ยวข้องกับวิธีการเชื่อมทั้งสิ้น การจัดการนับเป็นเรื่องสำคัญ ถ้าไม่มีการจัดการให้มีการฝึกหัดวิธีการประกอบให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่วางไว้ ก็จะไม่สามารถที่จะทำงานให้ได้โครงสร้างที่มีคุณภาพสูงเป็นที่น่าเชื่อถือได้ โดยนำที่โครงสร้างทั้งหมดประกอบจากการที่นำชิ้นส่วนต่าง ๆ มาเชื่อมต่อจนเป็นชิ้นเดียวกัน การที่มีสภาพบกพร่องในการเชื่อมแม้เพียงจุดเดียว อาจทำให้โครงสร้างทั้งหมดหักพังลงมาได้ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องทำให้รอยเชื่อมทุกรอยมีคุณภาพดีเป็นที่เชื่อถือได้

(2) ความยากง่ายของการเชื่อม

รอยต่อทุกแห่งควรอยู่ในตำแหน่งที่จะทำการเชื่อมได้สะดวก ข้อควรระวังต่าง ๆ มีดังนี้

1) ตรวจดูว่าการเชื่อมจะกระทำได้โดยที่ขั้วไฟฟ้า (ลวดเชื่อม) อยู่ในท่าและมุมที่เหมาะสม

2) ตรวจดูว่าผู้เชื่อมจะสามารถตรวจสอบสภาพของประกายไฟได้

3) ตรวจดูว่าสามารถใช้ท่าเชื่อมปกติได้

เป็นไปได้ว่าเมื่อโครงสร้างมีลักษณะซับซ้อนมักจะมีการมองข้ามข้อควรระวังไปในบางข้อ และในเมื่อสภาพแวดล้อมของการเชื่อมไม่ดีก็จะทำให้ได้รอบเชื่อมที่มีคุณภาพไม่ดีพอไปด้วย ดังนั้นจึงเป็นความจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องวางแผนเกี่ยวกับการเชื่อมเพื่อให้เป็นไปตามข้อระวังทั้งสามข้อนี้ให้มากที่สุด

สิ่งที่จะต้องระวังอีกประการหนึ่งก็คือ การออกแบบโครงสร้างและรอยเชื่อม จะต้องให้สามารถทำการทดสอบรอยเชื่อมแบบไม่ทำลายสภาพได้ เนื่องจากคุณภาพของโลหะเชื่อมจะต้องผ่านการทดสอบขั้นสุดท้าย โดยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายสภาพ

(3) ทำการเชื่อมให้ได้ประสิทธิภาพของการเชื่อมสูง

วิธีการเชื่อมที่มีประสิทธิภาพ เช่น การเชื่อมไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซ (gas shield metal arc welding), การเชื่อมไฟฟ้าภายใต้สารปกคลุม (submerged arc welding) และการเชื่อมแบบ (electroslag welding) ได้รับการพัฒนาไปมากในระยะนี้ วิธีเชื่อมดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูง ทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพดี การที่จะใช้วิธีเชื่อมเหล่านี้ให้ได้ผลสูงสุด จะต้องพิจารณาสิ่งต่าง ๆ เกี่ยวกับลักษณะของโครงสร้าง และรูปร่างของรอยต่อประกอบด้วย

(4) การป้องกันการแตกของรอยเชื่อม

ในบรรดาสภาพบกพร่องต่าง ๆ ในการเชื่อม การเกิดรูภายใน (blowhole), มีการมีตะกรันปะปน (slag inclusion), ร่องเว้าขอบรอยเชื่อม (undercut), และการซ้อน (overlap) จะมีสาเหตุเนื่องมาจากเทคนิคการเชื่อมของช่างเชื่อมเป็นส่วนใหญ่ ส่วนการแตกของรอยเชื่อมนั้นจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของโลหะพื้นฐาน, ลักษณะการจับยึดของรอยต่อ, ความเหนียวของโลหะเชื่อม, อัตราการเย็นตัวของบริเวณเชื่อม, ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม, และปริมาณไฮโดรเจน ตามที่ได้กล่าวแล้วในบทก่อน ๆ

การป้องกันมิให้เกิดการแตกของรอยเชื่อม จะต้องกระทำทั้งในขั้นตอนของการออกแบบและในขณะทำการเชื่อม วิธีการที่ควรกระทำในขั้นตอนของการออกแบบมีดังนี้

1) เลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติทนการแตกได้ดี

2) ออกแบบรอยต่อให้เกิดการยึดตัวน้อยที่สุด

3) หลีกเลี่ยงโครงสร้างแบบที่ทำให้เกิดมีระยะต่อ (root opening) สูงในขณะที่ทำการประกอบโครงสร้างการเชื่อมรอยต่อที่มีระยะต่อมากดังกล่าว จะทำให้เกิดความเค้นภายในเป็นปริมาณมาก เนื่องจากเกิดมีแรงยึดตัว (restraining force) เป็นจำนวนมาก ซึ่งเกิดขึ้นตามปริมาณเนื้อโลหะเติมที่เพิ่มมากขึ้น

4) กำหนดสัดส่วนรูปร่างของรอยต่อให้เหมาะกับลักษณะของวัสดุที่ใช้ สำหรับเหล็กกล้ารีด (rolled steel) จะมีคุณสมบัติเชิงกลต่ำในทิศทางของความหนา คุณสมบัติเชิงกลเหล่านี้จะยิ่งต่ำลงอีกถ้ามีสิ่งแปลกปลอมปนอยู่ในเนื้อโลหะ การออกแบบรอยต่อมีข้อเสีย ทั้งนี้เนื่องจากเพื่อหลีกเลี่ยงการฉีกบริเวณขอบของรอยต่อซึ่งจะเกิดขึ้นในการต่อ ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นในทิศทางของความหนาในแผ่นวัสดุ

(5) เลือกรูปร่างของการเซาะร่อง (groove) ที่จะไม่ทำให้เกิดการแตก (hot cracking) ในระหว่างการแข็งตัวของเนื้อโลหะเชื่อม

เมื่อใช้วิธีเชื่อมที่ใช้กระแสสูงและมีการซึมลึกมาก เช่น การเชื่อมไฟฟ้าภายใต้สารปกคลุม (submerged arc welding) อาจทำให้เกิดตะเข็บเชื่อมรูปลูกแพร์ (pear type bead) ขึ้นได้ ตัวเนื้อตะเข็บเชื่อมแบบนี้จะมีความกว้าง (W) น้อยกว่าความลึก (d) สำหรับตะเข็บเชื่อมรูปลูกแพร์นี้ การแตกในขณะร้อน (hot cracking) จะเกิดขึ้นได้ง่ายบริเวณกึ่งกลางของตัวเนื้อตะเข็บ เนื่องจากผลึกโครงสร้าง (dendritic structure) จะจัดตัวอยู่ในทิศทางตรงข้ามกันในขณะที่เนื้อโลหะแข็งตัว เมื่อทำการเชื่อมโดยวิธีเชื่อมที่จะใช้กระแสสูง ซึ่งนับรวมการเชื่อมภายใต้บรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย จะต้องมีการพิจารณาเลือกชนิดของการเซาะร่อง และสภาพในการเชื่อม (welding condition) อย่างรอบคอบทุกครั้ง

เนื่องจากสภาวะการใช้งานทางอุตสาหกรรม มีปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาหลากหลายมาก และอุตสาหกรรมแต่ละประเภทก็มีสภาวะการใช้งานที่แตกต่างกันไป ทำให้การเลือกใช้งานท่อกลายเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการออกแบบระบบทั้งหมด อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปวัสดุที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่เหล็กหล่อ เหล็กเหนียว และเหล็กกล้า

สำหรับตัวแปรหลักที่ต้องนำมาพิจารณาในการเลือกใช้วัสดุท่อคือ สภาวะการกัดกร่อน ราคา ความดันใช้งาน อุณหภูมิใช้งาน และความปลอดภัย ในแง่ของสภาวะการกัดกร่อน นอกเหนือจากการขอคำแนะนำ/ปรึกษา จากบริษัทผู้ผลิตแล้ว ถือเป็นหน้าที่หลักของวิศวกรและผู้ออกแบบระบบที่ต้องเลือกวัสดุสำหรับโครงการที่รับผิดชอบ เนื่องจากคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเป็นคำแนะนำโดยทั่วไปตามชนิดของวัสดุ แต่ถึงแม้ว่าเป็นของไหลที่ใช้งานในระบบชนิดเดียวกัน หากสภาวะการใช้งานด้านอุณหภูมิและความดันต่างกัน ผลกระทบต่อคุณสมบัติการกัดกร่อนของวัสดุก็แตกต่างกันไปด้วย ส่วนในแง่ของราคา ถึงแม้ว่าจะเป็นตัวแปรในการนำมาพิจารณาอยู่เสมอ แต่ต้องพิจารณาในแง่ของความปลอดภัยก่อนเสมอ โดยเฉพาะในการใช้งานของระบบท่อกับสภาวะอุณหภูมิสูงและความดันสูง

2.5.6 ท่อโลหะ

2.5.7 เหล็กกล้าและเหล็กเหนียว

ท่อที่ผลิตออกมาใช้งานโดยส่วนใหญ่แล้วผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอน อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบทางเคมีและกรรมวิธีการผลิตจะแปรเปลี่ยนไปในแต่ละบริษัทผู้ผลิต และตามมาตรฐานของแต่ละประเทศ สำหรับประเทศไทยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) เป็นผู้กำหนดมาตรฐานในการผลิตผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรม อย่างไรก็ดีสำหรับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ในการผลิตเหล็กกล้าและเหล็กเหนียวยังออกมาน้อยมาก จึงไม่สามารถนำมาใช้งานได้ในทางปฏิบัติ โดยส่วนใหญ่ผู้ออกแบบระบบท่อจึงใช้มาตรฐานของต่างประเทศแทน ที่ใช้งานโดยทั่วไป ได้แก่ มาตรฐานของสมาคมมาตรฐานต่าง ๆ ในอเมริกา เช่น

American Society of Testing Materials (ASTM)

American National Standards Institute (ANSI)

American Iron and Steel Institute (AISI)

American Society of Mechanical Engineer (ASME)

American Waterworks Association (AWWA)

American Petroleum Institute Standard (APIS)

นอกจากนี้ที่นิยมใช้รองลงมาคือมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น ได้แก่

Japanese Industrial Standards (JIS)

และมาตรฐานของประเทศเยอรมัน คือ

Deutscher Industrial Normen (DIN)

เหล็กกล้าแบ่งออกได้เป็น 7 ชนิด คือ

1) เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา (plain-carbon steel)
2) เหล็กกล้าผสมต่ำ ความต้านแรงสูง (high-strength, low-alloy steel)
3) เหล็กกล้าโครงสร้างผสมต่ำ (low-alloy structural steel)
4) เหล็กกล้าหล่อ (cast steel)
5) เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel)
6) เหล็กเครื่องมือ (tool steel) และ
7) เหล็กกล้าพิเศษ (special purpose steel)

สำหรับการใช้งานในระบบท่อทางอุตสาหกรรม ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา (หรือเรียกให้สั้น ๆ ว่าเหล็กกล้าคาร์บอน) เหล็กกล้าผสมต่ำ และเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าคาร์บอน ถือเป็นวัสดุที่สามัญมากที่สุด ราคาไม่แพง สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ คือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (low carbon steel) มีคาร์บอนผสมอยู่ ระหว่าง 0.05 ถึง 0.30% เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (medium carbon steel) มีคาร์บอนผสมอยู่ มากกว่า 0.50% ขึ้นไป ที่ใช้งานในระบบท่อมากที่สุดคือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ในตารางที่ 8 และ 9 แสดงคุณสมบัติทางกล และองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่ใช้งานเป็นวัสดุท่อ ตามมาตรฐานของ ASTM ตามลำดับ

เหล็กกล้าผสมต่ำ เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผสมโลหะบางชนิดเข้าไปด้วย เมื่อนำไปผ่าน กรรมวิธีทางความร้อน เหล็กกล้าชนิดนี้จะได้รับการปรับปรุงให้มีความต้านทานดึง ความแข็ง ความเหนียว (ductility) และความเหนียวนุ่ม (toughness) ขึ้นไปอีก ตารางที่ 10และ 11 แสดง คุณสมบัติทางกลและองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าผสมต่ำ (ความต้านทานสูง) ที่ใช้งานเป็น วัสดุต่อตามมาตรฐานของ ASTM สำหรับใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนตารางที่ 12 และ 13 ใช้งานที่ อุณหภูมิสูงขึ้น

เหล็กกล้าไร้สนิม ถือเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณ โครเมียมที่ผสมอยู่ แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ออสตินิติก (austenitic) เฟอร์นิติก (fernitic) และมาเทน ซิติก (martensitic) ที่ใช้งานเป็นวัสดุท่อจะใช้ชนิดออสตินิติกเป็นหลัก เนื่องจากทนความร้อนได้ดี และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีกวาชนิดมาเทนซิติกและเฟอร์นิติก ตารางที่ 14 และ 15 แสดง องค์ประกอบระบุ (nominal composition) และชื่อเรียกตาม AISI (American Iron and Steel Institute) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสติกนิกสำหรับต้านทานการกัดกร่อนและสำหรับทนความร้อน ตามลำดับ

2.5.8 เหล็กหล่อ

เหล็กหล่อ (cast-iron) ที่ใช้งานทั่วไปมีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 4.0% เป็นที่ทราบ กันว่า เมื่อมีคาร์บอนผสมอยู่มาก เหล็กจะเปราะ และมีความเหนียวน้อยลง เพราะฉะนั้นเหล็กหล่อ จึงขึ้นรูปเย็นไม่ได้ แต่เมื่อนำไปหลอมเหลวแล้วจะไหลได้ง่าย จึงสามารถหล่อเป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้ ดี เมื่อเย็นตัวลงแล้วทำการบ่มจะทำให้สามารถตัดกลึงได้ เหล็กหล่อมีความต้านทานแรงดึงกว่า ความต้านแรงกด (compressive strength) จึงเหมาะกับชิ้นงานที่รับแรงกด นอกจากนั้นคุณสมบัติ ของเหล็กหล่อยังเปลี่ยนแปลงไปได้มากเมื่อผสมโลหะผสมชนิดต่าง ๆ และผ่านกรรมวิธีทางความ ร้อนต่างกันเพื่อความเหมาะสมกับการใช้งาน

จากคุณสมบัติของเหล็กหล่อดังกล่าว ท่อเหล็กหล่อจึงนำมาใช้งานเป็นหลักในการขนส่งน้ำ หรือก๊าซ และมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบท่อฝังดิน เนื่องจากสามารถรับแรงกดได้มากเป็น พิเศษจากการติดตั้งใต้ดินตามคุณสมบัติของเหล็กหล่อ และจากคุณสมบัติต้านทานแรงต่ำการนำท่อ

เหล็กหล่อมาใช้งานเพื่อรับแรงดันภายในต้องได้รับการพิจารณาตรวจสอบโดยผู้ออกแบบ เนื่องจากภาระแรงบางอย่างสามารถทำให้ท่อแตกได้ถ้าไม่มีการปรับให้ยืดหยุ่นอย่างเหมาะสม

และจากคุณสมบัติที่เปราะบางของเหล็กหล่อ ท่อเหล็กกล้าจึงไม่สามารถนำมาใช้กับของไหลที่มีคุณสมบัติสูง ความดันสูง หรือระบบที่มีการสั่นสะเทือน โดยไม่ควรใช้กับไอน้ำที่อุณหภูมิเกินกว่า 230°C (450°F) และน้ำมันที่อุณหภูมิเกินกว่า 150 C (300 F)

ในแง่ของสภาวะการกัดกร่อนท่อเหล็กกล้า ที่นำมาติดตั้งใหม่จะมีอัตราการเกิดสนิมค่อนข้างสูงในปีแรก แต่เมื่อใช้งานนานขึ้นอัตราการกัดกร่อนจากสนิมจะลดลง

การกำหนดขนาดระบุของท่อเหล็กหล่อ จะไม่เหมือนกับท่อเหล็กกล้า โดยจะกำหนดตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (ID) ดังนั้นเมื่อทำการสั่งซื้อท่อเหล็กหล่อ ต้องระบุความหนาของผนังที่ต้องการและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก พร้อมไปกับขนาดระบุด้วย

2.5.9 ทองแดงและทองแดงผสม

ทองแดงและทองแดงผสม ส่วนมากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนไม่ได้ คุณสมบัติทางกลของทองแดงจะเปลี่ยนแปลงและแข็งแรงขึ้นได้โดยการขึ้นรูปเย็น ยกเว้นทองแดงเบอริลเรียม (beryllium) ที่สามารถชุบแข็งได้

ทองแดงผสมแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ทองเหลือง (brass) และบรอนซ์ (bronze)

ทองเหลือง เป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี แต่ทองเหลืองอาจมีส่วนผสมของดีบุกและตะกั่วปนอยู่ได้ นอกจากนี้อาจมีนิเกิลปนอยู่ได้ ซึ่งหากมีนิเกิลปนอยู่ในทองเหลืองมากกว่า 20% เรียกว่า เงินนิเกิล (nickel silver)

บรอนซ์ เป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับดีบุก แต่อย่างไรก็ตามบรอนซ์บางชนิดมีดีบุกผสมอยู่น้อยมากหรือไม่มีเลย แต่ก็ยังเรียกว่าบรอนซ์เพราะมีสีเหลืองบรอนซ์

ท่อทองแดงและท่อทองเหลืองที่มีใช้งานโดยทั่วไปผลิตออกมา 2 ชนิด คือ ชนิดแข็งแรงพิเศษและชนิดธรรมดา ขนาดตั้งแต่ 30 mm - 300 mm (1/8 in - 12 in) โดยมีความหนาผนังและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในคล้ายคลึงกับท่อเหล็กกล้า ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกที่มีขนาดท่อระบุเท่ากับท่อเหล็กกล้าจะมีขนาดเท่ากัน เนื่องจากท่อทองแดงและท่อทองเหลืองมีราคาแพงเมื่อเทียบกับท่อเหล็กกล้าที่มีขนาดเท่ากัน ดังนั้นการใช้งานจึงใช้งานบริเวณที่ต้องการอายุการใช้งานที่ยาวนาน นอกจากนี้ใช้เพื่อเป็นตัวนำความร้อนที่ดี

จากสภาพการใช้งานทางอุตสาหกรรมที่มีลักษณะแตกต่างกัน ท่อทองเหลืองที่ผลิตออกมาจึงมีประมาณทองแดงและสังกะสีที่ผสมอยู่แตกต่างกันไปตามคุณสมบัติที่ต้องการในการใช้งาน เช่น ท่อทองเหลืองแดง (red brass) มีส่วนผสมของทองแดง 85% และสังกะสี 15% ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติทางกลสูงกว่าทองแดง เป็นต้น

2.5.10 อะลูมิเนียมผสมเหนียว

อะลูมิเนียม เป็นโลหะที่ใช้มากเป็นอันดับสองรองจากเหล็กกล้า ประมาณว่าท่ออะลูมิเนียมที่มีใช้งานอยู่ในราว 1 ส่วน 3 ของปริมาณท่อเหล็กกล้า อะลูมิเนียมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากบรรยากาศต่าง ๆ ได้ดีมาก เพราะมีออกไซด์เคลือบผิวอยู่ตลอดเวลา โลหะผสมที่ผสมลงในอะลูมิเนียมจะมีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมแตกต่างกัน ยกเว้นกรดฮาโลเจน (halogen) และอัลคาไลเข้มข้น (strong alkalies) เป็นสารละลายสองชนิดที่กัดกร่อนอะลูมิเนียมได้ เพราะสารละลายนี้จะกำจัดออกไซด์ที่ผิวของอะลูมิเนียม ทำให้เนื้อแท้ของอะลูมิเนียมสัมผัสกับสารได้ สำหรับโลหะผสมที่มักใช้ผสมในอะลูมิเนียมเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่แตกต่างออกไป ได้แก่ ทองแดง แมงกานีส ซิลิกอน แมกนีเซียม และสังกะสี

อะลูมิเนียมเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี แต่เนื่องจากโมดูลัสความยืดหยุ่นของอะลูมิเนียมมีค่าประมาณหนึ่งในสามของเหล็กกล้า จึงมีความแข็งตึง (stiffness) น้อยกว่าเหล็กกล้า (มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างน้อยกว่า) และโค้งงอได้ง่ายกว่าเมื่อรับแรงเท่ากัน นอกจากนี้ความต้านแรงล้า (fatigue strength) ของอะลูมิเนียมไม่สูงนักจึงไม่ควรใช้รับแรงที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ

คุณสมบัติอื่น ๆ ของอะลูมิเนียมคือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียมมากกว่าเหล็กกล้า 1.5 เท่า และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอะลูมิเนียมมากกว่าเหล็กกล้า 5 เท่า นอกจากนี้อะลูมิเนียมไม่ทนต่อการสึกหรอ และเนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อความแข็งแรงของอะลูมิเนียม การใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงและความดันสูง จึงต้องมีการตรวจสอบโดยตลอดด้วยความระมัดระวัง

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกลของท่อเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ASTM

ชื่อวัสดุ	คุณสมบัติทางกล		อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (°C)	ลักษณะการใช้งาน
	ความเค้นคราก (gield stress) N/m^2	ความเค้นอันติมะ (Ultimate Stress) N/m^2		
A53 Seamless	210×10^6	336×10^6	600	ใช้งานทั่วไป
A 106B	245×10^6	420×10^6	600	ใช้งานที่ความดันสูงขึ้น
A 53	175×10^6	315×10^6	200	ท่อเชื่อมใช้งานทั่วไป
A 134	189×10^6	350×10^6	165	ท่อเชื่อมใช้งานทั่วไป
A 135	210×10^6	336×10^6	600	ท่อเชื่อมใช้งานทั่วไป
A 139	210×10^6	336×10^6	165	ท่อเชื่อมใช้งานทั่วไป
A 55 KC 60 Class 2	224×10^6	420×10^6	600	ท่อเชื่อมใช้งานที่ความดันสูงขึ้น

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของท่อเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ASTM

ชื่อวัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี (%)					
	C สูงสุด	Mn	Si	P สูงสุด	S สูงสุด	อื่น ๆ สูงสุด
A53 Seamless	-	-	-	0.048	-	-
A 106B	0.30	0.29 - 1.06	0.10 ต่ำสุด	0.048	0.058	-
A 53	-	-	-	0.08	-	-
A 134	0.25	-	-	0.04	0.05	-
A 135	-	-	-	0.05	0.06	-
A 139	-	0.30 - 1.00	-	0.04	0.05	-
A 55 KC 60 Class 2	0.24	0.80 สูงสุด	0.15 - 0.30	ดูข้อกำหนด		-

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกลของท่อเหล็กกล้าผสมต่ำ ASTM สำหรับใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

ชื่อวัสดุ	โลหะผสม	คุณสมบัติทางกล		อุณหภูมิใช้งานต่ำสุด (°C)	การบำบัดทางความร้อน
		ความเค้นดราก N/m^2	ความเค้นอันติมะ N/m^2		
A 333 Grade 1	CS	210×10^6	385×10^6	-45	ปรับสู่สภาพปกติ (normalized)
A 333 Grade 7	2 1/4 Ni	$245\ 10^6$	455×10^6	-70	ปรับสู่สภาพปกติ
A 333 Grade 3	3 1/2 Ni	$245\ 10^6$	455×10^6	-100	ปรับสู่สภาพปกติ
A 333 Grade 8	9 Ni	$490\ 10^6$	700×10^6	-195	ปรับสู่สภาพปกติ 2 ครั้ง

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของท่อเหล็กกล้าผสมต่ำ ASTM สำหรับใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

ชื่อวัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี (%)					
	C สูงสุด	Mn	Si	Ni	S สูงสุด	P สูงสุด
A 333 Grade 1	0.30	0.40-1.03	-	-	0.05	0.06
A 333 Grade 7	0.19	0.90 สูงสุด	0.13-0.32	2.03-2.57	0.04	0.05
A 333 Grade 3	0.19	0.31-0.64	0.18-0.37	3.18-3.82	0.05	0.05
A 333 Grade 8	0.13	0.90 สูงสุด	0.13-0.32	8.40-9.60	0.45	0.45

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางกลของท่อเหล็กกล้าผสมต่ำ ASTM สำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูง

ชื่อวัสดุ	โลหะผสม	คุณสมบัติทางกล		อุณหภูมิใช้งานต่ำสุด (°C)	การบำบัดทางความร้อน
		ความเค้นดราก N/m^2	ความเค้นอันติมะ N/m^2		
A 335 Grade P1	C½ Mo	210×10^6	385×10^6	600	อบปรับสภาพ
A 335 Grade P2	½-Cr½ -Mo	210×10^6	385×10^6	600	อบปรับสภาพ
A 335 Grade P12	1- Cr½ -Mo	210×10^6	420×10^6	665	อบปรับสภาพ
A 335 Grade P11	1 ¼ Cr ½ -Mo	210×10^6	420×10^6	665	อบปรับสภาพ
A 335 Grade P22	2 ¼ Cr ½ -Mo	210×10^6	420×10^6	665	อบปรับสภาพ
A 335 Grade P5	5- Cr ½ -Mo	210×10^6	420×10^6	665	อบปรับสภาพ
A 335 Grade P9	9- Cr 1 -Mo	210×10^6	420×10^6	665	อบปรับสภาพ

ตารางที่ 2.9 องค์ประกอบทางเคมีของท่อเหล็กกล้าผสมต่ำ ASTM สำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูง

ชื่อวัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี					
	C max	Mn	Si	Cr	Mo	S และ P
A 335 Grade P1	0.20	0.30-0.80	0.10-0.50	-	0.44-0.65	0.045
A 335 Grade P2	0.20	0.30-0.61	0.10-0.30	0.50-0.81	0.44-0.65	0.045
A 335 Grade P12	0.15	0.30-0.61	0.50 max	0.80-1.25	0.44-0.65	0.045
A 335 Grade P11	0.15	0.30-0.60	0.50-1.00	1.00-1.50	0.44-0.65	0.03
A 335 Grade P22	0.15	0.30-0.60	0.50 max	1.90-2.60	0.87-1.13	0.03
A 335 Grade P5	0.15	0.30-0.60	0.50 max	4.00-6.00	0.45-0.65	0.03
A 335 Grade P9	0.15	0.30-0.60	0.25-1.00	8.00-10.0	0.90-1.10	0.03

ตารางที่ 2.10 ชนิดและองค์ประกอบระบุของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสตินิติก สำหรับใช้งานกับสภาวะที่มีการกัดกร่อน

ชื่อวัสดุตาม AISI	องค์ประกอบระบุ
304	0.08% max C 19-Cr 10 Ni
304 L	0.08% max C 19-Cr 10 Ni
321	ไททาเนียมที่เสถียรภาพ 18-Cr 11-Ni
347	โคลัมเนียมที่เสถียรภาพ 18-Cr 11-Ni
316	18 Cr 12-Ni 2 -1/2-Mo
316 L	คาร์บอนต่ำพิเศษ 18-Cr 12-Ni 2.5 Mo
317	18.Cr 12-Ni 3.5-Mo

ตารางที่ 2.11 ชนิดและองค์ประกอบระบุของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสตินิติก สำหรับใช้งานกับสภาวะที่ทนต่อความร้อน

ชื่อวัสดุตาม AISI	องค์ประกอบระบุ
304 H	0.04-0.10-C 19-Cr 10-Ni
321 H	0.40-0.10-C ไททาเนียมที่เสถียรภาพ 18/8
347 H	0.40-0.10-C ไททาเนียมที่เสถียรภาพ 18/8
316 H	0.04-0.10-C 18-Cr 12-Ni 2 1/2-Mo
309	23-Cr 12-Ni
310	25-Cr 20-Ni

ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุระบบท่อพลาสติกที่ใช้งานทั่วไป

คุณสมบัติทางกายภาพ	วิธีทดสอบ (ASTM)	ABS	PVC	CPVC	PB	PE	PPRO ชนิด 1	PVDF	อิฟ็อกซีเสริมแก้ว	โพลิเอสเตอร์ เสริมแก้ว	ไวนิลเอสเตอร์เสริมแก้ว
ความถ่วงจำเพาะ	D-792	1.04	1.38	1.55	0.92	0.95	0.91	1.76	1.90	1.60	1.90
การดูดซับน้ำ (% ใน 24 ชั่วโมงที่ 23°C)	D-570	0.3	0.05	0.05	0.01	0.01	0.02	0.05	0.03	0.03	0.03
ความต้านทานแรงดึง (MPa ที่ 23°C)	D-638 D-2105	31.0	49.7	57.9	26.2	22.8	34.5	41.4	241.4[1] 62.1[2]	241.4[1] 62.1[2]	241.4[1] 62.1[2]
โมดูลัสความยืดหยุ่น (MPa ที่ 23°C)	D-638 D-2105	2069	2897	2897 "	2414	828	1172	1448	9655	9655	9655
ความต้านทานการโค้งงอ (MPa)	D-790	69	100	106	21	21	67	48	138+	138+	138+
ความต้านทานการกระแทก (N/mm notch)	D-256	0.033	0.004	0.016	0.041	0.038	0.011	0.021	0.136+	0.136+	0.136+
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ($m/m/^{\circ}C \times 10^{6}$)	D-696	90.0	54.0	68.4	129.6	140.4	99.0	142.2	10.8[1] 25.2[2]	10.8[1] 25.2[2]	10.8[1] 25.2[2]
สภาพนำความร้อน (W/m.k)	C-177	0.196	0.102	0.435	0.218	1.015	0.305	0.551	0.261	0.189	0.189
ความต้านทานความร้อน ณ การระบายต่อเนื่อง (°C)	-	82	66	99	99	71	82	1.38	149	120	121

หมายเหตุ 1. เส้นตามรอบวง (Hoop) 2. ตามแนวแกน (Axia)

ตารางที่ 2.13 ความต้านทานทางเคมีของวัสดุระบบท่อพลาสติกท่อกลุ่มสารเคมีบางชนิด

กลุ่มสารเคมี	PVC	CPVC	PP	PVDF	PE	RTR อิพ็อกซี	RTR ไวนิล/ โพลิเอสเตอร์
สารอนินทรีย์							
กรดเจือจาง	R	R	R	R	R	R	R
กรดเข้มข้น	R	R	L	R	L	NR	R
กรดออกไซด์	NR	NR	NR	R	NR	NR	L
ด่าง	R	R	R	R	R	R	L
ก๊าซกรด	R	R	R	R	R	NR	L
ก๊าซแอมโมเนีย	R	R	R	R	R	R	R
ก๊าซฮาโลเจน	L	L	L	R	L	NR	R
เกลือ	R	R	R	R	R	R	R
เกลือออกไซด์	L	L	R	R	R	NR	R
สารอินทรีย์							
กรด	R	R	R	R	R	L	R
กรดแอนไฮดริด	L	L	L	L	L	NR	NR
แอลกอฮอล์	R	R	R	R	L	L	L
เอสเตอร์/คีโตน/ อิเธอร์	NR	NR	L	L	L	L	L
ไฮโดรคาร์บอน อะลิพาติค	L	L	L	R	L	L	L
ไฮโดรคาร์บอน อะโรแมติค	NR	NR	NR	R	NR	L	L
ไฮโดรคาร์บอน ฮาโรลเนต	L	L	NR	L	NR	L	L
ก๊าซธรรมชาติ	R	R	R	R	R	R	R
ก๊าซสังเคราะห์	R	R	L	R	L	L	L

หมายเหตุ : R = ใช้ได้ดี, L = ใช้ได้จำกัด, NR = ใช้ได้ไม่ดี

ตารางที่ 2.14 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุระบบท่อพลาสติกบางชนิด

ชนิดของวัสดุท่อ	การประยุกต์ใช้งาน
PVC	ลักษณะท่อที่ใช้จะมีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนและขัดสีที่ดี และสามารถต้านทานต่อกรดและด่างได้ อุณหภูมิใช้งานสูงสุดคือ 60°C
CPVC	ใช้งานได้ทำนองเดียวกับท่อ PVC แต่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าคือในราว 100°C อย่างไรก็ตามราคาสูงกว่าท่อ PVC ประมาณ 2 เท่า
PE	ท่อ PE ที่ใช้งานโดยมากคือท่อ PE ความหนาแน่นสูงที่เรียกว่า HDPE เป็นท่อที่นิยมใช้งานกับระบบขนส่ง เช่น ก๊าซ และน้ำ เนื่องจากมีสารปรุงแต่งที่ทำให้ทนทานต่อการแผ่รังสีของแสงอัลตร้าไวโอเลต นอกจากนี้ยังใช้กับระบบบำบัดน้ำเสีย
PP	เป็นวัสดุท่อที่มีสภาพต้านทานทางเคมีที่ดีมาก มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน PE แต่มีความต้านทานต่ออาหารที่มีน้ำและไขมันเป็นส่วนผสมได้ดีกว่า ไม่ทำให้กลิ่นและรสใด ๆ ไอน้ำและออกซิเจนซึมผ่านได้ต่ำ จึงเหมาะกับอุตสาหกรรมอาหารและยา
PB	เป็นวัสดุท่อ ที่ทนต่อความต้านทานแรงดึงได้ดีกว่าท่อเทอร์โมพลาสติกส่วนใหญ่ และใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า PVC คือ อยู่ในช่วง-23 ถึง 93°C ในระบบท่อที่มีความดัน โดยท่อ PB สามารถใช้งานได้ดีทั้งในระบบท่อน้ำร้อนและน้ำเย็น และมีความต้านทานต่อการขัดสี ทำให้สามารถใช้งานได้ดีกับเส้นท่อที่ใช้ในการขนถ่ายสเลอรี่ (slurry)
ABS	ท่อ ABS มีความทนทาน ความแข็งแรง และความแข็งตึง (stiffness) จึงใช้งานได้ดีในระบบท่อที่เกี่ยวข้องกับระบบการระบายน้ำ ระบบน้ำเสีย และระบบระบายอากาศ นอกจากนี้วัสดุ ABS ที่ผสมพิเศษสามารถนำมาใช้เป็นท่อลมอัดได้ด้วย
อีพ็อกซี่เสริมแก้ว	เป็นวัสดุท่อที่ใช้งานกรณีที่มีผลระทบทางเคมีที่รุนแรง โดยมีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนได้เป็นเยี่ยม และสามารถใช้ขนถ่ายของไหลที่มีอุณหภูมิสูงได้ถึงประมาณ 150°C
โพลิเอสเตอร์เสริมแก้ว	ใช้งานในสภาวะที่มีการกัดกร่อนรุนแรง อุณหภูมิใช้งานอยู่ในช่วงไม่เกิน 90-105°C
ไวนิลเอสเตอร์เสริมแก้ว	มีคุณสมบัติด้านทานเคมีได้ดี ใช้งานอย่างแพร่หลายกว่า 2 ชนิดข้างต้น

เนื่องจากบริษัทผู้ผลิตแต่ละรายผลิตโลหะผสมอะลูมิเนียมตามมาตรฐานของตนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีอัตราส่วนผสมที่หลากหลายมาก การใช้งานจึงควรตรวจสอบคุณสมบัติเฉพาะต่าง ๆ กับรายการสินค้าและปรึกษาบริษัทผู้ผลิต

2.5.11 ท่อพลาสติก

วัสดุท่อนอกตระกูลโลหะหรือที่เรียกว่าอโลหะ พลาสติกถือว่าเป็นวัสดุท่ออโลหะที่ใช้งานอยู่มากที่สุดในอุตสาหกรรมทั้งหลาย ในปัจจุบันท่อพลาสติกเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในระบบงานท่อทั้งในระบบท่อน้ำทิ้ง ในระบบท่อสุขภัณฑ์ และในระบบท่อทางอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาไม่แพงนักเมื่อเทียบกับท่อเหล็ก หรือท่อโลหะอื่น ๆ ทั้งมีน้ำหนักเบาทำให้ลดปัญหาเรื่องโครงสร้าง มีการติดตั้งที่ง่ายกว่า และไม่มีปัญหาเรื่องการผุกร่อน และการกัดกร่อนเหมือนท่อโลหะ รวมทั้งมีสภาพต้านทานทางเคมีสูง ยกเว้นการทนทานต่อสภาวะอุณหภูมิสูงและความดันสูงที่ท่อพลาสติกด้อยกว่าท่อโลหะ

สำหรับวัสดุพลาสติกที่นำมาผลิตท่อสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) และชนิดเทอร์โมเซ็ท (thermoset) ชนิดเทอร์โมพลาสติก เรซิน เป็นเรซินพลาสติกที่มีคุณสมบัติที่สามารถอ่อนตัวได้เมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นตัวลง โดยสามารถกระทำได้ซ้ำ ๆ กัน โดยที่มีคุณสมบัติของเรซินไม่เปลี่ยนแปลงจึงเป็นพลาสติกที่สามารถฟื้นฟูสภาพนำมาใช้ใหม่ได้ (Recycle) วัสดุท่อของพลาสติกประเภทนี้คือ

- โพลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride) หรือพีวีซี (PVC)
- คลอรีเนตโพลิไวนิลคลอไรด์ (Chlorinated polyvinyl chloride) หรือ ซีพีวีซี (CPVC)
- โพลิเอทิลีน (Polyethylene) หรือ พีอี (PE)
- โพลิโพรพิลีน (Poly propylene) หรือ พีพี (PP)
- โพลิบิวทิลีน (Polybutylene) หรือ พีบี (PB)
- อะคริโลไนตริลบิวตาไดอีนสไตรีน (Acrylonitrile-butadience styrene) หรือ เอบีเอส (ABS)
- ฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbons) ต่าง ๆ

ชนิดเทอร์โมเซ็ท เป็นพลาสติกที่มีความแข็งไม่สามารถยืดหยุ่นได้ และเมื่อบ่มตัวเสร็จแล้วหลังการผลิตไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก สำหรับวัสดุท่อที่ใช้คือ ท่อเทอร์โมเซ็ทติงเรซินเสริมความแข็งแรง (Resinforced thermosetting resin pipe) หรือกลุ่มท่ออาร์ทีอาร์พี (RTRP) ต่าง ๆ ได้แก่ อีพ็อกซีเสริมแก้ว (Glass-reinferced epoxy) โพลิเอสเตอร์เสริมแก้ว (Glass-resinforce polyester) ไวนิลเอสเตอร์เสริมแก้ว (Glass-resinferced vinylester) เป็นต้น

ตารางที่ 16 ถึง 18 เป็นตารางแสดงคุณสมบัติทางกายภาพ ความต้านทานทางเคมี และการประยุกต์ใช้งานของวัสดุระบบท่อพลาสติก ตามลำดับ

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.เฉลิมพล ลีลาผาติกุล, (2540): การวิเคราะห์และควบคุมปัจจัยที่มีผลกระทบทางคุณภาพสำหรับอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดและควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของยางรถยนต์โดยใช้การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในกระบวนการผลิต (Failure Mode and Effect Analysis:FMEA) มาวิเคราะห์และควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิตรถยนต์ โดยเริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิตและค้นหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อข้อบกพร่องทุกขั้นตอนการผลิต โดยอาศัยแผนภาพแสดงเหตุและผล แผนภาพความสัมพันธ์และแผนภาพต้นไม้เป็นเครื่องมือช่วยในการค้นหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อข้อบกพร่องนั้น จากนั้นให้ผู้เชี่ยวชาญในการผลิตนั้นมาวิเคราะห์เพื่อประเมินความรุนแรงของข้อบกพร่อง การเกิดข้อบกพร่อง และการควบคุมกระบวนการ เพื่อคำนวณหาค่าดัชนี (Risk Priority Number: RPN) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความเสี่ยงที่เกิดข้อบกพร่อง โดยค่า RPN ยิ่งมากจะหมายถึงมีความเสี่ยงที่เกิดข้อบกพร่องสูง โดยภายหลังจากการดำเนินการ ทำให้ความเสี่ยงลดลง

2. นิพนธ์ ชวนะปราณี, (2543) : การประยุกต์ใช้เทคนิค FMEA และ FTA ในงานการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์สายไฟฟ้า งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเพื่อกำหนดและควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการออกแบบและการผลิตสายไฟฟ้าประเภททนไฟ โดยการประยุกต์ใช้ FTA และ FMEA ในการออกแบบและกระบวนการผลิตเป็นเครื่องมือคุณภาพหลัก จากการดำเนินงานพบว่าข้อบกพร่องต่างๆ ของทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน โดยจำนวนข้อบกพร่องที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FMEA มีจำนวนมากกว่าและครอบคลุมทุกหัวข้อของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTA ในการปรับปรุงแก้ไขและควบคุมปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อการออกแบบและการผลิตนั้นจึงอ้างอิงมาผลมาจาก FMEA เป็นหลัก ผลที่ได้จากการดำเนินงานคือ ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติสอดคล้องกับความต้องการของลูกค้า

3. พิศิษฐ์ เจริญกิจวิวัฒน์, (2541): การปรับปรุงคุณภาพสินค้าสำหรับลูกค้าในกรณีศึกษาของโรงงานประกอบต่อสายเครื่องควบคุมไฟฟ้าและขั้วต่อปลายไฟฟ้างานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของสายเครื่องควบคุมไฟฟ้า เพื่อที่จะบรรลุความต้องการของลูกค้าในโรงงานประกอบชิ้นส่วนอิเล็คโทรนิกส์ โดยเน้นในการปรับปรุงด้านกิจกรรมในโรงงาน เริ่มจากการวิเคราะห์เครื่องมือการควบคุมคุณภาพ หลังจากนั้นจะนำ FMEA มาทดลองใช้ในการป้องกัน ลด และกำจัดข้อผิดพลาดที่เคยเกิดขึ้น และข้อผิดพลาดที่มีโอกาสจะเกิดขึ้นสำหรับสินค้าที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยเริ่มค้นหาข้อมูลเกณฑ์

คุณภาพจากคำร้องของลูกค้าโดยใช้พาเรโต ปรับปรุงแผนการสุ่มตัวอย่างในระหว่างการดำเนินงาน FMEA จากผลการดำเนินงานคำร้องเรียนจากลูกค้าได้ลดลงร้อยละ 43.76

4. อรรถพล ฤทธิภักดี, (2544): การปรับปรุงคุณภาพสำหรับกระบวนการพ่นสีชิ้นส่วนพลาสติกในอุตสาหกรรมรถยนต์วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพสำหรับกระบวนการพ่นสีชิ้นส่วนพลาสติกในอุตสาหกรรมรถยนต์ให้เหมาะสม ซึ่งผลจากการศึกษาในครั้งนี้ทำให้เปอร์เซ็นต์ของเสียในกระบวนการผลิตลดลง ข้อร้องเรียนจากลูกค้าลดลง พร้อมกับมีวิธีการและมาตรฐานในการทำงานเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาซ้ำโดยใช้เทคนิค Seven new QC tools บางเครื่องมือ เช่นแผนภาพความสัมพันธ์ของปัญหา และใช้เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบต่อคุณภาพสำหรับกระบวนการผลิต (PFMEA)เพื่อแก้ไขและปรับปรุงกระบวนการผลิต

5. ธวัชชัย นาวาล้ำเลิศ, (2542) การประกันคุณภาพสำหรับการบริหารโครงการของโรงบำบัดน้ำงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการสร้างระบบประกันคุณภาพสำหรับการบริหารโครงการของโรงบำบัดน้ำ โดยปัญหาที่พบในโครงการประกอบไปด้วย ปัญหาคุณภาพของงานที่ไม่ดีพอ ปัญหาการเสร็จงานล่าช้า ปัญหาความไม่พอใจของลูกค้าได้มีการจัดตั้งกลุ่มบุคคลที่มีประสบการณ์รวบรวมความคิดและถกปัญหากันอย่างเปิดเผย พร้อมเสนอแนะข้อคิดที่เกี่ยวข้องกับปัญหาและมีการใช้แผนภูมิก้างปลาเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุที่เป็นไปได้ของแต่ละปัญหาที่เกิดขึ้นในโครงการตัวอย่างเพื่อสร้างระบบประกันคุณภาพ ในการศึกษานั้นจะวิเคราะห์ความผิดพลาดที่เป็นไปได้ของแต่ละกิจกรรม พร้อมทั้งบอกผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดนั้น และเสนอแนะวิธีการดำเนินงานเพื่อป้องกันปัญหานั้นๆ หรือเราเรียกว่า Failure Mode and Effect Analysis ผลที่ได้จากการวิจัย มีการกำหนดกิจกรรมคุณภาพทั้งขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพ การสร้างเอกสารเพื่อช่วยในการตรวจสอบหรือเพื่อช่วยเตือนความจำในระหว่างการดำเนินงาน