บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินแก้ปัญหาปรับปรุงกระบวนการผลิต สิ่งที่จำเป็นต้องใช้ในการตัดสินใจคือข้อมูล (Data) แต่ข้อมูลดังกล่าวจะไม่มีประโยชน์ใดๆ เลย ถ้าข้อมูลไม่สามารถแปลงมาเป็นสารสนเทศ (Information) ที่ดีพอต่อการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ การที่จะได้มาซึ่งข้อมูลที่มีสารสนเทศครบถ้วนและน่าเชื่อถือได้นั้น จะต้องมีการวางแผนการออกแบบการทดลองอย่างรัดกุม เพื่อป้องกันไม่ให้ปัจจัยภายนอกที่ไม่ต้องการเข้าไปผสมอยู่ในข้อมูลที่ต้องการศึกษา ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการตัดสินใจในหลักการและรายละเอียดของการออกแบบการทดลองให้ถ่องแท้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

2.1 การควบคุมคุณภาพ [5]

ความหมายของการควบคุมคุณภาพ จากพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2542 ได้ให้ความหมายของคำว่า "ควบคุม" ว่าหมายถึง ดูแล กำกับดูแล ดังนั้นการควบคุมคุณภาพจึงหมายถึงการกำกับดูแลเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณภาพ

ISO 8402: 1994 ได้กำหนดนิยามของการควบคุมคุณภาพว่า กิจกรรมและเทคนิคเชิงปฏิบัติการที่ใช้เพื่อให้บรรลุผลตามความต้องการด้านคุณภาพ โดย ISO 8402 ได้อธิบายเพิ่มเติมไว้ว่า การควบคุมคุณภาพจะประกอบไปด้วยกิจกรรมและเทคนิคเชิงปฏิบัติการที่มุ่งเน้นทั้งการเฝ้าพินิจ กระบวนการและกำจัดสาเหตุของสมรรถนะที่แสดงความไม่พึงพอใจตามวงจรผลิตภัณฑ์เพื่อให้ได้ประสิทธิผลเชิงเศรษฐศาสตร์สูงที่สุด

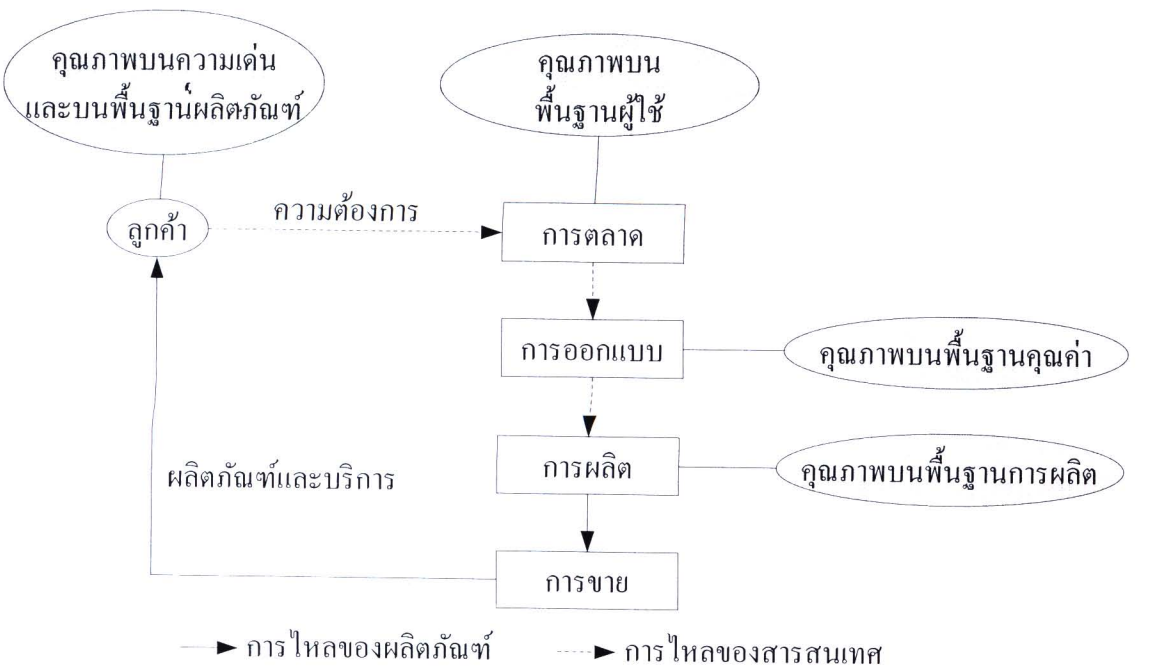
สมาคมคุณภาพแห่งอเมริกา (ASQ, 1996) ได้ให้นิยามที่ใกล้เคียงกับ ISO 8402 โดยให้คำนิยามว่า กิจกรรมและเทคนิคเชิงปฏิบัติการที่ทำให้ได้มาซึ่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือบริการที่ตอบสนองต่อความต้องการที่กำหนด โดยรวมถึงการใช้กิจกรรมและเทคนิคดังกล่าวด้วย
สำหรับอุตสาหกรรมญี่ปุ่น สำนักมาตรฐานแห่งประเทศญี่ปุ่นได้ให้นิยามตาม JIS Z 8101-1981 ไว้ว่า ระบบที่ประกอบด้วยวิถีทางทั้งหมดที่ใช้เพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์อย่างคุ้มค่าเพื่อให้ตรงกับความต้องการด้านคุณภาพของผู้ซื้อ

ดังนั้นจากนิยามการควบคุมคุณภาพที่ได้กล่าวมานี้ จะพบว่า การควบคุมคุณภาพมีลักษณะสำคัญดังนี้คือ

1. การกำหนดความต้องการด้านคุณภาพของลูกค้า ซึ่งต้องเริ่มต้นจากลูกค้าภายนอกก่อนแล้วแปรให้เป็นความต้องการของลูกค้าภายใน

2. การกำหนดตัววัดหรือจุดประสงค์ของการควบคุมคุณภาพ ที่เน้นความมีประสิทธิผลทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้น การควบคุมคุณภาพจึงเป็นการตอบสนองต่อความต้องการด้านคุณภาพของลูกค้าอย่างคุ้มค่ามากที่สุด

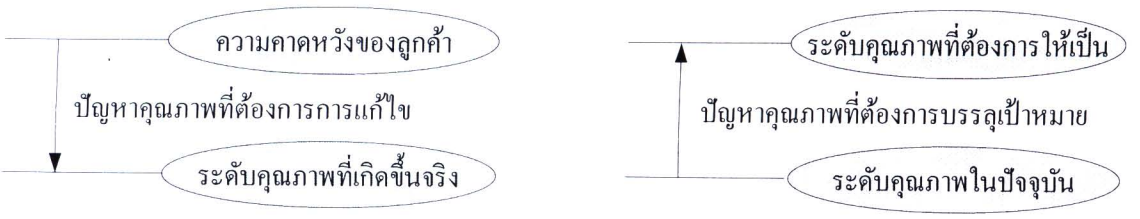
3. การกำหนดกิจกรรมและเทคนิคการควบคุมคุณภาพ ดังนั้นการควบคุมคุณภาพจึงเป็น "กระบวนการ" ที่ดำเนินการทั้งในส่วนกระบวนการหลักของกระบวนการทางธุรกิจ (ตามวงจรของผลิตภัณฑ์)แสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 และในส่วนของกระบวนการสนับสนุนกระบวนการดังกล่าว



รูปที่ 2.1 คุณภาพในมุมมองของวงจรผลิตภัณฑ์ [5]

2.2 ปัญหาคุณภาพ [5]

จากนิยามคุณภาพว่าเป็นคุณลักษณะโดยรวมของผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองต่อความคาดหวังของลูกค้า ดังนั้น อาจกำหนดความหมายของปัญหาคุณภาพได้ว่า เป็นความเบี่ยงเบนของคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์หรือระดับคุณภาพที่เกิดขึ้นจากค่าความคาดหวังของลูกค้า ซึ่งอาจจะเรียกปัญหาลักษณะอย่างนี้ว่าปัญหาคุณภาพที่ต้องการแก้ไข นอกจากนี้อาจจะนิยามปัญหาคุณภาพได้อีกประการหนึ่งว่าเป็นความแตกต่างของคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์หรือระดับคุณภาพในปัจจุบันกับระดับคุณภาพที่ต้องการให้เป็น ซึ่งอาจจะเรียกปัญหาลักษณะนี้ว่าปัญหาคุณภาพที่ต้องการบรรลุเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 2.2



(ก) ปัญหาคุณภาพที่ต้องการการแก้ไข (ข) ปัญหาคุณภาพที่ต้องการบรรลุเป้าหมาย

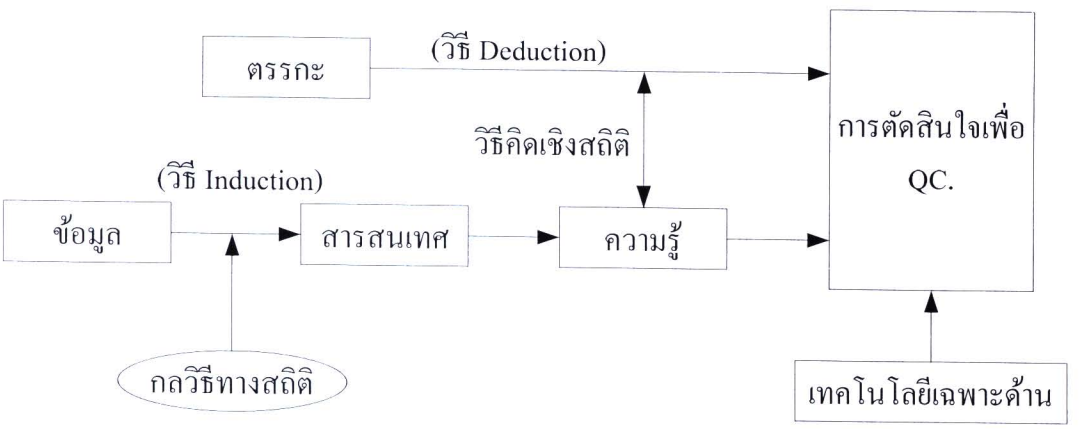
รูปที่ 2.2 ประเภทของปัญหาคุณภาพ [5]

ในการนิยามปัญหาคุณภาพ มีความจำเป็นอย่างยิ่งต้องทำความเข้าใจกับองค์ประกอบต่อไปนี้

1. กระบวนการคืออะไร โดยอาจจะพิจารณาได้จากใบพรรณนาลักษณะงาน (JD: job description) หรือภาระงานที่ได้รับหมอบหมาย
2. ผลิตภัณฑ์คืออะไร ซึ่งได้จากการนิยามผลลัพธ์ของกระบวนการหรือกิจกรรมที่รับผิดชอบ
3. ลูกค้าคือใคร ในการควบคุมคุณภาพจะให้ความสนใจกับลูกค้าภายในเท่านั้น และถ้าหากลูกค้าสนใจต่อการควบคุมคุณภาพเชิงเทคนิคก็ควรให้ความสนใจต่อลูกค้าที่เป็นผู้รับผลิตภัณฑ์ต่อจากเรา แต่ถ้าหากสนใจต่อการควบคุมภาพเชิงการจัดการก็ควรให้ความสนใจต่อลูกค้าที่เป็นผู้บังคับบัญชาโดยตรง
4. ความคาดหวังของลูกค้าคืออะไร การทำความเข้าใจกับความคาดหวังของลูกค้าจะทำให้ทราบถึงหัวข้อควบคุมและเป้าหมายสำหรับการควบคุมคุณภาพ ซึ่งลูกค้าประเภทผู้รับผลิตภัณฑ์ต่อจากเราจะคาดหวังในคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่สามารถตอบสนองต่อความคาดหวังในผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย (End product) ของผู้ซื้อ ผู้ใช้ สำหรับลูกค้าประเภทผู้บังคับบัญชาจะคาดหวังในความมีประสิทธิผลและประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์
5. ระดับคุณภาพที่เกิดขึ้นจริงคืออะไร จากระบบการวัดและประเมินผลจะทำให้ทราบถึงระดับคุณภาพที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับเป้าหมายหรือระดับความคาดหวังของลูกค้าเพื่อการนิยามปัญหาคุณภาพที่ต้องการแก้ไขได้อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ต้องการนิยามปัญหาคุณภาพที่ต้องการบรรลุเป้าหมาย จะอาศัยองค์ประกอบเดียวกันกับข้างต้น แต่จะแตกต่างกันตรงที่ต้องเริ่มต้นจากการทำความเข้าใจในระดับคุณภาพที่เกิดขึ้นจริงในปัจจุบันก่อน แล้วจึงทำความเข้าใจกับสถานการณ์ที่แสดงความคาดหวังของลูกค้า เพื่อคาดการณ์ความคาดหวังของลูกค้าสำหรับกำหนดเป็นระดับเป้าหมายคุณภาพที่ต้องการจะให้บรรลุ

2.3 การใช้หลักการทางสถิติในการแก้ไขปัญหาคุณภาพ [4]

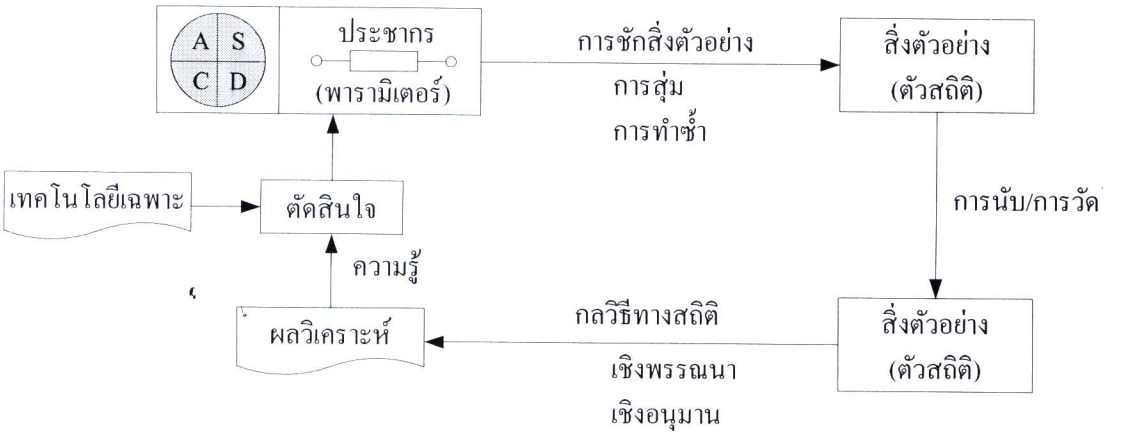
ในการแก้ไขปัญหาสามารถดำเนินการได้ 2 แนวทางคือแนวทางแรกเรียกว่า Deductive เป็นการแก้ไขปัญหาเชิงทฤษฎีกล่าวคือเมื่อมีการเผชิญกับปัญหาแล้วจะมีการพิจารณาจากเหตุและผล แล้วจะสรุปเข้าหาข้อสรุปโดยทันที และแนวทางที่สอง เรียกว่า Inductive จะเป็นวิธีอนุมานหมายถึงความพยายามอธิบายด้วยเหตุและผล ซึ่งมักจะใช้แก้ปัญหาในเชิงปฏิบัติการ โดยการแบ่งเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหาออกเป็นขั้นตอนย่อย และเมื่อเผชิญกับปัญหาก็พยายามรวบรวมผลการดำเนินงานที่มีปัญหาในรูปข้อมูล ประกอบกับการสังเกตการณ์ แล้วจากนั้นจะทำการสร้างสมมุติฐานและทดสอบสมมุติฐานด้วยหลักฐานอ้างอิงและเมื่อผ่านขั้นตอนการพิสูจน์และทวนสอบแล้วว่าวิธีการแก้ปัญหามีความถูกต้องจึงมีการดำรงรักษาไว้ด้วยการทำให้เป็นมาตรฐาน ดังนั้นจุดเด่นของการแก้ปัญหาแบบ Inductive นี้คือความเป็นระบบและมีเหตุผลประกอบให้ผลที่น่าเชื่อถือ ซึ่งสามารถแสดงกระบวนการทางสถิติที่ใช้ในการแก้ปัญหาจากที่ได้กล่าวมาแล้วดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการทางสถิติที่ใช้ในการแก้ปัญหา [4]

สถิติ (Statistics) หมายถึง ศาสตร์ของการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเป็นศาสตร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการผันแปรที่เกิดขึ้น ในการควบคุมและปรับปรุงคุณภาพนั้น มีความจำเป็นต้องตัดสินใจด้วยข้อเท็จจริง (Management by fact) เพื่อการสืบค้นหาข้อเท็จจริงในการสร้างองค์ความรู้ โดยอาศัยค่าความผันแปร (Variation) หรือวิธีคิดเชิงสถิติมาช่วยในการตัดสินใจ ซึ่งความรู้ที่ได้มาจากข้อเท็จจริงนี้อาจจะได้จากตรรกะ (Logic) ซึ่งหมายถึงความเป็นเหตุเป็นผลต่อกันด้วยกฎธรรมชาติ หรือจากการสืบค้นข้อเท็จจริงจากข้อมูลด้วยกลวิธีทางสถิติ ในการตัดสินใจทางสถิติ จะต้องเริ่มต้นจากการนิยามถึงสิ่งที่ต้องการจะตัดสินใจ ซึ่งอาจอยู่ในรูปสิ่งของ (Object) หรือประเด็น (Subject) ก็ได้ และจะเรียกสิ่งที่รวบรวมทั้งหมดดังกล่าวว่า “ประชากร (Population)” โดยประชากรอาจจะอยู่ในรูปของลอต (Lot) หรือกระบวนการ (Process) และจะเรียกคุณลักษณะเชิง

ตัวเลขของประชากรว่า "พารามิเตอร์ (Parameter)" โดยค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการตัดสินใจในทางสถิติต้องเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าเสมอ ซึ่งได้จากการทำให้กระบวนการเป็นมาตรฐานหรือ S-D-C-A โดยพารามิเตอร์ของประชากรนี้อาจแบ่งออกได้ 2 ชนิดคือ เชิงผันแปร (Variable) และเชิงแอตทริบิวต์ (Attributes) ซึ่งสามารถแสดงกระบวนการตัดสินใจทางสถิติได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการตัดสินใจทางสถิติ [4]

ในกระบวนการตัดสินใจทางสถิติ จะต้องมีการเก็บสิ่งตัวอย่างให้เป็นตัวแทนของประชากรโดยอาศัยหลักการของการสุ่ม (Randomization) และการทำซ้ำ (Replication) โดยการสุ่มจะเป็นกลไกสำคัญในการกระจายออกอย่างสมดุล (Balance out) สำหรับผลจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ในประชากร สำหรับการทำซ้ำจะเป็นกลไกในการเฉลี่ยออก (Average out) ผลจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ในสิ่งตัวอย่าง ดังนั้น การสุ่มและการทำซ้ำจึงเป็นกลไกสำคัญที่จะทำให้ได้สิ่งตัวอย่างที่เป็นตัวแทนที่ดีของประชากรในการวิเคราะห์เพื่อการตัดสินใจเกี่ยวกับประชากรได้ และจะเรียกคุณลักษณะเชิงตัวเลขที่สนใจของสิ่งตัวอย่างว่า "ตัวสถิติ (Statistic)"

2.4 ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) [8]

แผนผังสาเหตุและผลเป็นแผนผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา (Problem) กับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น (Possible Cause) เราอาจคุ้นเคยกับแผนผังสาเหตุและผลในชื่อของ "ผังก้างปลา (Fish Bone Diagram)" เนื่องจากหน้าตาแผนภูมิมีลักษณะคล้ายปลาที่เหลือแต่ก้าง หรือหลายๆคนอาจรู้จักในชื่อของแผนผังอิชิกาว่า (Ishikawa Diagram) ซึ่งได้รับการพัฒนาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1943 โดย ศาสตราจารย์คาโอรุ อิชิกาว่า แห่งมหาวิทยาลัยโตเกียว ผังแสดงเหตุและผล หรือถ้าเรียกเป็นภาษาอังกฤษอาจจะใช้ตัวย่อว่า CE Diagram ซึ่งมีนิยามปรากฏในมาตรฐานของญี่ปุ่น หรือ JIS Standards (Japanese Industrial Standards) ในมาตรฐาน JIS ได้ระบุนิยามของ CE Diagram ไว้

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 28 มี.ค. 47
เลขทะเบียน 247084
เลขเรียกหนังสือ

ดังนี้คือ ผังที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางคุณภาพกับปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง คำอธิบายคุณสมบัติหรือคุณลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristics) คือ ผลที่เกิดขึ้นจากเหตุซึ่งก็คือปัจจัยต่างๆที่เป็นต้นเหตุของคุณลักษณะอันนั้นหรืออาจจะกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นแผนผังที่ใช้ในการวิเคราะห์ค้นหาสาเหตุต่างๆว่ามีอะไรบ้างที่มาเกี่ยวข้องกัน สัมพันธ์ต่อเนื่องกันอย่างไรจึงทำให้ผลปรากฏตามมาในขั้นสุดท้ายโดยวิธีการระดมความคิดอย่างเป็นอิสระของทุกคนในกลุ่มกิจกรรมด้านการควบคุมคุณภาพ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

2.4.1โครงสร้างของผังก้างปลา

ผังก้างปลาหรือผังแสดงเหตุและผลประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนโครงกระดูกที่เป็นตัวปลา ซึ่งได้รวบรวมปัจจัยอันเป็นสาเหตุของปัญหาและส่วนหัวปลา ที่เป็นข้อสรุปของสาเหตุที่กลายเป็นตัวปัญห่า โดยตามความนิยมจะเขียนหัวปลาอยู่ทางขวามือและตัวปลา (หางปลา) อยู่ทางซ้ายมือเสมอ การสร้างผังแสดงเหตุและผลที่จะเอื้อประโยชน์ต่อการแก้ปัญหาได้จริงๆนั้นไม่ใช่เรื่องง่าย ผู้ที่สามารถสร้างผังก้างปลาได้อย่างถูกต้องคือผู้ที่มีโอกาสแก้ปัญหาทางคุณภาพได้อย่างถูกต้องเช่นกัน

2.4.2 ประโยชน์ของการใช้ผังก้างปลา

1. ผังนี้ใช้เป็นเครื่องมือในการระดมความคิดจากสมองของทุกคนที่เป็นสมาชิกกลุ่มคุณภาพอย่างเป็นหมวดหมู่ซึ่งได้ผลมากที่สุด
2. แสดงให้เห็นสาเหตุต่างๆของปัญหาของผลที่เกิดขึ้นที่มีมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปมสำคัญที่จะนำไปปรับปรุงแก้ไข
3. แผนผังนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆได้มากมาย ทั้งในหน้าที่การงาน สังคม แม้กระทั่งชีวิตประจำวัน

2.5 การวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากลักษณะข้อบกพร่อง

(FMEA: Failure Mode and Effect Analysis) [8]

FMEA ย่อมาจากคำว่า Failure Mode and Effect Analysis แปลว่า “การวิเคราะห์คุณลักษณะของความเสียหายและผลกระทบที่ตามมา” ซึ่งในปัจจุบันนี้หลายๆบริษัทได้นำหลักการ FMEA ไปใช้ในการปรับปรุงวิธีการทำงานตั้งแต่ การออกแบบ การผลิต และการบริการ เป็นต้น หลักการ FMEA ได้ถูกพัฒนาโดยหน่วยงานอากาศยานทางทหารของสหรัฐอเมริกา (ได้แก่กองทัพอากาศ กองทัพเรือ องค์การ NASA) ตั้งแต่ทศวรรษที่ 60 (ระหว่าง ค.ศ. 1960 - 1970) จากนั้นได้มีการประยุกต์วิธีการ FMEA ไปยังบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ชั้นนำของโลก ได้แก่ Ford, GM และ Chrysler หรือที่รู้จักกันดีว่า

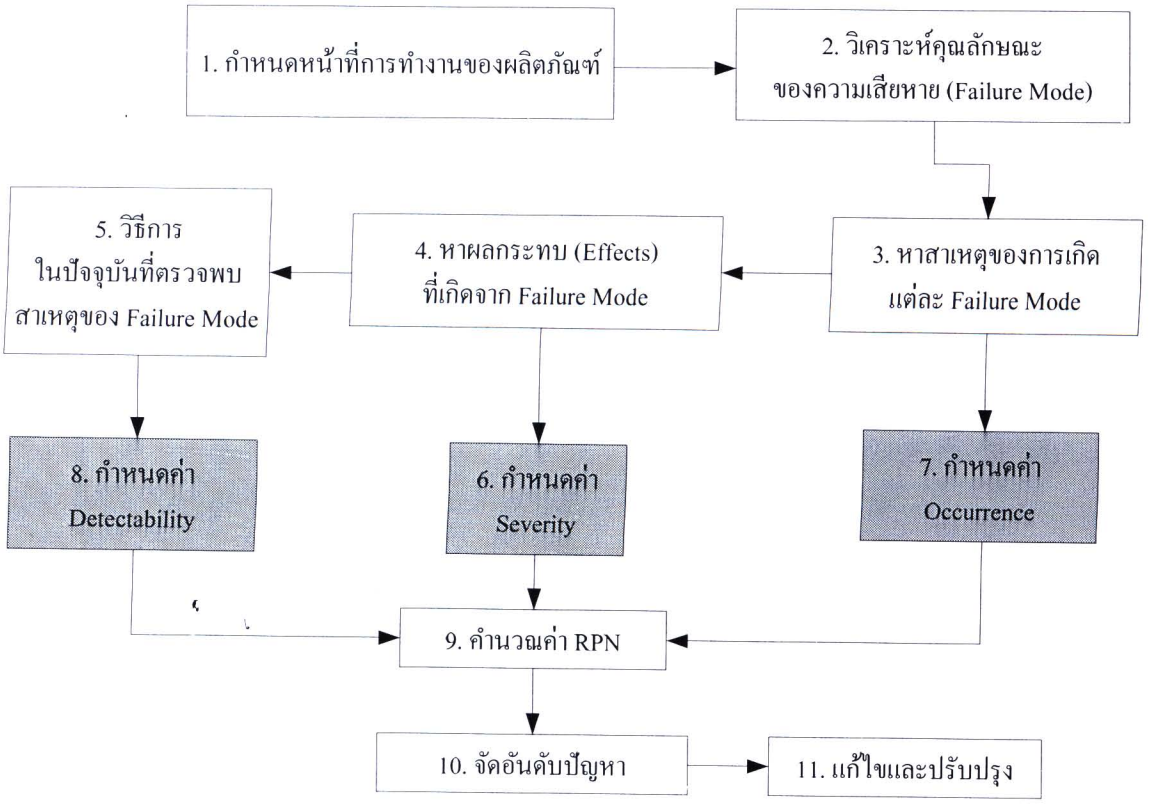
BIG THREE (Big 3) โดยเป็นข้อกำหนดที่สำคัญของระบบ QS-9000 และในปัจจุบันนี้วิธีการ FMEA ก็ได้กลายมาเป็นข้อกำหนดพื้นฐานของอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ผู้ผลิตรถยนต์ทุกค่าย ทุกยี่ห้อ หรือแม้แต่ผู้ผลิตชิ้นส่วนประกอบต่างๆต้องปฏิบัติตาม ภายใต้ระบบคุณภาพ TS-16949 FMEA โดยจะมุ่งเน้นที่การชี้ให้เห็นถึงคุณลักษณะของความเสียหายหรือสาเหตุที่จะนำไปสู่ความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น (Potential Failure Mode) อันเนื่องมาจากการออกแบบ การผลิต หรือการบริการ จากนั้นจึงจะทำการวิเคราะห์ผลกระทบของความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (Effects Analysis) และสุดท้ายก็เพื่อการนำไปสู่การหาวิธีป้องกันการเกิดความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (Problems Prevention)โดย FMEA นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้คือ

1. Design FMEA (DFMEA) คือการปรับปรุงการออกแบบโดยวิธีการ FMEA
2. Process FMEA (PFMEA) คือการปรับปรุงการผลิตโดยวิธีการ FMEA
3. Service FMEA (SFMEA) คือการปรับปรุงการบริการโดยวิธีการ FMEA

2.5.1 ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยหลักการ FMEA

ขั้นตอนการใช้หลักการ FMEA ในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.5 โดยมีรายละเอียดต่างๆดังต่อไปนี้คือ

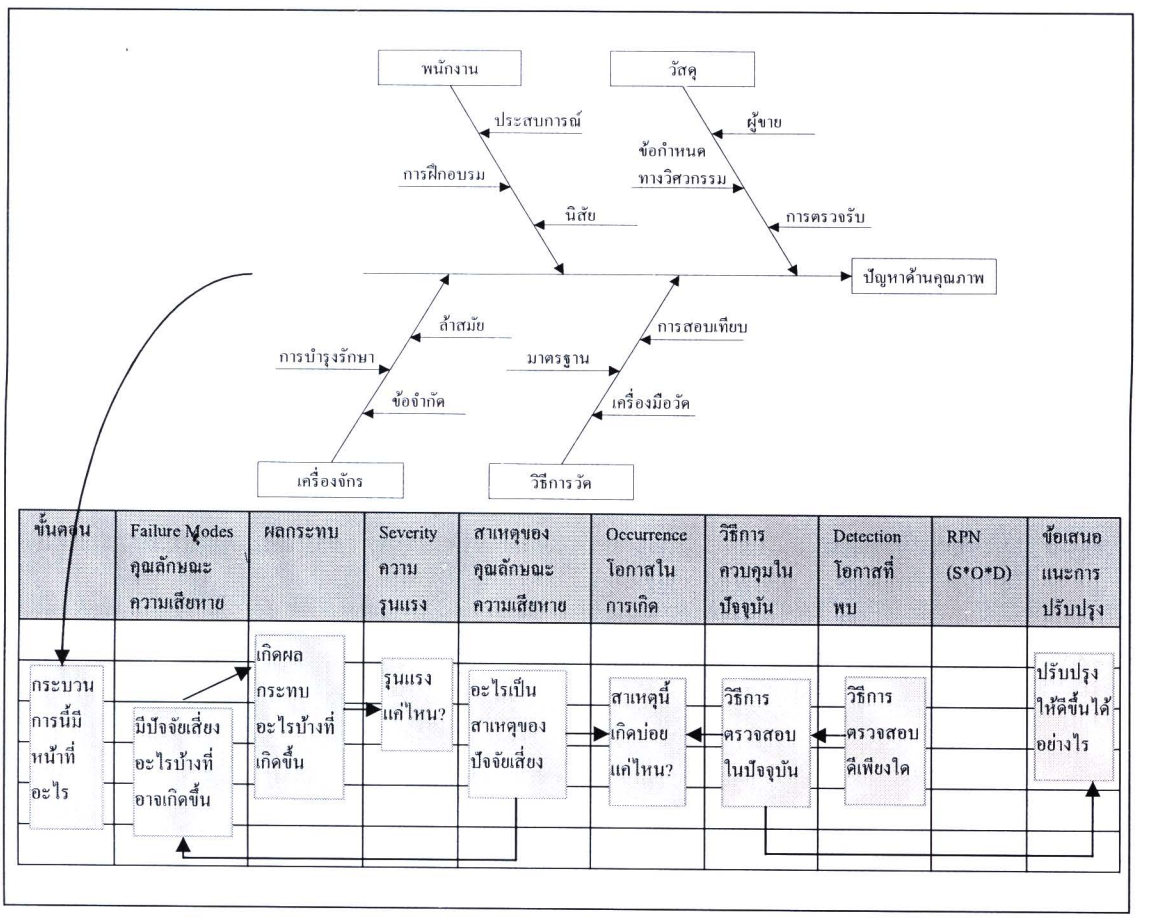
1. กำหนดแผนผังการดำเนินงาน (Process Flow) เช่น การออกแบบ การผลิต การบริการ
2. กำหนดหน้าที่หลักของผลิตภัณฑ์
3. วิเคราะห์คุณลักษณะความเสียหาย (Failure Mode) ที่อาจจะเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์
4. หาสาเหตุของการเกิดคุณลักษณะความเสียหาย (Cause of Failure Mode)
5. พิจารณาว่าลูกค้าจะรู้ได้อย่างไรถ้าเกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ (Effect)
6. กำหนดระดับของความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้น (S = Severity)
7. พิจารณาถึงความถี่ของสาเหตุของการเกิดคุณลักษณะความเสียหาย
   (O = Occurrence of Cause of Failure Mode)
8. พิจารณาวิธีการในปัจจุบันที่ทำการตรวจสอบการเกิดคุณลักษณะความเสียหาย
   (D = Detect ability of Cause of Failure Mode)
9. คำนวณค่า Risk Priority Number (RPN) = S x O x D



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดย FMEA [8]

2.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนภูมิก้างปลากับ FMEA

การวิเคราะห์ปัญหาในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยการใช้แผนภูมิแสดงเหตุและผล (แผนภูมิก้างปลา) จะพบว่ามีการกำหนดสาเหตุที่เป็นไปได้ (Possible Causes) ไว้เพื่อเป็นกรอบแนวคิดในการแก้ปัญหา เพื่อนำไปสู่การเริ่มต้นแก้ไขรากของปัญหาโดยวิธี FMEA จากนั้นจึงเริ่มวิเคราะห์โดยหลักการ FMEA ซึ่งจะพบว่าในแต่ละสาเหตุของการเกิดคุณลักษณะของความเสียหายหรือปัจจัยเสี่ยง (Cause of Failure Mode) จะมีการคิดค่าระดับคะแนน RPN (Risk Priority Number) ดังนั้นหากพบว่าสาเหตุใดมีค่า RPN ที่สูงที่สุด สาเหตุนั้นจะต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน ส่วนสาเหตุใดที่ได้ค่า RPN รองลงมา สาเหตุนั้นก็อาจจะได้รับการแก้ไขในลำดับถัดไป ซึ่งหลักการ FMEA จะให้ผลที่ชัดเจนไม่เอนเอียง (Bias) เพราะว่าค่า RPN ที่คำนวณได้จะพิจารณาจาก ระดับความรุนแรงของความเสียหายที่เกิด ความถี่ในการเกิดคุณลักษณะความเสียหาย และความสามารถในการตรวจพบคุณลักษณะของการเกิดความเสียหาย ดังนั้นการใช้แผนภูมิก้างปลาแต่เพียงอย่างเดียวในการแก้ปัญหาอาจจะทำให้รู้แค่ว่า "ปัญหานั้นมีสาเหตุจากอะไร" แต่ถ้านำมาวิเคราะห์ต่อด้วย FMEA จะทำให้ดูมิติในการแก้ปัญหาได้ถึง 3 มิติ คือ "รู้ว่ามีผลกระทบมากน้อยแค่ไหน มีโอกาสในการเกิดมากน้อยแค่ไหน และมีวิธีการตรวจสอบที่ดีแล้วหรือยัง" ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนภูมิก้างปลาและหลักการ FMEA ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนภูมิก้างปลาและ FMEA [8]

การใช้หลักการ FMEA มาวิเคราะห์และแก้ไขรากของปัญหาที่แท้จริงในกระบวนการ (ออกแบบ การผลิต หรือบริการ) จะทำให้ผู้ผลิตมีมุมมองในการแก้ปัญหาที่ครอบคลุมมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ปัญหาที่เคยเกิดขึ้นซ้ำซากลดลงไป ทำให้กระบวนการผลิตมีความผันแปรที่ลดลง นั่นหมายถึงว่าผลผลิตทุกชิ้นจะมีคุณภาพที่สม่ำเสมอและเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด สุดท้ายแล้วผลพลอยได้ที่ตามมาก็คือลูกค้ามีความพึงพอใจต่อผลผลิตนั้นอย่างสูงสุด

2.6 แผนผังพาเรโต (Pareto Diagram)

หลักการของพาเรโต หรือ Pareto Principle นั้นถูกค้นพบโดยนาย Vilfredo Pareto นักเศรษฐศาสตร์ชาวอิตาเลียน เขาค้นพบกฎนี้โดยบังเอิญจากการสำรวจรายได้ของประชากรซึ่งเขาพบว่า คนที่มีรายได้สูงสุดเพียง 20% ของประชากรทั้งประเทศสามารถสร้างรายได้ถึง 80% ในขณะที่ประชากรที่เหลืออีก 80% มีรายได้รวมกันเพียง 20% ของระบบเศรษฐกิจทั้งหมด จากนั้นก็ยังคงพบอีกว่า สถานการณ์เช่นนี้

ยังเกิดขึ้นกับเรื่องอื่นๆอีกมากมาย จนสามารถใช้เป็นกฎที่สามารถนำไปพยากรณ์เหตุการณ์อื่นๆได้จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า 20:80 หรือปรากฏการณ์พาเรโต แต่กฎนี้เพิ่งจะโด่งดังจริงๆก็ตอนที่มีการนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพการผลิตทางอุตสาหกรรมในญี่ปุ่น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าถ้าปรับปรุงงานสำคัญที่สุดเพียงไม่กี่อย่างหรือ 10-20% ก็จะได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นมหาศาลหรืออาจจะได้ถึง 80-90% เพราะฉะนั้นการเลือกปรับปรุงงานสำคัญๆจะให้ผลตอบแทนที่สูงมาก โดยหลักการของแผนภูมิพาเรโตในการปรับปรุงคุณภาพ คือการหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพ (Quality function) ตัวอย่างเช่น ถ้าเราหาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณภาพ และนำมาหาค่าตัวเลข หรือร้อยละของผลกระทบนั้น จัดลำดับจากมากไปน้อยแล้วนำมาเขียนกราฟโดยให้แกนตั้งด้านซ้ายเป็นค่าจริงของผลกระทบของตัวแปรส่วนแกนตั้งด้านขวาเป็นค่าสะสมของผลกระทบของตัวแปร แผนภูมิพาเรโตมีประโยชน์ในการสรุปรวมและประมาณการณ์ถึงขนาดของปัญหาที่จะแก้ไขได้จากแต่ละปัจจัย ถ้านำข้อมูลมาจัดลำดับลงในตารางจากมากไปน้อยจะได้กราฟความสัมพันธ์ 2 แบบ คือกราฟแท่งที่แสดงตัวเลขในการจำแนกข้อมูลอาจเป็นขั้นตอนการปฏิบัติงาน ผลลัพธ์ปริมาณงานของบุคคล สาเหตุ ฯ แล้วเลือกวิเคราะห์ตามสัดส่วนที่สอดคล้องกับเป้าหมายที่กำหนดไว้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและประสิทธิผลต่อการแก้ปัญหาหรือปรับปรุงงานสำคัญๆโดยตรง และใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นดังนั้นหลักการพาเรโตจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกสาเหตุที่สำคัญในการแก้ปัญหาด้านคุณภาพเพื่อจะได้แก้ปัญหานั้นอย่างถูกต้องและเหมาะสม

2.7 การวิเคราะห์การวัด (Measurement System Analysis) [5]

ในการบริหารคุณภาพเพื่อการประกันคุณภาพนั้น มีความจำเป็นต้องดำเนินการภายใต้หลักการของการบริหารภายใต้ข้อเท็จจริงที่จะใช้ตรรกะ และสารสนเทศจากข้อมูลประกอบการตัดสินใจ ดังนั้นจึงไม่อาจหลีกเลี่ยงการใช้ข้อมูลการตัดสินใจในการบริหารได้ โดยข้อมูลที่ดีจะต้องเป็นข้อมูลที่สามารถอธิบายถึงสาเหตุในกระบวนการที่ศึกษาได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำให้ข้อมูลถูกต้องและแม่นยำก่อน ทั้งนี้โดยการศึกษาระบบการวัดและทำการวิเคราะห์ระบบการวัดเพื่อศึกษาถึงแหล่งความผันแปรของระบบการวัด แล้วทำการลดและกำจัดความผันแปรนั้น เพื่อให้ข้อมูลแสดงถึงสารสนเทศเกี่ยวกับกระบวนการที่ศึกษาให้มากที่สุด ทั้งนี้การวิเคราะห์ความผันแปรของระบบการวัดจะต้องทำการพิจารณาประเด็นหลักๆ 5 ประการดังนี้

1. ระบบการวัดมีความสามารถในการแยกความแตกต่างที่เพียงพอหรือไม่
2. ระบบการวัดมีคุณสมบัติด้านเสถียรภาพหรือไม่
3. ระบบการวัดมีคุณสมบัติที่มีความสม่ำเสมอตลอดเวลาหรือไม่
4. คุณสมบัติเชิงสถิติของกระบวนการวัดมีความไวต่อเทคนิคของพนักงานวัดหรืออุปกรณ์วัดหรือไม่
5. ระบบการวัดมีความสามารถในการตรวจจับความผันแปรของผลิตภัณฑ์ที่แสดงถึงความผันแปรของกระบวนการผลิตหรือไม่

2.7.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความถูกต้อง

การวัดของข้อมูลจากระบบการวัดใดๆจะมีค่าเอนเอียงไปจากค่าจริงเสมอ เนื่องจากคุณสมบัติความถูกต้องหรือค่าไบอัส ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ระบบการวัดเพื่อการศึกษาถึงคุณสมบัติความถูกต้อง และความไบอัสตลอดเวลาหรือไม่ ตลอดจนศึกษาคุณสมบัติเชิงสถิติว่าค่าวัดมีความสม่ำเสมอ (Consistent) ตลอดเวลาหรือไม่ โดยการวิเคราะห์นี้จะมุ่งพิจารณาในคุณสมบัติ 3 ประการดังนี้คือ

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านไบอัสของระบบการวัด โดยค่าไบอัสนั้นหมายถึง ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าที่ได้จากการวัดค่าอ้างอิง หรือค่ามาสเตอร์ โดยที่ค่ามาสเตอร์หมายถึง ค่าที่ได้จากการวัดซ้ำด้วยเครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำสูงกว่า ภายใต้สภาวะควบคุมหรือห้องปฏิบัติการสอบเทียบ และสามารถ์สอบกลับได้ ทั้งนี้การประเมินคุณสมบัติด้านไบอัสของระบบการวัดด้วยวิธีการใช้สิ่งตัวอย่างเดียว (Independent Sample Method) พิจารณาจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ได้จากค่าอ้างอิงดังนี้

$$\text{ค่าไบอัส} = \text{ค่าเฉลี่ยของค่าวัด} - \text{ค่าอ้างอิง}$$

จากนั้นต้องทำการประเมินผลค่าไบอัสเทียบกับความผันแปรในกระบวนการโดยที่

$$\%\ \text{ไบอัสของกระบวนการ} = \frac{\text{ค่าไบอัส}}{\text{ความผันแปรของกระบวนการ}} \times 100\ \%$$

การประเมินค่าไบอัสที่ได้โดยทั่วไปมักจะกำหนดภายใต้กฎเกณฑ์ดังนี้

% ไบอัส < 5%	อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้โดยไม่ต้องแก้ไข
5% < % ไบอัส < 10%	อาจจะยอมรับได้ (ให้พิจาณาจากปัจจัยอื่นประกอบ)
% ไบอัส > 10%	ไม่สามารถยอมรับได้ต้องค้นหาสาเหตุพร้อมทำการแก้ไข

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านเสถียรภาพของระบบการวัด ซึ่งคุณสมบัติด้านเสถียรภาพของระบบการวัดหมายถึง คุณสมบัติด้านอายุการใช้อุปกรณ์ในการวัด โดยพิจารณาจากความผันแปรโดยรวมในระบบการวัดที่ได้จากการวัดงานมาตรฐานตลอดช่วงเวลา ทั้งนี้การประเมินผลความมีเสถียรภาพของระบบการวัดด้วยวิธีการสร้างกราฟแผนภูมิควบคุม $\overline{X} - R$ ต้องทำการประเมินค่าเสถียรภาพของระบบการวัดโดยที่

$$\text{ความมีเสถียรภาพ} = \overline{\overline{X}}_2 - \overline{\overline{X}}_1$$

จากนั้นทำการประเมิน % ความมีเสถียรภาพเมื่อเทียบกับความผันแปรในกระบวนโดยที่

$$\%\text{ ความมีเสถียรภาพของกระบวนการ} = \frac{\text{ความมีเสถียรภาพ}}{\text{ความผันแปรของกระบวนการ}} \times 100\%$$

การประเมินค่า % ความมีเสถียรภาพโดยทั่วไปมีเกณฑ์เดียวกับการประเมินค่า % ไบอัสของกระบวนการดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัด ซึ่งคุณสมบัติเชิงเส้นตรง (Linearity) ของระบบการวัด หมายถึง การที่ค่าไบอัสของระบบการวัดจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปตลอดย่านวัด (Working Range) ของระบบการวัดถ้าค่าไบอัสมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนย่านวัดนั้น หมายถึงระบบการวัดดังกล่าวขาดคุณสมบัติเชิงเส้นตรง นอกจากนี้ค่าความแม่นยำของค่าย่านวัดจะมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยเมื่อเปลี่ยนย่านวัด ทั้งนี้การประเมินผลคุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัดอาศัยการพล็อตกราฟแสดงการกระจายในแผนภาพการกระจายโดยให้แกนนอน หมายถึงค่ามาสเตอร์และแกนตั้ง หมายถึงค่าไบอัส จากนั้นทำการพิจารณาสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ $\left(R^2\right)$ เพื่อแสดงความสามารถในการอธิบายได้ด้วยแบบถดถอยเชิงเส้นตรงสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองหาก R^2 มีค่าสูงพอ โดยทั่วไปควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.70 และทำการทดลองว่า X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ด้วยการทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตาราง ANOVA สำหรับทดสอบความมีนัยสำคัญของตัวแบบเชิงเส้นตรง

แหล่งความผันแปร	ผลรวมกำลังสอง	องศาอิสระ	ความแปรปรวน	F
เส้นถดถอย	$SS_R = \hat{\beta}_1 S_{XY}$	1	MS_R	$\frac{MS_R}{MS_E}$
ความคาดเคลื่อน	$SS_E = S_{YY} - SS_R$	n-2	MS_E	
ผลรวม	S_{YY}	n-1		

2.7.2 การวิเคราะห์ความถูกต้องด้านความแม่นยำ

การวิเคราะห์ความแม่นยำนี้ จะมุ่งเน้นใน 2 ประเด็นหลักคือ คุณสมบัติเชิงสถิติของค่าวัดว่ามีค่าความว่องไวต่อเทคนิคของพนักงานหรืออุปกรณ์วัดหรือไม่และระบบการวัดที่พิจารณามีความสามารถในการตรวจจับความผันแปรของผลิตภัณฑ์ที่แสดงถึงความผันแปรของกระบวนการผลิตหรือไม่ คุณสมบัติด้านความแม่นยำนี้ หากจำแนกตามช่วงเวลาที่เกิดขึ้นแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ความสามารถในการทำซ้ำหรือรีพีททะบิลิตี้ (Repeatability) และความสามารถในการทำ

เหมือนหรือรีโปรดิวซิบิลิตี้ (Reproducibility) โดยที่รีพีททะบิลิตี้ของระบบการวัดหมายถึง ค่าความแตกต่างในการวัดอย่างต่อเนื่องกับชิ้นงานด้วยเงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งปกติใช้ค่ารีพีททะบิลิตี้ในการประมาณค่าความแปรผันของระบบวัดในระยะสั้น (Short-term Measurement) ส่วนรีโปรดิวซิบิลิตี้ของระบบการวัดหมายถึง ค่าความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของการวัดชิ้นงานเดียวกันแต่ต่างเงื่อนไข โดยปกติจะใช้ค่ารีโปรดิวซิบิลิตี้ในการประมาณความผันแปรของระบบการวัดระยะยาว (Long-term Measurement) ดังนั้นในการประเมินผลค่ารีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ของระบบการวัด (GR&R : Gage Repeatability and Reproducibility) หมายถึง การประเมินความผันแปรอันเนื่องจากการวัดค่าจริงของงานหนึ่งชิ้นแบบซ้ำๆภายใต้เงื่อนไขเดียวกันแล้วมีการเปลี่ยนเงื่อนไข โดยการวิเคราะห์ความถูกต้องแม่นยำนี้จะมุ่งพิจารณาในคุณสมบัติ 6 ประการดังนี้คือ

1. การวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) คือวิธีการทางสถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยหลักการแยกความผันแปรในรูปความแปรปรวน ออกเป็นความผันแปรย่อยๆ ตามแหล่งความผันแปรว่าแหล่งความผันแปรใดมีนัยสำคัญ การใช้วิธีการวิเคราะห์ความผันแปรสำหรับการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดนั้น จะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองแบบบล็อก (Randomized Block Design :RBD) โดยมีเครื่องมือวัด และพนักงานเป็นปัจจัยที่ทำการศึกษา และชิ้นงานคือบล็อกซึ่งต้องพยายามให้ความผันแปรภายในบล็อกหรือชิ้นงานมีความใกล้เคียงกันในขณะที่ความผันแปรระหว่างบล็อกมีค่าสูงๆ ทั้งนี้การคำนวณด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถสรุปเป็นตาราง ANOVA สำหรับการวิเคราะห์ระบบการวัดได้ดังตารางที่ 2.2 โดยคุณภาพของข้อมูลจากระบบการวัดและการวิเคราะห์ระบบการวัดจะต้องอาศัยสารสนเทศด้านความผันแปรของข้อมูลวัด เพื่อพิจารณาข้อมูลว่าสารสนเทศที่ได้เกี่ยวข้องกับแหล่งผันแปรใด ดังนั้นข้อมูลที่นำมาใช้ต้องผ่านการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูล (ความสามารถในการแยกแยะความแตกต่าง คุณสมบัติด้านความสุ่มของข้อมูลวัด ความสามารถของระบบการวัดในการตรวจจับความผันแปรของสิ่งตัวอย่าง) การประเมินความแม่นยำของระบบการวัดและวิเคราะห์ผลความแม่นยำของระบบการวัด

ตารางที่ 2.2 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการวิเคราะห์ระบบการวัด

แหล่งความผันแปร	SS	DF	MS
เครื่ององมือวัด	$\sum_j \frac{Y_j^2}{nr} - \frac{Y_{....}^2}{nkr}$	k-1	$MS_O = SS_O/(k-1)$
ชิ้นงาน	$\sum_i \frac{Y_{i....}^2}{kr} - \frac{Y_{....}^2}{nkr}$	n-1	$MS_P = SS_P/(n-1)$
เครื่องมือวัด x ชิ้นงาน	$\sum_i \sum_j \frac{Y_{ij}^2}{r} - \frac{Y_{...}^2}{nkr} - SS_P - SS_O$	$(n-1)(k-1)$	$MS_O = SS_{OP}/(n-1)(k-1)$
รีพีททะบิลิตี้	$SS_r - SS_o - SS_p - SS_{OP}$	$nk(r-1)$	$MS_E = SS_E/nk(r-1)$
ผลรวม	$\sum_i \sum_j \sum_m Y_{ijm}^2 - \frac{Y_{....}^2}{nkr}$	$nkr-1$	

โดยที่ SS_r คือผลรวมกำลังสองของข้อมูลทั้งหมด (Total Sum of Square)

SS_P คือผลรวมกำลังสองของชิ้นงาน (Part Sum of Square)

SS_O คือผลรวมกำลังสองของพนักงานวัด (Tester Sum of Square)

SS_{OP} คือผลรวมกำลังสองของอิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานและพนักงานวัด (Interaction of Parts and Tester Sum of Square)

SS_E คือผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error Sum of Square)

2. ความสามารถในการแยกความแตกต่าง โดยจุดประสงค์สำคัญในการทำระบบการวัดคือ การพิจารณาความผันแปรของสารสนเทศที่นำมาใช้เพื่อการประเมินความสามารถของระบบการวัดในการอธิบายความผันแปรของกระบวนการ ดังนั้นถ้าระบบการวัดไม่สามารถอธิบายความผันแปรได้แสดงว่าระบบการวัดขาดสารสนเทศในการอธิบายความผันแปรของกระบวนการ ทำให้ระบบการวัดไม่สามารถตรวจจับสาเหตุผิดธรรมชาติในการควบคุมกระบวนการโดยอาศัยสถิติ (Statistic Process Control: SPC) ได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์ความสามารถในการแยกความแตกต่างของกระบวนการวัดจะทำการพิจารณาจากการวิเคราะห์แผนภูมิควบคุม R โดยลักษณะของความสามารถในการแยกความแตกต่างของระบบการวัดจากการวิเคราะห์แผนภูมิ R จะมีลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่งคือ

- แผนภูมิควบคุม R แสดงพิสัยที่เป็นไปได้เพียงค่าเดียว หรือสอง หรือสามค่า ที่อยู่ภายในพิกัดควบคุม

- แผนภูมิควบคุม R แสดงพิสัยที่เป็นไปได้ 4 ค่าที่อยู่ภายในพิกัดควบคุมของแผนภูมิและมีค่าพิสัยเป็นศูนย์มากกว่า 1 ใน 4 ของจำนวนพิสัยทั้งหมด

3. คุณสมบัติด้านความสุ่มของข้อมูลวัด ซึ่งข้อมูลทางสถิติที่นำมาพิจารณานั้น นอกจากมีคุณสมบัติด้านความสามารถในการแยกความแตกต่างแล้ว ยังจำเป็นต้องมีคุณสมบัติการคาดการณ์ โดยการดำเนินการให้ข้อมูลดังกล่าวดำเนินการผ่านการทดลอง (หรือแผนการเก็บข้อมูล) ที่เรียกว่า "การทดลองแบบสมบูรณ์" (Completely Randomized Design: CRD) ซึ่งดำเนินการด้วยการกำหนดตัวเลขลงในตารางทดสอบและดำเนินการสุ่มตัวเลขเพื่อกำหนดลำดับในการทดลอง

4. ความสามารถของกระบวนการวัดในการตรวจจับความผันแปรของสิ่งตัวอย่างซึ่งสามารถพิจารณาได้จากแผนภูมิควบคุม X-bar ถ้าความผันแปรส่วนใหญ่มาจากความแตกต่างระหว่างสิ่งตัวอย่างจะต้องมีค่า X-bar ส่วนใหญ่ออกนอกพิกัดควบคุมและต้องมั่นใจได้ว่า ค่าที่ออกนอกพิกัดเหล่านั้นมาจากสาเหตุธรรมชาติเท่านั้น โดยดูความสม่ำเสมอของกระบวนการด้วยแผนภูมิ R เพื่อตรวจสอบว่าสาเหตุของความผันแปรนั้นเป็นสาเหตุโดยธรรมชาติจากนั้นมาพิจารณาถึงแผนภูมิควบคุม R – bar โดยข้อมูลที่ดีจะต้องจำแนก (Number of distinct Categories) ได้ไม่ต่ำกว่า 5 ประเภทสำหรับการคำนวณสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\text{จำนวนประเภทข้อมูล} = \sqrt{2}\frac{PV}{GR\&R}$$

เมื่อ PV คือ 5.15 * sigma

GR&R คือ การประเมินผลค่ารีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ของกระบวนการ

5. การประเมินผลความแม่นยำของระบบการวัด โดยในการประเมินผลนั้นจะวิเคราะห์ผ่านดัชนีที่เรียกว่า P/TV (Precision-to-Total Variation) เป็นดัชนีสำหรับระบบการวัดที่ใช้ทำการวัดเพื่อตรวจจับความผันแปรในกระบวนการโดยทั่วไปมักจะกำหนดเกณฑ์การยอมรับค่ารีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ไว้ดังนี้

P/TV < 10%	สามารถยอมรับความสามารถของระบบการวัดได้
10% < P/TV < 30%	อาจจะยอมรับได้ซึ่งต้องพิจารณาปัจจัยอื่นประกอบ
P/TV < 30%	ไม่สามารถยอมรับความสามารถของกระบวนการวัดได้มีความจำเป็นต้องระบุถึงสาเหตุความผันแปรแล้วทำการลดหรือกำจัดทิ้ง

6. การวิเคราะห์ผลความแม่นยำของระบบการวัด โดยในการวิเคราะห์ผลความแม่นยำของระบบการวัด จะวิเคราะห์ผ่านดัชนีค่าจัดสรรความผันแปร (% Contribution) ดัชนีนี้เป็นการจำแนกความผันแปรทั้งหมดของระบบออกเป็นความผันแปรของชิ้นงานที่ศึกษา ความผันแปรที่เกิดจากอิทธิพลร่วมของเครื่องมือวัดกับชิ้นงาน และความผันแปรของชิ้นงานแล้วจึงดำเนินการวิเคราะห์ว่าค่าจัดสรรความผันแปรของระบบการวัดมีความเหมาะสมที่จะสามารถวิเคราะห์ระบบการวัดหรือไม่ ซึ่งเกณฑ์ในการ

กำหนดค่าจัดสรรความผันแปรนั้นขึ้นอยู่กับแต่ละบริษัทโดยทั่วไปค่าจัดสรรความผันแปรของระบบการวัดไม่ควรเกิน 7-10% ของความผันแปรทั้งหมด

2.8 การทดสอบสมมุติฐาน (Test of Hypothesis) [6]

เป็นกระบวนการตัดสินใจเพื่อยืนยันความเชื่ออย่างใดอย่างหนึ่งเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่อธิบายสภาวะที่เกิดขึ้นจริง และเรียกข้อความที่แสดงถึงการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มที่หมายถึงสภาวะที่เกิดขึ้นจริงว่า สมมุติฐานเชิงสถิติ (Statistical Hypothesis) ได้แก่สมมุติฐานหลัก (Null Hypothesis : H_0) และสมมุติฐานอื่น (Alternative Hypothesis : H_1) โดยสมมุติฐานหลักคือ สมมุติฐานที่เชื่อว่าเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นจริงและต้องทำการทดสอบเพื่อที่จะปฏิเสธสมมุติฐานนี้

การตัดสินใจแบบทดสอบสมมุติฐานนี้มีโอกาสในการผิดพลาดได้ 2 ชนิดคือ

1. ความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I Error) ซึ่งเป็นการปฏิเสธสมมุติฐานหลัก ทั้งที่ในความเป็นจริงสมมุติฐานหลักถูกต้องอยู่แล้ว เรียกว่าระดับนัยสำคัญ (Significant Level) แทนด้วยสัญลักษณ์ α
2. ความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II Error) ซึ่งเป็นการไม่ปฏิเสธสมมุติฐานหลักทั้งที่ในความเป็นจริงสมมุติฐานหลักไม่ถูกต้องแทนด้วยสัญลักษณ์ β และ $1-\beta$ คืออำนาจในการทดสอบ (Power of Test)

ในการทดสอบสมมุติฐานนั้นต้องออกแบบวิธีการตัดสินใจให้มีระดับนัยสำคัญคงที่และมีค่าต่ำๆ เช่น 0.05 หรือ 0.1 และให้อำนาจในการทดสอบมีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้การตัดสินใจเลือก H_1 ต้องกระทำอย่างมีเหตุผลรองรับที่ชัดเจนจริงๆซึ่งเรียกว่า การตัดสินใจแบบยืนยัน (Strong Conclusion) โดยการทดสอบสมมุติฐานสามารถดำเนินการทดลองต่อไปนี้

1. ตั้งสมมุติฐานตามสิ่งที่ต้องการทดสอบ อาจเป็นสมมุติฐานแบบสองด้าน หรือด้านเดียว
2. กำหนดวิธีการตัดสินใจ $d(x)$ ด้วยการพิจารณาถึงตัวสถิติสำหรับการทดสอบพารามิเตอร์ แล้วพิจารณาถึงการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวสถิติด้วยทฤษฎีการแจกแจงของสิ่งตัวอย่าง ซึ่งอธิบายถึงขนาดความผันแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระหว่างเงื่อนไขของการทดลอง จากนั้นกำหนดช่วงแห่งการปฏิเสธภายใต้ค่า α ที่กำหนด
3. ออกแบบการทดลองด้วยการกำหนดค่า n
4. ดำเนินการทดลองตามที่ออกแบบ
5. ตัดสินใจตามวิธีการที่กำหนดไว้ คือถ้าหากค่าสถิติอยู่ภายในช่วงการยอมรับ ให้ยอมรับสมมุติฐาน แต่ถ้าหากค่าของตัวสถิติอยู่ในบริเวณแห่งการปฏิเสธให้ทำการปฏิเสธสมมุติฐาน และยืนยันว่าสมมุติฐานที่กำหนดไว้ไม่ถูกต้อง

การพิจารณาค่า P-Value ในการทดสอบสมมุติฐาน (Hypothesis Test) ค่า P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ตัวสถิติทดสอบจะมีค่าเท่ากับค่าสังเกต (Observe Value) ที่เป็นไปได้น้อยที่สุดเมื่อสมมุติฐานหลักเป็นจริง โดยทั่วไปในโปรแกรม Minitab แสดงค่า P-Value ไว้

2.9 การออกแบบการทดลอง [11]

การทดลอง หมายถึงการทดลองหรือชุดของการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรป้อนเข้า (Input Variables) ของกระบวนการหรือระบบเพื่อสังเกตผล และชี้บ่งสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงในผลลัพธ์ (Output Response) ที่ได้ ส่วนคำว่า "การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistic Design of Experiment)" หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็นถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ และยิ่งปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ โดยหลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ

1. การทำซ้ำ (Replication) เป็นการทำการทดลองซ้ำ ซึ่งมีคุณสมบัติ 2 ประการคือ ประการแรกทำให้สามารถหาความผันแปรอันเนื่องมาจากปัจจัยที่ไม่ได้รับการควบคุมในการทดลองได้ (Experimental Error) และประการที่สองคือ ทำให้สามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นของค่าเฉลี่ยจากข้อมูลในการทดลอง

2. การสุ่ม (Randomization) เป็นการทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม ซึ่งเป็นพื้นฐานหลักในการใช้วิธีการเชิงสถิติที่กำหนดข้อมูลจะต้องเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบอิสระ ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดผลกระทบจากปัจจัยภายนอกที่อาจเกิดขึ้นในการทดลอง

3. การสกัดกั้น (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง หรืออาจหมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่จะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละ Blocking จะเกิดขึ้นได้จากการทำ Blocking

2.10 การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) [11]

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลนั้น สามารถใช้ได้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปเพื่อต้องการศึกษาผลของปัจจัยและผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัยเหล่านั้น ดังนั้นการทดลองแบบแฟคทอเรียลจึงเป็นการทดลองที่ใช้สารสนเทศครบถ้วนและเป็นพื้นฐานสำคัญในการดำเนินการ

ทดลองการปรับปรุงกระบวนการ ในการทดลองแบบแฟคทอเรียลเพื่อต้องการรู้ผลของปัจจัยหลายๆ ปัจจัยนั้นเป็นเหตุให้มีการทดลองขนาดใหญ่ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตไม่ว่าจะเป็นจำนวนวัตถุดิบ เวลา หรือแรงงานต่างๆที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการทดลองที่มีขนาดเล็กที่สุด โดยเรียกการทดลองนี้ว่า 2^k แฟคทอเรียลโดยที่

2 หมายถึง จำนวนระดับ (Level)

k หมายถึง จำนวนปัจจัย (Factor)

การทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียล เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเท่าไหร่ก็ได้ตามที่กำหนด แต่จำนวนของระดับที่ใช้ในการทดลองมีเพียง 2 ระดับเท่านั้นในทุกปัจจัยที่ทำการศึกษาโดยเมื่อจำนวนปัจจัยการป้อนเข้าสำหรับการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียลเพิ่มจำนวนสูงขึ้น จำนวนของการทดลองก็สูงขึ้นด้วย เช่น การออกแบบการทดลอง 2^5 จะต้องการจำนวนการทดลอง 32 ครั้ง การออกแบบการทดลอง 2^6 จะต้องการจำนวนการทดลองถึง 64 ครั้ง ซึ่งยังไม่นับรวมการทดลองซ้ำซึ่งจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรไม่ว่าจะเป็นจำนวนสิ่งตัวอย่างและเวลาในการทดลองที่มากขึ้น และไม่อาจทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกันได้ทั้งหมด ซึ่งภาษาทางสถิติเรียกเงื่อนไขนี้ว่า "เงื่อนไขในทรีตเมนต์ คอมบิเนชัน (Treatment Combination) มีมากกว่าเงื่อนไขขนาดของบล็อก (Block size)" ดังนั้นในบางการทดลองจำเป็นต้องแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ครั้ง หรือ 4 ครั้งเป็นต้น

การดำเนินการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมมีขั้นตอนและแนวคิดในการปฏิบัติแบ่งออก เป็น 7 ขั้นตอนดังนี้คือ

1. การทำความเข้าใจปัญหา (Problem of Recognition & Statement) ในการกำหนดหัวข้อของปัญหาผู้ทดลองต้องทำความเข้าใจต่อสภาพของปัญหาและวัตถุประสงค์ของการทดลอง ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความชัดเจนในการวางแผนและการดำเนินงาน การระบุปัญหาที่มีความชัดเจนจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับกฎเกณฑ์และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้นๆ ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบการทดลองทุกครั้งควรมีการทำงานเป็นทีมเพื่อความเข้าใจปัญหาได้ชัดเจน

2. การเลือกปัจจัย ระดับปัจจัย และขอบเขตของปัจจัย (Choice of Factors and Levels) ในขั้นตอนนี้เป็นการเลือกปัจจัยที่นำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทดลอง การกำหนดขอบเขตปัจจัยเหล่านี้จะทำให้การเปลี่ยนแปลงระดับที่จะเกิดขึ้นในการทดลองจะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรและจะวัดผลตอบสนองได้อย่างไร ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงต้องมีการใช้ความรู้ทางเทคโนโลยีเฉพาะด้าน (Intrinsic Technology) เกี่ยวกับกระบวนการซึ่งอาจมาจากประสบการณ์ หรือความรู้ทางทฤษฎี เพื่อนำมาตัดสินใจเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ต้องการปรับในการทดลอง

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Choice of Response Variable) ในการเลือกตัวแปรผลตอบสนองผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่

และต้องแน่ใจว่าระบบการวัดที่ใช้วัดตัวแปรตอบสนองมีคุณภาพ เพื่อให้ความผันแปรที่เกิดขึ้นมาจากกระบวนการผลิตอย่างเดียว

4. การเลือกการออกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) ในการเลือกการออกแบบ เราจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา การเลือกการออกแบบจะเกี่ยวข้องกับการกำหนดขนาดของสิ่งตัวอย่าง (Replications) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูลซึ่งจะต้องเป็นการเก็บข้อมูลแบบสุ่ม การเลือกใช้หลักการพื้นฐานใดบ้างในการออกแบบการทดลอง

5. การดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment) เมื่อทำการทดลองเราจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน เนื่องจากหากมีความผิดพลาดเกิดขึ้นจะทำให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ต่อได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistical Analysis) เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติเพื่อพิจารณาผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่ นอกจากนี้ควรใช้ความรู้ทางวิศวกรรมหรือความรู้เกี่ยวกับกระบวนการมาประกอบการวิเคราะห์ด้วย เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่มีเหตุผลและมีความน่าเชื่อถือ

7.การสรุปผลและการทดสอบเพื่อยืนยันผล (Conclusion and Confirmation Testing) เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว จำเป็นจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้ควรนำกราฟเข้ามาช่วยในการนำเสนอ นอกจากนี้แล้วการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่จะเกิดขึ้น

Full Factorial Design

Factors:	3	Base Design:	3, 8
Runs:	19	Replicates:	2
Blocks:	1	Center pts (total):	3

All terms are free from aliasing.

Results for: 3 Factor & 3 Center_19 Run

Factorial Fit: Defect (N=2000) versus A, B, C _ก่อนการลดรูป

Estimated Effects and Coefficients for Defect (N=2000) (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		156.13	4.833	32.31	0.000
A	-127.75	-63.87	4.833	-13.22	0.000
B	-38.00	-19.00	4.833	-3.93	0.003
C	-25.00	-12.50	4.833	-2.59	0.027
A*B	-12.00	-6.00	4.833	-1.24	0.243
A*C	-14.00	-7.00	4.833	-1.45	0.178
B*C	0.75	0.38	4.833	0.08	0.940
A*B*C	-4.25	-2.13	4.833	-0.44	0.670
Ct Pt		-24.12	12.162	-1.98	0.075

S = 19.3313 PRESS = 7798.4
R-Sq = 95.34% R-Sq(pred) = 90.28% R-Sq(adj) = 91.61%

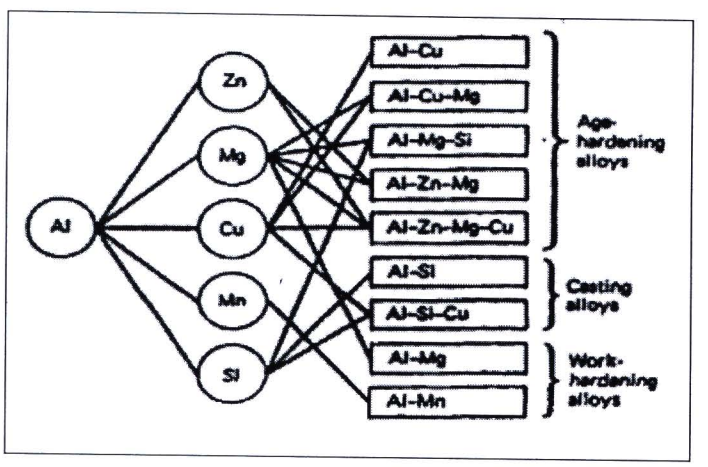
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการรันโปรแกรมของการทดลองแบบ Factorial Design [7]

2.11 ทฤษฎีอะลูมิเนียมหล่อ [2]

2.11.1 การแบ่งกลุ่มของโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ

โลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อมีบทบาทสำคัญมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในการผลิตชิ้นงานส่วนยานยนต์ และเครื่องจักรกลต่างๆ เนื่องจากมีการใช้งานทดแทนเหล็กหล่อ หรือเหล็กกล้าหล่อ เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา ความแข็งแรงทนต่อหน่วยน้ำหนักสูง จุดหลอมเหลวต่ำจึงมีความสามารถในการหล่อหลอมที่ดี เป็นต้น การใช้งานของโลหะผสมอลูมิเนียมหล่อในอุตสาหกรรมรถยนต์มีการพัฒนาอย่างกว้างขวางในทวีปยุโรปในปี ค.ศ. 1992 นำมาใช้ในรถยนต์แทนที่เหล็กหล่อประมาณ 50-60 กิโลกรัมต่อตัน และเริ่มใช้เพิ่มมากขึ้นเป็น 2 เท่าในปี ค.ศ. 2000 ดังนั้นโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อจึงเป็นโลหะที่สำคัญที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะเบา (Light Metals) งานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีสมบัติทางด้านหล่อหลอมที่ดีชนิดหนึ่ง เพราะ มีจุดหลอมเหลงต่ำ มีความสามารถในการไหลเข้าแบบหล่อที่ดี ทำให้สามารถหล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนได้ง่าย และสามารถใช้เทคนิคการหล่อหลอมได้หลายวิธี เช่น การใช้วิธีการหล่อด้วยแบบทราย (Sand Mold), หล่อด้วยแบบหล่อถาวร, หล่อด้วยแบบหล่อโลหะดดยใช้แรงอัดฉีดโลหะเข้าแบบหล่อ เป็นต้น

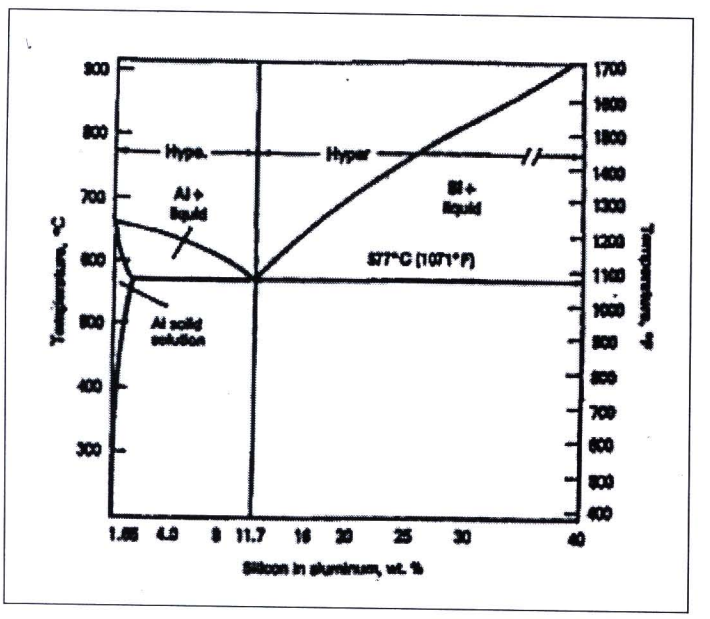
โลหะผสมสำหรับงานหล่อมีการพัฒนามาจากระบบยูเทคติกของระบบ 2 ธาตุ เช่น อะลูมิเนียมซิลิคอน (Aluminum-silicon) อะลูมิเนียม-ทองแดง (Aluminum-Copper) อะลูมิเนียม-แมกนีเซียม (Aluminum-Magnesium) เป็นต้น ดังรูปที่ 2.8 อย่างไรก็ตามโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อที่นิยมใช้งานส่วนใหญ่พัฒนามาจากอะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยอาจเติมธาตุต่างๆ ลงไปเพื่อทำให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไหใช้งานกว้างขวางขึ้น เช่น ทำให้มีความสามารถในการผ่านกรรมวิธีความร้อน (Heat Treatment) ทำให้เพิ่มความแข็งด้วยการทำให้เป็นสารละลายของน้ำแข็ง (solid Solution Hardening) และทำให้เพิ่มความแข็งแรงในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (Hot Strength)



รูปที่ 2.8 การแบ่งกลุ่มของโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ [2]

2.11.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนหล่อ

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมีการนำไปใช้งานประมาณ 85-90% โดยรวมของโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อในงานผลิตชิ้นส่วนต่างๆ เนื่องจากมีธาตุซิลิคอนผสมอยู่ช่วยเพิ่มความสามารถในการหล่อหลอมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดี เพิ่มความสามารถในการกลึงไสตบแต่งผิวชิ้นงานและความสามารถในการเชื่อมซิลิคอนมีสมบัติหลายประการที่แตกต่างจากอะลูมิเนียม โดยเฉพาะในด้านของโครงสร้างผลึกและจุดหลอมเหลว ดังนั้นการรวมตัวกันระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนจึงมีขอบเขตจำกัดมาก ซิลิคอนสามารถละลายกับอะลุมิเนียมได้สูงสุดเพียง 1.65 wt. % ที่อุณหภูมิ 577 °C ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภูมิสมดุลของโลหะผสมอะลูมิเนียม – ซิลิคอน [2]

ปริมาณของซิลิคอนจะละลายได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ และเมื่ออุณหภูมิต่ำลงกว่า 577°C ซิลิคอนสามารถละลายได้สูงสุดเพียง 0.1 wt.% ที่อุณหภูมิ 200°C จากแผนภาพสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนจะมีลักษณะเด่นชัดที่ซิลิคอนแยกตัวไม่ละลายในอะลูมิเนียม โดยให้ปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic Reaction) ที่อุณหภูมิ 577°C และมีส่วนผสมของซิลิคอนที่ 11.7 wt.% การแยกตัวให้ปฏิกิริยายูเทคติกจะพบเฟสที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิคอนที่ไม่สามารถละลายเข้ากับอะลูมิเนียมหลอมเหลวและแยกตัวออกมาอยู่ตามบริเวณขอบเกรนซึ่งอาจจะเป็นซิลิคอนบริสุทธิ์หรือสารประกอบเชิงโลหะที่มีสมบัติแข็งและเปราะ ซึ่งถ้าโครงสร้างมีการตกผลึกของเฟสของแข็งนี้และมีขนาดใหญ่จะส่งผลให้โลหะผสมมีความแข็งแรงต่ำ และมีความเหนียวลดลง แต่เนื่องมาจากเป็น

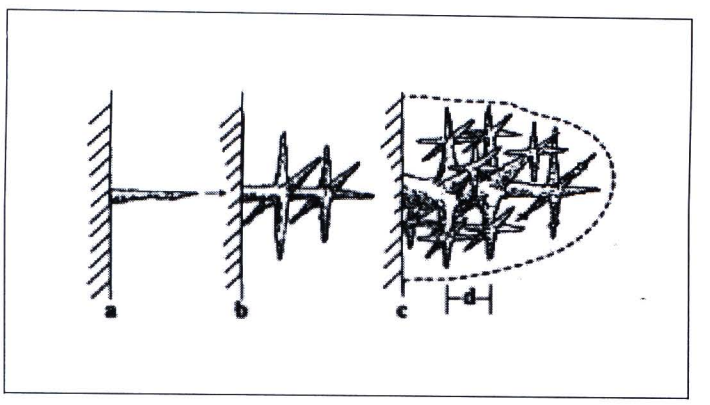
โลหะผสมที่ให้ส่วนผสมยูเทคนิคที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมีสมบัติในด้านการหล่อที่ดี อัตราการหดตัวต่ำและมีความต้านทานต่อการกัดกร่อน

2.11.13 การควบคุมโครงสร้างจุลภาค

ปัจจัยซึ่งควบคุมสมบัติของอะลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติก [2] มี 2 ประการหลักคือ

1.ขนาดและรูปร่างของเกรน (Grain Size and Shape)

2.ช่วงห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ (Secondary Dendrite Arm Spacing; Das ลักษณะเหล่านี้แสดงในรูปที่ 2.10 ช่วงห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ (Das) จะมีอิทธิพลของอะลูมิเนียมผสมหล่อมากกว่าขนาดเกรนที่งนี้เพราะ das เป็นตัวกำหนดการกระจายตัวของเฟสอินเตอร์เมทัลลิกซึ่งอยู่ระหว่างแขนของเดนไดรต์ (Interdendritric Intermetallic Constituent) และการกระจายตังของโพรงหดตัวระหว่างเดนไดรต์ (Interdendritric Shrinkage) ในอะลูมิเนียมผสมยูเทคติก และใกล้ยูเทคติก ลักษณะรูปพรรณสัณฐาน (ได้แก่ ขนาด รูปร่าง และการกระจายในเนื้อโลหะ) ของเฟสยูเทกติกซิลิคอน มีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อสมบัติของอะลูมิเนียมผสม พื้นฐานทางโลหะวิทยาของอะลูมิเนียมผสมสามารถอธิบายอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 2.10 ด้วยการพิจารณาตัวอย่างของแผนภูมิสมดุลระบบ 2 ธาตุของอะลูมิเนียมซิลิคอน รวมทั้งภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของงานหล่อเมื่อหล่อเสร็จ (Das-cast Microstructure) ของโลหะไฮโปยูเทกติก (a) โลหะผสมยูเทกติก (b) และโลหะไฮเปอร์ยูเทกติก (c) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



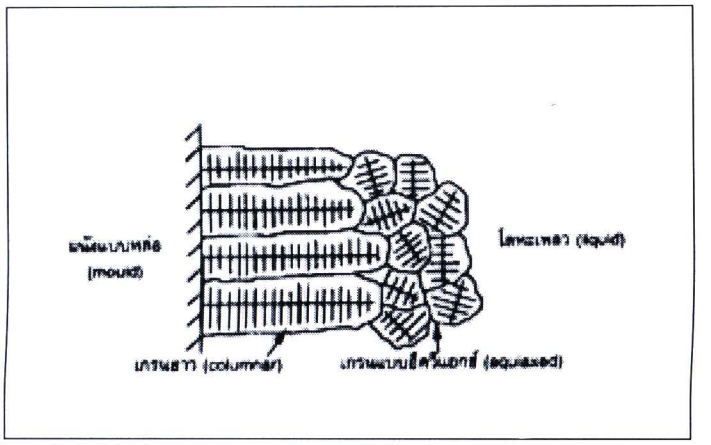
รูปที่ 2.10 แบบจำลองอย่างง่ายแสดงการเติบโตของผลึกแบบแตกกิ่งก้าน (Dendrite Growth in Columnar and Equiaxed Grain) [2]

ขั้นตอนการเจริญเติบโตของเดนไดร์ต

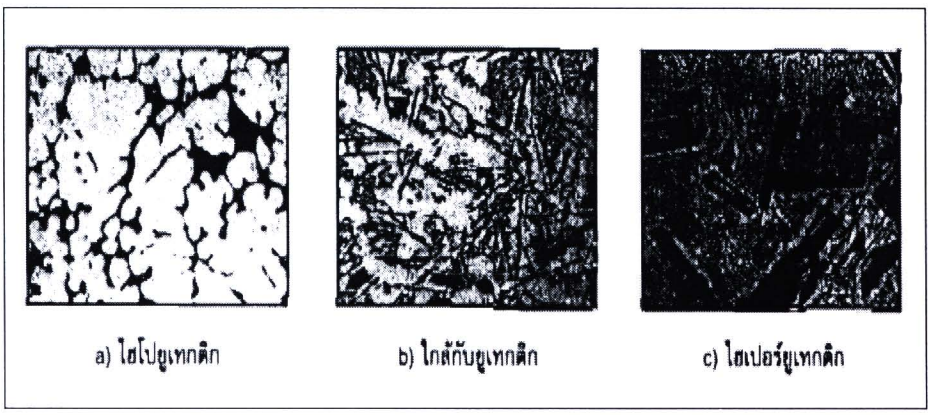
a) แขนเดนไดร์ตขั้นปฐมภูมิ b) แขนเดนไดร์ตขั้นทุติยภูมิเกิดจากด้านข้าง

c) แตกกิ่งก้านมากมาย d) ระยะระหว่างแขนเดนไดร์ตขั้นที่สองหรือทุติยภูมิ, das

เดนไดร์ตเติบโตในเกรนยาวและเกรนอิควิแอกซ์ (Dendrite growth in columnar and equiaxed grain)



รูปที่ 2.10 แบบจำลองอย่างง่ายแสดงการเติบโตของผลึกแบบแตกกิ่งก้าน (Dendrite Growth in Columnar and Equiaxed Grain) [2] (ต่อ)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนกลุ่มต่างๆ [2]

1.อะลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติกมีแนวโน้มที่จะเกิดการหดตัวระหว่างแขนเดนไดรต์ได้ เนื่องจากช่วงการแข็งตัวกว้าง

2.อะลูมิเนียมผสมไฮเปอร์ยูเทกติกเหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องทนต่อการสึกหรอ และความคงตัวขนาดและรูปร่าง

2.12 องค์ประกอบและคุณสมบัติของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย [3]

อะลูมเนียม-ซิลิกอนอัลลอย เป็นอัลลอยที่ใช้มากที่สุดในงานฉีดอะลูมิเนียมเนื่องจากมี คุณสมบัติในการหล่อดีเยี่ยมใกล้เคียงกับความสามารถที่ต้องการในการหล่อแบบฉีดมากที่สุดดังนี้

1. มีการไหล (Fluidity) ที่ดี
2. มีการหดตัว (Shrinkage) น้อย

3. การแตกขณะร้อน (Hot Shortness) น้อย

4. ไม่ติดกับผิวของแม่พิมพ์ง่าย

อัลลอยที่นิยมแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงอัลลอยที่นิยมใช้ในงานฉีดอะลูมิเนียมและส่วนผสม

อัลลอย	ส่วนผสม					
	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	อื่นๆ
380	8.50	3.50	<0.10	<1.30	<3.00	
383	10.00	2.50	0.10	1.30	<3.00	0.15
384	11.00	2.00	<0.30	<1.30	<3.00	0.35
390	17.00	4.50	0.55	<1.30	<0.100	<0.1Mg
413	12.00	<0.10	<0.10	<0.20	-	

ซึ่งอัลลอยที่ได้รับความนิยมสูงเนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับที่กล่าวมาแล้วได้แก่ อัลลอย 380 ตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งเทียบได้กับมาตรฐานอื่นๆ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงอัลลอย 380 และส่วนผสมเทียบกับมาตรฐานอื่นๆ

(Alan Kaye และ Arther Street, 1983: 29)

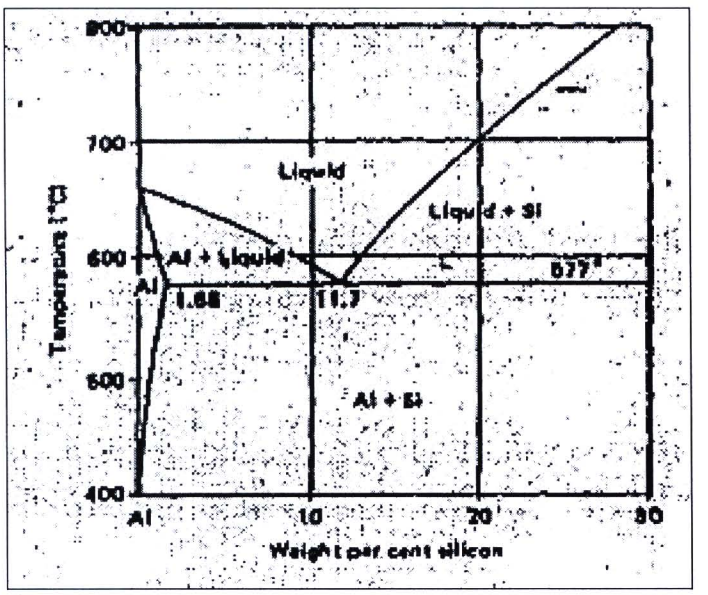
ประเทศ	มาตรฐาน	ชื่อ	Cu	Si	Fe	Zn	Mn
International	ISO DLS 3522	AlSi8Cu3Fe	2.5-4.0	7.5-9.5	1.3	1.2	0.6
Belgium	NBN436	DG AlSi8Cu3Fe	2.5-4.0	7.0-9.5	1.3	1.0	0.6
Canada	HA3	SC 84N	3.0.4.0	7.5-9.5	0.6	0.1	0.1
		SC 84R	3.0-4.0	7.5-9.5	1.2	1.2	0.5
Denmark	DS3002	4254	2.0-4.0	7.5-10.0	1.1	3.0	0.5
Finland	SFS568	G-AlSi9Cu3Fe	2.0-4.0	7.5-10.0	1.25	1.2	0.5
France	NF A57-703	A-S9U9A-Y4	2.5-4.0	7.5-10.0	1.3	1.2	0.5
W.Germany	DIN1725/2	G-AlSi8Cu3(226)	2.0-3.5	7.5-9.5	0.8	1.2	0.5
		GD-lSi8.5Cu(226D)	2.0-3.5	7.5-9.5	1.3	1.2	0.5
Italy	UNI3601	G-AlSi8.5Cu	3.0-4.0	7.5-9.5	0.8	0.05	0.5
	UNI5075	GDAlSi8.5Cu35Fe	3.0-4.0	8.0-9.5	1.1	1.0	0.5
Japan	JIS	ADC10	2.0-4.0	7.5-9.5	1.3	1.0	0.5
	H5302	ADC12	1.5-3.5	10.5-12.0	1.3	1.0	0.5

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงอัลลอย 380 และส่วนผสมเทียบกับมาตรฐานอื่นๆ

(Alan Kaye และ Arther Street, 1983: 29) (ต่อ)

ประเทศ	มาตรฐาน	ชื่อ	Cu	Si	Fe	Zn	Mn
Netherlands	NEN6022	Alsi8Cy3	2.5-4.5	7.0-9.5	0.7	1.0	0.6
Norway	NSI7530	Alsi9Cu3	2.0-4.0	7.5-10.0	1.0	1.3	0.5
Spain	UNB8-203-76	L2630	2.5-4.0	7.5-10.0	1.0	3.0	0.5
Sweden	SISI44252	4252	2.0-4.0	7.5-10.0	1.1	1.2	0.5
Switzerland	VSM10895	G-AlSi8Cu3	2.0-3.5	7.5-9.5	1.3	1.2	0.5
UK	BS1490	LM24	3.0-4.0	7.5-9.5	1.3	3.0	0.5
USA	ASTM B179-80	A380	3.0-4.0	7.5-9.5	2.0	3.0	0.5

ซึ่งอัลลอย ADC12 นี้มีปริมาณการใช้ในประเทศญี่ปุ่นสำหรับงานฉีดอะลูมิเนียมมากที่สุดเนื่องจากมีปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ยูเทคติค (ประมาณ 12%) ทำให้มีความสามารถในการเย็นตัวได้อย่างทันทีทันใด และมีจุดหลอมเหลวต่ำอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ประมาณ 100 องศาเซลเซียล ทำให้อายุของแม่พิมพ์นานขึ้น มีคุณสมบัติความสามารถในการไหลที่ดี ช่วงการแข็งตัวแคบทำให้เกิดการฉีกขาดเมื่อร้อน (Hot Tear) ได้ยาก และการเกิดรูพรุนขึ้นภายในจะมีโอกาสเกิดได้น้อยกว่าอัลลอยที่มีช่วงการแข็งตัวกว้าง จากแผนภาพสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยดังรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นว่าจุดยูเทคติคซิลิกอนสามารถละลายได้ 11.7% แต่สามารถเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 11.7-12.7% ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว ในการใช้อะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยโดยใช้ส่วนผสมซิลิกอนที่ยูเทคติคนั้น อัตราการเย็นตัวมีผลต่อความแข็งแรงมาก ถ้าอัตราการเย็นตัวช้าจะทำให้ซิลิกอนแยกตัวออกมาอยู่ในรูปเกล็ดหยาบ (Coarse flake) ขึ้นในเมตริกซ์ของอะลูมิเนียม โดยเกิดขึ้นขณะฉีดน้ำอะลูมิเนียมเข้าแม่พิมพ์จะทำให้อัลลอยนั้นมีความแข็งแรงและความเหนียวต่ำ ถ้าซิลิกอนแยกออกมานี้มีขนาดใหญ่จะให้การกลึงบริเวณนั้นยากขึ้นด้วย



รูปที่2.12 รูปแสดงแผนภาพสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย

(Alan Kaye และ Arther Street, 1983:24) [3]

2.13 ลักษณะโครงสร้างของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย [3]

ในสภาพการเย็นตัวตามปกติในแบบหล่อทราย โดยไม่ได้ทำการปรุง (Modification) แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ลักษณะคือ

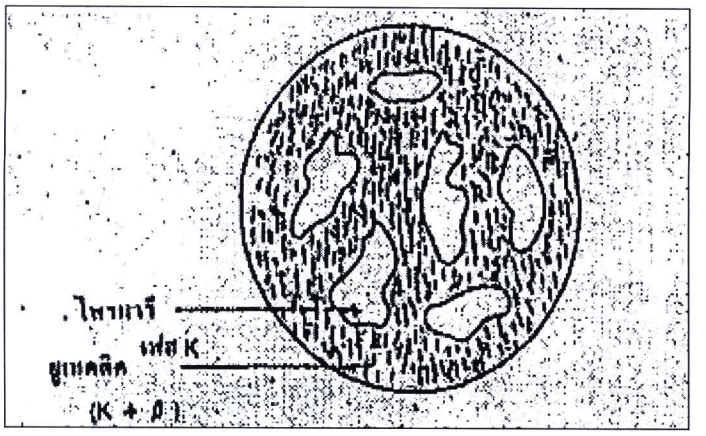
ก. โลหะผสมประเภทไฮโปยูเทคติค (ซิลิกอนต่ำกว่า 11.6%) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ

1.โลหะผสมที่มีซิลิกอนต่ำกว่า 1.65% โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟส K หรือ α เพียงเฟสเดียว เป็นลักษณะของโลหะผสมที่อยู่ในกลุ่มขึ้นรูปเย็น (Wrought)

2.โลหะผสมที่มีซิลิกอนสูงกว่า 1.65% แต่ไม่เกิน 11.6 โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟส K โดยมีโครงสร้างยูเทคติค (K+β) อยู่รอบบริเวณขอบเกรน

ข. โลหะผสมยูเทคติค (11.6%ซิลิกอน)

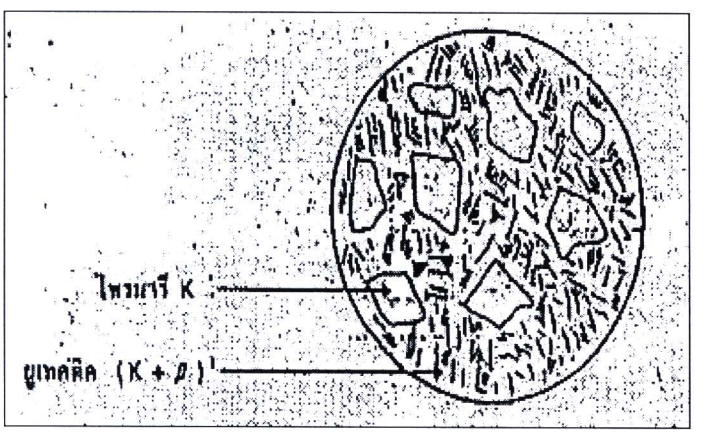
โครงสร้างประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กของเฟส K กับเฟสβ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปแท่งหรือรูปเข็ม แทรกสลับกันอยู่ในเฟส K ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปแสดงโครงสร้างยูเทคติค [3]

ค. โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติค (มากกว่า 11.6% ซิลิกอน)

โครงสร้างประกอบด้วยเฟสβ เป็นลักษณะรูปหลายเหลี่ยม กระจัดกระจายโดยมีโครงสร้างยูเทคติค (K+β) ล้อมรอบดังรูปที่ 2.14



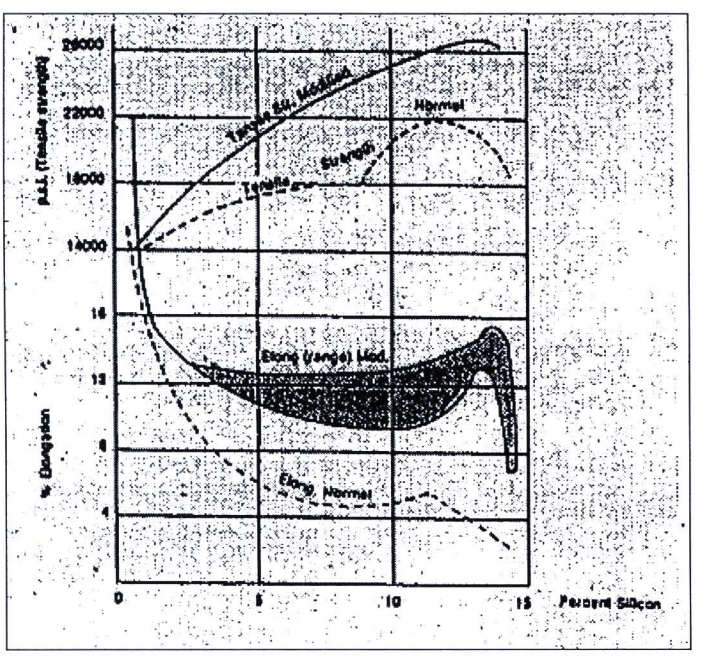
รูปที่ 2.14 รูปแสดงโครงสร้างของไฮเปอร์ยูเทคติค [3]

โครงสร้างภายหลังการทำการปรุง (Modification) จะปรากฏจัดยูเทคติคต่ำลง และเคลื่อนไปอยู่ที่ 14% ซิลิกอน โครงสร้างของโลหะผสมประเภทไฮโปยูเทคติค ไม่ค่อยจะเกิดการเปลี่ยนแปลง เพียงลักษณะของเกรนจะเล็กละเอียดเพราะเกิดปฏิกิริยายูเทคติค ที่ให้เฟส K และ β พร้อมกันเกิดที่อุณหภูมิต่ำลง (564°C) และมีเฟส K ชนิดไพรมารี่มีปริมาณน้อยลง

โครงสร้างของโลหะผสมยูเทคติค (11.6%ซิลิกอน) เมื่อจุดยูเทคติคเปลี่ยนไปอยู่ที่14% ซิลิกอน ภายหลังการทำการปรุง จึงให้โครงสร้างใหม่มีลักษณะเป็นโลหะผสมไฮโปยูเทคติคคือ มีเฟส K ขนาดเล็กเกิดขึ้นและมีโครงสร้างยูเทคติคที่ประกอบด้วยเฟส K และเฟส β ขนาดเล็กเกิดขึ้นล้อมรอบ

ด้วยเฟส K ที่เป็นไพรมารี่ มีผลทำให้โลหะผสมภายหลังการทำการปรุงมีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มขึ้น

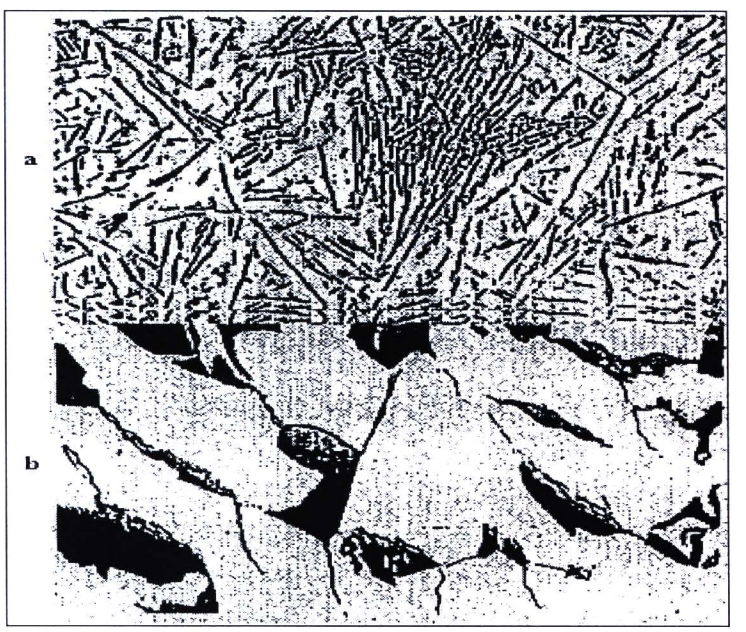
โครงสร้างของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติค (มากกว่า 11.6%ซิลิกอน) ในที่นี้ถ้าพิจารณาโลหะผสมที่ 14%ซิลิกอน ภายหลังเมื่อทำการปรุงจะทำให้โลหะผสมนี้กลายเป็นโลหะผสมยูเทคติคซึ่งจะได้โครงสร้างภายหลังเย็นตัวเป็นลักษณะโครงสร้างยูเทคติค (K+β) ที่มีขนาดเล็กละเอียดเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสมที่ให้ผลสูงมาก ทั้งความแข็งแรงและความเหนี่ยวดังรูปที่ 2.15 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างความแข็งแรงทางดึง (Tensile Strength) กับเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) ของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยที่เปอร์เซ็นต์ของซิลิกอนต่างๆ กัน ระหว่างการเย็นตัวปกติในแบบทรายกับสภาพการเย็นตัวโดยผ่านการปรุงด้วยโลหะโซเดียม



รูปที่ 2.15 แสดงคุณสมบัติต่างๆของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างแบบไม่ปรุงและแบบที่ปรุงด้วยโลหะโซเดียม [3]

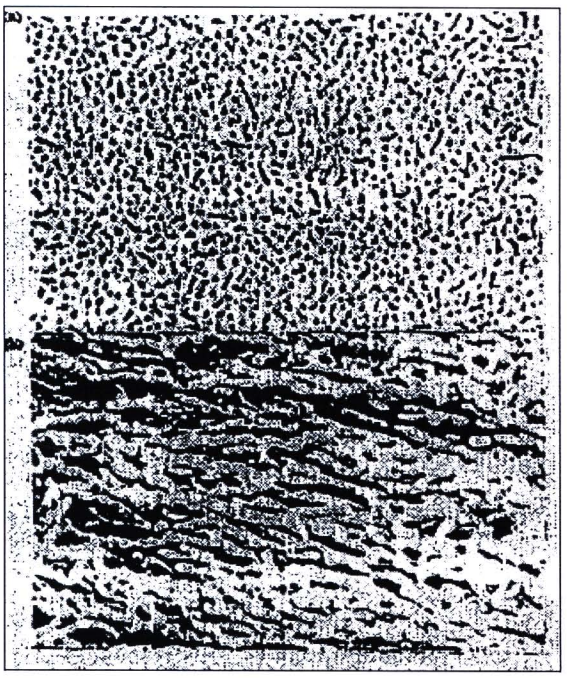
ในการหล่อแบบถาวรและการหล่อแบบทราย การปรุงอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย นั้นต้องการส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อช่วยให้เกรนมีขนาดเล็กลงและเปลี่ยนเปลี่ยนซิลิกอนที่เป็นเกล็ดหยาบ (Coarse Flake) ให้อยู่ในรูปเส้น (Fibrous) หรือรูปแท่ง(Rod) ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยใช้โซเดียมประมาณ 0.05% จากการศึกษาและรวบรวมโดย C.B. Kim และ R.W. Heine (1963:367) จากมหาวิทยาลัยวิสคอนซิน พบว่า อัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย จะมีผลใกล้เคียงกับการเติมโซเดียม โดยซิลิกอนนั้นจะก่อตัวอยู่ในรูปแท่ง อีกทั้ง M.G. Day และ A. Hellawell (1967:377) ได้ศึกษา ระดับจุลภาคและการเกิดผลึกของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย ที่ยูเทคติคในเรื่องส่วนผสม ระยะการแข็งตัวและอุณหภูมิ ทำการเปรียบเทียบการเย็น

ตัวอย่างช้าๆและการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้ซิลิกอนก่อตัวและเติบโตขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง ทำให้เกิดอยู่ในรูปแท่ง (Rod Form) ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่ารูปเกล็ดหยาบ และเป็นการยืนยันว่า การเย็นตัวอย่างรวดเร็วให้ผลเหมือนการปรุงด้วยโซเดียมในการหล่อแบบทราย ดังรูปที่ 2.16a, 2.16b แสดงถึงอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยที่ยังไม่ได้ปรุงเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยที่ปรุงแล้วในรูปที่ 2.17a, 2.17b



รูปที่ 2.16 a แสดงระดับจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยยังไม่ได้ปรุงที่ซิลิกอน 12.7% โดยเย็นตัวอย่างช้าๆ (x120) [3]

รูปที่ 2.16 b แสดงเกล็ดซิลิกอนในอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย (ชิ้นงานผ่านการกัดกรดลึกและถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (x 1000)) (Alan Kaye และ Arther Street, 1983:25) [3]



รูปที่ 2.17a รูปแสดงระดับจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยปรุงแล้ว ที่ซิลิกอน12.7% (x 120) [3]

รูปที่ 2.17 b รูปแสดงซิลิกอนรูปแท่งในอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย (ชิ้นงานผ่านการกัดกรดลึกและถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (x 500)) (Alan Kaye และ Arther Street, 1983:26) [3]

ในส่วนผสมของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน อัลลอยกลุ่ม ADC12 ยังมีส่วนผสมของเหล็กอยู่ประมาณ1.3% ด้วย จากการศึกษาของ B.A. Gillelt และ K.G. Lalimer (1970:955) พบว่า ถ้ามีเหล็กผสมอยู่ประมาณ 1.3% จะช่วยให้การหลอมติดของน้ำอะลูมิเนียมกับหน้าแม่พิมพ์น้อยลง ถึงแม้จะมีการพ่นน้ำหล่อลื่นหน้าแม่พิมพ์อยู่แล้วก็ไม่เพียงพอ เนื่องจากบริเวณตรงข้ามทางเข้าจะได้รับผลกระทบจากการหมุนวนของน้ำอะลูมิเนียมทำให้บริเวณนี้มีความร้อนสูงเกิดการหลอมติดได้ง่าย ถ้าในน้ำอะลูมิเนียมมีเหล็กผสมอยู่ 1.3% จะช่วยลดการหลอมติดจากสาเหตุนี้ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ไม่ควรมีเหล็กผสมอยู่มากกว่านี้ เพราะจะเกิด α-AlFeSi ขึ้นทำให้เกิดเป็นจุดแข็ง (Hard Spot) และมีความแข็งแรงทางดึงลดลงด้วย อีกทั้งจากการรายงานของ C.A. Qucener และ W.L. Mitchell (1965:70) ได้ทำการทดลองกลึง เจาะ อัลลอย380 ตามมาตรฐานอเมริกัน โดยใช้ชิ้นงาน 1 ½ กิโลกรัม จำนวน 105 ชิ้น ในการทำงาน 38 วินาที พบว่า ถ้าลดปริมาณเหล็กในส่วนผสมลงจาก 1.4% เป็น 0.7% จะช่วยให้อายุของเครื่องมือตัดยาวนานขึ้น

2.14 การฉีดอะลูมิเนียมด้วยความดันในแม่พิมพ์โลหะ [3]

องค์ประกอบที่สำคัญ 3 อันดับแรกในงานฉีดประกอบด้วย (H.H. Docholer, 1951:3)

1. เครื่องจักร กลไก ที่ใช้ในการฉีด
2. การออกแบบชิ้นงานและการออกแบบแม่พิมพ์
3. อัลลอยที่เหมาะสม

ซึ่งต้องเป็นมาตรฐานเพื่อให้การทำงานถูกต้องหรือใกล้เคียงกันทุกครั้งเมื่อได้องค์ประกอบทั้ง 3 ข้อแล้ว สิ่งที่ต้องพิจารณาต่อไปคือ สภาวะการฉีดนั่นเอง เนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของงานฉีดสูงทั้งควบคุมได้ยาก และไม่สามารถกำหนดได้แน่นอน

ในการปฏิบัติงานฉีดจริง ปัจจัยต่างๆที่ต้องควบคุมของเครื่องจักรจะถูกตั้งไว้แน่นอนแล้วพร้อมทั้งปัจจัยที่สามารถเกิดได้จากแม่พิมพ์ก็ถูกควบคุมจากแม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบมาแล้ว ซึ่งทำให้ปัจจัยต่างๆแปรค่าไปได้จนกระทั่งเข้าจุดที่สมดุลที่สุดที่การฉีกขณะนั้น

2.14.1 ทฤษฎีที่ใช้เพื่อพิจารณาการไหลของอะลูมิเนียมในแม่พิมพ์ฉีดมีดังนี้

2.14.1.1 ทฤษฎีของ Frommer (H.H. Docholer, 1951:126-129)

Frommer ได้ทำการศึกษาสภาวะการฉีดในงานฉีดสังกะสี โดยทำแม่พิมพ์เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้พบสิ่งเกิดขึ้นดังนี้

น้ำโลหะเข้าไปในแม่พิมพ์โดยผ่านทางเข้า (Gate) พุ่งเข้าไปโดยมีรูปร่างสัมพันธ์กับภาคตัดขวางของทางเข้า แล้วเข้าไปชนด้านตรงข้ามของแม่พิมพ์ เกิดการหมุนวนในตำแหน่งนั้นแล้วค่อยไหลล้นไปตามผิวแม่พิมพ์แล้วเต็มแม่พิมพ์ในที่สุด โดยตรงกลางแม่พิมพ์จะเป็นจุดที่แข็งตัวเป็นอันดับสุดท้าย ซึ่งการพุ่งเข้าแม่พิมพ์จะขึ้นกับพลังงานการไหลหรือแรงดันที่ให้กับน้ำโลหะ และแรงเสียดทานที่ผิวแม่พิมพ์กับอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะนั่นเอง น้ำโลหะที่ไหลวนที่ผิวของแม่พิมพ์ก่อนที่จะไหลลงมาเรียกว่า “Forerunners” ซึ่งถ้ายิ่งมีขนาดเล็กก็จะมีผลอย่างมากต่อแรงเสียดทานและการเย็นตัว ความเร็วของ forerunners จะลดลงตามระยะทางที่ห่างจากจุดที่น้ำโลหะพุ่งปะทะ (Pool) ค่าความดันและค่าความเร็วในการฉีดสัมพันธ์กันดังสมการ

$V = \sqrt{2gP/D}$

V = ความเร็วในการฉีด

g = ความเร่งโน้มถ่วย

P = ความดันในการฉีด

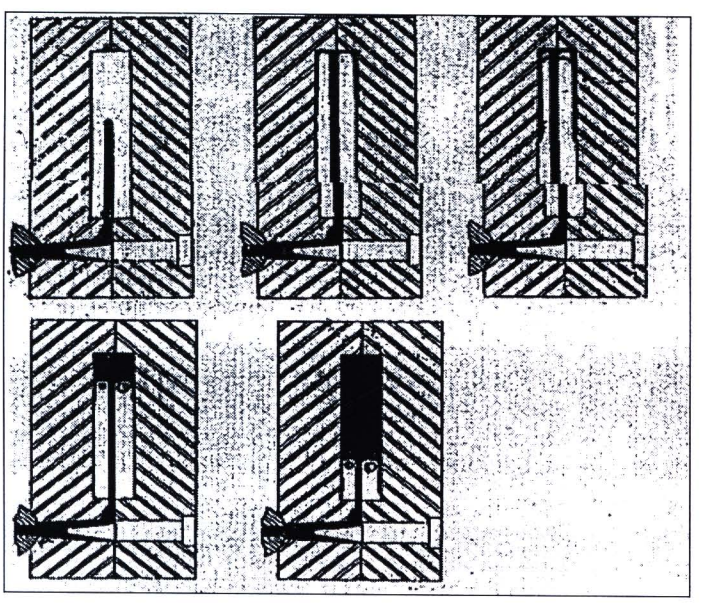
D = ค่าความถ่วงจำเพาะของอัลลอ

$V = \sqrt{P}$ *0.87 สำหรับอะลูมิเนียม

จากผลการทดลองของ Frommer สรุปได้ว่า ทางเข้าที่มีขนาดใหญ่ดีกว่าทางเข้าที่มีขนาดเล็กดังนี้

1. มีอันตรายในการฉีดน้อยกว่า
2. มีการหมุนวนของน้ำโลหะขณะฉีดน้อยกว่า
3. การปั่นป่วนที่จุดเข้าปะทะ (Pool) น้อยกว่า
4. การรวมตัวกับอากาศน้อยกว่า
5. น้ำโลหะที่ไหลที่ผิวแม่พิมพ์สามารถร้อยอยู่ได้นานกว่า

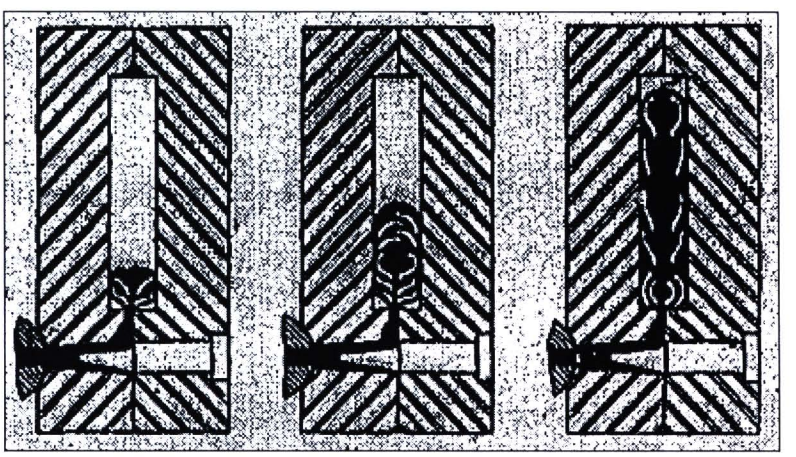
รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Frommer ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Frommer (H.H. Docholer, 1951:127) [3]

2.14.1.2 ทฤษฎีของ Brandt (H.H. Docholer, 1951:131)

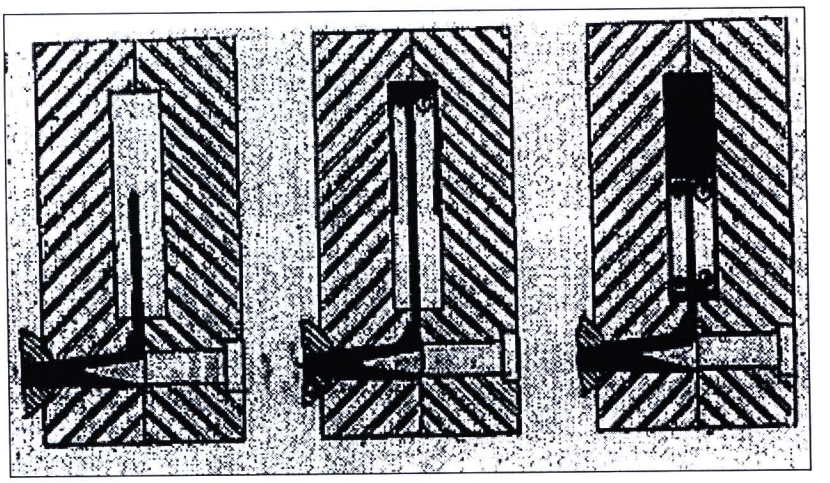
Brandt ได้ทำการศึกษาบนแม่พิมพ์ที่มีลักษณะเหมือนกับของ Frommer แต่ลักษณะการเข้าไปของน้ำโลหะจะไม่พุ่งไปด้านตรงข้ามแต่จะเข้าไปเต็มช่องว่างก่อนแล้วเพิ่มขึ้นเพื่อเติมช่องว่างให้เต็ม ซึ่งตรงข้ามกับทฤษฎีของ Frommer รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Brandt แสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Brandt (H.H. Docholer, 1951:131) [3]

2.14.1.3 ทฤษฎีของ Koester และ Gocharing (H.H. Docholer, 1951:132)

ทฤษฎีนี้ได้สนับสนุนทฤษฎีของ Frommer ซึ่ง Koester และ Gocharing แห่งสถาบันวิจัยโลหะ เมืองสตุดการ์ท ประเทศเยอรมัน ได้ทำการทดลองโดยใช้แม่พิมพ์ที่เป็นแก้วทนความร้อนรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่ในโครงโลหะ ทำให้สามารถเห็นการไหลที่เกิดขึ้นภายในได้โลหะที่ใช้คือ Wood's metal แล้วทำการทดลองเหมือนกับที่ Frommer และสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน พร้อมทั้งสิ่งที่ได้พบเพิ่มเติมคือ เมื่อน้ำโลหะเติมจนมีปริมาณมากพอทำให้แข็งตัวที่ผิวไม่ทันก็จะไหลตามผิวแม่พิมพ์ลงมาที่ด้านล่างของว่าง อย่างไรก็ตามแรงเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของแก้วกับโลหะไม่เท่ากัน ทำให้พฤติกรรมที่เห็นอาจไม่ถูกต้องนัก และโลหะที่ใช้คือ Wood's metal ซึ่งมีจุดหลอมละลายต่ำกว่าอัลลอยที่ใช้ในการฉีดจริงมาก ดังรูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Koester และ Gocharing แสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Koester และ Gocharing (H.H. Docholer, 1951:131) [3]

2.14.2 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานฉีดอะลูมิเนียมด้วยความดันในแม่พิมพ์โลหะ

การแข็งตัวอย่างรวดเร็วของน้ำโลหะในการกระบวนการฉีดด้วยความดันนี้ทำให้ชิ้นงานมีโครงสร้างที่ละเอียด มีความแข็งแรงสูง ซึ่งเป็นเหตุที่ทำให้เกิดความเค้นที่แตกต่างกันมากระหว่างผิดและเนื้อกายในชิ้นงานมีผลทำให้เกิดการแตกจากการหดตัว (Shrinkage Crack) และข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นในงานฉีดด้วยความดันมีดังนี้ (H.H. Docholer, 1951:134-140)

1. รูที่เกิดจากหดตัว (Shrink Hole) เกิดจากการเติมน้ำโลหะเข้าไปไม่พอ เมื่อเกิดการเย็นตัวโลหะจะหดตัวทำให้เนื้อโลหะส่วนที่แข็งตัวที่หลังหายไป สังเกตได้ว่า รูนี้จะขรุขระและไม่มีรูปร่างที่แน่นอน
2. รูที่เกิดจากก๊าซ (Gas Hole) เกิดจากการที่ก๊าซไม่สามารถหนีออกได้ทันก่อนที่น้ำโลหะแข็งตัว สังเกตได้ รูนี้จะมีลักษณะมน กลม และเรียบ
3. อัตราส่วนผสมไม่เท่ากันทำให้เนื้อไม่เข้ากัน (Segregation) เกิดจากส่วนผสมที่ไม่เท่ากันในแต่ละชั้นทำให้ส่วนที่มีอัลลอยมากแข็งตัวช้า ส่วนที่มีอัลลอยน้อยแข็งตัวเร็วกว่า ทำให้ชิ้นงานที่ได้เหมือนมี 2 ผิว จะเกิดมากถ้าอุณหภูมิและอัตราการฉีดน้ำโลหะต่ำมาก
4. รอยแตกจากการหดตัว (Shrink Crack) เกิดจากความเค้นภายในระหว่างการแข็งตัวมีค่าสูงกว่าความเหนียวและความแข็งแรงของน้ำโลหะที่แข็งตัวอจากสถานะของเหลว
5. รูพรุน (Porosity) โครงสร้างที่เป็นรูพรุนมันเกิดจากน้ำโลหะสกปรกมีออกไซด์เข้าไปในชิ้นงานทำให้ชิ้นงานมีความทนต่อแรงกระแทกและความล้าลดลง
6. โคลด์ชัต (Cold Shut หรือ Shot Mold) เนื้อโลหะไม่ประสานกันขนาดใหญ่ มีขนาด 1-2 มิลิเมตร เกิดจากน้ำโลหะที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์แยกตัวออกจากกันเมื่อมารวมกันไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวเนื่องจากสูญเสียความร้อน ความดันและความเร็วลดน้อยลงทำให้เกิดเป็นออกไซด์ฟิลม์ขึ้น ทำให้เนื้อไม่ประสานกัน

7. โฟลว์ไลน์ (Flow Line) เนื้อโลหะไม่ประสานกันขนาดเล็ก มีขนาด 10-100 ไมโครเมตรมองเห็นเป็นเส้น มีสาเหตุเดียวกับโคลด์ชัตแต่มีขนาดเล็กกว่า เกิดที่ผิวเนื่องจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์น้อยเกินไป

8. จุดแข็ง (Hard Spot) เกิดจากส่วนผสมที่เป็นอัลลอยไม่ผสมกับอะลูมิเนียมเหลว ทำให้เกิดเป็นจุดแข็งขึ้น ซึ่งนำไปกลึงได้ยาก

2.15 สรุป

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องการดำเนินแก้ปัญหาปรับปรุงกระบวนการผลิต สิ่งที่จำเป็นต้องใช้ในการตัดสินใจคือข้อมูล (Data) แต่ข้อมูลดังกล่าวจะไม่มีประโยชน์ใดๆ เลย ถ้าข้อมูลไม่สามารถแปลงมาเป็นสารสนเทศ (Information) ที่ดีพอต่อการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ การที่จะได้มาซึ่งข้อมูลที่มีสารสนเทศครบถ้วนและน่าเชื่อถือได้นั้น จะต้องมีการวางแผนการออกแบบการทดลองอย่างรัดกุมเพื่อป้องกันไม่ให้ปัจจัยภายนอกที่ไม่ต้องการเข้าไปผสมอยู่ในข้อมูลที่ต้องการศึกษา ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการตัดสินใจในหลักการและรายละเอียดของการออกแบบการทดลองให้ถ่องแท้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการดำเนินโครงงานวิจัยนี้เพื่อให้โครงงานวิจัยได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดโดยนำหลักทฤษฎีต่างๆมาช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุและปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาชิ้นงานบกพร่องประเภท Shot Mold ในกระบวนการผลิตการฉีดอะลูมิเนียมขึ้นรูปฝาประกบหลังแผ่นจานแม่เหล็ก (HDDs) ขนาด 3.5 นิ้ว โดยเฉพาะทฤษฎีเกี่ยวกับการทดลอง หมายถึงการทดลองหรือชุดของการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรป้อนเข้า (Input Variables) ของกระบวนการหรือระบบเพื่อสังเกตผล และชี้บ่งสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงในผลลัพธ์ (Output Response) ที่ได้ ส่วนคำว่า "การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistic Design of Experiment)" หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็นถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ และยิ่งปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้