

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับ ส่วนประกอบ โครงสร้าง และคุณสมบัติของแก้ว *H. K. Pulker, 1999*

แก้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ แก้วอนินทรีย์ (Inorganic Glass) และ แก้วอินทรีย์ (Organic Glass) โดยการทดลองทางวิทยาศาสตร์ เพื่อค้นหาส่วนประกอบและคุณสมบัติของแก้วอนินทรีย์นั้นเริ่มมีการทดลองมาตั้งแต่ศตวรรษที่แล้ว แต่ในส่วนของ การทดลองเกี่ยวกับ แก้วอินทรีย์เพิ่งเริ่มจะมีการพัฒนาเมื่อไม่นานมานี้เท่านั้น ซึ่งในโรงงานที่ใช้เป็นโรงงานตัวอย่างนั้น เกล็ดที่ผลิตขึ้นมานั้นจะทำมาจากแก้วอนินทรีย์ทั้งหมด

2.1.1 ส่วนประกอบของแก้วอนินทรีย์

แก้วอนินทรีย์หรือที่คุ้นเคยกันดีคือพลาสติกใส (Transparent Plastics) นั้นเอง เป็นการสังเคราะห์มาจากสารประกอบจำพวกโพลีเมอร์ ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก คือ ธาตุนีออน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และ ไนโตรเจน ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์โมเลกุลโพลีเมอร์ขึ้นมานั้นจะได้มาจากกระบวนการที่เรียกว่า โพลีเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) โดยทั่วไปแล้วเลนส์มักจะทำมาจากเทอร์โมพลาสติก เพราะจะสามารถที่จะทำให้กลายเป็นของเหลวด้วยความร้อนได้และสามารถทำการขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่างๆได้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของส่วนประกอบและค่าการหักเหแสงของพลาสติกเมื่อมีการขึ้นรูปแล้ว

ชนิดของพลาสติก	ส่วนประกอบ	ค่าการหักเหแสง
Acrylic	Polymethyl methacrylate	1.491
Styrene	Polystyrene	1.590
NAS	Methylmethacrylate	1.562
CR39	Allyldiglycolcarbonate	1.490
ABS	Acrylonitril-butadiene-styrene Copolymer	

2.1.2 โครงสร้างของแก้วอนินทรีย์

โครงสร้างของของแก้วอนินทรีย์สามารถเป็นได้ทั้ง โครงสร้างแบบอสัณฐาน(Amorphous) โครงสร้างแบบผลึก (Crystalline) หรือเป็นแบบผสม โครงสร้างแบบผลึกของพลาสติกค่อนข้างที่จะเกิดได้ยาก เนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลต้องการระยะเวลาการจัดเรียงโครงสร้างที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นแก้วอนินทรีย์ส่วนมากจึงมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน แต่ใน

บางครั้งจะพบว่าโครงสร้างแบบผลึกมีการปะปนอยู่ในโครงสร้างแบบอสัณฐาน โครงสร้างในลักษณะนี้ก็จะกลายเป็นโครงสร้างแบบผสม ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะไม่สามารถใช้ในกระบวนการผลิตเลนส์ได้

2.1.3 คุณสมบัติทางกลของแก้วอนินทรีย์

แก้วจะมีสมบัติเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง โดยคุณสมบัติที่สำคัญของของแข็ง คือ ค่าความยืดหยุ่น (Elasticity) ค่าของการผิดรูปร่าง (Rheology) และค่าความแข็ง (Strength) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับกระบวนการทางกลของการเปลี่ยนรูปของโมเลกุล การไหลของของไหล และการออกแบบโครงสร้างเฉพาะของแต่ละโรงงานที่ผลิต

2.1.4 คุณสมบัติทางเคมีของแก้วอนินทรีย์

แก้วอนินทรีย์จะสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนทางเคมีได้ดีมาก และจะมีความทนทานมากกว่าแก้วอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเลือกใช้สารเคมีที่จะนำมาใช้ในการทำความสะอาดแก้วอนินทรีย์จึงสามารถเลือกใช้ได้อย่างหลากหลาย

2.1.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแก้วอนินทรีย์

ข้อมูลที่ใช้ในการบ่งบอกคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแก้วอนินทรีย์ จะมีค่า ความต้านทานไฟฟ้าของพื้นผิว (Surface Resistivity) ค่าคงที่การเป็นฉนวน (Dielectric Constant) ค่าสูญเสียการเป็นฉนวน (Dielectric Loss) และค่าความแรงของการเป็นฉนวน (Dielectric Strength) โดยค่าต้านทานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของแก้ว อุณหภูมิ และสภาพของบรรยากาศ ซึ่งแก้วอนินทรีย์นั้นจะมีคุณสมบัติเป็นประจุตัวนำที่อุณหภูมิสูง และจะเป็นฉนวนที่อุณหภูมิต่ำ

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการเคลือบผิวเลนส์

เลนส์ที่สัมผัสกับบรรยากาศ โดยทั่วไปแล้วจะสามารถถูกปนเปื้อนได้โดยง่าย โดยอนุภาคที่ฟุ้งกระจายตามบรรยากาศหรืออนุภาคที่ติดอยู่ตามร่างกาย ซึ่งอนุภาคที่ฟุ้งกระจายอยู่เหล่านี้อาจเป็นได้ทั้ง ฝุ่น ของเหลว ของแข็ง สารประกอบไอออนิก สารประกอบโควาเลนต์ สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ซึ่งสารเหล่านี้สามารถปนเปื้อนไปยังผิวเลนส์ได้ ดังนั้นก่อนที่เลนส์จะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการเคลือบนั้น ผิวของเลนส์จะต้องมีความสะอาดและเรียบเพียงพอ ซึ่งถ้าพื้นผิวเลนส์ที่ถูกเคลือบไม่สะอาดและเรียบเพียงพอความสามารถในการเกาะติดผิวเลนส์ของน้ำยาเคลือบที่ใช้เคลือบก็จะลดน้อยลง หรือไม่สามารที่จะเคลือบติดอยู่บนผิวของเลนส์ได้เลย เพราะฉะนั้นกระบวนการทำความสะอาดผิวเลนส์จึงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งกระบวนการหนึ่งในการเคลือบผิวเลนส์ ดังนั้นขั้นตอนของกระบวนการเคลือบผิวเลนส์สามารถแบ่งออกได้เป็น กระบวนการเตรียมผิวเลนส์หรือกระบวนการทำความสะอาดผิวเลนส์ และกระบวนการเคลือบผิว

2.2.1 กระบวนการทำความสะอาดผิวเลนส์

การทำความสะอาดผิวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้คือ

2.2.1.1 การทำความสะอาดทางอะตอม โดยจุดประสงค์ของวิธีการนี้จะใช้เฉพาะในการทดลองทางวิทยาศาสตร์ โดยจะต้องทำในระบบสุญญากาศ ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นกระบวนการทำความสะอาดที่ค่อนข้างซับซ้อนและยุ่งยากมากจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรม

2.2.1.2 การทำความสะอาดทางเทคโนโลยี โดยวิธีการทำความสะอาดประเภทนี้ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีอยู่ค่อนข้างหลากหลายกรรมวิธี เช่น การทำความสะอาดด้วยสารละลาย การทำความสะอาดด้วยไอของสารละลาย (Vapour Degreasing) การทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิก การทำความสะอาดด้วยความร้อนและการแผ่ความร้อน หรือการทำความสะอาดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งการที่จะเลือกใช้กรรมวิธีใดนั้นจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น คุณสมบัติของสารปนเปื้อน ระดับของความสะอาดที่ต้องการ เป็นต้น ดังนั้นในอุตสาหกรรมทั่วไป จึงจะใช้การทำความสะอาดทางเทคโนโลยี ในการทำความสะอาด เช่นเดียวกันกับโรงงานผลิตเลนส์ที่ทำวิจัยได้ใช้เป็นโรงงานกรณีศึกษา จะใช้กระบวนการทำความสะอาดเลนส์ดังนี้

2.2.1.2.1 การขัดผิวเลนส์

คือ การเช็ดผิวหน้าเลนส์ด้วยผ้าชุบสารละลาย หรือสารผสม เป็นต้น โดยวิธีการนี้เหมือนของผ้าสัมผัสนบนพื้นผิวเลนส์ สารละลายจะทำการตัดทอนและให้แรงเฉือนของของเหลว กับอนุภาคที่ติดอยู่บนผิวเลนส์ วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการกำจัดสารปนเปื้อนออกจากผิวเลนส์ และมักจะทำเป็นกระบวนการแรกก่อนกระบวนการล้างเลนส์ขั้นตอนต่อไป

2.2.1.2.2 การทำความสะอาดด้วยสารละลาย

วิธีการนี้ค่อนข้างที่ง่ายและไม่ซับซ้อนมากนัก บางครั้งอาจจะเรียกกระบวนการล้างด้วยสารละลายว่า การทำความสะอาดด้วยกระบวนการแช่ หรือการทำความสะอาดด้วยกระบวนการจุ่ม สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการนี้สามารถที่จะหาซื้อได้โดยทั่วไปและราคาไม่แพงมากนัก ดังนั้นจะเป็นกระบวนการที่เป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท โดยอุปกรณ์จะประกอบด้วยถังเปิดที่อาจจะทำมาจากแก้ว พลาสติก หรือสแตนเลส ซึ่งถังเปิดจะบรรจุของเหลวที่ใช้ทำความสะอาดไว้ภายใน และเลนส์ก็จะถูกแช่อยู่ในของเหลวภายในถึงเปิด โดยเลนส์จะถูกเขวนด้วยปากคิ๊บ หรือถูกใส่ในที่จับที่ออกแบบไว้โดยเฉพาะ เพื่อที่จะสามารถทำให้เลนส์ลอยอยู่ในของเหลว และเพื่อที่จะสามารถทำการเขย่าเลนส์ในของเหลวได้ แต่ในบางครั้งการเขย่าอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ในการทำความสะอาดก็ได้ เพียงแค่ทำการแช่อยู่ภายในของเหลวก็อาจจะเพียงพอในการทำความสะอาดแล้ว ส่วนการเลือกใช้ชนิดของของเหลวที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาด จะมีอยู่หลายปัจจัย เช่น การเลือกของเหลวมาใช้ควรระวังการทำปฏิกิริยาทางเคมีกันระหว่างวัตถุที่จะนำมาทำความสะอาดกับของเหลวที่จะใช้ในการทำความสะอาด ตัวอย่างเช่น กรดไฮโดรฟลูออริกสามารถที่จะละลายธาตุซิลิกาออกจากเลนส์ที่ทำมาจากแก้ว

ได้ ดังนั้นการใช้กรดกรดไฮโดรฟลูออริกจึงไม่เหมาะกับการทำความสะอาดเลนส์ที่ทำมาจากแก้ว แต่เมื่อใช้กรดชนิดอื่น เช่น กรดโคโรมิก หรือกรดซัลฟิวริก ทัศนวิสัยจะไม่ถูกละลายด้วยกรดทั้งสองชนิดนี้ ดังนั้นกรดโคโรมิก หรือกรดซัลฟิวริกสามารถที่จะนำมาใช้ในการทำความสะอาดเลนส์แก้วได้ ทั้งที่สารทั้งสองมีคุณสมบัติเป็นกรดเหมือนกันกับกรดไฮโดรฟลูออริก อีกปัจจัยที่มักจะนำมาพิจารณาในการเลือกของเหลวที่จะใช้เป็นตัวทำความสะอาด ก็คือคุณสมบัติของสารปนเปื้อน ตัวอย่างเช่น ไขมันหรือน้ำมันสามารถที่จะละลายได้ด้วยสารประกอบจำพวกเบส เป็นต้น

2.2.1.2.3 การทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

การใช้คลื่นอัลตราโซนิกในกระบวนการทำความสะอาด คลื่นสามารถที่จะทำลายแรงยึดเหนี่ยวที่ติดแน่นของอนุภาคที่ปนเปื้อนบนผิวเลนส์ได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการทำงานของ การใช้คลื่นอัลตราโซนิกกับวิธีการทำความสะอาดอื่นๆ การใช้คลื่นอัลตราโซนิกจะมีประสิทธิภาพมากในการที่จะทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคปนเปื้อนกับพื้นผิวเลนส์ โดยกระบวนการทำงานของคลื่นจะต้องทำงานในถังเปิดซึ่งบรรจุของเหลวไว้ภายใน โดยของเหลวจะถูกใช้เป็นตัวกลางในการส่งผ่านคลื่นไปยังเลนส์ ซึ่งคลื่นอัลตราโซนิกจะถูกส่งออกจากแหล่งกำเนิดที่ติดอยู่ที่ก้นถังหรือด้านข้างของถัง โดยช่วงความถี่ 20 – 100 kHz จะปีนความถี่ที่จะใช้นิยมในการให้กำเนิดพลังงานงานของคลื่นอัลตราโซนิก ในกระบวนการทำความสะอาด สำหรับช่วงความถี่ที่เกิน 1MHz ส่วนมากจะถูกนำไปใช้ในการตรวจและการค้นหา เช่น การสแกนทางการแพทย์ หรือการคำนวณหาขนาดของอนุภาค เป็นต้น ซึ่งหลักการทำงานของคลื่นอัลตราโซนิก คือ เมื่อเสียงเดินทางผ่านของเหลวเสียงจะอยู่ในรูปของคลื่นแรงดังสามมิติ ซึ่งจะมีคุณสมบัติเกิดเป็นคาบของความดันขึ้น และจะค่อยๆจางหายไป ในระหว่างช่วงระยะเวลาที่คาบความดันจางหายไปนั้น ความดันลบที่ถูกสร้างขึ้นจากกำลังงานของคลื่นอัลตราโซนิก จะมีกำลังงานที่มากเพียงพอที่จะสามารถทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลว ซึ่งจะทำให้ของเหลวนั้นเกิดเป็นเม็ดฟองเล็กๆขึ้น (micro bubbles) และคาบความดันที่ตามมาก็จะทำให้เม็ดฟองที่เกิดขึ้นในของเหลวนั้นแตกออกในทันที พร้อมกับปล่อยพลังงานมหาศาลออกมา และความดันที่ปล่อยออกมาอาจจะสูงถึง 1000 atm เลยทีเดียว กระบวนการนี้จะถูกเรียกว่า “Cavitation” ผลที่ได้จากการปล่อยพลังงานออกมาของกระบวนการ cavitation จะช่วยในการทำลายแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาคปนเปื้อนกับผิวเลนส์ ซึ่งก็คือกระบวนการทำความสะอาดผิวของเลนส์นั่นเอง ส่วนผลกระทบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น คือการปล่อยพลังงานของกระบวนการ cavitation อาจจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของเลนส์ได้

2.2.1.2.4 การทำความสะอาดด้วยไอของสารละลาย (Vopour Degreasing)

เป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์อย่างมาก ในการใช้กำจัดไขมันหรือน้ำมันออกจากผิวของเลนส์ โดยส่วนมากแล้วกระบวนการนี้มักจะใช้เป็นขั้นตอนสุดท้ายในหลายๆขั้นตอนของกระบวนการทำความสะอาด เพราะว่านอกจากจะเป็นกระบวนการทำความสะอาดแล้ว ยังเป็น

กระบวนการที่จะสามารถทำให้เลนส์แห้งได้อีกด้วย โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาดสะอาดด้วยไอของสารละลาย ประกอบด้วยถังเปิดที่มีเครื่องทำความร้อนอยู่ข้างใต้ถัง และท่อ นำน้ำ ความเย็นชดเชยรอบๆ ด้านบนของถังเปิด สารละลายที่ใช้เป็นตัวทำความสะอาดจะถูกทำให้เป็นไอ สารละลายที่ร้อนและมีความหนาแน่นสูง ด้วยเครื่องทำความร้อนที่อยู่ด้านล่างถัง ซึ่งไอสารละลาย ที่ระเหยจากสารละลายจะลอยอยู่แค่ภายในถังเปิดโดยจะไม่ระเหยออกนอกถังเปิด เนื่องจากท่อน้ำ เย็นที่ชดเชยรอบถังเปิดด้านบน จะเป็นตัวทำให้ไอสารละลายควบแน่นกลับไปอยู่ในสถานะ ของเหลวและไหลกลับลงมาในถัง โดยเลนส์ที่ถูกใส่ไว้ในภาชนะแบบพิเศษจะถูกจุ่มอยู่ในไอ สารละลายช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งไอของสารละลายที่ลอยอยู่รอบๆ ตัวเลนส์ จะเป็นตัวทำละลาย ไชมัน โดยเมื่อไอร้อนบริสุทธิ์ของสารละลายระเหยไปกระทบกับพื้นผิวที่มีความเย็นของเลนส์ ไอ สารละลายจะรวมตัวกับอนุภาคปนเปื้อนกลายเป็นของเหลวเกาะอยู่บนผิวเลนส์ ซึ่งของเหลว เหล่านี้ก็จะค่อยๆ ไหลออกจากผิวเลนส์ และขณะเดียวกันนั้นก็ถูกแทนที่ไปเรื่อยๆ ด้วยไอร้อน บริสุทธิ์ของสารละลาย กระบวนการทำความสะอาดจะทำต่อไปจนกระทั่งอุณหภูมิเข้าสู่ภาวะความ สมดุลย์ระหว่างผิวของเลนส์และไอร้อน ต่อจากนั้นก็ให้นำเลนส์ออกจากถังเปิด

2.2.2 กระบวนการเคลือบผิวเลนส์

ในการเคลือบผิวเลนส์น้ำยาเคลือบจำเป็นจะต้องยึดเกาะผิวของเลนส์ได้ดีเพียงพอ จึงจะทำให้เลนส์ที่เคลือบออกมานั้นมีคุณภาพ โดยน้ำยาที่เคลือบอยู่บนผิวเลนส์จะสามารถแสดงคุณสมบัติ ได้ทั้ง ทางแสง ทางไฟฟ้า ทางกล ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะแสดงคุณสมบัติได้ดีก็ต่อเมื่อ น้ำยาเคลือบมี ความต้านทานความชื้นสูงเพราะ ไอน้ำที่มักจะเกาะตามผิวของเลนส์ที่เคลือบแล้ว มักจะเป็นตัวการที่ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำยาที่เคลือบอยู่บนผิวของเลนส์ได้ และความต้านทาน ความชื้นจะขึ้นอยู่กับ การเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นน้ำยาเคลือบเพราะวัสดุที่ต่างชนิดกันก็จะมี โครงสร้างทางโมเลกุลแตกต่างกัน และนอกจากการเลือกใช้วัสดุที่จะนำมาเคลือบแล้วนั้นความ ต้านทานความชื้นก็จะขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้วิธีการในการเคลือบผิวเลนส์ด้วย

2.2.2.1 การยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างน้ำยาเคลือบกับผิวเลนส์

การยึดเกาะหมายถึงแรงระหว่างวัสดุสองชนิดหรือแรงระหว่างสองวัตถุ ซึ่งในที่นี้ก็จะ หมายถึงแรงระหว่าง โมเลกุลของน้ำยาเคลือบและผิวของเลนส์ ซึ่งแรงนี้จะเป็นได้ทั้งแรงแวนเดอ วาล์ (Van Der Waal) แรงทางไฟฟ้า และแรงยึดเกาะของพันธะเคมี โดยการยึดเกาะระหว่างน้ำยา เคลือบกับผิวเลนส์ขึ้นอยู่กับสาเหตุดังต่อไปนี้

การรวมตัวกันของชั้น (Interfacial Layer) คุณภาพของการยึดเกาะระหว่างน้ำยาเคลือบกับ ผิวเลนส์ขึ้นอยู่กับประเภทของการรวมตัวของชั้นน้ำยาเคลือบและผิวของเลนส์ โดยประเภทของ การรวมตัวมีดังต่อไปนี้

- การรวมตัวแบบทางกล (Mechanical interfacial layer)

การรวมตัวชนิดนี้จะเป็นการรวมตัวของวัสดุที่จะนำมาเคลือบที่มีลักษณะหยาบ และเป็นรูพรุน โดยน้ำยาเคลือบจะเข้าไปอยู่ในรูพรุนของวัสดุที่จะนำมาเคลือบ และเกิดการเปลี่ยนรูปร่างขึ้น ซึ่งเมื่อน้ำยาเคลือบไหลไปตามผิวของวัสดุที่จะนำมาเคลือบและทั่วทั้งผิวของวัสดุที่จะนำมาเคลือบ แรงยึดเหนี่ยวทางกลก็จะเกิดขึ้น โดยการยึดเกาะจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางฟิสิกส์โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงเฉือน

- การรวมตัวของชั้นเดี่ยว (Monolayer on monolayer)

การรวมตัวลักษณะนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีของน้ำยาที่ใช้เคลือบกลายเป็นวัสดุที่จะนำมาเคลือบ โดยส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงไปนั้นจะมีความหนาประมาณ 0.2 – 0.5 นาโนเมตร ซึ่งการรวมตัวในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อไม่มีการแพร่เกิดขึ้น และวัสดุที่จะนำมาเคลือบควรจะมี ความหนาแน่นและเรียบ

- การรวมตัวของพันธะเคมี (Chemical-bonding interfacial layer)

การรวมตัวลักษณะนี้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของอะตอมของน้ำยาเคลือบและอะตอมของผิวของวัสดุที่จะนำมาเคลือบ

- การรวมตัวแบบการแพร่ (Diffusion interfacial layer)

การรวมตัวลักษณะนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ของเลตทิซ (Lattice) และส่วนประกอบภายในส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำยาเคลือบและวัสดุที่จะนำมาเคลือบ โดยพลังงานที่จำเป็นที่จะต้องใช้ในการรวมตัวชนิดนี้จะประมาณ 1 – 5 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV)

2.2.2.2 ชนิดของแรงดึงดูด

การเกาะติดที่มีแรงดึงดูดอยู่ระหว่าง 0.1 – 10 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถแบ่งออกได้เป็นการดึงดูดทางกายภาพ การดึงดูดทางเคมี และพันธะเคมี

- การดึงดูดทางกายภาพ เกิดจากอะตอมของน้ำยาเคลือบเข้าไปใกล้กับอะตอมของวัสดุที่จะนำมาเคลือบ ซึ่งในตอนแรกก็จะเกิดแรงดึงดูดขึ้น หลังจากนั้นก็จะเกิดแรงผลักรวมมา สุดท้ายอะตอมก็จะเข้าสู่ภาวะสมดุล โดยแรงดึงดูดระหว่างวงอิเล็กตรอนซึ่งยังเหลืออยู่จะถูกรวมเข้าด้วยกันกลายเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์
- การดึงดูดทางเคมี เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของน้ำยาเคลือบและอะตอมของวัสดุที่จะนำมาเคลือบ ซึ่งการดึงดูดทางเคมีนั้นแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นจะแข็งแรงมาก และจะเกิดเมื่ออิเล็กตรอนมีการเลื่อนหรือถูกแลกเปลี่ยน
- พันธะเคมี โดยตัวอย่างของพันธะเคมีมีตัวอย่างคือ พันธะโควาเลนต์ และพันธะไอออนิกหรือพันธะโลหะ โดยแรงยึดเหนี่ยวของพันธะเคมีจะแข็งแรงมาก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับของอิเล็กตรอนที่มีการแลกเปลี่ยน

2.2.2.3. วิธีการเคลื่อนผิวเลนส์

วิธีการเคลื่อนผิวสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- วิธีการลบ (Subtractive) โดยวิธีการลบจะเกิดจากการการที่ส่วนประกอบของแก้วที่จะนำมาเคลื่อนสูญเสียส่วนประกอบบางส่วนบนผิวและในส่วนใกล้ผิวออกไป โดยอาจจะเกิดได้จากการกระทำทางกายภาพ หรือทางเคมี ซึ่งผลที่ได้จากวิธีการนำยาเคลื่อนจะสัมผัสกับผิวของวัสดุที่นำมาใช้เคลื่อนได้อย่างดี แต่ในบางครั้งส่วนประกอบของวัสดุที่ได้จากวิธีการนี้จะมีความแตกต่างกันส่วนประกอบในตอนแรกอยู่บ้าง

- วิธีการเพิ่ม (Additive) โดยวิธีการเพิ่มนี้สามารถทำการเคลื่อนผิวได้เพียงชั้นเดียว และจะทำให้ค่าการหักเหแสงต่ำ เนื่องจากแสงจะถูกจำกัดให้ลดการสะท้อนลงในน้ำยาเคลื่อน ซึ่งวิธีการนี้สามารถจำแนกออกได้เป็นทั้งกระบวนการทางเคมี กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการแบบเปียก กระบวนการแบบแห้ง โดยวิธีการเหล่านี้จะสามารถที่จะทำภายใต้บรรยากาศปกติ หรือภายในสุญญากาศ และในโรงงานนี้จะเป็นกระบวนการเคลื่อนเลนส์แบบจุ่ม ซึ่งเป็นกระบวนการแบบเปียกที่ทำภายใต้บรรยากาศปกติ กระบวนการเคลื่อนด้วยวิธีการจุ่ม วิธีการนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการคือ

- กระบวนการยก (Lifting Process) โดยวิธีการนี้เลนส์ที่ถูกนำลงไปจุ่มในน้ำยาเคลื่อนจะถูกยกออกจากน้ำยาเคลื่อนอย่างและขณะเดียวกันก็จะน้ำยาเคลื่อนก็จะถูกเคลื่อนบนผิวเลนส์

- กระบวนการลดระดับ (Lowering Process) โดยวิธีการนี้เลนส์ที่ถูกนำลงไปจุ่มน้ำยาเคลื่อนจะนั่งอยู่กับที่ แต่น้ำยาที่ใช้เคลื่อนจะค่อยๆลดระดับลง

ซึ่งจากสองกระบวนการนี้กระบวนการยกจะเป็นกระบวนการที่ประหยัดมากกว่าในการเคลื่อนเลนส์จำนวนมาก และง่ายที่จะนำมาประยุกต์ใช้

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ ซิกซ์ ซิกมา

2.3.1 ความหมายและประวัติความเป็นมาของ ซิกซ์ ซิกมา

งานวิจัยของ *Y. H. Kwak et.al, 2006* ได้กล่าวไว้ว่า ซิกซ์ ซิกมา เป็นตัวผลักดันการบริหารในการจัดการการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ การบริการ และกระบวนการลดของเสียอย่างต่อเนื่องขององค์กร

งานวิจัยของ *K. Linderman et.al, 2005* ได้กล่าวไว้ว่า ซิกซ์ ซิกมาเป็นกระบวนการทางธุรกิจที่เน้นให้บริษัททำการปรับปรุงจากระดับล่างโดยการออกแบบ และตรวจตราในทุกๆกิจกรรมทางธุรกิจ เพื่อทำการลดของเสีย และทรัพยากรให้น้อยที่สุด พร้อมกับเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้า

งานวิจัยของ *R. B. Coronado and F. Antony, 2002* ได้กล่าวไว้ว่า ซิกซ์ ซิกมา เป็นกลยุทธ์ในการปรับปรุงธุรกิจ เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำกำไร โดยการกำจัดของเสีย ลดต้นทุนคุณภาพ

และเพิ่มประสิทธิภาพและประสิทธิผลของการทำงาน เพื่อให้ได้ตามความต้องการและความคาดหวังของลูกค้า

งานวิจัยของ ศิริวิศิ เอื้ออรัญโชติ, 2546 ได้กล่าวไว้ว่า ซิกซ์ ซิกมา เป็นระบบที่จะนำความรู้และประยุกต์ใช้เครื่องมือทางสถิติต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อให้สำเร็จและตรงตามที่ลูกค้าต้องการ

งานวิจัยของ อุษณีย์ ถิ่นเกาะแก้ว, 2545 ได้กล่าวไว้ว่า ซิกซ์ ซิกมา เป็นมาตรการที่ใช้วัดคุณภาพการดำเนินงาน โดยมีแนวคิดที่ว่า การควบคุมและลดความแปรปรวนของกระบวนการผลิตให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้การดำเนินงานยังมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ซิกซ์ ซิกมา เป็น กลยุทธ์ในระยะยาวในการผลักดันให้มีการปรับปรุงการบริหารจัดการทางธุรกิจเพื่อเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้า โดยการนำเอาเครื่องมือทางสถิติต่างๆ มาใช้อย่างเหมาะสม เพื่อลดความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่งจะส่งผลให้เป็นการลดต้นทุนคุณภาพและเพิ่มผลกำไร

ซิกซ์ ซิกมา ได้ถูกเริ่มใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1980 โดยบริษัทโมโตโรล่า ซึ่งผู้บุกเบิกแนวคิดทางซิกซ์ ซิกมา คือ Robert W. Galvin เพื่อที่จะใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการผลิตโทรศัพท์เคลื่อนที่และเพจเจอร์ ซึ่งหลังจากประสบความสำเร็จเขาจึงได้รับการแต่งตั้งให้เป็น CEO ของบริษัทโมโตโรล่าในเวลาต่อมา และต่อมาในปี ค.ศ. 1986 วิธีการทางซิกซ์ ซิกมาก็ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Dr. Mikel J. Harry ซึ่งเป็นพนักงานของบริษัทโมโตโรล่าเช่นเดียวกัน จนในปี ค.ศ. 1988 หลังจากที่บริษัทโมโตโรล่าได้ใช้ปรัชญาทางซิกซ์ ซิกมา เพื่อการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในองค์กร ทำให้บริษัทได้รับรางวัลชนะเลิศทางด้านคุณภาพ Malcolm Baldrige National Quality Award

2.3.2 การปรับปรุงกระบวนการผลิตตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา

ในการที่จะบรรลุวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำให้เกิดความสำเร็จ ตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ตามวิธีการทาง ซิกซ์ ซิกมา จะต้องมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องในทุกๆจุดของการปฏิบัติงาน ซึ่งจะต้องอาศัยกลยุทธ์ในการประยุกต์ใช้วิธีการต่างๆ ในวิชาสถิติ ซึ่งในวิธีการทางซิกซ์ ซิกมานี้ จะประยุกต์ใช้กลยุทธ์ ทั้ง 5 ขั้นตอนที่สำคัญในการปรับปรุงกระบวนการผลิต คือ Define Phase, Measurement Phase, Analysis Phase, Improvement Phase และ Control Phase โดยรายละเอียดและเครื่องมือทางสถิติที่นำมาประยุกต์ใช้ในแต่ละกิจกรรมทั้ง 5 ขั้นตอน มีดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนในการกำหนดแผนงาน (Define phase) โดยเครื่องมือและวิธีการใช้เครื่องมือในขั้นตอนในการกำหนดแผนงาน มีดังต่อไปนี้

1.1 การกำหนดปัญหา (Problem statement)

ระบุปัญหาที่ต้องการทำการศึกษาและแก้ไข ซึ่งปัญหาเหล่านั้นจะต้องสัมพันธ์ต่อเสียงของลูกค้า (Voice of Customer) หรือทางด้านคุณภาพ (Critical to Quality) โดยข้อความที่จะแสดงถึงปัญหาควรจะต้องเป็นการตอบคำถามเหล่านี้ เกิดอะไรที่ผิดปกติ ปัญหาเกิดขึ้นที่ใด ปัญหานั้นรุนแรงเพียงใด และอะไรคือปัญหาที่มีผลต่อธุรกิจ

1.2 การวิเคราะห์คาโน ฮาร์ คาวานาช, 2548

เป็นวิธีการหนึ่งที่จะทำการจัดลำดับความสำคัญของความต้องการของลูกค้าซึ่งมีพื้นฐานมาจากการแบ่งพื้นฐานของ โนริกิ คาโน โดยการแบ่งความต้องการของลูกค้าออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. ความไม่พอใจหรือความต้องการพื้นฐาน เป็นความคาดหวังต่ำสุดที่ที่ลูกค้าต้องการ ซึ่งสินค้าทุกชนิดจำเป็นจะต้องมีสมรรถนะให้ตรงกับความต้องการต่ำสุดของลูกค้า ซึ่งลูกค้าจะไม่พึงพอใจถ้าสมรรถนะของสินค้าไม่ตรงตามความต้องการ
2. ความพึงพอใจหรือความต้องการที่หลากหลาย การปฏิบัติที่ดีกว่าหรือแย่กว่าของคุณสมบัติบนความต้องการเหล่านี้ สิ่งที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าถือเป็นอัตราที่ลูกค้ากำหนดให้ โดยลูกค้าที่ได้รับลักษณะเหล่านี้มากกว่าก็จะมี ความพึงพอใจที่มากกว่า
3. ความยินดีหรือความต้องการที่แฝงอยู่ เป็นลักษณะปัจจัยหรือความสามารถที่มากกว่า ความคาดหวังของลูกค้า หรือความต้องการเป้าหมายที่ลูกค้าไม่สามารถแสดงออกมาให้รู้ได้ด้วยตนเอง

1.3 แผนภาพกระบวนการผลิต (Process map)

แผนภาพกระบวนการผลิตใช้ประโยชน์ในการเป็นตัวแทนการระบุขั้นตอนการไหลของกระบวนการ และความสัมพันธ์ของแต่ละขั้นตอน ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงลำดับขั้นตอนตั้งแต่ต้นจนจบว่ามีอะไรเกิดขึ้นบ้าง โดยมักจะทำเป็นขั้นตอนแรกในกระบวนการทำซิกซ์ ซิกมา อีกทั้งยังเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งในการค้นหาสาเหตุของปัญหา การสร้างแผนภาพของกระบวนการผลิตจำเป็นจะต้องใช้ทีมงานในการระดมสมอง อีกทั้งทีมงานนั้นจะต้องทราบรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ที่จะทำการเขียนแผนภาพกระบวนการผลิต และยังคงต้องทำอย่างละเอียดทุกขั้นตอน รวมถึงแสดงสิ่งที่ซ่อนเร้นในกระบวนการผลิต (Hidden Factory) เพื่อที่จะสามารถระบุถึงโอกาสในการปรับปรุงแต่ละกระบวนการ รวมถึงตัวแปรสำคัญในกระบวนการผลิต (Key Process Input Variables : KPIVs) และตัวแปรตอบสนองของกระบวนการผลิต (Key Process Output Variables : KPOVs)

1.4 การระดมสมอง (Brainstorming) F. W. Breyfogle, 1999

ในการเริ่มต้นทีมงานจะรวมอยู่ในห้องซึ่งมีโต๊ะที่วางอยู่ในลักษณะที่สามารถทำการสนทนาโต้ตอบกันได้ (มักใช้ในรูปแบบตัวยู) การระดมสมองนั้นสมาชิกที่ถูกเลือกมานั้นควรจะมีความรู้

มุมมองที่แตกต่างกันหรือมีหน้าที่ความรับผิดชอบที่ต่างกันในเรื่องที่จะทำการระดมสมอง โดยคำถามหรือปัญหาจะถูกเขียนให้ทุกคนสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนภายในห้อง โดยปกติในการระดมสมองจำเป็นจะต้องมีผู้นำในการระดมสมอง ซึ่งข้อควรปฏิบัติที่ผู้นำในการระดมสมองจะต้องจดจำไว้ก่อนเริ่ม คือ

1. ควรจะถามความคิดเห็นของสมาชิกคนละความคิดเห็นโดยการวนถาม โดยจะถามวนต่อเนื่องกันไป จนกระทั่งสมาชิกทุกคนไม่มีความคิดเห็นที่จะเสนอแล้ว
2. ก่อนที่จะทำการสรุปว่าความคิดเห็นใดตรงกับประเด็นปัญหาหรือไม่ ความคิดเห็นที่ถูกนำเสนอขึ้นมานั้นจะต้องได้รับการประเมินหรือวิเคราะห์ในทุกๆความคิดเห็น
3. พยายามสนับสนุนความคิดเห็นที่ค่อนข้างแหวกแนว เพราะการที่จะแสดงความคิดเห็นที่แหวกแนวนั้นค่อนข้างที่จะยากที่จะนำเสนอออกมาได้ ดังนั้นไม่ควรที่จะจำกัดความคิดเห็นเหล่านี้ และความคิดเห็นที่แหวกแนวนี้เองจะเป็นตัวสนับสนุน ให้มีการแสดงความคิดเห็นที่แหวกแนวอื่นตามมา
4. พยายามทำให้บรรยากาศในการระดมสมองเป็นบรรยากาศที่สนุกสนานและไม่เป็นทางการมากนัก
5. จุดมุ่งหมายที่สำคัญคือต้องการจำนวนความคิดที่มากที่สุด ไม่ใช่คุณภาพ เพราะเมื่อยังมีความคิดเห็นมากเท่าใด โอกาสที่จะเป็นความคิดเห็นที่ดีก็จะมีมากขึ้นด้วย
6. พยายามค้นหาแนวทางการปรับปรุงและรวมกลุ่มความคิดเห็นให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน

2. ขั้นตอนการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measurement Phase) โดยเครื่องมือและวิธีการใช้เครื่องมือในขั้นตอนการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา มีดังต่อไปนี้

2.1 แผนภาพแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) *วีรพงษ์ เกลิมจิระรัตน์, 2549*

แผนภาพแสดงเหตุและผล หรือแผนภาพอิชิกาวา (Ishikawa Diagram) หรือแผนภาพก้างปลา (Fishbone Diagram) เป็นเครื่องมือที่ประสิทธิภาพมากที่สุดที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการแก้ปัญหา โดยจะมีประโยชน์ในการค้นหาสาเหตุของปัญหา ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลที่เกิดขึ้นจากสาเหตุกับปัจจัยต่างๆที่เป็นต้นตอของคุณลักษณะอันนั้น และผลที่ได้จากแผนภาพแสดงเหตุและผลก็จะถูกนำไปสู่ส่วนของการระดมสมองเพื่อที่จะได้สาเหตุของปัญหาที่เหมาะสม

2.1.1 โครงสร้างของแผนภาพแสดงเหตุและผล

เมื่อมีการใช้แผนภาพแสดงเหตุและผลโครงสร้างจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนกระดูกที่เป็นตัวปลา ซึ่งได้รวบรวมปัจจัยอันเป็นสาเหตุของปัญหา โดยส่วนมากแล้วจะพิจารณาแบ่งที่มาของสาเหตุของปัญหาออกเป็น 6 ส่วนด้วยกัน คือ วัสดุ (Material) เครื่องจักร (Machine) วิธีการทำงาน (Method) คน (Man) การวัด (Measurement) และสภาพแวดล้อม

(Environment) และอีกส่วนหนึ่งคือ ส่วนหัวปลาที่เป็นข้อสรุปผลของสาเหตุที่กลายเป็นตัวปัญหา โดยมีวิธีการสร้างแผนภาพแสดงเหตุและผลดังนี้

1. กำหนดลักษณะคุณภาพที่เป็นปัญหา
2. เลือกเอาคุณลักษณะที่เป็นปัญหามา 1 อัน แล้วเขียนลงทางขวามือของกระดาษ
3. เขียนก้างปลาจากซ้ายไปขวาโดยเริ่มจากกระดูกสันหลังก่อน
4. เขียนสาเหตุหลักๆ เดิมลงบนเส้นกระดูกสันหลัง ทั้งบนและล่างพร้อมกับใส่กรอบสี่เหลี่ยมด้วย ซึ่งสาเหตุหลักอาจจะเป็นที่มาของสาเหตุของปัญหาที่กล่าวไว้ตอนต้นก็ได้
5. ในก้างใหญ่ที่เป็นสาเหตุหลักของปัญหา ให้ใส่ก้างรองลงไป ที่แต่ละปลายของก้างให้ใส่ข้อความที่เป็นสาเหตุรองของแต่ละสาเหตุหลัก
6. ในแต่ละก้างรองที่เป็นสาเหตุรอง ให้เขียนก้างย่อยที่เข้าใจว่าจะเป็นสาเหตุย่อยๆ ของสาเหตุรองอันนั้น
7. พิจารณาทบทวนว่าการใส่สาเหตุต่างๆ มีความสัมพันธ์กันตามระดับชั้นถูกต้องแล้วหรือไม่ แล้วใส่ข้อมูลเพิ่มเติมให้ครบถ้วน

2.2 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) *F. W. Breyfogle, 1999*

เป็นตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองที่ทำการศึกษา (KPOV) กับปัจจัยนำเข้าที่สำคัญต่างๆ ที่ได้จากการระดมความคิดโดยใช้แผนภาพสาเหตุและผล โดยจะวิเคราะห์ถึงระดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญนี้ที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองต่างๆ ที่พิจารณา โดยใช้ความรู้ความชำนาญและประสบการณ์ในการปฏิบัติงานของผู้ร่วมระดมความคิด ผลลัพธ์ที่สำคัญของการทำตารางความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผลนี้จะได้จากแผนภูมิพาเรโตซึ่งเรียงปัจจัยตามลำดับผลกระทบที่มีต่อปัญหาที่ทำการพิจารณา ทำให้สามารถที่จะพิจารณาเลือกปัจจัยนำเข้าที่สำคัญในระดับต้นๆ มาทำการแก้ไขก่อน หรือนำผลที่ได้มาใช้ในการประเมินแผนการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิตได้โดยมีวิธีการสร้างตารางความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล ดังนี้

1. แจกแจงตัวแปรตอบสนองที่สนใจในการศึกษา ซึ่งตัวแปรที่มีความสำคัญต่อความพึงพอใจของลูกค้าหรือกลุ่มผู้ทำการวิเคราะห์ให้มีความสำคัญ โดยเขียนไว้ในส่วนของบนของตาราง โดยรายการเหล่านี้จะต้องเป็นสิ่งที่คณะทำงานหรือลูกค้าเชื่อว่ามี ความสำคัญ
2. ทำการจัดลำดับความสำคัญของตัวแปรตอบสนองที่ได้แจกแจงนี้ โดยในการให้คะแนนโดยทั่วไป มักจะใช้สเกล 1 ถึง 10 ซึ่งตัวเลขที่มีค่ามากจะแสดงถึงตัวแปร

ตอบสนองที่มีความสำคัญมากที่สุดจะได้คะแนนรวมมากที่สุด ซึ่งสำคัญต่อการพึงพอใจของลูกค้ามากเช่นเดียวกัน

3. ทำการแจกแจง ปัจจัยนำเข้าที่มีแนวโน้มจะเป็นสาเหตุ (Potential cause) ทั้งหมดที่เป็นไปได้ในช่องทางขายมือของตารางซึ่งปัจจัยนำเข้าที่สำคัญของตารางเหล่านี้จะได้อาจมาจากการระดมความคิดของกลุ่มสมาชิก โดยใช้แผนภาพสาเหตุและผลช่วยในการพิจารณาปัจจัย
4. ให้คะแนนลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองต่างๆ ที่ได้แจกแจงไว้ในส่วนบนของตาราง โดยเกณฑ์การให้คะแนนของความสัมพันธ์มีดังต่อไปนี้
 - 0 = ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นกับตัวแปรตอบสนอง
 - 1 = มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นกับตัวแปรตอบสนองน้อย
 - 4 = มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นกับตัวแปรตอบสนองปานกลาง
 - 9 = มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นกับตัวแปรตอบสนองมาก

ซึ่งการให้คะแนนนี้จะขึ้นกับความรู้ความชำนาญและประสบการณ์ของกลุ่มผู้ทำการวิเคราะห์

5. รวบรวมคะแนนและจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง โดยใช้แผนภูมิพारे โดช่วยในการวิเคราะห์ผลให้อัตราเป็นตัวเลข (ความสัมพันธ์ร่วม) แสดงอิทธิพลของปัจจัยนำเข้าแต่ละตัวที่มีต่อตัวแปรตอบสนองแต่ละตัวภายใต้กรอบในตารางที่พิจารณา โดยการกำหนดเกณฑ์นี้จะขึ้นกับประสบการณ์ของคณะทำงาน

2.3 แผนภูมิพारे โด (Pareto Chart) วีรพงษ์ เกลิมจิระรัตน์, 2549

แผนภูมิพारे โดเป็นแผนภูมิที่ใช้สำหรับตรวจสอบปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในสถานที่ทำงานหรือโรงงาน เพื่อสังเกตดูว่าปัญหาใดเป็นปัญหาที่สำคัญที่สุดและรองๆ ลงมาตามลำดับ โดยนำปัญหา หรือสาเหตุเหล่านั้นมาจัดเป็นหมวดหมู่ และแบ่งแยกประเภท จากนั้นทำการเรียงลำดับตามความสำคัญจากมากไปหาน้อย โดยการแสดงขนาดความสำคัญมากน้อยด้วยกราฟแท่งและค่าสะสมด้วยกราฟเส้น ได้รับการคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1897 โดยนักเศรษฐศาสตร์ชาวอิตาลีคนหนึ่งที่มีชื่อว่า วิ.พारे โด (V.Pareto) ที่ได้ทำการแสดงผลการวิจัยชิ้นหนึ่งของเขา โดยการแสดงให้เห็นว่าการกระจายรายได้ของประชากรแตกต่างกัน ซึ่งต่อมา ดร.จูราน ชาวอเมริกันก็ได้นำเอาหลักการของพारे โดมาใช้ในวิชาการควบคุมคุณภาพ เพื่อแสดงให้เห็นว่าสาเหตุความบกพร่องเพียงไม่กี่สาเหตุกลับก่อให้เกิดความสูญเสียมากมาย ขณะที่ความสูญเสียเล็กๆ น้อยๆ ที่เหลือกลับมาจากสาเหตุจำนวนมาก และเรียกวิธีการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุของความบกพร่องกับ

ความสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้ว่า การวิเคราะห์แบบพาเรโต (Pareto Analysis) และเรียวกราฟหรือแผนภูมิที่แสดงความสัมพันธ์นี้ว่า แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram)

2.4 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านคุณภาพ (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) *Daimler Chrysler Corporation et.al, 2001*

การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านคุณภาพ เป็นวิธีการป้องกันที่ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต เพื่อที่จะทำให้เชื่อมั่นได้ว่าจะสามารถออกแบบและผลิตสินค้าได้ตามความต้องการของลูกค้า ในการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของข้อบกพร่องของการออกแบบกระบวนการนั้น จะต้องมีการจัดตั้งทีมงานที่ทำหน้าที่หาข้อบกพร่องทางด้านศักยภาพที่ลูกค้าไม่พอใจ โดยในที่นี้ คำว่า “ลูกค้า” หมายถึง ผู้บริโภคขั้นสุดท้าย สายงานผลิตและประกอบ แผนกบริการและแผนกอื่นๆ รูปแบบตารางการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบจะช่วยบอกว่าข้อบกพร่องใดที่มีคะแนนความเสี่ยงสูง เพื่อนำมาจัดลำดับว่าควรปรับปรุงการออกแบบหรือกระบวนการใดก่อน โดยมีจุดมุ่งหมายในการปรับปรุงคือ ลดคะแนนความเสี่ยงและโอกาสการเกิดลักษณะบกพร่อง รวมถึงลดความรุนแรงของผลอันเกิดจากลักษณะของข้อบกพร่อง

2.4.1 การนำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบไปใช้งาน

1. ใช้เมื่อมีการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตใหม่ เพื่อชี้บ่งและหลีกเลี่ยงข้อบกพร่องที่มีโอกาส หรือแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นจากการออกแบบ
2. เมื่อต้องการหาสาเหตุในการเกิดข้อขัดข้องในระบบที่มีอยู่และหาวิธีการแก้ไข
3. ช่วยในการตัดสินใจหาทางเลือกที่เป็นไปได้โดยพิจารณาเลือกค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ และประโยชน์ที่ได้จากการเลือกนั้น
4. ใช้ในการวางแผนปฏิบัติการเพื่อชี้บ่งความเสี่ยงในแผนและหาวิธีที่จะหลีกเลี่ยงความเสี่ยงนั้น

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

การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านกระบวนการผลิต มีความแตกต่างจากการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านการออกแบบ กล่าวคือ จะทำการวิเคราะห์ผลกระทบของข้อบกพร่องอันเนื่องมาจาก เครื่องมือ เครื่องจักร กระบวนการประกอบและขั้นตอนการผลิตของบริษัทในการผลิตสินค้า การวิเคราะห์จะกระทำภายใต้สมมติฐานที่ว่าชิ้นส่วนทุกชิ้นส่วนได้รับการออกแบบมาอย่างถูกต้อง ไม่มีปัญหาข้อบกพร่องอันเนื่องมาจากกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ ลักษณะการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านกระบวนการผลิตประกอบไปด้วยขั้นตอนดังนี้คือ

1. มีการบ่งชี้ผลผลิตอันเป็นผลเกี่ยวเนื่องจากลักษณะข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต
2. ประเมินผลกระทบอันเกิดจากลักษณะข้อบกพร่อง
3. บ่งชี้สาเหตุที่เป็นไปได้ของกระบวนการผลิต หรือการประกอบและบ่งชี้ตัวแปรของกระบวนการ โดยให้ความสำคัญต่อการควบคุมเพื่อลดการเกิดขึ้นหรือการตรวจพบลักษณะข้อบกพร่อง
4. พัฒนาลำดับของข้อบกพร่องที่ได้จัดอันดับไว้ จากนั้นจัดตั้งระบบเบื้องต้นสำหรับการพิจารณาปฏิบัติการเชิงแก้ไข
5. จัดทำเอกสารแสดงผลกระบวนการผลิตและการประกอบ

2.4.3 ลักษณะของแบบฟอร์มที่ใช้ประกอบการทำการ วิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่อง และผลกระทบด้านกระบวนการผลิต

ภายหลังการออกแบบตารางในการเก็บข้อมูล สำหรับการทำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ ซึ่งกระทำในขั้นตอนการเตรียมการสำหรับการทำ FMEA แล้ว กระบวนการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านกระบวนการผลิต จะเริ่มต้นด้วยการทำแผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต แผนภูมินี้ควรชี้บ่งลักษณะของผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการระหว่างผลิต ซึ่งแผนภูมิการไหลแสดงขั้นตอนการทำงานในกระบวนการผลิตทุกขั้นตอนดังกล่าว จะเป็นรายการที่ต้องนำไปเติมในแถวแรกของตารางที่ออกแบบจากขั้นตอนการทำ PFMEA

จากการพิจารณากระบวนการผลิต จะพิจารณาตามลำดับขั้นตอนต่อไปนี้เพื่อทำการวิเคราะห์และเติมในตารางจากการทำ PFMEA ลักษณะแบบฟอร์มกระบวนการ FMEA ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) **หมายเลข FMEA** ระบุหมายเลขเอกสาร FMEA ซึ่งอาจนำไปใช้ในการติดตามต่อไป ภายหลัง
- 2) **วัสดุ** กรอกชื่อและหมายเลขของ ระบบ ระบบย่อย หรือส่วนประกอบ ของกระบวนการผลิตที่ทำการวิเคราะห์
- 3) **ความรับผิดชอบด้านกระบวนการ** ส่ชื่อของฝ่ายหรือกลุ่ม หรืออาจรวมถึงชื่อผู้ส่งมอบ ด้วย ด้านกระบวนการที่ทำการวิเคราะห์
- 4) **จัดทำโดย** กรอกชื่อหมายเลขโทรศัพท์และชื่อบริษัทของวิศวกรผู้รับผิดชอบ ในการจัดทำกระบวนการ FMEA
- 5) **ปี / รุ่น** กรอกชื่อปี รุ่น รวมทั้งสายการผลิตยานยนต์ ที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งจะเป็นประโยชน์หรือได้รับผลกระทบจากการออกแบบ

- 6) **วันที่ป้อน** ระบุวันที่เริ่มต้นทำการวิเคราะห์กระบวนการ FMEA ซึ่งไม่ควรช้ากว่าวันที่เริ่มต้นการผลิตตามกำหนดการ
- 7) **วันที่ของ FMEA** ระบุวันที่จัดทำต้นฉบับ FMEA รวมทั้งวันที่ที่ได้รับการทบทวนครั้งล่าสุด
- 8) **คณะผู้ทำงานหลัก** กรอกรายชื่อบุคคลและแผนกซึ่งเป็นผู้รับผิดชอบและผู้มีอำนาจหน้าที่ในการกำหนดหรือดำเนินการวิเคราะห์กระบวนการ (ขอเสนอแนะให้ระบุรายชื่อ แผนก หมายเลขโทรศัพท์ ที่อยู่ ฯลฯ ของสมาชิกในคณะทีมงานทั้งหมด)
- 9) **หน้าที่ของกระบวนการและข้อกำหนด** กรอกรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการหรือการปฏิบัติงานที่ทำการวิเคราะห์ เช่น การกลึงรูปร่าง การเจาะ การเลาะ การเชื่อม การประกอบ เป็นต้น เพื่อเป็นการกำหนดจุดประสงค์ในการวิเคราะห์ ลักษณะข้อความที่ใช้นั้นควรที่จะกระชับและเข้าใจง่ายในกรณีที่กระบวนการหรือการปฏิบัติงานที่ทำการวิเคราะห์มีหลายขั้นตอนและมีข้อบกพร่องที่แตกต่างกันแต่ละกระบวนการ
- 10) **ลักษณะข้อบกพร่องด้านศักยภาพ** โดยคณะทีมงานจะต้องทำการวิเคราะห์ขั้นตอนการผลิตแต่ละขั้นตอนว่าจะเกิดความผิดพลาดไม่เป็นไปตามหน้าที่ที่กำหนดในการออกแบบไว้ได้อย่างไร อาจเป็นสาเหตุหนึ่งร่วมกับอีกสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องในการปฏิบัติงานอันดับก่อนหน้าหรือถัดไป ทั้งนี้โดยกำหนดสมมติฐานว่าข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ที่ได้กำหนดขึ้นอย่างถูกต้องเหมาะสมทั้งในขั้นตอนการออกแบบ การจัดซื้อวัสดุ และกระบวนการอื่นๆ ก่อนหน้านั้นได้ถูกจัดทำอย่างถูกต้องมาตั้งแต่เบื้องต้นแล้ว ลักษณะสาเหตุของข้อบกพร่องที่มักเกิดขึ้นได้อาจมีสาเหตุดังต่อไปนี้ การโค้งงอ การแตกร้าว การลงดิน การยึดติดกันการเสีรูปร่าง u3585 .ารเปิดวงจร การเลื่อนจาง ความสกปรก การลัดวงจร การใช้งานชำรุด การปรับตั้งไม่ถูกต้อง การหมดสภาพของเครื่องมือ
- 11) **ผลกระทบของข้อบกพร่องด้านศักยภาพ** คณะทีมงานต้องทำการหาคำตอบว่าจะเกิดผลกระทบอย่างไร หากจุดบกพร่องที่ทีมงานได้ระบุไว้ในข้อ 10 ได้เกิดขึ้น โดยจุดบกพร่องหรือลักษณะอย่างหนึ่ง อาจเกิดผลกระทบได้หลายรูปแบบ สิ่งที่สำคัญคือทีมงานจะต้องพยายามใช้จินตนาการหรือความคิดในการค้นหารูปแบบของผลกระทบอันเกิดจากลักษณะข้อบกพร่องที่มีผลต่อคุณภาพให้ได้มากและครอบคลุมทั้งหมด
- 12) **ภาวะความรุนแรง (S)** ภาวะความรุนแรงของผลกระทบ (Severity of Effect) คณะทีมงานต้องทำการวิเคราะห์และประเมินความรุนแรงของผลที่เกิดจากลักษณะข้อบกพร่อง ที่มีต่อลูกค้าภาวะความรุนแรงที่กล่าวถึงนี้ควรได้รับการประเมินไว้เป็นสเกลตั้งแต่ 1 ถึง 10 ุรายละเอียดในตารางที่ 2.1

- 13) **การจัดประเภท** คณะทีมงานอาจจะมีการจัดประเภทของระบบ ระบบย่อย หรือส่วนประกอบเพื่อการชี้บ่งว่าระบบดังกล่าวทำให้เกิด จุดวิกฤต หรือจุดสำคัญ ต่อระบบการทำงานเพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตเพิ่มเติม เมื่อมีการจัดประเภท ในกระบวนการผลิตจะต้องแจ้งต่อผู้รับผิดชอบด้านการออกแบบ ทำการแก้ไขเอกสารที่เกี่ยวข้องเชิงวิศวกรรมต่างๆ เพื่อใช้เป็นจุดควบคุมต่อไป
- 14) **สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องด้านศักยภาพและกลไก** การวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่อง ถือได้ว่าในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการจัดทำ FMEA เนื่องจากการหาสาเหตุได้อย่างถูกต้องจะสามารถนำไปสู่การแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขั้นตอนนี้จะต้องมีการระมัดระวังไม่ให้เกิดความสับสนระหว่างสาเหตุของลักษณะข้อบกพร่อง และผลกระทบของลักษณะข้อบกพร่อง โดยทีมงานจะต้องทำการเขียนสาเหตุทุกสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องอย่างละเอียดมาแต่ละข้อ ซึ่งสาเหตุจากคน เครื่องจักร วัตถุดิบ หรือ ขั้นตอนวิธีการทำงานการวิเคราะห์การเกิดข้อบกพร่อง ถือว่าการผลิตชิ้นส่วนจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดทางวิศวกรรม ที่ถูกระบุอยู่ในแบบของชิ้นส่วน สำหรับสาเหตุของข้อบกพร่องโดยทั่วไป อาจมีสาเหตุมาจาก แรงบิดไม่ถูกต้องอาจจะสูงหรือต่ำเกินไป การเชื่อมไม่ถูกต้องเช่น ค่ากระแส เวลา แรงดัน ความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัด กรรมวิธีการให้ความร้อนไม่ถูกต้อง เช่น เวลา อุณหภูมิ การปิดกั้น การระบายที่ไม่เพียงพอ การหล่อลื่นไม่เพียงพอ ชิ้นส่วนประกอบไม่ครบหรือใส่ชิ้นส่วนผิดตำแหน่ง เป็นต้น
- 15) **โอกาสที่ข้อบกพร่องเกิดขึ้น (O)** โอกาสที่ข้อบกพร่องเกิดขึ้น ได้แก่ แนวโน้มหรือโอกาสของสาเหตุที่อาจจะเกิดความเสียหายขึ้นได้ในระหว่างกระบวนการผลิต หลังจากทีคณะทีมงานได้ทำการหาสาเหตุและผลกระทบอันเกิดจากลักษณะข้อบกพร่องแล้ว คณะทีมงานจะต้องทำการประเมินความเสี่ยงของลักษณะข้อบกพร่องในแต่ละข้อ ในขั้นตอนนี้คณะทีมงานจะต้องจัดทำสเกลขึ้นมาเพื่อจัดระดับความเสี่ยง โดยปกติแล้ว การกำหนดสเกลที่มีจำนวนระดับหลายๆ สมาชิกในทีมจะต้องใช้ในการแบ่งระดับให้กับลักษณะข้อบกพร่องแต่ละข้อ ทำให้กระบวนการวิเคราะห์มีประสิทธิภาพลดลง โดยส่วนใหญ่ในการใช้งานแบบสเกล 1-10 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.2
- 16) **การควบคุมกระบวนการปัจจุบัน** การควบคุมกระบวนการปัจจุบันเป็นการระบุรายละเอียดที่ต้องการควบคุม เพื่อป้องกันมิให้เกิดข้อบกพร่องหรือการตรวจสอบว่ามีข้อบกพร่องเกิดขึ้นหรือไม่
- 17) **โอกาสการตรวจพบลักษณะข้อบกพร่อง (D)** โอกาสการตรวจพบลักษณะข้อบกพร่อง (Detection) ได้แก่ การประเมินความสามารถของการควบคุมกระบวนการผลิตใน

ปัจจุบันว่ามีประสิทธิภาพเพียงใด ซึ่งทีมงานจะต้องทำการประเมินว่าถ้ามีลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต กระบวนการควบคุมปัจจุบันจะสามารถตรวจพบลักษณะบกพร่องได้มากน้อยเพียงใด โดยการจัดลำดับของโอกาสในการตรวจพบจะอยู่ในลักษณะตรงข้ามกับการจัดลำดับโอกาสการเกิดลักษณะข้อบกพร่องและความรุนแรงของผลกระทบจากลักษณะข้อบกพร่อง กล่าวคือ ถ้าโอกาสในการตรวจพบมีน้อย ค่าคะแนนหรือระดับจะมีค่ามาก ดูรายละเอียดได้ในตารางที่ 2.3

- 18) **ค่าตัวเลขระดับความเสี่ยงชี้หน้า (RPN)** ค่าตัวเลขระดับความเสี่ยงชี้หน้า หรือบางครั้งเรียกว่า Criticality Index นี้ ช่วยให้ทีมงานทราบว่าลักษณะข้อบกพร่องใดที่จะทำให้กระบวนการผลิตประสบความผิดพลาดหรือล้มเหลวได้ การเปรียบเทียบค่า RPN ของลักษณะข้อบกพร่องในแต่ละข้อสามารถทำให้ทีมงานจัดลำดับลักษณะข้อบกพร่องที่มีความสำคัญจากมากไปน้อย ในการพิจารณาดำเนินการเลือกลำดับก่อนหลังในการปฏิบัติการแก้ไขได้อย่างไรก็ตามเมื่อภาวะรุนแรงสูงในกระบวนการผลิตทีมงานจะต้องทำการแก้ไขข้อบกพร่องอย่างเร่งด่วน โดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงผลลัพธ์ของค่า RPN ที่ได้ ค่า RPN มีค่าระหว่าง 1 – 100 โดย $RPN = S \times O \times D$
- 19) **ปฏิบัติการเสนอแนะ** ทำการปฏิบัติการแก้ไขและป้องกัน หลังจากที่ได้ทำพิจารณาค่า RPN ซึ่งการดำเนินการนี้จะสามารถช่วยในการกำจัดลักษณะข้อบกพร่องหรือ สามารถลดคะแนนตัวเลข RPN ลงได้ การแก้ไขควรพิจารณาจากสาเหตุข้อบกพร่องที่มีค่า RPN อันดับสูงสุดก่อน โดยมุ่งหมายที่จะลดภาวะความรุนแรงที่เกิดขึ้น และโอกาสการตรวจพบของข้อบกพร่อง โดยทีมงานจะต้องทำการพัฒนาทางเลือกในการแก้ปัญหาได้มากกว่า 1 ทางเลือกสำหรับแต่ละสาเหตุของลักษณะข้อบกพร่อง โดยปฏิบัติการแก้ไขป้องกันที่จัดทำขึ้น เพื่อกำจัดสาเหตุของการเกิดลักษณะข้อบกพร่องที่จะทำให้ลักษณะข้อบกพร่องถูกกำจัดไปด้วยทันทีเช่นกัน หากไม่สามารถคิดปฏิบัติการป้องกันได้ พิจารณาวาวิธีในการลดค่า RPN ด้วยการอาจจะลดโอกาสที่ลักษณะข้อบกพร่องจะเกิดขึ้น ลดความรุนแรงของผลกระทบจากลักษณะข้อบกพร่อง และเพิ่มโอกาสในการตรวจพบลักษณะข้อบกพร่อง ในกรณีที่ไม่มีการปฏิบัติการเสนอแนะให้ระบุว่า “ไม่มี”
- 20) **ความรับผิดชอบ** (สำหรับปฏิบัติการที่เสนอแนะ) ระบุชื่อบุคคลหรือหน่วยงานซึ่งเป็นผู้รับผิดชอบสำหรับปฏิบัติการที่เสนอแนะ รวมทั้งวันที่ ที่กำหนดให้ดำเนินการแก้ไขเสร็จสิ้นตามเป้าหมาย
- 21) **ปฏิบัติการที่ดำเนินการ** หลังจากปฏิบัติการได้รับการนำไปปฏิบัติตามแล้วให้ระบุรายละเอียดโดยย่อของปฏิบัติการที่ดำเนินการจริงพร้อมทั้งระบุวันที่ที่ได้ดำเนินการ

22) ผลการปฏิบัติการด้านค่า RPN ในกระบวนการผลิต FMEA บางครั้งรวมเอาการทวนการคำนวณค่า RPN เข้าไปด้วย เพื่อวัดผลการปฏิบัติการแก้ไขต่อกระบวนการผลิตด้วยเมื่อปฏิบัติการแก้ไขเสร็จสิ้นลง จะต้องมีการบันทึก ค่า RPN ก่อนและหลังการดำเนินการปฏิบัติการแก้ไข โดยค่า RPN ที่ลดลง เป็นหลักฐานยืนยันถึงประโยชน์จากการดำเนิน

การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบต่อคุณภาพการติดตามผลงาน ผู้รับผิดชอบกระบวนการผลิต จะต้องสามารถประกันได้ว่าการปฏิบัติการเสนอแนะทั้งหมดจะต้องได้รับการนำไปปฏิบัติตาม หรือได้รับการระบุรายละเอียดไว้อย่างเพียงพอแล้วเอกสาร FMEA เป็นเอกสารใช้งานซึ่งควรแสดงให้เห็นถึงระดับการเปลี่ยนแปลงการออกแบบครั้งล่าสุดเสมอ รวมทั้งระดับปฏิบัติการครั้งล่าสุดที่เกี่ยวข้อง ทีมงานผู้รับผิดชอบในกระบวนการผลิตจะต้องสามารถหาวิธีการหลายๆวิธี เพื่อแสดงให้เห็นว่าข้อกำหนดในกระบวนการผลิตและปฏิบัติการเสนอแนะต่างๆ ได้รับการนำไปแก้ไข และปฏิบัติตาม เป้าหมายพื้นฐานของการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบต่อคุณภาพด้านกระบวนการ หรือ การทำProcess FMEA คือ เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิบัติการแก้ไขป้องกันซึ่งช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิตในครั้งต่อไป ดังนั้นกิจกรรมนี้จะประสบความสำเร็จลุล่วงตามขั้นตอนได้ก็ต่อเมื่อบริษัท ได้มีการดำเนินการปฏิบัติตามปฏิบัติการแก้ไขและป้องกันซึ่งทางทีมงาน FMEA ได้เสนอไว้

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์การประเมินความรุนแรง (S) สำหรับ PFMEA (AIAG)

ผลกระทบ	เกณฑ์: ความรุนแรงของผลกระทบ การจัดระดับนี้จะใช้เมื่อแนวโน้มความล้มเหลวที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องต่อลูกค้าหรือในการผลิต/ประกอบของลูกค้ากรณีที่เกิดเหตุการณ์ได้ทั้ง 2 ลักษณะให้เลือกใช้ค่าความรุนแรงที่มากกว่า(ผลกระทบต่อลูกค้า)	เกณฑ์: ความรุนแรงของผลกระทบ การจัดระดับนี้จะใช้เมื่อแนวโน้มความล้มเหลวที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องต่อลูกค้าหรือในการผลิต/ประกอบของลูกค้ากรณีที่เกิดเหตุการณ์ได้ทั้ง 2 ลักษณะให้เลือกใช้ค่าความรุนแรงที่มากกว่า(ผลกระทบต่อการผลิต/ประกอบ)	ระดับคะแนน
อันตรายร้ายแรงโดยไม่มี การเตือนล่วงหน้า	อันดับความรุนแรงสูงมาก เมื่อแนวโน้มความล้มเหลวส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย การทำงานของยานยนต์และ/หรือ ไม่สอดคล้องกับกฎระเบียบของรัฐ โดยไม่มี การเตือน	หรืออาจส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงาน (เครื่องจักร, การประกอบ) โดยไม่มี การเตือน	10
อันตรายร้ายแรงแต่มี การเตือนล่วงหน้า	อันดับความรุนแรงสูงมาก เมื่อแนวโน้มความล้มเหลวส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย การทำงานของยานยนต์และ/ หรือ ไม่สอดคล้องกับกฎระเบียบของรัฐ โดยมี การเตือน	หรืออาจส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงาน (เครื่องจักร, การประกอบ) โดยมี การเตือน	9
สูงมาก	ความบกพร่องซึ่งทำให้ยานยนต์/ส่วนประกอบ ไม่สามารถใช้งานได้ (สูญเสียความสามารถในการทำงานตามจุดประสงค์พื้นฐาน)	หรือ ผลิตภัณฑ์ต้องถูกกำจัดทิ้ง (100%) หรือ ยานยนต์/ส่วนประกอบต้องถูกซ่อมในหน่วยงาน ซ่อมด้วยระยะเวลาเกิน 1 ชั่วโมง	8
เล็กน้อยมาก	ส่วนประกอบมีความไม่สอดคล้องในด้านความปลอดภัย, การตกแต่ง, เสียงสั่นดัง ลูกค้าส่วนน้อย (น้อยกว่า 25%) สังเกตได้	หรือ ผลิตภัณฑ์บางส่วน (น้อยกว่า 100%) ถูกแก้ไข โดยไม่มี การกำจัดทิ้ง, โดยการแก้ไขกระทำในสายการผลิตและในหน่วยผลิต	2
สูง	ความบกพร่องซึ่งทำให้ยานยนต์/ส่วนประกอบ สมรรถนะการงานที่ลดลง แต่ยังสามารถใช้งานได้ ทำให้ลูกค้าไม่พอใจอย่างมาก	หรือ อาจต้องมีการคัดแยกผลิตภัณฑ์ และ บางส่วนต้องถูกกำจัดทิ้ง (น้อยกว่า 100%) หรือ ยานยนต์/ส่วนประกอบต้องถูกซ่อมในหน่วยงานซ่อม	7
ปานกลาง	ความบกพร่องซึ่งยานยนต์/ส่วนประกอบทำงานได้ แต่ ส่วนประกอบที่เกี่ยวกับความสะดวกสบายไม่สามารถใช้งานได้ ทำให้ลูกค้าไม่พอใจ	หรือ ส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ (น้อยกว่า 100%) อาจต้องถูกกำจัดทิ้ง โดยไม่ต้องคัดแยก หรือ ยานยนต์/ส่วนประกอบ ต้องถูกซ่อมในหน่วยงานซ่อมด้วยระยะเวลาไม่เกินครึ่ง ชั่วโมง	6
ต่ำ	ความบกพร่องซึ่งยานยนต์/ส่วนประกอบทำงานได้ แต่ ส่วนประกอบที่เกี่ยวกับความสะดวกสบายมีสมรรถนะ การทำงานที่ลดลง แต่ใช้งานได้	หรือ ผลิตภัณฑ์ (100%) อาจถูกแก้ไข, หรือ ยานยนต์/ส่วนประกอบถูกซ่อมนอกสายการผลิต โดยไม่ต้องส่งไปยังหน่วยงานซ่อม	5
ต่ำมาก	ส่วนประกอบมีความไม่สอดคล้องในด้านความปลอดภัย, การตกแต่ง, เสียงสั่นดัง ลูกค้าส่วนใหญ่ (มากกว่า 75%) สังเกตได้	หรือ ผลิตภัณฑ์อาจถูกคัดแยก และบางส่วน (น้อยกว่า 100%) ถูกแก้ไขได้โดยไม่ต้องกำจัดทิ้ง	4
เล็กน้อย	ส่วนประกอบมีความไม่สอดคล้องในด้านความปลอดภัย, การตกแต่ง, เสียงสั่นดัง ลูกค้าส่วนหนึ่ง (มากกว่า 50%) สังเกตได้	หรือ ผลิตภัณฑ์บางส่วน (น้อยกว่า 100%) ถูกแก้ไข โดยไม่มี การกำจัดทิ้ง, โดยการแก้ไขกระทำในสายการผลิตแต่ นอกหน่วยผลิต	3
ไม่มีเลข	ไม่มีผลใดๆ	หรือ เกิดความไม่สะดวกต่อกระบวนการ, ผู้ปฏิบัติงาน หรือ ไม่มีผลกระทบ	1

ตารางที่ 2.3. เกณฑ์การประเมินความถี่ในการเกิด (O) สำหรับ PFMEA (AIAG)

ความน่าจะเป็นของการเกิดความล้มเหลว	โอกาสการเกิด	ระดับ
สูงมาก: เกิดความล้มเหลวบ่อยมาก	> 100 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	10
	50 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	9
สูง: เกิดความล้มเหลวถี่	20 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	8
	10 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	7
ปานกลาง: เกิดความล้มเหลวเป็นครั้งคราว	5 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	6
	2 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	5
	1 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	4
ต่ำ: เกิดความล้มเหลวน้อยครั้ง	0.5 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	3
	0.1 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	2
แทบไม่เกิด: ความล้มเหลวไม่น่าจะเกิดขึ้นเลย	< 0.01 ครั้ง ต่อ 1,000 ชิ้น	1

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) สำหรับ PFMEA (AIAG)

การตรวจพบ	เกณฑ์	ประเภทของการตรวจสอบ			การควบคุมที่ใช้เพื่อให้อาจตรวจพบ	ระดับ
		A	B	C		
แทบเป็นไปไม่ได้	ไม่สามารถตรวจพบได้			X	ไม่สามารถตรวจพบหรือไม่มีการตรวจ	10
เป็นไปได้ยากมาก	เป็นไปได้ยากมากที่การควบคุมจะตรวจพบ			X	การควบคุมมีเพียงการตรวจสอบทางอ้อมหรือการสุ่มตรวจสอบเท่านั้น	9
เป็นไปได้ยาก	เป็นไปได้ยากที่การควบคุมจะตรวจพบ			X	การควบคุมมีเพียงการตรวจสอบด้วยสายตาเท่านั้น	8
ต่ำมาก	เป็นไปได้ยากที่การควบคุมจะตรวจพบ			X	การควบคุมมีเพียงการตรวจสอบด้วยสายตา 2 ครั้งเท่านั้น	7
ต่ำ	การควบคุมอาจตรวจพบได้		X	X	การควบคุมมีการใช้ฟังก์ชันควบคุม เช่น SPC (การควบคุมกระบวนการด้วยกลวิธีทางสถิติ)	6
ปานกลาง	การควบคุมอาจตรวจพบได้		X		มีการใช้เกณฑ์ต่างๆ ตรวจสอบหลังจากชิ้นงานออกจากหน่วยผลิต หรือมีการใช้ Go/No Go เกณฑ์ตรวจสอบ 100% สำหรับชิ้นงานที่ออกจากหน่วยผลิต	5
ปานกลางถึงค่อนข้างสูง	การควบคุมมีโอกาสสูงที่จะตรวจพบ	X	X		ตรวจสอบข้อบกพร่องในกระบวนการย่อยต่างๆ ได้ หรือใช้เกณฑ์ตรวจสอบการตั้งเครื่องและชิ้นงานแรก (สำหรับการตั้งเครื่องเท่านั้น)	4
สูง	การควบคุมมีโอกาสสูงที่จะตรวจพบ	X	X		ตรวจสอบข้อบกพร่องในจุดปฏิบัติงานหรือตรวจพบในกระบวนการย่อยต่างๆ ได้ โดยมีการกรองเพื่อยอมรับในหลายระดับ: การจัดหา, คัดเลือก, ติดตั้ง, ทวนสอบ โดยไม่มีการยอมรับชิ้นงานบกพร่อง	3
สูงมาก	การควบคุมมีโอกาสค่อนข้างแน่นอนที่จะตรวจพบ	X	X		ตรวจพบข้อบกพร่องในจุดปฏิบัติงาน (มีการใช้เกจวัดโนมิติร่วมกับการหยุดอัตโนมัติ) ไม่สามารถที่จะส่งต่อชิ้นงานเสียได้	2
สูงมาก	การควบคุมแน่นอนที่จะตรวจพบ	X			ไม่สามารถเกิดชิ้นงานที่บกพร่องได้เนื่องจากมีการป้องกันความผิดพลาดโดยกระบวนการและการออกแบบผลิตภัณฑ์	1

ชนิดของการตรวจสอบ A = ตัวป้องกันความผิดพลาด

B = ใช้เครื่องมือตรวจสอบ

C = การตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน

2.5 การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) สำหรับข้อมูลนับ กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2549

ในการศึกษาความสามารถของกระบวนการวัดแบบอาศัยข้อมูลนับนี้ จะเป็นการประเมิน โดยการเปรียบเทียบชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบกับพิสัยของข้อกำหนดเฉพาะ ซึ่งจะทำให้สามารถ ประเมินผลข้อมูลออกมาเป็นที่ยอมรับหรือปฏิเสธ และผ่านหรือไม่ผ่าน จึงไม่สามารถประเมินผล ได้ว่าคุณภาพของงานที่ตรวจสอบนั้นดีหรือไม่อย่างไร

โดยในการศึกษาความสามารถของกระบวนการวัดนี้จะอาศัยวิธีการจำแนกชิ้นงานที่มีทั้ง ลักษณะดี ไม่ดีและ ก้ำกึ่ง (Marginal) ในจำนวนที่เหมาะสม แล้วให้พนักงานที่สุ่มมาหรือกำหนดไว้ ล่วงหน้าทำการตรวจสอบเพื่อจำแนกผลการตรวจสอบเป็นผ่านหรือไม่ผ่าน จากนั้นพิจารณาว่าผล การตรวจสอบซ้ำมีคุณภาพตรงกับคุณภาพแท้จริงของสิ่งตัวอย่างงานหรือไม่ ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะ บอกถึง “ความถูกต้อง” ในการตรวจสอบ โดยจะแบ่งลักษณะความถูกต้องนี้ออกเป็น “ความลำเอียง ของลูกค้า (Consumer’s bias)” ที่จะหมายถึง การที่พนักงานตรวจสอบมีแนวโน้มที่จะตรวจสอบ แล้วสรุปว่าไม่ผ่าน สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี และ “ความลำเอียงของผู้ผลิต (Producer’s bias)” ที่หมายถึง การที่พนักงานตรวจสอบที่แนวโน้มจะตรวจสอบแล้วสรุปผลว่าผ่าน สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ มีคุณภาพไม่ดี นอกจากนี้ยังให้ความหมายสนใจต่อความสามารถในการตรวจสอบซ้ำของพนักงาน ตรวจสอบ ซึ่งโดยปกติจะทำการประเมินผลออกมาในรูป “ความมีประสิทธิภาพของการตรวจสอบ (Screen effectiveness)” ที่หมายถึง ความสามารถของระบบการวัด ในการแยกแยะงานที่ไม่ดีออก จากงานที่ดี โดยมีกระบวนการประเมินผลดังต่อไปนี้

1. ทำการเลือก “คณะผู้ชำนาญการ” ซึ่งเป็นบุคคลที่มีความสามารถเป็นพิเศษในการ แยกแยะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดี/เสีย และลูกค้ายอมรับในผลการตรวจสอบดังกล่าว
2. ให้กำหนด ลอตมาตรฐาน (Standard lots) สำหรับใช้ในการตรวจสอบเพื่อประเมิน ความสามารถของระบบการตรวจสอบ โดย Fasser and Brettner, 1992 แนะนำให้ลอต มาตรฐานดังกล่าวประกอบด้วยสิ่งตัวอย่างที่มีคุณภาพดีจำนวน 1 ใน 3 ของสิ่งตัวอย่าง ทั้งหมด โดยมีสิ่งตัวอย่างที่มีคุณภาพไม่ดีอีกจำนวน 1 ใน 3 ของสิ่งตัวอย่างทั้งหมด และอีก 1 ใน 3 เป็นสิ่งตัวอย่างที่มีคุณภาพก้ำกึ่ง โดยงานก้ำกึ่งนี้ควรจะไปด้วย งานดีแบบก้ำกึ่งและงานไม่ดีแบบก้ำกึ่งอย่างละครึ่งๆ
3. ทำการเลือกพนักงานวัดหรือพนักงานตรวจสอบงานมา 2-4 คนโดยพนักงานที่เลือกมา จะต้องเป็นพนักงานที่มีหน้าที่ประจำในงานตรวจสอบคุณภาพ และได้ผ่านการ ฝึกอบรมมาอย่างดีพร้อม ผ่านการสอบประเมินผลแล้ว
4. ทำการกำหนดจำนวนชิ้นตัวอย่างงาน และจำนวนครั้งในการทดสอบซ้ำ โดยจำนวน ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับจำนวนของพนักงานทดสอบด้วย
5. ให้สุ่มพนักงานตรวจสอบขึ้นมาคนหนึ่งแล้วให้ทำการตรวจสอบตัวอย่างงานแบบสุ่มเพื่อ ประเมินผลคุณภาพของสิ่งตัวอย่างว่า ผ่านหรือไม่ผ่าน พร้อมทั้งบันทึกผล

6. ทำการสุ่มเลือกพนักงานมาอีก แล้วดำเนินการเหมือนขั้นตอนที่ 5 ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนครบการประเมินผลจากพนักงานทุกคน
7. ดำเนินการประเมินผลด้วยดัชนีต่างๆ ดังนี้

$$\% \text{ รัฟฟิทธะบิลิตีของพนักงานตรวจสอบ} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ผลการตรวจสอบเหมือนกัน}}{\text{จำนวนชิ้นงานตรวจสอบ}} \quad 2.1$$

$$\% \text{ ความไม่ไปอัสของพนักงานตรวจสอบ} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่การตรวจสอบเหมือนกันและถูกต้อง}}{\text{จำนวนชิ้นงานตรวจสอบ}} \quad 2.2$$

$$\% \text{ ประสิทธิผลด้านรัฟฟิทธะบิลิตีของการตรวจสอบ} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ผลการตรวจสอบเหมือนกัน}}{\text{จำนวนชิ้นงานตรวจสอบ}} \quad 2.3$$

$$\% \text{ ประสิทธิผลด้านไปอัสของการตรวจสอบ} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่พนักงานทุกคนตรวจสอบได้ถูกต้องเหมือน}}{\text{จำนวนชิ้นงานตรวจสอบ}} \quad 2.4$$

8. ดำเนินการตัดสินใจจากสมการ (2.1) ถึง (2.2) โดยที่ว่า ถ้าหากค่า %รัฟฟิทธะบิลิตีของพนักงานตรวจสอบ (% appraiser score) ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดแล้วให้ทำการอบรมพนักงานใหม่ รวมถึงการประเมินผลพนักงานใหม่เพื่อปรับปรุงรัฟฟิทธะบิลิตีให้ดีขึ้น และถ้า %ความไม่ไปอัสของพนักงานตรวจสอบ (% attribute score) มีค่าไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดแล้วจะต้องปรับปรุงวิธีการตรวจสอบใหม่หรือมีฉะนั้นจะต้องกำหนดให้ชิ้นงานได้รับการตรวจสอบโดยผู้ชำนาญการเท่านั้น

สำหรับ %ประสิทธิผลด้านรัฟฟิทธะบิลิตีของการตรวจสอบ (% screen effective score) และ %ประสิทธิผลด้านไปอัสของการตรวจสอบ (% attribute screen score) ถ้าหากมีค่าไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดแล้วมีความจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุจากดัชนีข้างต้น แล้วทำการแก้ไขให้ถูกต้อง

โดยการวิเคราะห์เพื่อการตัดสินใจเกี่ยวกับค่าไปอัสและค่ารัฟฟิทธะบิลิตีของระบบการวัดแบบประเมินผลระยะยาว สามารถศึกษาได้จาก AIAG (2002)

3. ขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อระบุสาเหตุของปัญหา (Analysis Phase) โดยเครื่องมือและวิธีการใช้เครื่องมือในขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อระบุสาเหตุของปัญหา มีดังต่อไปนี้

3.1 การทดสอบสมมติฐาน สมจิต วัฒนาชญากุล, 2546

สมมติฐานทางสถิติหรือที่เรียกสั้นๆ ว่า “สมมติฐาน” เป็นความเชื่อหรือข้อสมมติเกี่ยวกับลักษณะที่สนใจในประชากร ซึ่งอาจเป็นจริงหรือไม่เป็นจริงก็ได้ ซึ่งเราไม่อาจทราบได้แน่นอนว่าสมมติฐานนั้นๆ เป็นจริงหรือไม่ถ้าไม่ได้ทำการตรวจสอบจากทุกๆ หน่วยของประชากร ซึ่งการ

ตรวจสอบจากทุกๆหน่วยของประชากรในทางปฏิบัติจะเป็นไปได้ยากหรืออาจเป็นไปได้ ดังนั้นที่นิยมใช้กันในทางปฏิบัติคือ การสุ่มเลือกตัวอย่างจากประชากรที่สนใจ แล้วนำผลที่ได้จากการศึกษามาทำการตัดสินใจว่าสมมติฐานดังกล่าวเป็นจริงหรือไม่ โดยถ้าผลที่ได้จากตัวอย่างไม่สอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ ก็จะทำให้สรุปได้ว่าต้องปฏิเสธหรือไม่ยอมรับสมมติฐานที่ตั้งไว้นั้นคือ สรุปว่าสมมติฐานนั้นไม่ถูกต้อง แต่ถ้าผลที่ได้จากตัวอย่างสอดคล้องหรือสนับสนุนสมมติฐานที่ตั้งไว้ ก็ทำให้เราไม่มีหลักฐานที่จะโต้แย้งว่าสมมติฐานไม่จริงจึงต้องยอมรับสมมติฐานนั้น ในการยอมรับสมมติฐานที่ตั้งไว้นั้นไม่ได้หมายความว่าข้อความในสมมติฐานต้องเป็นจริงแน่นอน เพียงแต่จากตัวอย่างที่เราไม่มีหลักฐานพอที่จะเชื่อได้ว่าเป็นอย่างอื่นเท่านั้น

ดังนั้น การทดสอบสมมติฐาน หมายถึง ขบวนการที่ใช้หลักฐานจากตัวอย่างและทฤษฎีความน่าจะเป็นเข้ามาช่วยในการตัดสินใจว่าข้อความในสมมติฐานนั้นมีเหตุผลพอจะเชื่อถือหรือไม่ ในการทดสอบสมมติฐานเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากตัวอย่าง (สถิติ) กับค่าของประชากร (ค่าพารามิเตอร์) เพื่อดูว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด ทั้งนี้เพราะโดยปกติในการอ้างอิงหรือทดสอบทางสถิติ เรายอมรับว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นเสมอ เนื่องจากเป็นการศึกษาจากตัวอย่าง แต่ถ้าความแตกต่างที่เกิดขึ้นไม่มาก อาจถือว่าไม่มีความแตกต่าง หรือความแตกต่างที่เกิดขึ้นไม่มีนัยสำคัญ แสดงว่าตัวอย่างชุดนั้นมาจากประชากรที่กำหนดหรือตัวอย่างเหล่านั้นมาจากประชากรเดียวกัน แต่ถ้าความแตกต่างที่เกิดขึ้นมีค่ามาก สามารถกล่าวได้ว่าความแตกต่างนั้นมีนัยสำคัญ ถ้าความแตกต่างนั้นมีนัยสำคัญ แสดงว่าสิ่งที่นำมาเปรียบเทียบกันนั้นไม่ใช่พวกเดียวกัน ในการตัดสินใจว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นจะมากจนมีนัยสำคัญหรือไม่นั้น เราอาศัยคุณสมบัติของการแจกแจงของค่าสถิติที่ได้จากตัวอย่างและความน่าจะเป็นมาช่วยในการตัดสินใจ

ในการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ จะมีการตั้งสมมติฐาน 2 สมมติฐานคู่กันไปคือ สมมติฐานว่าง (Null Hypothesis) ซึ่งเขียนแทนด้วย H_0 และสมมติฐานทางเลือก (Alternative Hypothesis) ซึ่งเขียนแทนด้วย H_1

สมมติฐานว่าง เป็นสมมติฐานที่ผู้วิเคราะห์ต้องการจะทดสอบหรือพิสูจน์ว่าไม่จริง โดยทั่วไปจะเป็นคำกล่าวอ้างว่าค่าพารามิเตอร์ของประชากรไม่มีความแตกต่างกับค่าที่สงสัย หรือค่าพารามิเตอร์ของประชากรกลุ่มต่างๆ ไม่แตกต่างกัน

สมมติฐานทางเลือก เป็นข้อความหรือสัญลักษณ์ที่กล่าวถึงพารามิเตอร์ว่ามีค่าความแตกต่างจากค่าที่กำหนดไว้ในสมมติฐานว่าง หรือเป็นข้อความที่เกี่ยวข้องกับประชากรที่ผู้วิจัยคาดว่าจะเป็นเมื่อสมมติฐานว่างไม่จริง

3.1.1 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานไม่ว่าจะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ย หรือการทดสอบเกี่ยวกับค่าสัดส่วนของประชากร จะมีขั้นตอนในการทดสอบสมมติฐานเหมือนกัน ซึ่งขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานอาจสรุปได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดสมมติฐาน

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.1 สมมติฐานทางสถิติมี 2 อย่างคือ สมมติฐานว่าง และ สมมติฐานทางเลือก ซึ่งจะต้องกำหนดคู่กัน จากสมมติฐานทางเลือกจะเป็นการบ่งชี้ว่าการทดสอบ สมมติฐานเป็นการสอบทางเดียวหรือสองทาง และควรระลึกอยู่เสมอว่าสมมติฐานว่างจะต้องมี เครื่องหมายเท่ากับรวมอยู่ด้วยเสมอ ซึ่งเครื่องหมายเท่ากับจะไม่ปรากฏในสมมติฐานทางเลือก ทั้งนี้ เพราะข้อความในสมมติฐานว่าง เป็นข้อความที่ต้องการทดสอบ ไม่เหมือนกับสมมติฐานทางเลือก ซึ่งผู้วิจัยจะใช้สรุปผลถ้าพิสูจน์ได้ว่าสมมติฐานว่างไม่จริง

ขั้นที่ 2 กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ

ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) หมายถึง ค่าความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่ สมมติฐานว่างที่ตั้งไว้จะถูกปฏิเสธทั้งๆที่สมมติฐานนั้นเป็นจริง ใช้สัญลักษณ์ α (แอลฟา) แทน

เนื่องจากระดับนัยสำคัญในการทดสอบ หรือบางครั้งเรียกว่าระดับความเสี่ยง เป็นโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นในการตัดสินใจโดยการไม่เชื่อสมมติฐานว่าง เราจึงมักจะกำหนดระดับ นัยสำคัญให้มีค่าน้อยๆ ระดับนัยสำคัญที่นิยมใช้ในการทดสอบมี 3 ระดับ คือ .01 .05 และ .10

โดยระดับ .01 นิยมใช้ในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการประกันคุณภาพ
 .05 นิยมใช้ในโครงการวิจัยเกี่ยวกับผู้บริโภค
 .10 นิยมใช้ในการทำโพล

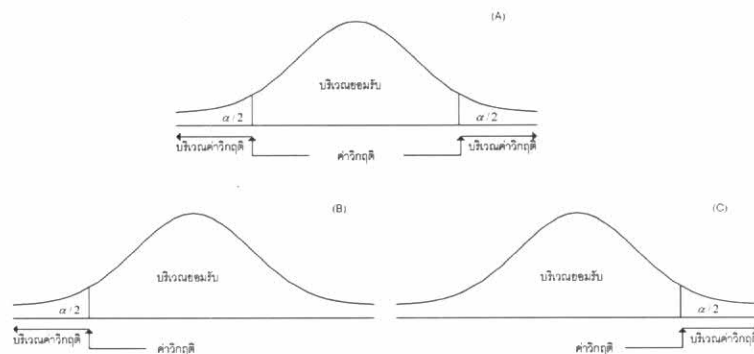
โดยทั่วไปการกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ ผู้ทำการตัดสินใจจะเป็นผู้กำหนดว่า ควรจะเป็นเท่าใด

ขั้นที่ 3 การเลือกสถิติเพื่อใช้ในการทดสอบและคำนวณค่าสถิติ

ตัวสถิติที่จะนำมาใช้ในการทดสอบมีหลายตัวเช่น z , t , F หรือ χ^2 (ไคสแควร์) การจะ ใช้ตัวสถิติใดในการทดสอบขึ้นอยู่กับข้อมูลที่มีอยู่เกี่ยวกับประชากรและตัวอย่าง จากนั้นก็คำนวณ ค่าสถิติของการทดสอบ โดยการแทนค่าที่ได้จากตัวอย่างลงไปในตัวสถิติของการทดสอบ

ขั้นที่ 4 สร้างเกณฑ์เพื่อใช้ในการตัดสินใจ

เกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจเป็นเงื่อนไขที่กำหนดว่า จะปฏิเสธหรือไม่ปฏิเสธสมมติฐานว่าง อาณาบริเวณหรือพื้นที่ของการปฏิเสธสมมติฐานจะเป็นบริเวณที่ค่าสถิติจะมีค่าใหญ่มากหรือเล็ก มากโดยโอกาสที่ค่าเหล่านั้นจะเกิดขึ้นเมื่อสมมติฐานจริงมีน้อยมาก จะเรียกอาณาบริเวณเหล่านั้นว่า บริเวณวิกฤต (Critical Region) หรือ บริเวณการปฏิเสธ (Rejection Region)



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงบริเวณการปฏิเสธและการยอมรับสมมติฐาน สำหรับการทดสอบสองหาง
(A) การทดสอบหางเดียวชนิดน้อยกว่า (B) และการทดสอบหางเดียวชนิดมากกว่า (C)

ขั้นที่ 5 ทำการตัดสินใจ

ในการตัดสินใจว่าจะเชื่อตามสมมติฐานว่างหรือไม่นั้น อาจทำได้ 2 แบบคือ

- นำค่าสถิติที่คำนวณได้จากขั้นที่ 3 มาเปรียบเทียบกับค่าวิกฤตที่ได้จากขั้นที่ 4 ถ้าค่าสถิติที่คำนวณได้ตกอยู่ในบริเวณวิกฤต จะปฏิเสธสมมติฐานว่าง และสรุปตามสมมติฐานทางเลือก หรือถ้าค่าสถิติคำนวณได้ ไม่ตกอยู่ในบริเวณวิกฤต จะเชื่อตามสมมติฐานว่าง
- นำค่าสถิติที่คำนวณได้จากขั้นที่ 3 มาหาค่าความน่าจะเป็นเพื่อเป็นตัวบอกค่า ถ้าสมมติฐานว่างเป็นจริง โอกาสที่ค่าสถิติที่ได้จะมากกว่าค่าที่คำนวณได้เล็กน้อยเพียงใด ค่าความน่าจะเป็นที่ได้นี้เรียกว่าค่า P (P-Value) โดยค่า P คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าที่ได้จากตัวอย่างจะมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้ถ้าสมมติฐานเป็นจริง จากนั้นนำค่า P ไปเปรียบเทียบกับค่าระดับนัยสำคัญ ที่ได้กำหนดไว้

ถ้าค่า P มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแอลฟา จะปฏิเสธสมมติฐานว่างและสรุปตามสมมติฐานทางเลือก

ถ้าค่า P มีค่ามากกว่าแอลฟา จะไม่ปฏิเสธสมมติฐานว่าง นั่นคือสรุปผลตามสมมติฐานทางเลือก

การตัดสินใจค่า P ไม่เพียงแต่ทำให้เราตัดสินใจได้ว่าจะปฏิเสธสมมติฐานว่างหรือไม่ แต่จากค่า P จะทำให้เราเกิดความมั่นใจในการตัดสินใจมากกว่าการใช้ระดับนัยสำคัญ ค่า P ที่มีค่าน้อยๆ เช่น 0.001 จะเป็นตัวบอกว่ามีโอกาสน้อยมากเพียง 1 ใน 1000 ที่สมมติฐานว่างจะเป็นจริง ในทางตรงกันข้ามถ้าค่า P มีค่าเป็น 0.325 ซึ่งสมมติฐานว่างจะไม่ถูกปฏิเสธไป เนื่องจากมีโอกาสที่สมมติฐานว่าง จะเป็นจริงหรือมีโอกาสน้อยที่สมมติฐานว่างจะไม่จริง

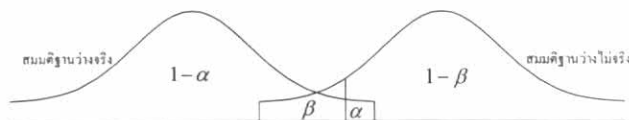
3.1.2 ประเภทของความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน

ในการทดสอบสมมติฐาน จำเป็นจะต้องตัดสินใจลงไปว่าจะเชื่อหรือไม่เชื่อสมมติฐานว่างที่ได้ตั้งเอาไว้ โดยอาศัยหลักฐานที่สุ่มมาจากประชากรที่สงสัย ซึ่งในการตัดสินใจดังกล่าวอาจจะเกิดข้อผิดพลาดขึ้นมาได้ ซึ่งความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในการตัดสินใจเกี่ยวกับการทดสอบสมมติฐานแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I error) หมายถึง ความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานว่าง ทั้งๆที่สมมติฐานว่างเป็นจริง โอกาสหรือความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดประเภทนี้เท่ากับ α ซึ่งก็คือระดับนัยสำคัญสำหรับการทดสอบนั่นเอง

ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II error) หมายถึง ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการยอมรับสมมติฐานว่างทั้งๆที่สมมติฐานว่างไม่จริง ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดประเภทนี้เท่ากับ β

ในการทดสอบสมมติฐานทุกครั้ง เราต้องการให้ความผิดพลาดทั้ง 2 ประเภทนี้เกิดขึ้นน้อยที่สุด กล่าวคือ ทั้ง α และ β มีค่าน้อย แต่โดยทฤษฎีพบว่า ความผิดพลาด 2 ประเภทนี้มีความสัมพันธ์กันดังภาพ



รูปที่ 2.2 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง α และ β

นั่นคือถ้าลดค่า α ลงค่า β ก็จะสูงขึ้น และถ้าลดค่า β ให้ต่ำลงค่า α ก็จะสูงขึ้น นั่นคือเราไม่อาจลดความผิดพลาดทั้ง 2 ประเภทลงพร้อมๆ กันได้ เนื่องจากความผิดพลาดประเภทที่ 1 เป็นความผิดพลาดที่ร้ายแรงกว่า ดังนั้นโดยทั่วไปในการทดสอบสมมติฐานเราจะกำหนดค่า α ให้มีค่าน้อยๆ ไว้ก่อน แล้วพยายามหาวิธีการทดสอบที่จะทำให้ค่า β มีค่าน้อย นั่นคือทำให้ค่า $(1 - \beta)$ ซึ่งจะเรียกว่า อำนาจของการทดสอบ (Power of the test) มีค่ามาก

อย่างไรก็ดี นักวิจัยที่ต้องการให้งานวิจัยมีอำนาจการทดสอบมาก หรือทั้ง α และ β มีค่าลดลง วิธีหนึ่งที่จะทำได้คือ การเพิ่มขนาดตัวอย่างให้มากขึ้น การกำหนดให้ α และ β มีค่าเป็นเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับผู้วิจัยว่าจะยอมรับความผิดพลาดแบบใดมากกว่ากัน

3.1.3 การทดสอบความแตกต่างของค่าสัดส่วนของประชากร 2 กลุ่ม

ในกรณีที่ต้องการทดสอบว่าค่าสัดส่วนของสิ่งที่สนใจจากประชากร 2 กลุ่มเท่ากัน จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

1. เมื่อกำหนดสมมติฐานว่า สัดส่วนของประชากร 2 กลุ่มไม่แตกต่างกัน หรือเมื่อ

$$H_0 : \pi_1 = \pi_2 \text{ หรือ } \pi_1 - \pi_2 = 0$$

ในกรณีที่ n_1 และ n_2 มีขนาดใหญ่ การแจกแจงของ $p_1 - p_2$ จะใกล้เคียงการแจกแจงแบบปกติ โดยมีค่าเฉลี่ย $\mu_{p_1-p_2} = p_1 - p_2$ และความแปรปรวน

$$\sigma_{p_1-p_2}^2 = \frac{p_1(1-p_1)}{n_1} + \frac{p_2(1-p_2)}{n_2} \text{ ทั้งนี้ภายใต้เงื่อนไข } n_1 p_1, n_1(1-p_1), n_2 p_2 \text{ และ } n_2(1-p_2)$$

ต้องมีค่ามากกว่า 5

ดังนั้น ในการทดสอบความแตกต่างของสัดส่วนของประชากร 2 กลุ่ม ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบคือ

$$z = \frac{(p_1 - p_2) - (\pi_1 - \pi_2)}{\sqrt{\frac{\pi_1(1-\pi_1)}{n_1} + \frac{\pi_2(1-\pi_2)}{n_2}}}$$

แต่จาก $H_0 : \pi_1 = \pi_2$ หรือ $\pi_1 = \pi_2 = \pi$

$$\text{ดังนั้น } z = \frac{p_1 - p_2}{\sqrt{\pi(1-\pi)\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

เนื่องจาก π ไม่ทราบค่า เราประมาณค่า π ด้วยสัดส่วนจากตัวอย่าง (p) โดยที่

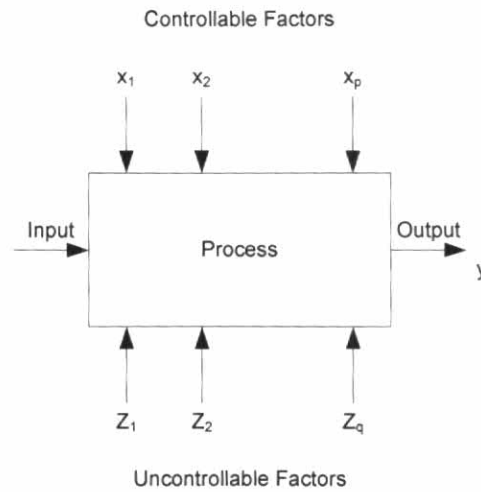
$$p = \frac{X_1 + X_2}{n_1 + n_2} = \frac{n_1 p_1 + n_2 p_2}{n_1 + n_2}$$

ดังนั้น ในการทดสอบ $H_0 : \pi_1 = \pi_2$ เราจึงใช้ z เป็นตัวทดสอบ โดยมีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$z = \frac{p_1 - p_2}{\sqrt{p(1-p)\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

4.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) ปารเมศ ชูติมา, 2545

การทดลองถูกสร้างขึ้น โดยผู้ทดลองซึ่งมาจากหลายสาขาอาชีพที่ต้องการค้นหาคำตอบจากกระบวนการหรือระบบที่ผู้ทดลองมีความสนใจ การทดลองในที่นี้อาจหมายถึงการทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่คาดหมายว่าเมื่อเปลี่ยนตัวแปรนำเข้าของกระบวนการหรือระบบ จะเป็นผลให้ตัวแปรตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในงานทางด้านวิศวกรรม การทดลองมีบทบาทสำคัญในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ การพัฒนากรรมวิธีการผลิตของกระบวนการและการปรับปรุงกระบวนการผลิต บางกรณีอาจต้องการพัฒนากระบวนการที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากแหล่งภายนอกกระบวนการ จะมีผลกระทบต่อกระบวนการ (Robust Design)



รูปที่ 2.3 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ

เมื่อ y คือ ตัวแปรตามหรือผลิตภัณฑ์

X, Z คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัย

$$y_{ij} = \mu + \tau + \varepsilon$$

ซึ่ง μ คือ ค่าเฉลี่ย

τ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย

ε คือ ความคลาดเคลื่อน

4.1.1 ปัจจัยในกระบวนการผลิต โดยสามารถแบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่คิดว่ามีผลต่อค่าตอบสนองที่สนใจ

2. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัยพอหรือต้นทุนในการควบคุมสูงมากหรือมีความรู้ไม่เพียงพอ ฯลฯ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมาก ผู้ทำการทดลองควรพยายามกำจัดปัจจัยลักษณะนี้เพื่อให้เปลี่ยนเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ จึงจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลองการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ให้ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์หรือไม่ต้องการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับแล้วทำการทดลอง จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง มีดังต่อไปนี้

1. หาตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง y มากที่สุด
2. กำหนดค่า x ที่ทำให้ค่า y ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ

3. กำหนดค่า x ที่ทำให้ค่า y มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
4. กำหนดค่า x ที่ทำให้ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ มีผลน้อยมาก

4.1.3 หลักในการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการวางแผนของการทดลองซึ่งข้อมูลในการทดลองนั้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ จนได้ข้อสรุปของวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อทำความเข้าใจในข้อมูล และหาผลสรุปออกมาแน่นอน หลักในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

1. การทำซ้ำ (Replication) คือการทำการทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูลเพื่อกำจัดผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออกไป การทำซ้ำมีความสำคัญ 2 ประการ คือ เพื่อการประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลอง และเพื่อการประมาณค่าเฉลี่ยนั้นให้มีความมั่นใจมากขึ้น

2. การทำแบบสุ่ม (Randomization) การทำแบบสุ่ม คือการให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวให้เท่ากันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่า ๆ กัน การทำแบบสุ่มสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีดังนี้

- a) การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)

- b) การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)

- c) การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization within Blocks)

4. การบล็อก (Blocking) คือการจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วงเพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ทำให้การทดลองนั้นมีความเที่ยงตรงมากขึ้น การบล็อกส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีความสม่ำเสมอ จึงจำเป็นต้องแยกเอาผลของวัสดุที่แตกต่างกันออกไปจะสนใจผลการทดลองที่เกิดขึ้นในแต่ละบล็อกเท่านั้น

4.1.4 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบ และวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งจำเป็น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีการในการเก็บข้อมูลตลอดจนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา

ขั้นที่ 1 การนิยามปัญหา เป็นการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

ขั้นที่ 2 การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัยการเลือกปัจจัย ที่มีผลและระดับของปัจจัย เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์ที่เคยปฏิบัติมาในการผลิต เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร เพื่อระบุระดับของปัจจัยในการทดลองสุดท้ายคือระบุว่าระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Levels), แบบสุ่ม (Random Levels) หรือแบบผสม (Mixed Levels)

- แบบกำหนด (Fixed Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน

- แบบสุ่ม (Random Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน

- แบบผสม (Mixed Levels) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดได้และแบบสุ่ม

ขั้นที่ 3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้ทำการทดลองต้องมั่นใจว่าเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการที่ทำการศึกษา ค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าวัดจะใช้เป็นตัวแปรตอบสนอง โดยทั่วไปจะเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองเพียงค่าเดียว แต่ก็มีบางการทดลองที่ทำการวัดค่าตัวแปรตอบสนองหลายค่า การวัดค่าจะต้องมีความแม่นยำรวมทั้งความถูกต้องของเครื่องมือวัดด้วย

ขั้นที่ 4 การเลือกแบบการทดลองการเลือกแบบการทดลองจะต้องพิจารณาถึงขนาดของข้อมูลหรือจำนวนที่ใช้ในการทำซ้ำ (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับในการทดลอง ข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่จำเป็น ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง

ขั้นที่ 5 การดำเนินการทดลองเมื่อทำการทดลอง ต้องทำการตรวจสอบการทดลองอย่างระมัดระวังว่ามีการดำเนินการตามที่วางไว้ ข้อควรระวังในการทำการทดลองคือความถูกต้องของกระบวนการเครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความผิดพลาด (Error) น้อยที่สุด เพราะความผิดพลาดในขั้นตอนนี้มักจะทำให้การทดลองล้มเหลวได้

ขั้นที่ 6 การวิเคราะห์ข้อมูลหลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลจากการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลอาจใช้ซอฟต์แวร์ (Software) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์อยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ วิธีการถูกนำมาใช้อย่างได้ผลคือกราฟอย่างง่ายโดยช่วยในการวิเคราะห์และตีความข้อมูลจากการทดลอง การตรวจสอบความเพียงพอของโมเดล (Model Adequacy Checking) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อความเชื่อมั่นของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลอง จึงจำไว้ว่าวิธีการทางสถิติไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลได้แน่นอน เพียงแต่เป็นเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่นโดยระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ดีการใช้หลักการทางสถิติช่วยให้การตัดสินใจเป็นนามธรรมมากขึ้น

ขั้นที่ 7 สรุปผลและข้อเสนอแนะเมื่อข้อมูลถูกวิเคราะห์ จะต้องสรุปผลของการวิเคราะห์ซึ่งอาจแสดงในรูปแบบกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะจากการทดลอง เมื่อสรุปผลแล้ว ควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

4.1.5 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง

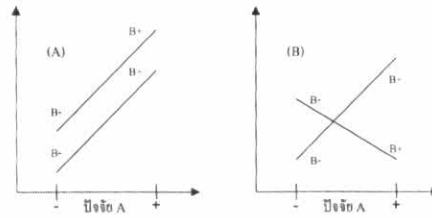
1. แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design) แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียวจะต้องเก็บข้อมูลโดยระดับของปัจจัยหรือทรีทเมนต์ (Treatment) เพื่อทดสอบว่าระดับของปัจจัยต่างๆ มีผลต่อค่าตอบสนองหรือไม่ โดยแผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

- การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียว แต่จะทำการเปรียบเทียบระหว่างระดับของปัจจัย มีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ มีผลกระทบน้อย และไม่มีปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) โดยการทดลองจะใช้หลักการทำให้แบบสุ่ม (Randomization) และการทำซ้ำ (Replication)

- การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ภายในบล็อก (Completely Randomized Block Design) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียวและมีปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) ที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง และต้องทำการกำจัดปัจจัยรบกวนดังกล่าวทิ้ง บางครั้งปัจจัยรบกวนนั้นไม่ทราบและไม่สามารถควบคุมได้ จึงใช้วิธีการบล็อก (Blocking) ในการกำจัดผลของปัจจัยรบกวนออกได้

2. แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นๆ จึงเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้ในการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ตัวอย่างเช่น กรณี 3 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย 3 ระดับ ปัจจัย B ประกอบด้วย 3 ระดับ และปัจจัย C ประกอบด้วย 3 ระดับ ในการทดลองทำซ้ำ (Replicate) 2 ครั้ง จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด $3 \times 3 \times 3 \times 2 = 54$ การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล จึงกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) และหากผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งเรียกว่าการมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แนวคิดดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.4 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (A) และแสดงการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (B)

จากรูปที่ 2.4 A จะเห็นได้ว่า เส้นของ B- และ B+ จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสอง ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 2.4 B จะเห็นได้ว่า เส้นของ B- และ B+ ไม่ขนานกัน และสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะเช่นนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสำคัญ (Significant) ของอันตรกิริยา อย่างไรก็ตามกราฟเช่นนี้ไม่ควรนำมาใช้แทนเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลในทางสถิติ เพราะการตีความจากกราฟค่อนข้างที่จะขึ้นกับความเห็นส่วนบุคคล ซึ่งอาจทำให้เกิดการเข้าใจผิดหรือวิเคราะห์ผิดพลาดได้รูปแบบของแผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลยังแบ่งย่อยในกรณีที่แผนการทดลองมีลักษณะเฉพาะตัวอีกดังต่อไปนี้

2.1) การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k (2^k Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k เป็นการทดลองที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 หรือ (-) และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ (+) การทดลองแบบนี้เหมาะสำหรับการทดลองที่มีปัจจัยมากๆ เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเบื้องต้นจะช่วยในการทดลองที่เจาะลึกต่อไป

2.2) การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3^k (3^k Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3^k เป็นการทดลองที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 หรือ (-) ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์ 0 หรือ (0) และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ (+) การทดลองแบบนี้เหมาะสมเมื่อผู้ทดลองกำลังสนใจกับผลตอบแทนที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

2.3) การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล เป็นการทดลองที่ใช้ในกรณีเมื่อการทดลองมีหลายปัจจัย ทำให้ต้องเสียเวลาในการเก็บข้อมูลมาก ดังนั้นจะทำให้ความสัมพันธ์ของทรีทเมนต์ (Treatment Combination) บางตัวถูกตัดออกไปโดยอาศัยหลักการของการคอนฟาวด์ (Confound) ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนั้นลดลง

3. แผนการออกแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) การออกแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบ เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยการฟิตและวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบที่เหมาะสมจะทำได้ง่ายขึ้น ถ้าเราเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม

3.1) การออกแบบสำหรับฟิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง (First Order Model)

สมมติว่าเราต้องการฟิตแบบจำลองอันดับหนึ่งที่มี k ตัวแปร

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon$$

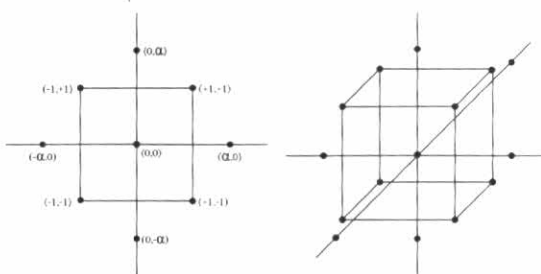
ซึ่งเป็นประเภทของการออกแบบพิเศษชนิดหนึ่ง ที่จะทำให้ความแปรปรวนของสัมประสิทธิ์ของการถดถอยมีค่าต่ำสุด และเรียกว่า การออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับที่หนึ่ง (Orthogonal First-Order Model) โดยการออกแบบชนิดนี้สามารถทำได้โดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2

3.2) การออกแบบสำหรับฟิตแบบจำลองอันดับที่สอง

เนื่องจากการออกแบบแบบจำลองอันดับที่สองไม่สามารถใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2 (ยกเว้น การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3^k) ดังนั้นในการออกแบบการทดลองจึงเติมการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลให้มีจุดเพียงพอที่จะหาแบบจำลองอันดับที่สองได้ ซึ่งการออกแบบลักษณะนี้มีหลายประเภทดังนี้

- การออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design: CCD)

โดยทั่วไป CCD จะประกอบไปด้วย 2^k แฟคทอเรียลที่มี n_f รัน, 2^k รันในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว และ n_c รันที่จุดศูนย์กลาง การพัฒนา CCD ในทางปฏิบัติส่วนมากจะเกิดจากการทดลองแบบเป็นอันดับ นั่นคือ การออกแบบ 2^k ถูกนำมาใช้เพื่อฟิตแบบจำลองอันดับหนึ่ง แล้วพบว่าแบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมกับข้อมูลนี้ ดังนั้นจึงได้มีการรันเพิ่มขึ้นในแนวแกน เพื่อให้สามารถใส่พจน์ควอดราติกลงในแบบจำลองได้ CCD เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการฟิตแบบจำลองอันดับที่สอง มีพารามิเตอร์อยู่สองตัวในการออกแบบที่จะต้องถูกกำหนด นั่นคือระยะทาง α ของการรันในแนวแกนของจุดศูนย์กลางในการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง n_c

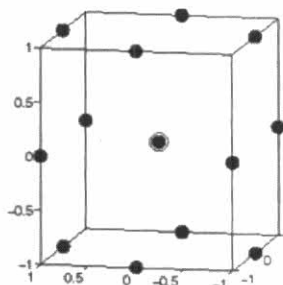


รูปที่ 2.5 การออกแบบ CCD สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$

- การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน (Box – Behnken Design)

การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพื้นผิวผลตอบ การออกแบบถูกสร้างขึ้นจากการรวมเอาการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

Run	x1	x2	x3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



รูปที่ 2.6 การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคนสำหรับสามตัวแปร

จากรูปแสดงให้เห็นถึงการออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัวแปร รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบ จะสังเกตเห็นว่า การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนั้น การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างจากขั้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลอง เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านการขยายของกระบวนการ

5. ขั้นตอนการควบคุมกระบวนการผลิต (Control Phase) โดยเครื่องมือและวิธีการใช้เครื่องมือในขั้นตอนการควบคุมกระบวนการผลิต มีดังต่อไปนี้

5.1 แผนภูมิควบคุม (Control Charts) วีรพงษ์ เกลิมจิระรัตน์, 2549

แผนภูมิควบคุม คือ แผนภูมิหรือกราฟที่จัดทำขึ้นล่วงหน้า โดยอาศัยข้อมูลจากขอบเขตที่กำหนด (Specification) ที่ระบุคุณสมบัติทางคุณภาพข้อใดข้อหนึ่งของชิ้นงานที่ดำเนินการผลิตและจะต้องควบคุมเพื่อใช้เป็นแนวทางในการติดตามผลการผลิตจากกระบวนการผลิต ขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง โดยการตรวจวัดคุณภาพของชิ้นงาน ซึ่งในการวัดข้อมูลอาจอยู่ในลักษณะ 2 แบบ คือ ข้อมูลที่ได้จากการวัด (Variable Data) และข้อมูลที่ได้จากการนับ (Attribute Data) จากนั้นเขียน

บันทึกลงในแผนภูมินั้น ๆ ซึ่งโดยปกติจะมีเส้นควบคุม 3 เส้น ได้แก่ เส้นขอบเขตกลาง คือ เส้นที่แสดงขนาดหรือจำนวนที่เป็นข้อกำหนดหรือเป้าหมายในการผลิต เส้นขอบเขตควบคุมบนและเส้นขอบเขตควบคุมล่างเป็นค่าที่อนุญาตให้มีความคลาดเคลื่อนในการผลิตเกิดขึ้นได้ และหากอยู่ในขอบเขตนี้ถือว่าผลการผลิตยอมรับได้ แต่หากค่าที่ได้อยู่นอกเหนือขอบเขตควบคุม (ไม่ว่าในทางมากกว่าหรือต่ำกว่า) ถือว่าการผลิตในขณะนั้นยอมรับไม่ได้จะต้องมีการปรับปรุงแก้ไขจุดบกพร่องโดยทันที

โดยธรรมชาติของกระบวนการผลิตทั้งหลายย่อมมีความผันแปร (Variation) เกิดขึ้นกับชิ้นงานหรือผลผลิตได้ โดยความผันแปรบางชนิดเป็นเรื่องปกติและอนุญาตให้ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ใน การผลิต โดยไม่ก่อความเสียหายต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่ความผันแปรบางชนิดมีผลกระทบมากและมีผลเสียหายต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เพราะทำให้ขนาด ของชิ้นงาน หรือ คุณสมบัติบางประการผิดไปจากมาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นการเข้าใจในสาเหตุแห่งความผันแปร จึงเป็นสิ่งสำคัญ

โดยสาเหตุความผันแปรต่างๆ มีผลมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ชนิด คือ

1. สาเหตุที่เป็นปกติวิสัย หรือเป็นธรรมชาติของการผลิต (Chance Cause) เป็นลักษณะสาเหตุของความผันแปรที่ไม่มีความรุนแรงและไม่มีผลต่อคุณภาพของสินค้าที่ผลิตได้ เกิดจากความผันแปรหรือความแตกต่างเล็กๆ น้อยๆ ของวัตถุดิบและปัจจัยการผลิตต่างๆ ซึ่งแน่นอนว่าไม่มีของสองสิ่งเหมือนกันทุกประการ วัตถุดิบ 100 ชิ้น ที่มีขนาดตรงกันตามข้อกำหนดทั้ง 100 ชิ้น ก็จะมีขนาดแต่ละชิ้นที่แตกต่างกันออกไป เพียงแต่ความแตกต่างเหล่านั้นอยู่ในพิสัยที่ขอบเขตข้อกำหนดได้อนุญาตเอาไว้แล้วในค่าพิสัยความเผื่อ (tolerance) ของชิ้นงาน

ฉะนั้นความผันแปรในคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากสาเหตุที่เป็นปกติวิสัยของการผลิต จึงเป็นสิ่งที่ยอมรับได้ในการควบคุมคุณภาพด้วยแผนภูมินี้

2. สาเหตุที่ระบุได้ หรือสาเหตุที่กำจัดได้ (Assignable Cause) เป็นลักษณะสาเหตุของความผันแปร ที่เกิดจากความผิดพลาด ความผิดพลาด ความชำรุด ความไม่ได้เกณฑ์ ฯลฯ ของปัจจัยการผลิตต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และไม่ใช่เป็นปกติวิสัย หรือธรรมชาติของการผลิตนั้นๆ จำเป็นจะต้องได้รับการกำจัด หรือแก้ไขจึงจะทำให้คุณภาพของงานผลิตกลับเข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้งได้

5.1.1 ชนิดของแผนภูมิควบคุม

แผนภูมิควบคุมแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ใหญ่ๆ โดยพิจารณาจากคุณลักษณะของตัวแปรที่ใช้เขียนแผนภูมิ คือ

1. แผนภูมิควบคุมชนิดข้อมูลมีค่าต่อเนื่องหรือเป็นข้อมูลจากหน่วยวัด (Continous Value)
2. แผนภูมิควบคุมชนิดข้อมูลมีค่าเป็นค่าแฉ่งนับ (Discrete Value) หรือมีค่าเต็มหน่วย ซึ่งเป็นข้อมูลจากหน่วยนับ

ตารางที่ 2.5 ชนิดของแผนภูมิควบคุม

ลักษณะจำเพาะของค่าที่จะควบคุม	ชื่อแผนภูมิควบคุมที่ใช้
ข้อมูลมีค่าต่อเนื่องหรือ ข้อมูลจากหน่วยวัด	$\bar{x} - R$ Chart (แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและพิสัย)
	\bar{x} Chart (แผนภูมิควบคุมค่าวัด)
ข้อมูลแบบค่าแฉงนับ หรือข้อมูลจากหน่วยนับ	pn Chart (แผนภูมิควบคุมจำนวนชิ้นงานที่เป็นของเสีย)
	p Chart (แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย)
	c Chart (แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย)
	u Chart (แผนภูมิควบคุมจำนวนตำหนิต่อชิ้น)

ตารางที่ 2.6 แสดงรายการสูตรที่ต้องใช้ในการสร้างแผนภูมิควบคุมแต่ละชนิด

ชนิดของแผนภูมิควบคุม	สูตรในการคำนวณ
\bar{x}	$UCL = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$ $CL = \bar{\bar{x}}$ $LCL = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$
R	$UCL = D_4 \bar{R}$ $CL = \bar{R}$ $LCL = D_3 \bar{R}$
x	$UCL = \bar{\bar{x}} + 2.66 \bar{R}_s$ $CL = \bar{\bar{x}}$ $LCL = \bar{\bar{x}} - 2.66 \bar{R}_s$
pn	$UCL = \bar{p}n + 3\sqrt{\bar{p}n(1-\bar{p})}$ $CL = \bar{p}n$ $LCL = \bar{p}n - 3\sqrt{\bar{p}n(1-\bar{p})}$
p	$UCL = \bar{p} + 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n}$ $CL = \bar{p}$ $LCL = \bar{p} - 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n}$
c	$UCL = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$ $CL = \bar{c}$ $LCL = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$
u	$UCL = \bar{u} + 3\sqrt{\bar{u}}$ $CL = \bar{u}$ $LCL = \bar{u} - 3\sqrt{\bar{u}}$

5.1.2 ลักษณะเฉพาะตัวของแผนภูมิควบคุมที่สำคัญ

1. แผนภูมิ $\bar{x} - R$ เป็นแผนภูมิควบคุมที่อาศัยค่าหน่วยวัด (x) และค่าเฉลี่ย (\bar{x}) ของกลุ่มข้อมูลในการควบคุม โดย \bar{x} จะหาได้จากค่าเฉลี่ยของ x ในกลุ่มย่อย (Subgroup) และค่า R หรือพิสัยก็เป็นค่าพิสัยของ x ภายในกลุ่มย่อยนั้น เรามักจะใช้ แผนภูมิ \bar{x} คู่กับแผนภูมิ R เพื่อควบคุมความผันแปรภายในกลุ่มย่อย

2. แผนภูมิ x เป็นแผนภูมิควบคุมที่ใช้ตัวเลขค่าวัด (x) โดดๆ แต่ละตัวมาเขียนลงในแผนภูมิโดยไม่หาค่าเฉลี่ยของค่าวัดจากกลุ่มย่อยก่อน อาจเป็นเพราะว่าการสุ่มตัวอย่างกระทำห่างกันและเก็บข้อมูลโดดๆ ก็ได้ ค่าพิสัยของกลุ่มย่อยจึงไม่มี จึงอาศัยพิสัยเคลื่อนที่ (Moving Range) ซึ่งวัดเทียบกันระหว่างค่าวัดที่อยู่ต่อเนื่องกันเป็นหลักในการคำนวณหาค่าขอบเขตควบคุม

3. แผนภูมิ pn, p เป็นแผนภูมิควบคุมสำหรับกรณีนับจำนวนของเสีย หรือชิ้นงานชำรุด (Defectives) หรือค่าสัดส่วนของเสีย (Fractional Defective) ที่เกิดจากกระบวนการผลิตหนึ่งๆ

หากขนาดของสิ่งตัวอย่าง มีค่าคงที่จะใช้ แผนภูมิ pn แต่หากขนาดตัวอย่างมีค่าไม่คงที่จะใช้แผนภูมิ p

4. แผนภูมิ c, u แผนภูมิควบคุมทั้งสองชนิดนี้ใช้ควบคุมรอยตำหนิ (Defects) ที่ปรากฏบนหนึ่งหน่วยผลิตภัณฑ์ หรือต่อหนึ่งครั้งที่มีการตรวจสอบ โดยผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดหรือหน่วยวัดคงที่จะใช้แผนภูมิ c เพื่อกำหนดจำนวนรอยตำหนิต่อ หนึ่งหน่วยผลิตภัณฑ์ แต่สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดหรือหน่วยวัดขณะทำการชักสิ่งตัวอย่างที่ไม่แน่นอน จะใช้แผนภูมิ u ในการควบคุม

5.1.3 วิธีการอ่านแผนภูมิควบคุม

สิ่งที่สำคัญที่สุดของการควบคุมคุณภาพโดยใช้แผนภูมิ คือ การอ่านหรือตีความหมายจากภาพ ที่ปรากฏบนแผนภูมิ เพื่อโยงเหตุผลไปที่สภาวะของกระบวนการผลิตซึ่งได้ผลิตข้อมูลที่เราได้นำมา เขียนเป็นแผนภูมิควบคุมเพราะอาการผิดปกติต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตที่จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะแสดงออกให้เป็นรูปธรรมที่แผนภูมิควบคุมนี้เอง และเมื่อเราตรวจพบความผิดปกติของ กระบวนการผลิตโดยอ่านจากแผนภูมิควบคุมนี้แล้ว เราได้ไปทำการแก้ไขที่สาเหตุของความผันแปรใด ๆ ในกระบวนการผลิตนั้น เพื่อปรับสภาวะการผลิตให้กลับสู่สภาวะที่อยู่ในควบคุม (In controlled) ได้ต่อไป

ข้อแนะนำเกี่ยวกับ 6 ลักษณะอาการสำคัญ เพื่อการอ่านแผนภูมิควบคุม

1. จุดอยู่นอกการควบคุม พบได้ชัดเจน คือ มีจุดในแผนภูมิปรากฏอยู่นอกเส้นขอบเขตควบคุม เรียกว่า จุดอยู่นอกควบคุม (Out of control) อาจอยู่นอกค่าสูงหรือค่าต่ำก็ได้

2. การเกิดรัน (Run) เมื่อปรากฏติดต่อกันบนซีกใดซีกหนึ่งของเส้นค่ากลาง เราเรียกว่า เกิดรัน ความยาวของรันแต่ละชุดนับจากจำนวนจุดในชุดนั้นและรันที่มีความยาวตั้งแต่ 7 จุดขึ้นไป เราตีความได้ว่า ได้เกิดความผิดปกติขึ้นแล้วในการผลิตช่วงที่เกิดรันนั้น

3. การเกิดแนวโน้ม การมีจุดต่อเนื่องกันไปในทิศทางเดียวกันอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการสลับฟันปลาเลย มีผลทำให้เส้นต่อจุดเหล่านั้นคล้าย ๆ เส้นตรงพาดขึ้นหรือพาดลงเช่นนี้เราเรียกว่ามีการเกิดแนวโน้ม (Trend) ขึ้นในแผนภูมิควบคุม แนวโน้มที่ว่านี้คือแนวโน้มที่กำลังบอกเราว่าค่าเฉลี่ยของ ขนาดควบคุมที่ผลิต ได้จากกระบวนการผลิตนั้นกำลังมีปัญหาหรือมีแนวโน้มจะเคลื่อนไปจากขนาด กำหนดที่ได้ตั้งเอาไว้แต่แรก

4. การเกิดการเข้าใกล้เส้นขอบเขตควบคุม หากเราแบ่งระยะ 3 ซิกมา (3σ) จากเส้นค่ากลางออกเป็นเส้น 2σ แล้วพบว่าจุด 2 จุด ใน 3 จุดที่ต่อเนื่องกันในแต่ละช่วงได้ตกไปอยู่ในพื้นที่ระหว่างเส้น 2σ กับเส้นขอบเขตควบคุม (3σ) ถือได้ว่าเกิด การเข้าใกล้เส้นขอบเขตควบคุม (Approach to the control limits) และเป็นการบอกถึงความผิดปกติขึ้นในกระบวนการผลิตแล้ว

5. การเกิดการเข้าใกล้ค่ากลาง หากพบว่าเส้นกราฟทั้งหมดตกอยู่ในระหว่างเส้น 1.5σ นับจากเส้นค่ากลางขึ้นไป และ ลงมาแล้วไม่ได้หมายความว่ากระบวนการผลิตนั้นอยู่ในควบคุม แต่กลับแสดงว่า คงจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ในการกำหนดขนาดของกลุ่มย่อย ข้อมูลอาจมีการปะปนกันของข้อมูล ที่นำมาจากต่างประชากรกัน และเกิดการปะปนกัน

6. การเกิดวัฏจักรมีลักษณะ คือ ค่าในเส้นกราฟจะเปลี่ยนแปลงขึ้น ๆ ลง ๆ มีลักษณะเป็นวงจรรวมรอบ หรือวัฏจักรที่เกือบจะทำนายลักษณะเส้นกราฟในช่วงต่อ ๆ ไปได้ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เกิดวัฏจักร (Periodicity)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเตนส์

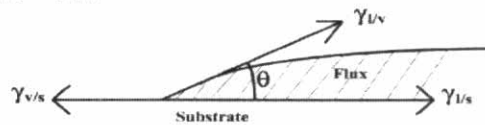
การเลือกชนิดของสารละลายนั้นขึ้นอยู่กับประเภทของสารปนเปื้อน เช่น การจะกำจัดฝุ่นและรอยนิ้วมือ(ไขมัน) ที่ติดอยู่บนผิวเตนส์จะใช้ผ้าชุบสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือ จาก *R.H.A. Crawley, 1953* แสดงให้เห็นว่า สารละลายเจือจาง 5%HF, 33% HNO_3 , 2%Teepol[®] และ 60% H_2O จะเป็นสารละลายที่สามารถทำให้ใช้ได้ทั่วไปในการทำทำความสะอาด แก้ว และ ซิลิกา เช่นเดียวกับ *R. S. Clouthier, 1996* กล่าวว่า การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยสารละลายจะช่วยชะล้างสารปนเปื้อนบนผิวของวัสดุที่จะนำมาเคลือบ แต่เนื่องจากในปัจจุบันมีการให้ความสำคัญเรื่องการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก การเลือกใช้สารเคมีประเภท CFC และ Volatile Organic Compound(VOC) ไม่ควรที่จะนำมาใช้ และ *R. S. Clouthier, 1996* ยังได้พูดถึงการเลือกใช้สารละลายในกระบวนการทำความสะอาดว่า “สารละลายที่จะใช้เป็นตัวชะล้างสิ่งเจือปน ควรจะถูกละเลือกเป็นลำดับแรก โดยส่วนมากโรงงานส่วนใหญ่จะเลือกเครื่องจักรที่จะนำเอามาทำความสะอาดเป็นลำดับแรก ซึ่งเมื่อพิจารณากระบวนการทำความสะอาดแล้ว ส่วนที่สำคัญที่สุดคือกระบวนการที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารละลาย ซึ่งถ้าสารละลายไม่สามารถชะล้างสารปนเปื้อนได้แล้ว การทำงานของเครื่องจักรก็จะส่งผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในการชะล้างสารปนเปื้อน ยกตัวอย่างเช่นการ

ล้างมือด้วยน้ำเปล่าและการขัดถูอย่างแรง อาจจะไม่สามารถชะล้างคราบสกปรกออกได้ จนกระทั่งเมื่อมีการใช้สบู่(สารละลาย)ในการล้างมือ คราบสกปรกก็จะสามารถถูล้างออกไปได้”

เช่นเดียวกันกับ *T. Lawrence et.al, 2001* ได้แสดงให้เห็นว่า VOC นั้นส่งผลกระทบต่อ ชั้นบรรยากาศ และประเด็นของสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะลดการใช้สารประเภท VOC ลง โดยมีการศึกษาเปรียบเทียบค่า wettability ของไอโซโพรพานอล (Isopropanol) กับน้ำบริสุทธิเพื่อที่จะค้นหาสารละลายที่สามารถนำมาใช้แทนสารจำพวก VOC ดังนี้

Wettability ถูกแสดงได้โดยมุมสัมผัส (contact angle (θ)) ดังสมการ

$$\gamma_{v/s} = \gamma_{l/s} + \gamma_{l/v} \cos \theta$$



รูปที่ 2.7 การถูก wetting ของวัสดุที่จะนำมาเคลือบ โดยแรงดึงดูดที่เกิดจากการไหลของของเหลว(Liquid flux)

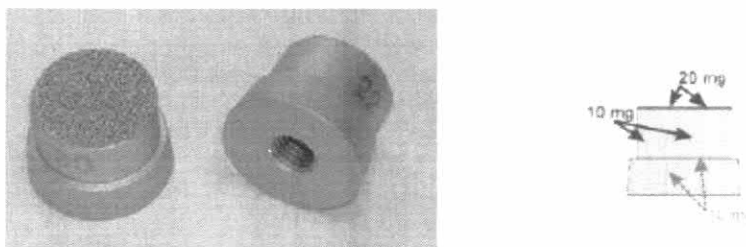
$\gamma_{v/s}$ = พลังงานบนผิวของ substrate (ระหว่างสถานะที่เป็นไอกับของแข็ง)

$\gamma_{l/s}$ = แรงดึง Interfacial (ระหว่างสถานะที่เป็นของเหลวกับของแข็ง)

$\gamma_{l/v}$ = แรงดึงผิว (ระหว่างสถานะที่ของเหลวกับไอ)

ดังนั้นจากสมการจะเห็นว่าค่า $\gamma_{l/v}$ จะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมสัมผัส เพิ่มขึ้น (ความสามารถในการชะล้างจะต่ำ) ในทางตรงกันข้ามค่า $\gamma_{l/v}$ จะลดลงเมื่อมุมสัมผัสลดลง(ความสามารถในการชะล้างจะสูง) ซึ่ง ไอโซโพรพานอล จะมีค่ามุมสัมผัสเกือบจะเป็น 0 องศา และน้ำบริสุทธิจะมีค่ามุมสัมผัสประมาณเท่ากับ 90 องศา ซึ่งจะเห็นว่าค่า $\gamma_{l/v}$ ของน้ำบริสุทธิจะสูงกว่าไอโซโพรพานอล ซึ่งเมื่อจะนำน้ำบริสุทธิมาใช้แทนไอโซโพรพานอล นั้นจึงเป็นไปได้ยาก ดังนั้น *T. Lawrence et.al, 2001* จึงเสนอแนะว่าวิธีการที่ดีที่สุดคือควรจะมีการเติมสารประเภทที่ใช้ลดแรงดึงผิว (Wetting agent) ลงในน้ำบริสุทธิก่อนเพื่อคุณสมบัติของการการชะล้าง

เมื่อทำการเลือกสารละลายที่จะนำมาใช้เป็นตัวทำความสะอาดได้แล้ว ในงานวิจัยของ *V. Frauchiger et.al, 2006* ได้ทำความสะอาดผิว Coupons ด้วยวิธีการจุ่ม ดังรูปที่ 2.9 และ 2.10



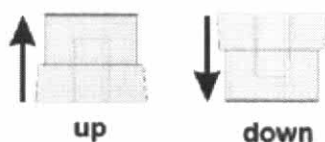
รูปที่ 2.8 ภาพและภาพร่างของ Test Coupons

โดยระบบการทำความสะอาดในงานวิจัยนี้จะใช้ถังเปิดใส่สารละลาย 11 ถัง ซึ่งมีจะมี ตะแกรงเพื่อใส่ coupons ต่อจากนั้นตะแกรงใส่ coupons จะถูกส่งผ่านไปตามตั้งแต่ละถัง (อัตโนมัติ) และในขั้นตอนสุดท้าย ลมร้อนที่ผ่านตัวกรองอากาศจะเป่าให้ coupons แห้งก่อนที่จะ ปล่อยออกจากระบบทำความสะอาด



รูปที่ 2.9 ระบบถังทำความสะอาด

โดยผลจากการทำความสะอาดแสดงให้เห็นว่า มีสารประกอบอินทรีย์ หลงเหลืออยู่น้อย กว่าค่าที่กำหนดไว้ 0.1 มิลลิกรัม และประเด็นที่สำคัญประการหนึ่งที่แสดงไว้ในงานวิจัยชิ้นนี้ คือ ลักษณะการวางตำแหน่งของ coupons ดังรูปที่ 4



รูปที่ 2.10 ลักษณะการวาง coupons บนตะแกรง

การวาง Coupons ในลักษณะ “up” สารประกอบอินทรีย์ จะหลงเหลืออยู่มากถึง 4 มิลลิกรัม ถึง 10 มิลลิกรัมโดยสารประกอบอินทรีย์ ที่ตกค้างจะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทำความสะอาด ภายในช่องปิดของ coupons จะเกิดฟองอากาศขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้สารประกอบอินทรีย์ ที่ติดข้างอยู่ ที่ก้นของช่องปิดจะไม่สามารถถูกชะล้างออกได้ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า ลักษณะการวางตำแหน่งของ สิ่งที่ต้องการทำความสะอาดในสารละลายนั้น เป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึง

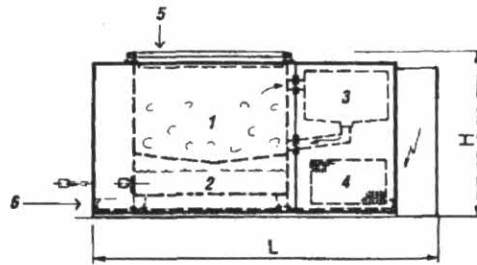
การทำความสะอาด coupons ในงานวิจัยของ *V. Frauchiger et.al, 2006* ข้างต้น ในแต่ละ ถังของสารละลายยังได้ใช้คลื่นอัลตราโซนิค ความถี่ 20-40 kHz เป็นตัวช่วยในการทำความสะอาด coupons ด้วย เช่นเดียวกัน ในงานวิจัยของ *A. D. Farmer et.al, 2000* แสดงให้เห็นว่าการทำความสะอาด ด้วย คลื่นอัลตราโซนิคสามารถลดเหล็กที่ปนเปื้อนที่เคลือบอยู่บนผิวของเม็ดซิลิกาจาก 0.025 เปอร์เซ็นต์ลงไปถึง 0.012 เปอร์เซ็นต์ และในการทดลองนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการลดลงของ เหล็กที่ปนเปื้อนจะขึ้นอยู่กับระดับของกำลังงานของคลื่นอัลตราโซนิค ที่ถ่ายทอดไปสู่เม็ดทราย ซึ่ง จะอธิบายได้ว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังงานนั้น ก็เพื่อที่จะช่วยในการทำลายแรงดึงดูดของอนุภาค

ปนเปื้อน ที่ติดอยู่บนเม็ดทรายให้หลุดออกไป และความเข้มข้นที่ใช้เป็นตัวกลางในการเคลื่อนไปของทำลาย ก็จะมีผลต่อการทำความสะอาดของเม็ดทรายเช่นเดียวกัน โดยการทำความสะอาดของตัวทำลายในสารละลายอัลคาไล (alkali) จะใช้เวลาเพียง 1 นาที ส่วนในน้ำนั้นจะใช้เวลามากกว่า 2 นาที

ในงานวิจัย *V. Frauchiger et.al, 2006* จะใช้ความร้อนที่ผ่านตัวกรองอากาศเป่าให้ coupons แห้งก่อนที่จะปล่อยออกจากระบบทำความสะอาด แต่ในงานวิจัยของ *J. Scapelliti* และ *J. A. Met-tens* ได้พูดถึงการทำความสะอาดด้วยไอของสารละลาย (Vapour Degreasing) ว่าสามารถที่จะกำจัดไขมันออกจากผิวของ substrate ได้และยังทำให้วัสดุที่จะนำมาใช้ในการเคลือบแห้งได้อีกด้วย จึงไม่จำเป็นต้องมีการนำวัสดุที่จะนำมาใช้ในการเคลือบมาเป่าให้แห้งอีกครั้ง ซึ่งให้ผลคือสามารถช่วยประหยัดเวลาลงได้ แต่สารละลายที่ใช้ในการทำความสะอาดนั้นจะเป็นสารละลายจำพวก CFC-113 และ 1,1,1-trichloroethane ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น *J. A. Met-tens* จึงได้เสนอแนะสารละลายประเภท Chlorinated ซึ่งก็คือ Trichloroethylene, Perchloroethylene และ Methylene chloride โดยผลดีของการใช้สารประเภท Chlorinated ก็คือ

- สารละลาย Chlorinated มีความสามารถในการละลายสารจำพวกอินทรีย์สูง
- สารละลาย Chlorinated ที่ถูกใช้แล้วเกือบทั้งหมดจะไม่สามารถติดไฟ เนื่องจากไม่มีจุดวาบไฟ ซึ่งถูกทดสอบโดยวิธีมาตรฐานต่างๆ ไป
- สารละลาย Chlorinated มีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่ำ จึงใช้พลังงานค่อนข้างน้อยในการทำให้เป็นไอ
- สารละลาย Chlorinated ค่อนข้างที่จะมีความเสถียรและทนต่อการกันกร่อนสูง ดังนั้นการใช้สารละลาย Chlorinated จะเป็นการช่วยเพิ่มให้ substrate มีความเสถียรซึ่งจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้และยังช่วยไม่ให้เกิด oxidization บน substrate อีกด้วย
- เนื่องจากไอของสารละลาย Chlorinated จะหนักกว่าอากาศ ดังนั้นสามารถจะควบคุมให้อ้อยู่ในถังของ Vapour Degreasing ได้ค่อนข้างง่าย
- สารละลาย Chlorinated สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นจึงเป็นการช่วยลดของเสียลง

เช่นเดียวกับกับงานวิจัยของ *J. Scapelliti* ได้เสนอแนวคิดที่ควรจะใช้สารละลาย Chlorinated แทน พร้อมกับเสนอแนะวิธีการ Enclosed Vapour Degreasing (EVD) แทน ถึงเปิดที่ใช้ในการทำความสะอาดด้วยไอของสารละลาย หลักการของ EVD นั้นค่อนข้างง่ายแต่มีประสิทธิภาพมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 Enclosed Vapour Degreasing

หลักการทำงานคือ วัสดุที่จะนำไปเคลือบจะถูกใส่ในถังเปล่า โดยจะไม่มีไอของสารละลายอยู่ในถังในขณะที่ฝาถังยังคงเปิดอยู่ โดยการทำงานของ EVD จะเริ่มทำงานเมื่อฝาถังปิดเท่านั้น ซึ่งจะแตกต่างจาก ถังเปิดที่ใช้ในการทำ ความสะอาดด้วยไอของสารละลาย ซึ่งเมื่อใส่วัสดุที่จะนำไปเคลือบลงไปในถังซึ่งมีไอของสารละลายอยู่วัสดุที่จะนำไปเคลือบจะทำหน้าที่คล้ายกับลูกสูบ โดยจะดันให้ไอสารละลายออกจากถังเปิด ทางแก้ง่ายๆหนทางหนึ่งคือ ความกว้างหรือความยาวของวัสดุที่จะนำไปเคลือบที่ถูกใส่ลงไปในถังควรจะกว้างหรือยาวไม่เกินครึ่งหนึ่งของถัง โดยการทดสอบของสถาบัน Battelle ได้แสดงให้เห็นว่า EVD สามารถลดการปล่อยไอสารละลายได้ถึง 99% เมื่อเปรียบเทียบกับถังเปิดที่ใช้ในการทำ ความสะอาดด้วยไอของสารละลาย

จากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้มีการศึกษามานั้น ผู้วิจัยทุกคนจะให้ความสำคัญอย่างมากในการทำความสะอาดผิวของวัสดุที่จะนำมาเคลือบ เพราะระดับความสะอาดของผิวของวัสดุที่เพียงพอจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เคลือบออกมามีคุณภาพด้วย และตัวผู้วิจัยเองก็มีความเห็นด้วยเป็นอย่างยิ่งว่ากระบวนการทำความสะอาดจำเป็นจะต้องทำก่อนที่จะมีการเคลือบผิวเลนส์ ซึ่งสามารถสรุปปัจจัยที่อาจจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของกระบวนการเคลือบได้ดังนี้

- การเลือกชนิดของสารละลายที่จะนำมาทำความสะอาดควรที่จะเลือกให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของสิ่งปนเปื้อนที่จะทำความสะอาด
- การเลือกชนิดของสารละลายที่จะนำมาทำความสะอาดนั้นจำเป็นจะต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย
- การเติมสารจำพวกสารลดแรงตึงผิวจะสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการชะล้างและสามารถลดการใช้สารละลายที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้
- ลักษณะการวางของเลนส์ในกระบวนการทำความสะอาดอาจจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพของเลนส์ที่ออกมาจากกระบวนการเคลือบ
- พลังงานของคลื่นอัลตราโซนิคที่ปล่อยออกมานั้นจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเลนส์ที่ออกมาจากกระบวนการเคลือบ โดยพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิคนั้นจะขึ้นอยู่กับ

ความแรงของแหล่งกำเนิดคลื่น ความเข้มข้นของสารละลายตัวกลางที่เคลื่อนเคลื่อนที่ผ่าน

- จากกระบวนการทำความสะอาดด้วยไอของสารละลายกระบวนการทำความสะอาดจะเกิดขึ้นเมื่อเลนส์มีการแช่อยู่ในไอของสารละลายดังนั้นระยะเวลาในการแช่ของเลนส์ในไอของสารละลายจึงเป็นปัจจัยที่น่าจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของเลนส์ที่ออกมาจากกระบวนการเคลือบ
- จากกระบวนการทำความสะอาดด้วยไอของสารละลายด้วยถังปิด ผู้วิจัยเห็นว่านอกจากจะช่วยป้องกันไม่ให้ไอของสารละลายระเหยออกไปจากถังแล้ว อาจจะยังสามารถป้องกันอนุภาคปนเปื้อนที่ฟุ้งกระจายอยู่ตามบรรยากาศได้อีกด้วย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ ซิกซ์ ซิกมา

ในกระบวนการทาง ซิกซ์ ซิกมานั้น ความผันแปรของการวัดนั้นมีผลอย่างมากในการกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่ง *J. N. Pan, 2004* ได้นำเสนอ จำนวนของสิ่งตัวอย่างที่จะนำมาตรวจสอบ (n)

จำนวนของพนักงานตรวจสอบ (p) และจำนวนครั้งของการวัดซ้ำ (k) เพื่อให้การประมาณค่าการแปรผันรวม(Total Variation) มีค่าน้อยที่สุด ภายในต้นทุนที่คงที่ค่าหนึ่ง โดยต้นทุนในการตรวจสอบนั้นก็มาจากการวัดรวม (Total Measurement: n, p, k) นั่นเอง นั่นคือเมื่อการวัดรวมมีค่ามากขึ้น การประมาณค่าการแปรผันรวมก็จะมีค่าแม่นยำมากขึ้น แต่ต้นทุนและเวลาที่ใช้ก็เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการหาจำนวนการวัดรวมนั้นจะทำโดยการใช้วิธีการของ ANOVA และกระบวนการทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Programming Algorithm) ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อที่จะทำให้ช่วงของความเชื่อมั่นมีค่าน้อยที่สุด โดยผลที่ได้สามารถแสดงเป็นตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.7 ความกว้างของช่วงความเชื่อมั่น

สำหรับแต่ละค่าของการวัดรวมที่แตกต่างกัน 4 ค่า (การวัดรวมเท่ากับ 80)

n	p	k	σ_{total}^2											
			$\sigma_1^2 = 0.5$	$\sigma_2^2 = 0.5$	$\sigma_3^2 = 0.5$	$\sigma_4^2 = 0.5$	$\sigma_1^2 = 1.0$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.0$	$\sigma_4^2 = 1.0$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$
5	4	4	$\sigma_1^2 = 0.5$	$\sigma_2^2 = 0.5$	$\sigma_3^2 = 0.5$	$\sigma_4^2 = 0.5$	$\sigma_1^2 = 1.0$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.0$	$\sigma_4^2 = 1.0$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$
			3.43	3.31	3.38	4.16	4.04	4.17	4.90	4.94	5.04			
			$\sigma_1^2 = 0.5$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 0.5$	$\sigma_1^2 = 1.0$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.0$	$\sigma_4^2 = 1.5$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$
10	2	4	31.25	19.29	13.79	22.80	16.09	13.56	22.01	16.74	15.06			
			$\sigma_1^2 = 0.5$	$\sigma_2^2 = 0.5$	$\sigma_3^2 = 0.5$	$\sigma_4^2 = 1.0$	$\sigma_1^2 = 1.0$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.0$	$\sigma_4^2 = 1.5$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$
			2.98	3.00	3.22	3.22	3.39	3.57	3.63	3.82	4.04			
20	2	2	24.78	16.41	13.00	18.24	13.18	11.57	14.32	11.56	11.20			
			$\sigma_1^2 = 1.0$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.0$	$\sigma_4^2 = 1.0$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$
			$\sigma_1^2 = 0.5$	$\sigma_2^2 = 0.5$	$\sigma_3^2 = 0.5$	$\sigma_4^2 = 1.0$	$\sigma_1^2 = 1.0$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.0$	$\sigma_4^2 = 1.5$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$
5	4	4	6.99	6.27	5.96	7.17	6.76	6.54	7.94	7.51	7.29			
			$\sigma_1^2 = 0.5$	$\sigma_2^2 = 0.5$	$\sigma_3^2 = 0.5$	$\sigma_4^2 = 1.0$	$\sigma_1^2 = 1.0$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.0$	$\sigma_4^2 = 1.5$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$
			124.24	75.80	52.93	94.57	59.30	44.55	77.68	54.95	41.22			
10	4	2	6.22	5.75	5.74	6.13	5.85	5.87	6.34	6.09	6.17			
			$\sigma_1^2 = 0.5$	$\sigma_2^2 = 0.5$	$\sigma_3^2 = 0.5$	$\sigma_4^2 = 1.0$	$\sigma_1^2 = 1.0$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.0$	$\sigma_4^2 = 1.5$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$
			115.41	75.44	50.66	75.07	50.67	41.71	50.88	39.91	31.86			
20	2	2	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$
			$\sigma_1^2 = 0.5$	$\sigma_2^2 = 0.5$	$\sigma_3^2 = 0.5$	$\sigma_4^2 = 1.0$	$\sigma_1^2 = 1.0$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.0$	$\sigma_4^2 = 1.5$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$
			$\sigma_1^2 = 0.5$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 0.5$	$\sigma_1^2 = 1.0$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.0$	$\sigma_4^2 = 1.5$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$
5	4	4	11.02	9.78	9.26	10.95	10.23	9.59	11.32	10.69	10.17			
			$\sigma_1^2 = 0.5$	$\sigma_2^2 = 0.5$	$\sigma_3^2 = 0.5$	$\sigma_4^2 = 1.0$	$\sigma_1^2 = 1.0$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.0$	$\sigma_4^2 = 1.5$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$
			285.35	189.29	130.52	196.28	132.35	96.74	164.19	119.54	87.34			
10	4	2	10.52	9.44	9.03	9.68	9.09	8.67	9.45	8.92	8.42			
			$\sigma_1^2 = 0.5$	$\sigma_2^2 = 0.5$	$\sigma_3^2 = 0.5$	$\sigma_4^2 = 1.0$	$\sigma_1^2 = 1.0$	$\sigma_2^2 = 1.0$	$\sigma_3^2 = 1.0$	$\sigma_4^2 = 1.5$	$\sigma_1^2 = 1.5$	$\sigma_2^2 = 1.5$	$\sigma_3^2 = 1.5$	$\sigma_4^2 = 1.5$
			251.44	176.35	117.77	186.13	121.00	85.72	128.22	93.63	77.01			

ตารางที่ 2.8 ความกว้างของช่วงความเชื่อมั่นสำหรับ
แต่ละค่าของการวัดรวมและค่าการวัดรวมที่แตกต่างกัน

n	p	k	$\sigma_0^2 = 1.0 \sigma_{\text{avg}}^2 = 0.5 \sigma_p^2 = 1.0$
<i>Total measurement = 30</i>			
5	2	4	103.56
5	4	2	7.28
10	2	2	95.18
<i>Total measurement = 60</i>			
5	3	4	11.25
5	4	3	6.52
10	2	3	84.38
10	3	2	10.77
15	2	2	80.08
<i>Total measurement = 90</i>			
10	3	3	9.57
15	3	2	9.47
15	2	3	70.05
<i>Total measurement = 120</i>			
10	3	4	9.28
10	4	3	5.47
15	2	4	67.73
15	4	2	5.42
20	2	3	65.98
20	3	2	9.00
<i>Total measurement = 160</i>			
10	4	4	5.40
20	2	4	60.90
20	4	2	5.17
<i>Total measurement = 180</i>			
15	3	4	8.73
15	4	3	5.23
20	3	3	8.54
<i>Total measurement = 240</i>			
15	4	4	5.11
20	5	4	8.17
30	4	3	5.08

นอกจากการคำนวณการวัดรวมในขั้นตอนของการวัดในกระบวนการทางซิกซ์ ซิกมาจะมีความสำคัญแล้วจำนวนของตัวอย่างที่จะต้องใช้ในการออกแบบการทดลองทั้งในขั้นตอนการวิเคราะห์และการขึ้นตอนการปรับปรุงในกระบวนการทางซิกซ์ ซิกมา ก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน ซึ่งแน่นอนว่าถ้าเราใช้จำนวนของตัวอย่างในการทดสอบมาก ความถูกต้องของการวิเคราะห์ก็ย่อมมีค่ามากขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ต้นทุนและเวลาที่ใช้ก็จะมากขึ้นด้วยเช่นกันและยิ่งเมื่อชนิดของข้อมูลที่ต้องทำการทดลองเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่นสัดส่วนของเสีย จำนวนของตัวอย่างที่ใช้จำเป็นที่จะต้องมีความพอประมาณด้วย และยิ่งถ้าสัดส่วนของเสียของกระบวนการผลิตมีค่าน้อยๆด้วยแล้วจำนวนตัวอย่างที่ใช้ก็จะมากขึ้นด้วย ซึ่งในงานวิจัยของ *S. Bisgaard and H. T. Fuller, 1992* ได้ประมาณจำนวนของตัวอย่างที่จำเป็นในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่กำหนดไว้ สำหรับการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k และการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล โดยสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$n = (z_{1-\alpha/2} + z_{1-\beta})^2 / (N\delta^2) \quad 2.5$$

เมื่อ $\delta = \arcsin(\sqrt{(p_0 + \Delta/2)}) - \arcsin(\sqrt{(p_0 - \Delta/2)})$

N คือ จำนวนการทดลอง (Combination)

p_0 คือ ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสีย

Δ คือ ระดับที่ต้องการตรวจจับของสัดส่วนของเสียที่เปลี่ยนแปลงไป

จากสมการจะเห็นว่าค่าประมาณค่าให้กับ ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสีย และระดับที่ต้องการตรวจจับของสัดส่วนของเสียที่เปลี่ยนแปลงไป จะมีผลต่อจำนวนของตัวอย่างที่จะใช้ในแต่ละวันของการทดลอง ดังนั้นควรพิจารณาให้รอบครอบในการกำหนดค่าทั้งสองค่านี้

ในขั้นตอนของการปรับปรุงกระบวนการผลิต ในบางครั้งในการออกแบบการทดลอง จำเป็นจะต้องพิจารณาผลตอบแทนมากกว่า 1 ค่า ซึ่งจะทำให้มีโอกาสนี้จะทำให้ระดับของปัจจัยนำเข้าที่ทำการทดลองเกิดการขัดแย้งกันได้ ในผลตอบแทนแต่ละค่า ดังนั้นในงานวิจัยของ *P.G. Paterakis et.al, 2002* จึงนำเสนอวิธีการที่เรียกว่า Desirability Function โดยจะเป็นการหาค่าที่ดีที่สุดเมื่อ มีค่าผลตอบแทน (y, Output Variable) หลายๆค่า ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนค่าของผลตอบแทนแต่ละค่าไปเป็นค่า Individual desirability function (d_i) ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 หลังจากนั้นก็จะทำการหาค่า maximize ของค่า desirability รวมจาก สมการ $D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n)^{\frac{1}{n}}$ และสมการการคำนวณค่า Individual desirability function สามารถดูได้จากหนังสือ *Montgomery, 2005; Design of experimnet* ซึ่งแต่ละสมการจะมีความแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของผลตอบ โดยในงานวิจัยของ *P.G. Paterakis et.al, 2002* จะทำการศึกษา ผลกระทบของ % w/w content of microcrystalline cellulose (MCC) (x_1), Temperature of inlet air (x_2) และ Spray rate (x_3) ที่มีต่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (y_1) และ 3 shape parameters ซึ่งประกอบด้วย roundness (y_2), Elongation (y_3) และ eR (y_4) ของกระบวนการผลิตเม็ดยา เพื่อให้แต่ละเม็ดมีคุณภาพเหมือนกันในเวลาใส่ใน Capsule และเพื่อประสิทธิภาพในกระบวนการเคลือบ ซึ่งผลที่ได้สามารถแสดงเป็นสมการต่อไปนี้

$$D = 0.33 + 0.13A + 0.15B + 0.19C + 0.043A^2 + 0.12B^2 + 0.006C^2 + 0.051AB + 0.023AC + 0.004BC$$

จากสมการจะเห็นว่าค่าผลตอบแทนทั้ง 4 ตัวแปรจะถูกรวมไว้เป็นตัวแปรเดียวกันก็คือ Desirability Function: D ดังนั้นในกระบวนการหาระดับที่ดีที่สุดของปัจจัยนำเข้าก็จะดำเนินการที่ผลตอบแทน Desirability Function: D ซึ่งก็จะเป็นการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับผลตอบแทนทั้ง 4 ค่าโดยรวม ในงานวิจัยของ *P.G. Paterakis* จะเห็นว่าหน่วยที่ใช้วัดของแต่ละค่าผลตอบแทนมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงคุณสมบัติที่มีการแปลงค่าแต่ละค่าให้อยู่ในรูปของ Individual desirability function ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ก่อน เพื่อที่จะสามารถนำมาคำนวณหา Desirability Function ได้ แต่ในบางกรณี ที่หน่วยของผลตอบแทนอยู่ในหน่วยเดียวกัน เช่น สัดส่วนของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องชนิดต่างๆ ซึ่งจะมีค่าสัดส่วนของเสียอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 อยู่แล้ว อาจจะไม่จำเป็นต้องใช้วิธีการของ Desirability Function เพียงแต่อาจจะหาค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องแต่ละชนิดก็เพียงพอ นอกจาก *P.G. Paterakis et.al, 2002* แล้ว *H.Wohlrabe et.al, 2006* ก็ยังได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการผลิต SMT-Board ซึ่งมีจุดประสงค์ในการวิจัยคือ ทำการผลิตให้ค่าผลตอบแทนทุกๆ

(Quality Parameter) อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด และเนื่องจากในการวิจัยมีค่าผลตอบแทนหลายตัวที่ต้องพิจารณาจึงได้มีการนำ Desirability Function มาใช้ในการแปลงค่าผลตอบแทนที่จะนำมาวิเคราะห์ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ *P.G. Paterakis et.al, 2002* และ *Heinz Wohlrabe et.al, 2006* ยังให้พิจารณาในส่วนของการหาค่า Individual desirability function ของแต่ละค่าผลตอบแทนอย่างรอบครอบ เนื่องจากในการหาค่าของ Individual desirability function นั้นจะมีการพิจารณากำหนดค่าเกณฑ์น้ำหนักให้แต่ละค่าผลตอบแทน ซึ่งในการวิจัยพบว่าถ้ากำหนดค่าเกณฑ์น้ำหนักแตกต่างกัน ระดับของปัจจัยนำเข้าจะเปลี่ยนแปลงไปด้วยในการหาค่าที่ดีที่สุด

การออกแบบการทดลองสิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ การพิจารณาเลือกระดับที่จะใช้ในการทดลอง เพราะถ้าการพิจารณาเลือกระดับไม่กว้างเพียงพออาจจะไม่สามารถแสดงความแตกต่างของการออกแบบการทดลองได้หรืออาจจะไม่ได้ค่าที่ดีที่สุดที่แท้จริงเพราะค่าที่ดีที่สุดอาจจะอยู่นอก ระดับที่ได้ทำการพิจารณาเลือกไว้ ซึ่งในงานวิจัยของ *M. G. Klous. et.al, 2006* ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตยาเพื่อใช้รักษาอาการของผู้ที่ติดเชื้อไวรัส ซึ่งในงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงการพิจารณาเลือกระดับที่จะนำมาทดลอง ซึ่งในการเลือกระดับการทดลองจะต้องดูทั้งข้อกำหนดทางเทคนิคและทางปฏิบัติ ตัวอย่างเช่น Dosage ทางด้านเทคนิคแล้วจะผสม diacetylmorphine powder ได้ 0.021-21 g แต่ว่าในทางปฏิบัติเครื่องที่ทำการผสมสามารถผสมได้ที่ระดับ 50–300 mg ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้ที่ระดับนี้ เช่นเดียวกันกับ Auger speed สามารถปรับได้ตั้งแต่ 0-2200 rpm แต่จากประสบการณ์จะพบว่าถ้าปรับ เกิน 1100 rpm จะเกินแรงเสียดสีทำให้เกิดความร้อนขึ้น และถ้าปรับต่ำกว่า 300 rpm จะไม่สามารถยอมรับได้เมื่อทำการปรับเวลาที่ Dosing สูง ดังนั้นจึงเลือก Auger speed ที่ 300–1100 rpm