

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1) ทฤษฎีเรื่องหลักการผลิตแบบลีน 2) นิยามและชนิดของแก่วินิจฉัย 3) ทฤษฎีเรื่องหลักการซิกซิกม่าและขั้นตอนการดำเนินงาน และ 4) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีแนวความคิดแบบลีนและหลักการออกแบบการทดลอง เพื่อนำมาปรับปรุงผลิตภัณฑ์และกระบวนการให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

1. ทฤษฎีเรื่องหลักการผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing)

1.1 หลักการเบื้องต้น

การแข่งขันของธุรกิจในปัจจุบันทำให้ภาคอุตสาหกรรมการผลิตต้องปรับตัวเพื่อความอยู่รอดระบบการผลิตแบบลีน (lean manufacturing system) เป็นระบบที่ได้รับการยอมรับทั่วโลกว่าเป็นระบบการผลิตที่สามารถลดต้นทุน ลดความสูญเปล่าและลดความสูญเสียโอกาสทางการผลิตได้ ทั้งยังเป็นระบบที่สร้างมาตรฐานและแนวคิดสำคัญในการผลิตรวมถึงส่งเสริมการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาอีกด้วย จากระบบการผลิตแบบโตโยต้า (Toyota production system: TPS) ได้มีการพัฒนาเป็นกระบวนทัศน์ใหม่ (new paradigm) ของการผลิต คือการผลิตแบบลีน ซึ่งกระบวนทัศน์นี้มีแนวคิดให้เห็นและเข้าใจกระบวนการผลิตมากขึ้น เป็นระบบสามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้เป็นอย่างดี ระบบการผลิตแบบโตโยต้าเป็นการพัฒนาด้านการบริหารเวลาและการทำงานโดยการลดความสูญเปล่า (waste/muda) เมื่อโตโยต้าต้องการที่จะให้ระบบมีความยืดหยุ่นและลดเวลาตั้งแต่การสั่งซื้อจนถึงการขนส่ง ในกรณีที่เป็นการสั่งซื้ออย่างเร่งด่วนหลักการที่สำคัญ คือการลดช่วงเวลาโดยการกำจัดทุกสิ่งทุกอย่างที่ไม่มีคุณค่าเพิ่มในตัวผลิตภัณฑ์ซึ่งความสูญเปล่า ที่สำคัญในกระบวนทัศน์ของระบบการผลิตแบบโตโยต้า คือ การผลิตมากเกินไป (overproduction) และการจัดเก็บไว้จนกระทั่งกลายเป็นสินค้าที่สะสมไว้นานในคลังสินค้า (inventory) ทำให้เกิดการรักษาที่ยุ่งยาก จากรูปแบบการผลิตที่เป็นแบบแบทช์ (batches) ของผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ ที่มุ่งเน้นในเรื่องของความประหยัดเวลาในการผลิตแบบจำนวนมาก ซึ่งอุปสรรคเหล่านี้สามารถป้องกันและแก้ไขได้ภายใต้การผลิตแบบลีน ที่มีเครื่องจักรที่เหมือนกัน การดำเนินงานในทางที่เหมือนกันแต่สามารถมองเห็นความแตกต่างในการป้องกันปัญหาอย่างสมบูรณ์แบบ

ผู้บริหารอุตสาหกรรมในระดับโลกมีแนวโน้มที่จะใช้การผลิตแบบลีน เป็นการผลิตจำนวนมากตามความต้องการของลูกค้า (mass customization) ที่เป็นทางเลือกที่ดีกว่าการผลิตแบบจำนวนมาก (mass production) โดยการจัดการอย่างง่าย ๆ นั่นคือการรวมกลุ่มเครื่องจักรจากกระบวนการและสร้างรูปแบบการไหลขึ้นเดียว (one piece flow) เป็นกลุ่มสินค้าที่คล้ายกันที่

ทำให้เกิดประสิทธิผล ความยืดหยุ่นและคุณภาพ ซึ่งมีการประสานรหว่างโรงงานกับลูกค้าที่ ต้องการข้อได้เปรียบในการแข่งขัน ในบางบริษัทต้องการสร้างวิสาหกิจแบบลินที่เชื่อมต่อระหว่าง โรงงานแบบลิน (lean factories) ซึ่งทำให้ได้ผลลัพธ์ที่คุ้มค่า

1.2 วิวัฒนาการผลิตสู่ระบบการผลิตปัจจุบัน

วิวัฒนาการผลิตเริ่มจากการผลิตแบบงานฝีมือ (craft production) มาเป็นแบบผลิต แบบจำนวนมาก แต่ในปัจจุบันการผลิตได้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป ดังตารางที่ 1 (Spann et al., 1997) จะเห็นได้ว่าภายใต้การผลิตในยุคปัจจุบัน การผลิตแบบลินจะเหมาะสมตรงกับลักษณะ การผลิตที่ลูกค้าต้องการมากที่สุด โดยมีการลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตและมีการ ปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (continuous improvement)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบลักษณะการผลิตแบบต่างๆ

ลักษณะ	การผลิตแบบงานฝีมือ	การผลิตแบบจำนวนมาก	การผลิตในปัจจุบัน
ผลิตภัณฑ์	หลากหลายหรือความ ความ ต้องการลูกค้า	แบบเดียวกัน	หลากหลายหรือตามความต้องการของลูกค้า
การควบคุมการผลิต	ผลิตตามสั่ง	ผลิตตามการพยากรณ์	ผลิตตามความต้องการของลูกค้า
เทคโนโลยีการผลิต	ทักษะของช่างฝีมือ	ความแม่นยำของเครื่องจักรทักษะย่อยๆ ของแรงงาน	การควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ความแม่นยำของเครื่องจักรสูงทักษะย่อยๆ ของแรงงาน
วิธีการผลิต	ด้วยมือ	การใช้ส่วนที่แทนกันได้เครื่องจักรอัตโนมัติ แรงงานสายพาน	การใช้ส่วนที่แทนกันได้เครื่องจักรอัตโนมัติ แรงงานหุ่นยนต์
ความต้องการของตลาด	มีอย่างจำกัด	ตลาดน้ำ หน้าความสามารถในการผลิต	ตลาดมีความสำคัญน้อยกว่าความสามารถในการผลิต
ความต้องการของลูกค้า	มีเพียงพอให้ไปใช้งาน	มีเพียงพอให้ไปใช้งานคุณสมบัติของสินค้า ต้นทุน	คุณภาพตามความต้องการของลูกค้า คุณสมบัติของสินค้า ต้นทุน เวลาในการส่งมอบ

1.3 ประวัติของระบบการผลิตแบบลีน

การผลิตแบบลีน เกิดขึ้นเป็นครั้งแรกเมื่อ ปี ค.ศ. 1990 ประวัติของระบบการผลิตแบบลีน จากหนังสือชื่อ “The Machine That Changed The World” ซึ่งเขียนโดย ศาสตราจารย์ ด็อกเตอร์ เจมส์ วอแม็ก แห่ง MIT (Massachusetts Institute of Technology) หนังสือเล่มนี้ได้กล่าวถึงการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบโรงงานประกอบรถยนต์ของญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา และยุโรปว่า ทำไมญี่ปุ่นจึงประสบความสำเร็จในการดำเนินธุรกิจการผลิตรถยนต์มากกว่าสหรัฐอเมริกา และยุโรป ผลการศึกษาพบว่าญี่ปุ่นมีระบบการผลิตที่เรียกว่า “ลีน” นั่นเอง โดยการศึกษาได้ทำขึ้นที่โรงงานผลิตรถยนต์โตโยต้าที่ประเทศสหรัฐอเมริกา

ก่อนหน้านั้นในช่วงปี ค.ศ. 1945-1970 โทอิชิ โอโนะ (Tajichi Ohno) วิศวกรการผลิตและอดีตรองประธานบริษัท Toyota Motor Corporation ได้คิดระบบการผลิตแบบโตโยต้า (Toyota production system: TPS) ซึ่งบางทีเรียกว่า ระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี (just in time manufacturing system) ขึ้นมา โดยส่วนหนึ่งของระบบนี้ได้มาจากระบบข้อเสนอแนะ (suggestion system) ที่เสนอโดยพนักงานนั่นเอง ด้วยเหตุดังกล่าวจึงได้นำไปสู่การพัฒนารูปแบบการผลิตโดยเน้นต้นทุนการผลิตต่ำ โดยมีผู้นำสำคัญอย่าง อิจิ โตโยตะ (Eiji Toyoda) และโทอิชิ โอโนะ แห่ง Toyota Motor ในปี 1950 โตโยตะ ได้เยี่ยมชมโรงงาน Ford River Rouge เพื่อเรียนรู้วิธีการผลิตแบบจำนวนมาก จึงเห็นว่าฟอร์ดได้ใช้สายการผลิตแบบต่อเนื่อง (continuous manufacturing system) ทำให้โตโยตะได้เห็นรูปแบบการผลิตได้ถึงวันละ 7,000 คันต่อวัน

ขณะนั้นทาง Toyota Motor สามารถผลิตได้น้อยกว่า 2,700 คัน หลังจากที่ได้ทำการเยี่ยมชมและศึกษาโรงงานของ Ford ประมาณหนึ่งเดือน โตโยต้าได้สรุปว่าระบบวิธีการผลิตแบบจำนวนมาก ไม่เหมาะสมกับรูปแบบการผลิตของโตโยต้า ดังนั้นโตโยต้าจึงต้องการสร้างรถยนต์ที่มีรูปแบบที่หลากหลายภายในโรงงาน ซึ่งแตกต่างจากรูปแบบการผลิตของฟอร์ด (Ford) อย่างสิ้นเชิงและยังขาดความพร้อมทางด้านเงินทุน จึงไม่สามารถเพิ่มการลงทุนทางด้านเทคโนโลยีขั้นสูงได้ เมื่อเขากลับถึงญี่ปุ่นจึงได้เรียก โทอิชิ โอโนะ วิศวกรการผลิต เพื่อร่วมพัฒนาระบบการผลิต เมื่อโอโนะได้ศึกษาแนวทางของการผลิตแบบจำนวนมากทำให้เห็นข้อจำกัดหลายประการ ดังนั้นจึงได้ออกแบบระบบเพื่อลดความสูญเสียและเน้นประสิทธิภาพสูงสุด ด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าและมีความยืดหยุ่นกว่าแนวทางการผลิตแบบจำนวนมาก ระบบที่พัฒนาขึ้นจึงรู้จักกันในนามระบบการผลิตแบบโตโยต้าและได้เป็นต้นแบบของการผลิตแบบทันเวลาพอดีหรือการผลิตแบบลีน โดยมุ่งลดความสูญเสียจากการใช้ทรัพยากรที่ไม่ได้สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสินค้า (non value added: NVA) และรวมถึงแนวทางปรับปรุงกระบวนการอย่างต่อเนื่องด้วยการลงทุนในทรัพยากรมนุษย์ (human capital) โดยไม่เน้นการลงทุนในเทคโนโลยีขั้นสูง แต่จะมุ่งการปรับปรุงโดยมีพนักงานเป็นตัวขับเคลื่อนที่สำคัญและสอดคล้องกับปรัชญาคุณภาพ อย่างการจัดการด้านคุณภาพรวมทั้งองค์กร จึงส่งผลให้ญี่ปุ่นสามารถแข่งขันในตลาดโลกและทำให้ธุรกิจของอเมริกาต้องดำเนินการปรับตัวในช่วงทศวรรษ 1980

กล่าวกันว่าก่อนหน้าที่ไอนะจะคิดระบบการผลิตแบบโตโยต้าขึ้นมา เขาได้เดินทางไปดูงานที่บริษัทผลิตรถยนต์ฟอร์ดที่สหรัฐอเมริกา นั่นคือ จุดกำเนิดความคิดเรื่องระบบการผลิตแบบโตโยต้า ที่มุ่งเน้นการไหลของงานหลัก โดยสิ่งต่างๆ ที่ขัดขวางการไหลของงานจะถูกเรียกว่าเป็นความสูญเปล่า ที่จะต้องกำจัดออกไป จากที่กล่าวมาสรุปได้ว่าระบบการผลิตแบบลีน มีจุดกำเนิดมาจากระบบการผลิตแบบโตโยต้านั่นเอง โดย เจมส์ วอแม็ก เป็นผู้เรียกระบบการผลิตดังกล่าวว่าเป็นระบบการผลิตแบบลีนและเผยแพร่จนเป็นที่รู้จัก

1.4 มุมมองแบบลีน: นิยาม

American Society For Quality (ASQ) ให้คำจำกัดความของระบบการผลิตแบบลีนไว้ว่าเป็นการเริ่มพิจารณาการกำจัดของเสียทั้งหมดในกระบวนการที่โรงงานผลิต หลักการของลีน รวมถึงเวลาการรอคอยเป็นศูนย์ (zero waiting time) ลินค้าคงคลังเป็นศูนย์ (zero inventory) การจัดตารางเวลาการผลิต (scheduling) (ระบบการดึงของลูกค้าภายในแทนที่ระบบผลัก) การไหลของกลุ่มผลิตภัณฑ์ (ลดขนาดกลุ่ม) การปรับสมดุลการผลิตและลดเวลาการผลิต (cutting actual process times) (Monden, 1998)

National Institute of Standards and Technology Manufacturing Extension Partnership (NIST-MEP) ได้ให้คำจำกัดความของระบบการผลิตแบบลีนไว้ว่าเป็นระบบที่มุ่งเน้นการจำแนกและกำจัดความสูญเปล่าในกิจกรรมตลอดจนการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยทำให้การไหลของผลิตภัณฑ์เกิดมาจากการดึงของลูกค้า เพื่อการตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้าอย่างสูงสุด (Spann et al., 1997)

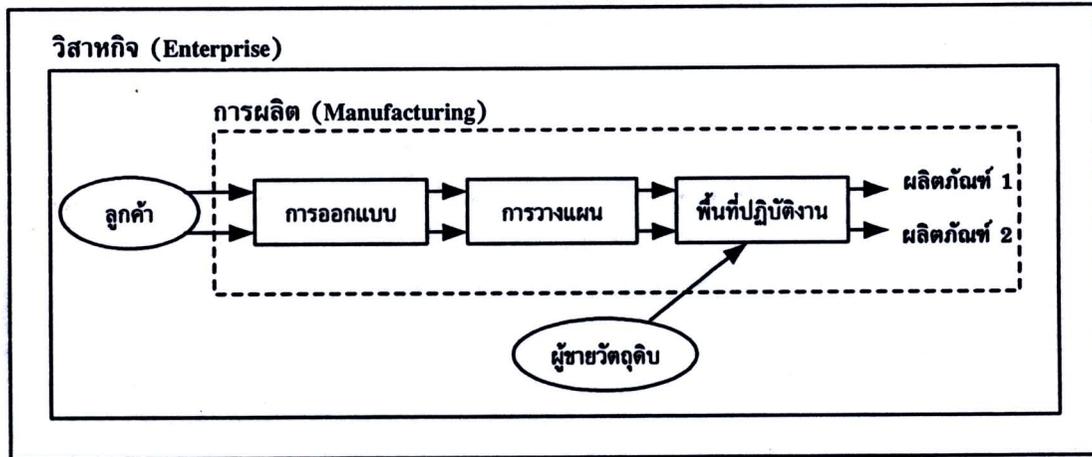
Production System Design Laboratory at the Massachusetts Institute of Technology ให้คำจำกัดความของการผลิตแบบลีนไว้คือการกำจัดความสูญเปล่าในทุกๆ ส่วนของการผลิต ซึ่งรวมทั้งส่วนความสัมพันธ์กับลูกค้า ส่วนการออกแบบผลิตภัณฑ์ ส่วนเชื่อมโยงกับซัพพลายเออร์ และในส่วนการบริหารโรงงาน (Feld, 2001)

William G. Nickle et al. (2002) ให้คำจำกัดความของการผลิตแบบลีนไว้ว่าเป็นการผลิตสินค้าโดยใช้ทุกสิ่งในกระบวนการผลิตน้อยที่สุด โดยเปรียบเทียบกับระบบการผลิตแบบจำนวนมาก

ระบบการผลิตแบบโตโยต้า ให้คำจำกัดความของการผลิตแบบลีนไว้ว่าเป็นปรัชญาของการลดของเสียอย่างต่อเนื่องในทุกๆ พื้นที่และทุกกิจกรรม ซึ่งเป็นระบบที่ประเทศสหรัฐอเมริกาสร้างมาจากการรวมเอาเทคนิคระบบการผลิตของญี่ปุ่น ซึ่งนิยามโดย Allen et al. (2001) ได้ให้คำจำกัดความของการผลิตแบบลีนไว้ว่าเป็นการติดตามความสูญเปล่าเพื่อกำจัดให้หมดไปจากระบบอย่างไม่มีที่สิ้นสุด โดยความสูญเปล่านั้นคือทุกๆ สิ่งที่ไม่เกิดคุณค่าแก่ผลิตภัณฑ์

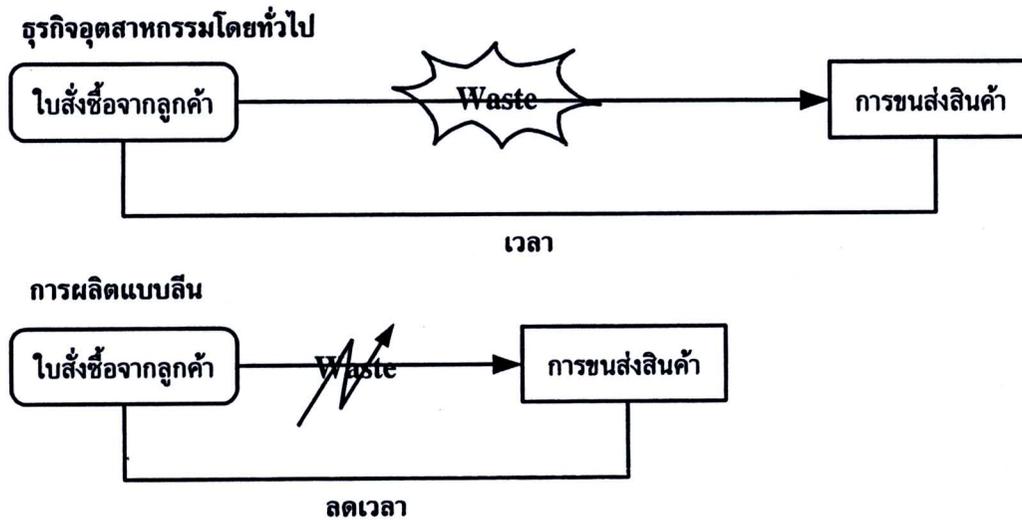
การออกแบบและจัดการอย่างถูกต้องเหมาะสมในครั้งแรกที่ดำเนินการและมุ่งเน้นถึงกระบวนการที่เพิ่มคุณค่าซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการทำงานที่ป้องกันความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์แบบและเป็นแนวทางที่ก่อให้เกิดการปรับตัวในสภาวะการแข่งขันที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time

based competition) เพื่อให้องค์กรมีความคล่องตัว (agility) ใช้ทรัพยากรอย่างจำกัด สะดวก รวดเร็ว ลดต้นทุน ลดเวลาที่ไม่จำเป็น และเพิ่มคุณภาพในระบบการผลิต โดยวิธีการแบบลีนที่เป็นองค์กรรม (holistic) แบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังภาพที่ 1 (Allen et al., 2001) แบบแรก การผลิตแบบลีนจะเน้นทางด้านการผลิต ส่วนแบบที่สอง วิศวกรรมแบบลีนจะประสานรวมระบบการผลิตที่เกี่ยวข้องกับโซ่อุปทาน โดยมีหลักการเดียวกันคือการทำจัดความสูญเปล่าเพื่อสร้างคุณภาพ



ภาพที่ 1 ลักษณะมุมมองแบบลีน

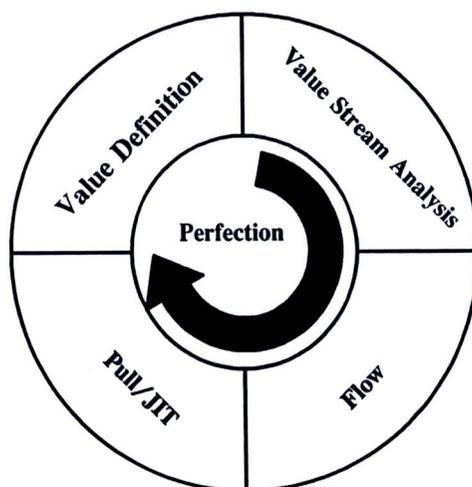
การผลิตแบบลีนเป็นปรัชญาการผลิต ที่มีพื้นฐานความแตกต่างของแนวคิดในการผลิตจากการไหลในการผลิตตั้งแต่วัตถุดิบจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ และตั้งแต่การออกแบบผลิตภัณฑ์จนถึงการบริการลูกค้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดความสูญเปล่าและผลิตสินค้าให้ตรงกับความต้องการของลูกค้า ดังภาพที่ 2 (Allen et al., 2001)



ภาพที่ 2 แนวคิดการผลิตแบบลีน

1.5 หลักการพื้นฐานของการผลิตแบบลีน

แนวคิดเรื่องลีน ที่เจมส์ วอแม็ก กล่าวไว้ในหนังสือชื่อ “Lean Thinking” หลักการพื้นฐานของการผลิตแบบลีนมี 5 ประการคือ การนิยามคุณค่า การวิเคราะห์สายธารคุณค่า การไหล การดึง/ทันเวลาพอดีและความสมบูรณ์แบบ ดังภาพที่ 3 (Feld, 2001) และยังคงคำนึงถึงการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องในแต่ละโครงสร้างหลักตามการหมุนของวงล้อการผลิตแบบลีน



ภาพที่ 3 หลักการพื้นฐานของการผลิตแบบลีน

1.5.1 การนิยามคุณค่า (value definition)

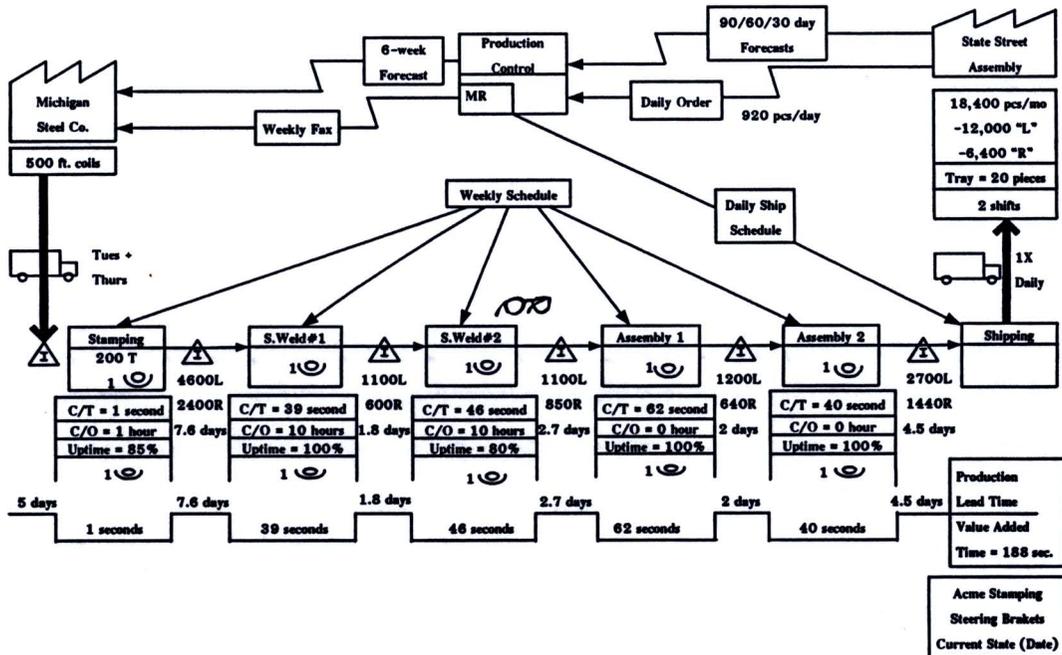
ในหลักการนี้เสนอให้สามารถระบุคุณค่าของผลิตภัณฑ์ ว่าคุณค่าของสินค้าที่ผลิตมีคุณค่าอยู่ที่ใด ตรงกับความต้องการของลูกค้าหรือไม่ การระบุว่าสินค้าหรือบริการมีคุณค่าอยู่ที่ใดอาจเปรียบเทียบกับคู่แข่ง (benchmarking) ก็ได้ และกระบวนการที่ปราศจากการสูญเสีย (waste free) เป็นกระบวนการที่ดำเนินไปอย่างถูกต้องโดยต้องใช้เวลาและความพยายามที่จะกำจัดความสูญเปล่าออกจากกระบวนการ ดังนั้นกระบวนการที่สร้างคุณค่าจึงเป็นสิ่งสำคัญ แต่จำเป็นต้องมองในมุมมองของลูกค้า (customer's perspective) ไม่ใช่มองจากมุมมองของผู้ผลิต (producer's perspective) ลูกค้าจะเป็นคนสุดท้ายที่กำหนดคุณค่า ด้วยเหตุนี้ความสูญเปล่าประเภทหนึ่งของของเสีย คือกระบวนการที่ลูกค้าไม่ต้องการบริษัทที่ผลิตแบบสิ้น จะดำเนินการเพื่อกำหนดคุณค่าในตัวผลิตภัณฑ์ และความสามารถของผลิตภัณฑ์ในการเสนอราคาให้กับลูกค้า การที่สามารถระบุได้ว่าสินค้าหรือบริการที่เป็นผลิตผลขององค์กรมีคุณค่าอย่างไรนั้น นับเป็นบันไดขั้นแรกของแนวคิดสิน ซึ่งจะทำให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจ อันจะส่งผลต่อการดำเนินธุรกิจต่อไปทั้งยังสามารถนำคุณค่าที่ลูกค้าต้องการนั้น มาเป็นแนวทางในการดำเนินการผลิตด้วย ดังนั้น การค้นหาและวิจัยความต้องการของลูกค้าจึงเป็นสิ่งสำคัญและควรใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Quality Function Deployment (QFD)

1.5.2 การวิเคราะห์สายธารคุณค่า (value definition)

หลักการการนิยามคุณค่าเป็นพื้นฐานสำคัญ สำหรับการวิเคราะห์สายธารคุณค่า ซึ่งในการวิเคราะห์เริ่มต้นด้วยแผนภาพกระบวนการ (process mapping) กำหนดแต่ละขั้นตอนตามกระบวนการผลิต ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะมีคำถามว่า “มีคุณค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์ตามธรรมชาติของลูกค้าหรือไม่” ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีผลต่อการเพิ่มคุณค่าความสามารถของผลิตภัณฑ์หรือคุณภาพ โดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์ การกำจัดสิ่งที่ไม่เกิดคุณค่าเพิ่มในกระบวนการ ซึ่งเป็นสิ่งที่ดีในการเพิ่มคุณค่าและเพิ่มประสิทธิภาพ

ภาพกระบวนการสามารถทำได้โดยสร้างแผนภาพการไหลของคุณค่า (value stream mapping: VSM) โดยที่ Value Stream คือกิจกรรมหรืองานทั้งหมด (เป็นสิ่งที่เกิดคุณค่าเพิ่มและไม่เกิดคุณค่าเพิ่ม) ที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้า ดังนั้น VSM คือการเขียนแผนภาพแสดงถึงการไหลของวัตถุดิบและข้อมูลสารสนเทศในการผลิตของกระบวนการต่างๆ ดังภาพที่ 4 (Allen et al., 2001) เมื่อเข้าใจว่าอะไรคือการไหลของคุณค่าของผลิตภัณฑ์แล้ว จะพบกับกิจกรรม 3 ประเภท ดังนี้ ประเภทที่หนึ่ง ขั้นตอนของการสร้างคุณค่าเพิ่มในการไหลและกระบวนการ (value added flow and activities) เป็นขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้เหมาะสมในเรื่องหน้าที่การทำงานของวัตถุดิบและนำไปสู่กระบวนการสุดท้ายที่ได้ผลิตภัณฑ์ ประเภทที่สอง ขั้นตอนการสร้างซึ่งไม่ก่อให้เกิดคุณค่าแต่จำเป็น (necessary but non value adding) เริ่มตั้งแต่ขั้นตอนปัจจุบันของระบบในกระบวนการผลิตที่อาจจะรวมถึงการตรวจสอบ

การรอคอยและการขนส่ง ประเภทที่สามขั้นตอนการสร้างซึ่งไม่ก่อให้เกิดคุณค่าและควรจะต้องกำจัดออกทันที (non value added flow and activities)



ภาพที่ 4 ตัวอย่างแผนภาพสายธารคุณค่า

1.5.3 การไหล (flow)

การทำให้คุณค่าเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง คือการทำให้สายการผลิตสามารถปฏิบัติงานได้อย่างสม่ำเสมอตลอดเวลา โดยไม่มีการขัดขวางหรือหยุดการผลิตด้วยเหตุอันใดก็ตาม ให้งานสามารถไหลไปได้อย่างต่อเนื่องเหมือนเช่นน้ำในแม่น้ำ ซึ่งแม้ว่าจะระดับน้ำจะลดต่ำลง แต่ก็ยังไหลอยู่เสมอองศ์กรต่างๆ ต้องการมุ่งเน้นในเรื่องการไหลของผลิตภัณฑ์แบบรวดเร็ว (rapid product flow) โดยการกำจัดอุปสรรคต่างๆ และระยะทางที่อยู่ระหว่างแผนกที่เกี่ยวข้องกับการทำงาน ทำให้แผนผังการทำงานของพนักงานและเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเปลี่ยนแปลงไป

1.5.4 การดึง (Pull) / ทันทเวลาพอดี (JIT)

ในแนวคิดแบบลีน ลินค้ำคงคลังหรือวัสดุคงคลังจะถูกพิจารณาเป็นเรื่องการสูญเปล่า ฉะนั้นการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ขายไม่ได้จะเป็นการสูญเปล่าเช่นเดียวกัน ดังนั้นการให้ลูกค้าเป็นผู้ดึงคุณค่าของกระบวนการ คือการทำการผลิตเมื่อลูกค้ามีความต้องการสินค้านั้นและผลิตแค่เพียงพอกับที่ลูกค้าต้องการ โดยหมายถึงทั้งลูกค้าภายในและภายนอกเป็นการผลิตที่เข้าใกล้กับลักษณะของการผลิตตามสั่ง (make to order) ไม่ใช่การผลิตเพื่อเก็บและรอการขาย (make to

stock) ซึ่งการผลิตเพื่อเก็บและรอการขายถือเป็นความสูญเปล่าชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเพราะการรอคอย (waiting) วัตถุประสงค์ของการผลิตแบบทันเวลาพอดี คือการสร้างความสะดวกและความสัมพันธ์ของปริมาณการผลิตตลอดเวลา จึงได้นำ Takt Time มาใช้เป็นเครื่องมือในการจัดสมดุลของการไหล โดย Takt Time นั้นเป็นตัวคำนวณมาตรฐานของคุณค่าบนความต้องการของลูกค้าและเป็นความรวดเร็วที่กำหนดให้ในกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ตามความต้องการในระบบการผลิตแบบลีน Takt Time จึงเป็นเครื่องมือที่เชื่อมระหว่างการผลิตกับลูกค้าและเป็นตัวกำหนดอัตราการผลิต การประเมินสภาพการผลิต การคำนวณแนวทางการทำงาน การพัฒนาเส้นทางสำหรับการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งนำไปสู่การค้นหาปัญหาและหาคำตอบที่ต้องการ

1.5.5 ความสมบูรณ์แบบ (perfection)

หลังจากที่เข้าใจความต้องการของลูกค้า รู้และเข้าใจในคุณค่าของสินค้าที่ผลิตจัดทำผังของคุณค่าและให้ลูกค้าเป็นผู้ตั้งงานและกำหนดกิจกรรมในการผลิตแล้ว ต่อมาก็คือ การพยายามเพิ่มคุณค่า ให้กับสินค้าและบริการอย่างต่อเนื่องรวมถึง การค้นหาความสูญเปล่า ให้พบและกำจัดอย่างต่อเนื่องตลอดไป ซึ่งก็คือแนวคิดของ PDCA (Plan-Do-Check-Act) การทำให้ประสบความสำเร็จได้นั้นได้รับผลมาจากการทำงานที่มีประสิทธิภาพในหลักการที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ควรเน้นโอกาสที่จะปรับปรุงในเรื่องของการลดเวลา พื้นที่ ต้นทุนและการลดความผิดพลาดเกี่ยวกับการสร้างผลผลิตและการจัดการ ซึ่งเป็นผลตอบสนองไปยังความต้องการของลูกค้า โดยทั่วไปองค์ประกอบ 3 ประการที่แนวคิดแบบลีนมุ่งเน้น ได้แก่ ประการแรก บรรลุถึงการออกแบบผลิตภัณฑ์และกิจกรรมในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มคุณค่าในสายตาลูกค้า ประการที่สอง เป็นการวางโครงสร้างระบบการไหลอย่างต่อเนื่อง ระบบคงคลังเป็นศูนย์ การผลิตทันเวลาพอดี ของเสียเป็นศูนย์และประการที่สามความสมบูรณ์แบบ คือการเพิ่มคุณค่ามากที่สุดโดยการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องหรือ Kaizen ดังนั้นการบริการและการดำเนินงานขั้นต่อไป ควรคำนึงถึงการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องที่เป็นไปได้

1.6 กุญแจสู่ความสำเร็จแนวคิดแบบลีน

1.6.1 การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (continuous improvement)

ปรัชญาทางธุรกิจที่นิยมใช้ในประเทศญี่ปุ่นและเป็นที่รู้จักกันในคำว่า ไคเซ็น (Kaizen) เศรษฐกิจญี่ปุ่นที่ก้าวหน้ามากกว่า 20 ปี เพราะได้ใช้ ไคเซ็นในการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องและอย่างสม่ำเสมอ ทำให้บริหารธุรกิจได้ตรงเป้าหมายและตามความสำคัญ สามารถทำให้ธุรกิจปรับตัวตามช่วงการเปลี่ยนแปลงมากและน้อยของปริมาณผลิตภัณฑ์ที่กำหนดและเมื่อมีการพัฒนาปรับปรุงมากขึ้นเรื่อยๆ การรวบรวมกิจกรรมการปรับปรุงเล็ก ๆ สามารถหาสาเหตุที่มาจากอิทธิพลหลัก ซึ่งทำให้มีข้อได้เปรียบในการแข่งขันในระยะยาว

1.6.2 การสร้างคุณค่าเพิ่ม (value creation)

การสร้างคุณค่าตามแนวคิดของลีน คือการทำความเข้าใจว่าอะไรคือคุณค่าและความสูญเปล่า ทั้งในและนอกองค์กรที่อยู่ในความสัมพันธ์ต่อการผลิต คุณค่าเป็นสิ่งจำเป็น



และต้องถูกสร้างขึ้นในสายตาลูกค้า ตามที่ลูกค้ากำหนดและมีกระบวนการที่ดำเนินไปอย่างถูกต้อง โดยต้องใช้เวลาและความพยายามที่จะกำจัดความสูญเปล่าออกจากกระบวนการ โดย ยาซุอิโร โม เด็น ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตแบบโตโยต้า (Toyota production system: TPS) และได้แบ่งลักษณะงานในการผลิตออกเป็น 3 ประเภท คือ

1) สิ่งที่ไม่เกิดคุณค่าเพิ่ม (non value added: NVA) คือความสูญเปล่าและเป็นกิจกรรมที่ไม่จำเป็นซึ่งควรกำจัดออกไป ตัวอย่างเช่น เวลารอคอย (waiting time) การลุ่มผลิตภัณฑระหว่างการผลิต (work in process: WIP) โดยไม่เชื่อมต่อเพื่อเข้าสู่กระบวนการต่อไป ในทันที การทำงานหรือกิจกรรมเดียวกันซ้ำ ๆ (double handing)

2) สิ่งที่ต้องมีแต่ไม่เกิดคุณค่าเพิ่ม (necessary but non value added: NNVA) คือความสูญเปล่าแต่อาจจำเป็นต้องยอมให้เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ตัวอย่างเช่น การเดินในระยะไกลเพื่อหยิบชิ้นส่วนหรือวัตถุดิบ การเคลื่อนย้ายอุปกรณ์หรือเครื่องมือระหว่างการผลิตและเพื่อจัดการทำงานเช่นนี้จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงการทำงานครั้งใหญ่ เช่น การวางผังโรงงานในกระบวนการผลิตใหม่ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในทันที

3) สิ่งที่เกิดคุณค่าเพิ่ม (value added: VA) คือกิจกรรมที่มีคุณค่าในการดำเนินงานที่เกี่ยวกับการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตตั้งแต่ขั้นวัตถุดิบหรือชิ้นส่วนใช้ในการผลิตว่าจะใช้แรงงานหรือเครื่องจักรในการผลิตซึ่งต้องใช้ข้อมูลในการตัดสินใจมาก

ในระบบการผลิตจะเห็นได้ว่าสิ่งที่ทำให้เกิดคุณค่าเพิ่มและต้นทุนคือการไหล และการดำเนินกิจกรรม (activities) ดังนั้นจึงต้องบริหารระบบการทำงานนั้นด้วยการสร้างคุณค่าเพิ่มด้วยการจำแนกและกำจัดความสูญเปล่า ซึ่ง ทาอิชิ โอนะ ได้แสดงความสูญเปล่าที่ก่อให้เกิดคุณค่าต่อลูกค้าโดยแบ่งออกเป็น 7 ประการ ได้แก่ การผลิตที่มากเกินไป (over production) การรอคอย (waiting) การขนส่ง (transporting) การดำเนินการที่ไม่เหมาะสม (inappropriate processing) สินค้าคงคลังที่ไม่จำเป็น (unnecessary inventory) การเคลื่อนย้ายที่ไม่จำเป็น (unnecessary motions) และข้อบกพร่อง (defects) สำหรับเครื่องมือในการจำแนกและกำจัดความสูญเปล่า คือ Value Stream Mapping (VSM) ที่ใช้ในการเขียนแผนภาพเส้นทางการไหลของผลิตภัณฑ์และวิเคราะห์สายธารคุณค่า จากนั้นจะใช้เครื่องมือทางด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรม (Industrial Engineering) ในการปรับปรุงการผลิตตามลักษณะการกำจัดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นของการดำเนินงานทั้งการไหลและกิจกรรม (Allen et al., 2001)

1.6.3 การมุ่งเน้นลูกค้า (customer focus)

การให้คำปรึกษาและค้นคว้าวิจัยตลาดทำให้องค์กรมีแนวทางเดียวกันตามความต้องการของลูกค้าในด้านคุณภาพ และการนำมาสู่การเชื่อมต่อระหว่างการผลิตกับลูกค้า เพื่อให้ได้การบริการที่ดีขึ้น ซึ่งการทำให้องค์กรมีแนวทางเดียวกันโดยการสร้างคุณค่าแห่งวัฒนธรรมการเป็นผู้นำ (culture leadership values) จากความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการ การ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่.....	25 กค - 2555
เลขทะเบียน.....	247525
เลขเรียกหนังสือ.....	

สร้างกลยุทธ์ ลูกค้าและคน (Feld, 2001) จะส่งผลให้ลูกค้ามีความซื่อสัตย์และภักดีต่อสินค้า และกำไรเพิ่มขึ้น

1.7 กุญแจสู่ความสำเร็จแนวคิดแบบลีน

สิ่งที่ทราบกันมาแล้วว่าการปรับเปลี่ยนองค์กร คงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในเพียงชั่วข้ามคืน ซึ่งประกอบด้วยกิจกรรมต่างๆ ดังเช่น การปรับปรุงสถานที่ การให้บริการลูกค้า การปรับปรุงผลิตภัณฑ์ การจัดการความสูญเปล่าและมุ่งป้องกันไม่ให้เกิดซ้ำอีก โดยเครื่องมือและเทคนิคช่วยในการแก้ปัญหาต่างๆ ดังนี้

1.7.1 การจัดสายการผลิตแบบเซลล์ (cellular manufacturing)

สายการผลิตแบบเซลล์เป็นผังของโรงงานชนิดหนึ่ง ซึ่งนำเครื่องจักรมาวางไว้ใกล้ตามลำดับของการผลิต (process sequence) หรือตามทิศทางเดินของชิ้นงาน (material flow) โดยจะมีคนเครื่องมือและอุปกรณ์ เป็นของตนเอง โดยทั่วไปจะมี 3-12 คน และ 5-15 สถานีทำงาน (work station) ถูกจัดไว้รวมกันในหนึ่งเซลล์และจะถูกกำหนดไว้แน่นอนว่าเซลล์นี้จะต้องผลิตสินค้าอะไรหรือรุ่น (model) ไหน แต่สามารถเปลี่ยนชนิดของสินค้าในการผลิตได้ หากว่าสามารถใช้เครื่องจักรร่วมกันในเซลล์นั้นๆ ได้ เซลล์จำเป็นต้องทำให้สมดุล (line balancing) เพื่อรักษาการไหลที่ดีของงานและควรใช้สายการผลิตแบบเซลล์ร่วมกับระบบคัมบัง (Kanban) เพื่อให้เกิดการผลิตแบบดึง (pull) ตามแนวคิดของลีน

1.7.2 การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (continuous improvement)

โคเซนเป็นภาษาญี่ปุ่นมีความหมายว่า การปรับปรุงอย่างต่อเนื่องตลอดไป เนื่องจาก Kai มีความหมายถึง การเปลี่ยนแปลง (change) และ Zen หมายถึง ดี (good) โคเซนเป็นแนวคิดของการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยเน้นในความร่วมมือ (participation) ของทุกคนเป็นหลักและเชื่อในปริมาณของสิ่งที่ทำการปรับปรุงมากกว่าผลที่ได้จากการปรับปรุง (return) คือเน้นการปรับปรุงหลายๆ สิ่ง ทำปริมาณมากๆ ถึงแม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จะดีขึ้นเพียงเล็กน้อย (small improvement) แต่ถ้าทำไปเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง มันก็จะกลายเป็นผลการปรับปรุงที่ยิ่งใหญ่ (big improvement) ในอนาคต ในขณะที่ซิกซ์ซิกม่าจะเลือกทำโครงการ (project) ที่ให้ผลตอบแทนทางการเงิน (financial return) ที่คุ้มค่าเท่านั้น ไม่เน้นที่ปริมาณ หนึ่งในเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องก็คือ 5 ส. 5 ส. คือการเอาพยัญชนะตัวหน้าของ สะสาง สะดวก สะอาด สุขลักษณะ และสร้างนิสัยมาย่อเป็น 5 ส. โดยที่แต่ละตัวมีความหมาย ดังนี้

1) สะสาง คือ ให้แยกสิ่งของที่ต้องการและสิ่งของที่ไม่ต้องการออกจากกัน และกำจัดเอาสิ่งของที่ไม่ต้องการเอาออกไปจากสถานที่นั้น

2) สะดวก คือ การจัดสิ่งของที่เป็นให้อยู่ในสภาพที่พร้อมนำมาใช้ โดยสะดวกในขณะที่จำเป็นต้องใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่มีความสูญเปล่าเกิดขึ้น

- 3) สะอาด คือ ทำให้สถานที่ประกอบการอยู่ในสภาพที่สะอาด ปราศจากสิ่งสกปรกและขยะ
- 4) สุขลักษณะ คือ ให้อากาศสภาพการณ์ของ สะอาด สะดวก สะอาด ให้ดำรงอยู่ตลอดเวลา
- 5) สร้างนิสัย คือ ปลูกสร้างนิสัยในการที่จะประพฤติอย่างถูกต้อง ตามกฎระเบียบวินัยในสถานประกอบการ

1.7.3 การผลิตแบบทันเวลาพอดี (just in time: JIT)

การผลิตแบบทันเวลาพอดี เป็นระบบการผลิตที่นำมาใช้เพื่อสนองปรัชญาในการผลิตที่มุ่งเน้นกำจัดความสูญเสียบริกรรมที่ไม่เกิดมูลค่าต่างๆ ออกจากกระบวนการ ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยบริษัทโตโยต้า ประเทศญี่ปุ่น เพื่อให้การบริหารจัดการวัตถุดิบและชิ้นส่วนเข้าสู่กระบวนการผลิตในปริมาณและเวลาที่ต้องการ เป็นสินค้าได้พอดีกับความต้องการทั้งปริมาณและเวลาทั้งนี้ ลดความสูญเสียด้านทุนที่มาจากคงคลังและลดงานระหว่างกระบวนการอันเป็นข้อเสียของการผลิตแบบคราวละมาก ๆ

ระบบดึงของความต้องการของลูกค้า ซึ่งเกิดจากคำสั่งซื้อที่ส่งไปเป็นเครื่องหมายแรกในการผลิต ผลลัพธ์ผลิตภัณฑ์จะถูกดึงไปในกระบวนการประกอบ กระบวนการได้ดำเนินต่อเนื่องไปในกระบวนการตั้งแต่กระบวนการที่ต้องการชิ้นส่วนจากกระบวนการที่มาก่อนในสายธารการไหล โดยกระบวนการจะต้องมีความร่วมมือในการใช้ระบบคัมบัง (Kanban) โดยระบบคัมบังได้ถูกนำมาใช้ในระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี การทำให้การผลิตและการเคลื่อนย้ายชิ้นส่วนและส่วนประกอบระหว่างกระบวนการต่างๆ สอดคล้องกันนั้นเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการมีมากเกินไปหรือมีไม่เพียงพอ โดยคำว่าคัมบัง หมายถึงบัตรหรือแผ่นป้าย ระบบคัมบังจะใช้บัตรหรืออุปกรณ์อื่น ๆ เป็นเหมือนสัญญาณที่มองเห็นได้ด้วยสายตา (visual signal) ในการควบคุมการไหลและการผลิตของวัสดุต่างๆ

คัมบังเป็นกลไกสำหรับการจัดการระบบการผลิตแบบดึง ในระบบดึงกระบวนการผลิตชิ้นงานเพิ่มก็ต่อเมื่อกระบวนการถัดไปเบิกชิ้นงานออกไปและส่งผลทำให้เกิด “การดึง” เริ่มต้นด้วยตารางการผลิตแบบปรับเรียบสำหรับกระบวนการขั้นสุดท้ายซึ่งจะยึดตามปริมาณการสั่งซื้อของลูกค้าที่แท้จริงหรือมีการคาดการณ์ไว้ กระบวนการขั้นสุดท้ายจะใช้คัมบังเพื่อดึงชิ้นงานที่ต้องการมาจากกระบวนการก่อนหน้าอีกทีและเป็นเช่นนี้ต่อไป โดยระบบคัมบังโดยทั่วไป มีอยู่ 3 ชนิดหลัก ดังนี้ (วิทยา สุทธิพิทักษ์, ยุพา กลอนกลาง, 2549)

- 1) คัมบังส่งเคลื่อนย้าย ในแต่ละกระบวนการจะมีจุดเก็บสต็อก ขาเข้าและขาออก จุดเก็บขาเข้าดูแลสถานะที่บรรจุหรือแทนรองสินค้าที่บรรจุวัสดุ ชิ้นงานหรือชิ้นส่วนประกอบสถานะบรรจุแต่ละอันในจุดเก็บขาเข้าจะมีคัมบังส่งเคลื่อนย้ายติดอยู่ด้วย เมื่อกระบวนการเริ่มจะใช้ชิ้นงานที่บรรจุอยู่ในสถานะ คัมบังส่งเคลื่อนย้ายจะถูกปลดออกจากสถานะที่บรรจุและนำไปไว้ที่จุดเก็บสต็อกขาออกของกระบวนการ เป็นต้น ดังภาพที่ 5

Store Shelf No. 5E215 Item Back No. A2-15			Preceding Process FORGING B-2
Item No. 35670507			
Item Name DRIVE PINION			
Car Type SX50BC			Subsequent Process MACHINING M-6
Box Capacity 20	Box Type B	Issued No. 4/8	

ภาพที่ 5 ใบเบิกคัมบัง (Fawaz, 2003)

2) คัมบังการผลิต โดยคัมบังการผลิตนั้น จะถูกติดไว้กับภาชนะที่บรรจุทุก ๆ อันในที่จุดเก็บสต็อกขาออกที่กระบวนการที่ย้ายภาชนะบรรจุชิ้นงานไป คัมบังการผลิตจะถูกปลดออกและใส่ไว้ในกล่องที่จะส่งไปเพื่อจะผลิตชิ้นงานใหม่ตามลำดับการวางไว้ในกล่อง เมื่อภาชนะบรรจุชิ้นงานเต็มตามจำนวนที่บรรจุไว้ คัมบังการผลิตก็จะถูกติดไว้ที่ภาชนะนั้นและจะถูกย้ายไปยังจุดเก็บสต็อกขาออกเพื่อเตรียมพร้อม ดังภาพที่ 6

Store Shelf No. F26-18 Item Back No. A5-34		Process MACHINING SB-8
Item No. 56790-321		
Item Name CRANK SHAFT		
Car Type SX50BC-150		

ภาพที่ 6 ใบคัมบังการผลิต (Fawaz, 2003)

3) คัมบังผู้จัดส่งวัตถุดิบ โดยที่ชิ้นงานบางตัวอาจจะทำการผลิตมาจากผู้จัดส่งวัตถุดิบภายนอก แทนการผลิตจากกระบวนการภายในโรงงาน ในกรณีนี้คัมบังผู้จัดส่งวัตถุดิบจะถูกใช้แทนคัมบังสิ่งเคลื่อนย้าย โดยจะติดอยู่กับภาชนะที่มีชิ้นงานบรรจุอยู่เต็มในจุดเก็บขาเข้าของกระบวนการต่อมา เมื่อกระบวนการเริ่มใช้ชิ้นงานในภาชนะบรรจุนั้น คัมบังผู้จัดส่งวัตถุดิบ จะถูกย้ายและส่งไปยังผู้จัดส่งวัตถุดิบภายนอกเพื่อจะได้มาเติมต่อไป

1.7.4 การปรับเรียงการผลิต (smooth production sequence)

Hejunka เป็นแนวความคิดที่ปรับมาจากแนวความคิดแบบลีน เพื่อลดต้นทุนในการผลิต โดยที่ตารางการผลิตควรจะราบเรียบให้เกิดประสิทธิภาพ ถูกต้องในปริมาณของชิ้นส่วนและการใช้ประโยชน์จากกำลังคนอย่างมีประสิทธิภาพ

การปรับเรียงการผลิตจะทำให้เกิดการไหลของงานอย่างราบเรียบอย่างสม่ำเสมอ (steady flow) ซึ่งจะทำให้การควบคุมการผลิตเป็นไปได้อย่างง่าย การปรับเรียงการ



ผลิต คือ การผลิตงานที่มีปริมาณสม่ำเสมอซึ่งตลอดช่วงเวลาในการผลิต โดยผลิตทุกรุ่น ทุกวัน ตามความต้องการของลูกค้า ถือว่าเป็นการลดความผันแปร (mura/variation) ในการผลิต การปรับเรียบการผลิตเป็นสิ่งที่ต้องทำก่อนการติดตั้งระบบคัมบัง เนื่องจากระบบคัมบังจะใช้งานได้ดี เมื่อการผลิตมีการไหลของงานอย่างราบเรียบสม่ำเสมอ ก่อน โดยทั่วไปในปัจจุบันมีลักษณะการผลิตอยู่ 2 ลักษณะ คือการผลิตรุ่นเดียวกันครั้งละมากๆ และการผลิตแบบผสมรุ่น (mixed production)

1.7.5 การทำงานที่เป็นมาตรฐาน (standardization of work)

การทำงานที่เป็นมาตรฐาน คือ การกระทำของคนงานที่เป็นมาตรฐาน การทำงานให้เป็นมาตรฐานจะต้องทำให้งานแต่ละองค์ประกอบปฏิบัติและลุล่วงไปในประสิทธิภาพของคน เครื่องมือที่ใช้ในการทำงานที่เป็นมาตรฐานคือ Takt Time

โดย Takt Time คืออัตราการผลิตที่สามารถบรรลุถึงความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละตัวเพื่อให้เป็นไปตามความต้องการของลูกค้าได้และอัตรานี้คือ จังหวะหรืออัตราที่ขึ้นงานแต่ละชิ้นออกจากกระบวนการด้วย

Takt Time จะมีค่าเป็นนาที (หรือเศษส่วนของนาที) ต่อชิ้น ในการคำนวณหาค่า Takt Time เฉลี่ยสำหรับกระบวนการขั้นสุดท้ายให้หารเวลาทำงานรวมในแต่ละวันด้วยปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ต้องการในแต่ละวัน (วิทยาและยุพา, 2549)

$$\text{ค่า Takt Time} = \frac{\text{เวลาการทำงานในแต่ละวัน}}{\text{ปริมาณที่ต้องการในแต่ละวัน}} \quad (1)$$

1.7.6 การบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม (total productivity maintenance: TPM)

การบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วมเป็นเครื่องมือของระบบการผลิตแบบลีน เพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของการทำงานร่วมกันระหว่างคนกับเครื่องจักรและทำให้เกิดการใช้ประโยชน์จากเครื่องจักรได้สูงสุดอันจะก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการผลิต เพื่อความเข้าใจลองพิจารณาความแตกต่างของการบำรุงรักษาแบบเก่าและการบำรุงรักษาแบบลีนหรือ TPM ดังตารางที่ 2 ซึ่งจะพบว่าลีนเน้นในเรื่องของทีมบำรุงรักษาเครื่องจักร การที่ช่างเทคนิคสามารถดูแลเครื่องจักรได้มากกว่าหนึ่งเครื่อง (multi skill) การให้ความสำคัญการป้องกันการเสียหายของเครื่องจักรมากกว่าการซ่อม ซึ่งก็คือแนวคิดที่ว่า การป้องกันปัญหาคือดีกว่าการแก้ปัญหาและการให้ผู้ปฏิบัติงานที่เครื่องจักรนั้นดูแลเครื่องจักรของตนเองให้ได้มากที่สุด โดยมีช่างเทคนิคเป็นที่ปรึกษาและอบรมเรื่องการดูแลรักษาเครื่องจักรให้

พัฒนาการของการซ่อมบำรุง (maintenance) จนกระทั่งกลายเป็น TPM. พจนานุกรมจะจำแนกออกได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ

1) breakdown maintenance: BM คือ จะมีการซ่อมหรือบำรุงรักษาเครื่องจักรก็ต่อเมื่อเครื่องจักรเกิดความเสียหายแล้วเท่านั้น

2) preventive maintenance: PM คือ การบำรุงรักษาเครื่องจักรเชิงป้องกัน

3) productive maintenance คือ การบำรุงรักษาเครื่องจักรเชิงป้องกันตลอดอายุการใช้งาน การออกแบบ เพื่อให้มีการบำรุงรักษาเครื่องจักรน้อยที่สุด (maintenance preventive: MP) และการปรับปรุงเครื่องจักรเพื่อให้ง่ายต่อการบำรุงรักษาและป้องกันเครื่องเสีย (maintenance improvement: MI)

4) total preventive maintenance: TPM คือ productive maintenance ที่ได้รวมการบำรุงรักษาด้วยตนเอง (autonomous maintenance) เข้าไปด้วย

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบการบำรุงรักษาแบบเก่าและการบำรุงรักษาแบบลีน

การบำรุงรักษาแบบเก่า	การบำรุงรักษาแบบลีน
งานของการบำรุงรักษาเครื่องจักรมีการแบ่งแยกกันตามหน้าที่	ทำงานเป็นทีม (productive team)
พนักงานคนหนึ่งทำงานได้งานเดียว	พนักงานหนึ่งคนทำได้หลายงาน (multi skill)
เน้นที่การซ่อมเป็นหลัก	เน้นที่การป้องกันเป็นหลัก
ให้ความสนใจเฉพาะเครื่องจักร	ให้ความสนใจกับคนที่ปฏิบัติงานที่เครื่องนั้น

1.8 แผนภูมิแผนภาพสายธารคุณค่า (value stream mapping)

1.8.1 การกำหนดความต้องการของลูกค้า (customer requirement) เนื่องจาก VSM เป็นเครื่องมือในแนวคิดการผลิตแบบลีนซึ่งมุ่งกำจัดความสูญเปล่าต่างๆ ในกระบวนการผลิตเพื่อให้สินค้าหรือบริการนั้นสามารถตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้า ดังนั้นก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนในการทำ VSM สิ่งแรกที่จะต้องคำนึงถึง คือความสามารถเข้าใจถึงความต้องการของลูกค้าได้อย่างแท้จริงเราจึงจะสามารถตอบสนองความต้องการนั้นได้อย่างถูกต้องจนทำให้ลูกค้ามีความพึงพอใจการจะเข้าถึงความต้องการของลูกค้าได้อย่างแท้จริงนั้นสามารถทำได้โดยการวิจัยตลาด โดยการสำรวจตลาด การออกแบบสอบถาม รวมไปถึงวิธีการใดๆ ที่ให้ได้มาซึ่งข้อมูลความต้องการของลูกค้าหรือผู้บริโภคขั้นสุดทำอย่างแท้จริง นอกจากนี้ยังรวมถึงการใช้เทคนิคบ้านคุณภาพ (quality function deployment: QFD) ช่วยเพื่อแปลงความต้องการของลูกค้าไปสู่การออกแบบกระบวนการผลิตต่อไป ทำให้เราสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่ลูกค้าต้องการได้อย่างแท้จริง

1.8.2 กลุ่มผลิตภัณฑ์ (product family) เมื่อทราบว่าผลิตภัณฑ์ใดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ลูกค้าต้องการและมีขั้นตอนการผลิตเป็นอย่างไรแล้ว ก่อนที่จะเริ่มทำการเขียนแผนภาพนั้นถ้าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านขั้นตอนแรกมาแล้วมีเพียงชนิดเดียวก็สามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปสู่ขั้นตอนที่ 3 ได้เลย แต่ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ที่ลูกค้าต้องการที่ผ่านขั้นตอนการกำหนดคุณค่านั้นมีหลายชนิดหลายรุ่น ที่มีขั้นตอนการผลิตแตกต่างกัน จะต้องทำการเลือกกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาทำการเขียนแผนภาพเสียก่อน ซึ่งจะเลือกเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีขั้นตอนการผลิตที่เหมือนกัน โดยใช้การจัด

กลุ่มตามการวิเคราะห์ที่เรียกว่า product quantity rooting analysis: PQR (Gary, 2001) ลักษณะของ PQR Analysis แสดงให้เห็นดังตารางที่ 3 ในส่วนที่ยังไม่ได้จัดกลุ่ม (unsorted) จะแสดงปริมาณและขั้นตอนการผลิตของผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ เช่น ขั้นตอนการผลิตของผลิตภัณฑ์ X - 1 คือ shear - press - bend -weld และเมื่อนำมาจัดกลุ่ม (sorted) โดยจัดให้ผลิตภัณฑ์ที่มีขั้นตอนการผลิตเหมือนกันอยู่กลุ่มเดียวกัน จากตารางแสดงให้เห็นว่าสามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ได้เป็น 4 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 คือ ผลิตภัณฑ์ X - 1C และ Y - 10 กลุ่มที่ 2 คือ X - 20 และ Z - 5 กลุ่มที่ 3 คือ X20B และกลุ่มสุดท้ายคือ X - 1 เราสามารถเลือกกลุ่มผลิตภัณฑ์กลุ่มใดก็ได้นำมาเขียนแผนภาพ VSM ต่อไป

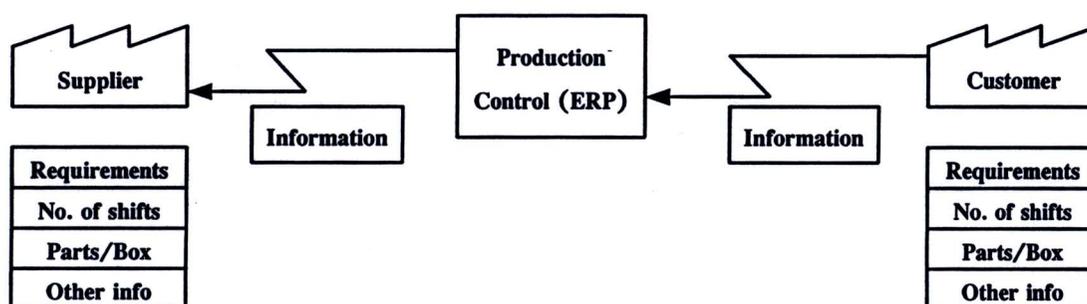
ตารางที่ 3 ตัวอย่างของ spreadsheet ที่ทำการวิเคราะห์ PQR

Unsorted					
Product Name	Production Volume	Process			
		Shear	Press	Bend	Weld
X-1	1000	1	2	3	4
X-1C	1500	1		2	3
X-20	1800		1	2	3
X20B	900		1		2
Y-10	700	1		2	3
Z-5	200		1	2	3
Sorted					
Product Name	Production Volume	Process			
		Shear	Press	Bend	Weld
X-1C	1500	1		2	3
Y-10	700	1		2	3
X-20	1800		1	2	3
Z-5	200		1	2	3
X20B	900		1		2
X-1	1000	1	2	3	4

(Gary, 2001)

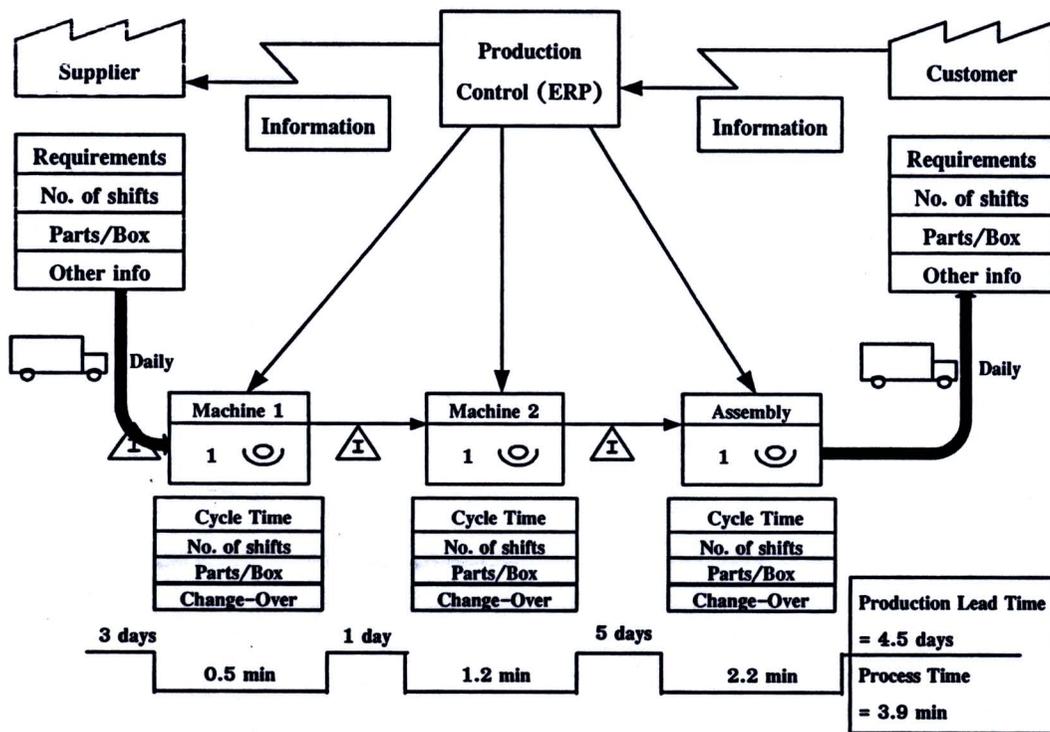
1.8.3 การเขียนแผนภาพสถานะปัจจุบัน (current state drawing) เมื่อเลือกผลิตภัณฑ์หรือกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการวาดแผนภาพกระบวนการผลิตที่แสดงทั้งการไหลของวัตถุดิบและการไหลของข้อมูลในกระบวนการผลิตที่กำลังดำเนินการอยู่ในปัจจุบันของผลิตภัณฑ์หรือกลุ่มผลิตภัณฑ์นั้น เพื่อให้มองเห็นถึงความสูญเสียเปล่าต่างๆ ที่ซ่อนอยู่และหาทางกำจัดความสูญเปล่าเหล่านั้นออกไป แผนภาพที่ได้จากการวาดในขั้นตอนนี้จะเรียกว่า แผนภาพกระบวนการผลิตในสถานะปัจจุบัน (current state mapping) ขั้นตอนการวาดแผนภาพจะแบ่งเป็นแผนภูมิภายนอก (external mapping) และแผนภูมิภายใน (internal mapping) (Jared, 2001)

แผนภูมิภายนอก คือการวาดแผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์กรระหว่างโรงงานผลิตเองกับผู้ส่งวัตถุดิบ (supplier) และกับลูกค้า (customer) ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ตัวอย่างแผนภาพภายนอก

แผนภูมิภายใน คือการวาดแผนภาพที่แสดงถึงกิจกรรมในกระบวนการผลิตทั้งหมด ซึ่งเป็นกิจกรรมที่เกี่ยวข้องเฉพาะภายในองค์กรของเรา โดยที่ผู้วาดจะต้องออกไปสังเกตการณ์ในกระบวนการจริงๆ เพื่อเก็บรายละเอียดทั้งหมดและการวาดก็ต้องเริ่มจากการสังเกตที่กระบวนการหลังสุดย้อนกลับไปข้างหน้า คือจากฝ่ายขนส่งสินค้า (shipping) ย้อนกลับไปจนถึงการรับวัตถุดิบจากผู้ส่งวัตถุดิบ เหตุผลก็คือจะทำให้สามารถเข้าใจการไหลของการผลิตนั้นได้ง่ายกว่า ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ตัวอย่างแผนภาพกระบวนการผลิตในสถานะปัจจุบัน

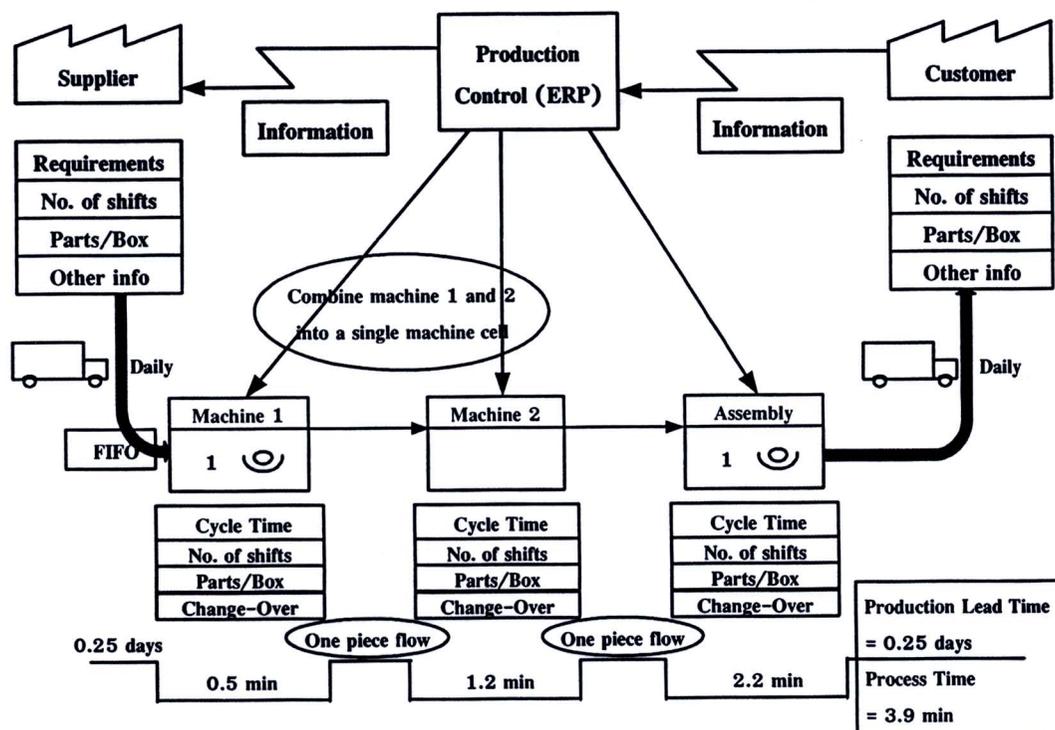
1.8.4 การวิเคราะห์คุณค่า (analysis mapping) เมื่อได้แผนภาพกระบวนการผลิตในสถานะปัจจุบันแล้ว จะนำแผนภาพที่ได้นี้มาทำการวิเคราะห์และปรับปรุงโดยใช้หลักการกำจัดความสูญเปล่าซึ่งไม่ถือว่าเป็นการเพิ่มคุณค่าออกจากระบบ เพื่อให้ได้กระบวนการผลิตใหม่ที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าเดิม ซึ่งความสูญเปล่าต่างๆ ที่อยู่ภายในกระบวนการผลิตและการไหลนั้น แผนภาพ VSM สามารถแสดงให้เห็นได้จากความสูญเปล่าทั้ง 7 ประการ ได้แก่ การผลิตเกินความจำเป็น (overproduction), สินค้าคงคลัง (inventory), การเคลื่อนย้าย (transportation), กระบวนการผลิตที่ไม่จำเป็นหรือไม่เหมาะสม (inappropriate processing), ของเสีย (defect หรือ rework), การรอคอย (waiting) และการเคลื่อนที่ที่ไม่จำเป็น (motion)

นอกจากการปรับปรุงที่ใช้การพิจารณาความสูญเปล่าต่างๆ ในแผนภาพและกำจัดออกไปดังที่กล่าวมาแล้วนั้น เรายังสามารถปรับปรุงกระบวนการหรือขั้นตอนการผลิตในแต่ละขั้นโดยใช้ Takt Time เป็นตัวกำหนดรอบเวลาการผลิตที่เหมาะสม Takt Time หาได้จากจำนวนเวลาทำงานในแต่ละวันทั้งหมดหารด้วยจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ลูกค้าต้องการในแต่ละวัน จะได้ออกมาเป็นเวลาที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้น ซึ่งเราสามารถนำ Takt Time นี้มากำหนดรอบเวลาการผลิตที่เหมาะสมคือ รอบเวลาการผลิตไม่ควรมากกว่า Takt Time เพราะถ้ารอบเวลาการผลิตมากกว่า Takt Time จะทำให้เกิดงานระหว่างการผลิต การรอคอยหรือเกิดการเคลื่อนที่ที่ไม่จำเป็นของพนักงานหรือเกิดความสูญเปล่าอื่นๆ ในการปรับปรุงกระบวนการหรือขั้นตอนการผลิต



เพื่อให้รอบเวลาการผลิตไม่มากกว่า Takt Time และให้มีประสิทธิภาพกระบวนการดีขึ้น สามารถทำได้โดยใช้ความรู้ต่างๆ ทางวิศวกรรมมาปรับปรุงต่อไป เช่น การออกแบบเครื่องมือช่วยจับ (jig) ช่วยในการจับชิ้นงานให้เกิดการทำงานที่สะดวกขึ้น การปรับปรุงขั้นตอนการผลิตให้ง่ายขึ้น การทำให้ระบบการผลิตให้เป็นการไหลแบบต่อเนื่อง การวางมาตรฐานการปฏิบัติงานเพื่อช่วยลดเวลาในการผลิต เป็นต้น

1.8.5 การเขียนแผนภาพสถานะอนาคต (future state drawing) ขั้นตอนนี้เป็นการวาดแผนภาพกระบวนการผลิตใหม่ที่ถูกปรับปรุงโดยการกำจัดความสูญเปล่าต่างๆ ออกไป และปรับปรุงกระบวนการหรือขั้นตอนการผลิตใหม่โดยใช้วิธีการหรือความรู้ต่างๆ แล้วจะได้เป็นแผนภาพกระบวนการผลิตในสถานะอนาคต การปรับปรุงนี้จะทำให้ข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจะต้องแสดงไว้ให้เห็นในแผนภาพด้วย เนื่องจากการปรับปรุงแผนภาพกระบวนการผลิตนี้ยังไม่ได้นำมาใช้ในกระบวนการผลิตจริง ตัวอย่างแผนภาพกระบวนการผลิตในสถานะอนาคตแสดงได้ดังภาพที่ 9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการปรับปรุงโดยการรวมเครื่องจักร 1 กับ 2 ให้อยู่ภายในบริเวณเดียวกัน ทำให้การไหลเป็นไปแบบทีละชิ้น และทำให้วัตถุดิบเข้ามาสู่กระบวนการโดยใช้หลักเข้าก่อนออกก่อน (first in first out: FIFO) ผลของการปรับปรุงนี้ทำให้สามารถจัดการคงคลังวัสดุระหว่างกระบวนการลงไปได้ ทำให้เวลาลดลงจากเดิม 4.5 วัน เหลือเพียง 0.25 วัน



ภาพที่ 9 ตัวอย่างแผนภาพกระบวนการผลิตในสถานะอนาคต



1.8.6 การนำไปใช้งาน (implementation) เมื่อสังเกตได้ว่า ค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต เช่น ค่าเวลานำ รอบเวลาการผลิต ที่ได้จากแผนภาพกระบวนการผลิตสถานะอนาคตพบว่ามีความที่แสดงว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น จากกระบวนการผลิตแบบเดิม เราสามารถนำกระบวนการผลิตใหม่ที่ปรับปรุงแล้วนั้นไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงได้ต่อไป แต่ถ้าหากพบว่ายังสามารถปรับปรุงหรือกำจัดความสูญเปล่าในจุดใดได้อีก สามารถทำให้แผนภาพกระบวนการผลิตในสถานะอนาคตนั้น เปลี่ยนไปเป็นแผนภาพกระบวนการผลิตในสถานะปัจจุบัน แล้วดำเนินการซ้ำตามข้อ 2 ได้ต่อไป

2. นิยามและชนิดของแก้วอินทรีย์

ตามนิยามของ American Society for Testing and Material (ASTM) แก้ว คือ “ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหลอมอินทรีย์ แล้วลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ได้เป็นของแข็งที่ปราศจากผลึก” นิยามนี้ยังไม่เป็นที่ยอมรับมากนักเพราะมีแก้วที่เป็นระบบแก้วอินทรีย์หรือสามารถผลิตแก้วด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมี (chemical vapor deposition: CVD) โดยไม่จำเป็นต้องหลอมสารตั้งต้นก็ได้ เนื่องจากแก้วเป็นวัสดุคล้ายกับของแข็ง มีความหนาแน่น สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนเหมือนวัสดุที่เป็นผลึก แต่แก้วมีจุดหลอมเหลวกว้างกว่าและเมื่อได้รับแรงหรือมีความเครียดภายใน มีแนวการแตกหักที่ไม่ชัดเจน นอกจากนี้แล้วสมบัติของแก้วยังไม่ขึ้นกับทิศทาง (isotropic) คล้ายกับของเหลว โดยเฉพาะสมบัติทางกายภาพเพราะมีการจัดเรียงอะตอมแบบสุ่ม จึงมีการให้นิยามแก้วใหม่ว่า “ของแข็งที่มีโครงสร้างผลึกเหมือนของเหลวหรือของแข็งที่ไม่ใช่ผลึก (non crystalline solid) หรือของแข็งอสัณฐาน (amorphous)”

2.1 แก้วบอโรซิลิเกต (borosilicate glass)

สมบัติทั่วไปและการใช้งาน

แก้วบอโรซิลิเกตเป็นแก้วที่มีปริมาณซิลิกอนออกไซด์น้อยกว่าแก้วชนิดอื่น ๆ แก้วชนิดนี้ต้องมีโบรอนออกไซด์เป็นองค์ประกอบอย่างน้อย 5% โดยน้ำหนักซิลิกอนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างโครงข่ายในเนื้อแก้ว โบรอนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นได้ทั้งตัวสร้างโครงข่ายในเนื้อแก้วและตัวทำลายโครงข่าย ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของแก้วและปริมาณของโบรอนออกไซด์ที่เติมลงไป สำหรับโซเดียมออกไซด์หรือโพแทสเซียมออกไซด์นั้น ทำหน้าที่เป็นตัวทำลายโครงข่ายและอลูมินาที่เติมลงไปเพียงเล็กน้อยจะเป็นตัวร่วมสร้างโครงข่ายทำให้ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนต่ออุณหภูมิสูงและทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจับพลันได้ดีขึ้น (Varshneya, 1994)

แก้วบอโรซิลิเกตมีสมบัติเด่นอยู่หลายประการ เช่น มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวโดยความร้อนต่ำกว่าแก้วอื่น ๆ คือประมาณ $(3.3-4.7) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ในช่วงอุณหภูมิ 0-300°C มีความต้านทานไฟฟ้าสูงถึง $10^{6.4}-10^{10}$ Ohm.cm ในช่วงอุณหภูมิ 250-300°C มีค่าดัชนีหักเหแสง 1.471-1.480 และแสงในช่วงความยาวคลื่น 290-350 nm. ทะลุผ่านได้ดี ขึ้นรูปได้สะดวก เพราะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่กว้าง (Babcook, 1971)

จากสมบัติดังกล่าว ทำให้มีการใช้งานแก้วบอโรซิลิเกตอย่างกว้างขวาง ทั้งเป็นเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี หรือแม้แต่เครื่องใช้ในครัวเรือน นอกจากนี้แก้วบอโรซิลิเกตยังมีใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และการผลิตหลอดไฟหรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ อย่างกว้างขวาง เนื่องจากทนต่ออุณหภูมิได้สูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีและมีความใส ทำให้สามารถเห็นสิ่งที่บรรจุภายในได้ และเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวความร้อนต่ำ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ต่ำและค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง แก้วบอโรซิลิเกตจึงใช้ในชิ้นส่วนไมโครอิเล็กทรอนิกส์และหลอดสุญญากาศ เช่น หลอดรังสีเอ็กซ์ ซึ่งแก้วบอโรซิลิเกตนั้นยอมให้รังสีเอ็กซ์ผ่านได้โดยมีการสูญเสียความเข้มจากการดูดกลืนต่ำ เนื่องจากเนื้อแก้วไม่มีองค์ประกอบของธาตุหนัก

การผลิตแก้วบอโรซิลิเกตนั้นต้องใช้อุณหภูมิหลอมสูงกว่าแก้วทั่วไปและวัตถุดิบที่ให้โบรอนออกไซด์มีราคาแพง ทำให้แก้วบอโรซิลิเกตถูกจำกัดการใช้งานเฉพาะงานที่ไม่สามารถหาวัสดุอื่นมาทดแทนได้ ยกตัวอย่างเช่น เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการที่ใช้เทียบปริมาตรซึ่งต้องมีขนาดหรือปริมาตรที่แน่นอนถึงแม้อุณหภูมิห้องจะเปลี่ยนไปและยังต้องใช้ความใสอีกด้วย เพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงภายใน ดังนั้นแก้วที่ใช้งานจำเป็นต้องมีการขยายตัวโดยความร้อนต่ำเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือบรรจุภัณฑ์และอุปกรณ์ผลิตในอุตสาหกรรมยา ซึ่งต้องไม่มีการปนเปื้อนสารอื่นในผลิตภัณฑ์ จึงเลือกใช้แก้วบอโรซิลิเกต เพราะทนการกัดกร่อนได้ดี แก้วบอโรซิลิเกตที่ผลิตขายทางการค้า มีสองเครื่องหมายการค้า คือ Pyrex และ Duran ซึ่งมีสมบัติทางเคมีและกายภาพที่ใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติของแก้ว Pyrex และ Duran

ความหนาแน่น	2.23 gcm^{-3}
สัมประสิทธิ์การขยายตัวโดยความร้อนเชิงเส้น	$3.2\text{-}3.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
โมดูลัสความยืดหยุ่น	$6 \times 10^{-4} \text{ N/nm}^2$
ความทนต่อแรงดึง	$\cong 90 \text{ N/nm}^2$
ดัชนีหักเห	1.473
ความต้านทานกระแสไฟฟ้าที่ 250°C	10^8 cm
อุณหภูมิการเปลี่ยนเป็นแก้ว (Tg)	530°C
อุณหภูมิ การอ่อนตัว	815°C

(Hodkin et al., 1924)

2.2 การขยายตัวโดยความร้อนของแก้ว

เมื่อแก้วมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะก่อให้เกิดการเพิ่มขนาดหรือการขยายตัวของชิ้นงาน ในกรณีที่อุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากันทุกจุด จะทำให้เกิดการขยายตัวของทุกจุดเท่ากัน หากชิ้นงานถูกยึดให้อยู่ในปริมาตรที่จำกัดขณะที่แก้วมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงเกิดความเครียดภายในชิ้นงานทำให้เกิดการประลัยได้ โดยเฉพาะความเครียดดึง เนื่องจากแก้วจะทนแรงดึงได้น้อยกว่าแรงอัด ดังนั้นการเลือกใช้งานแก้วให้คงทนจึงจำเป็นต้องคำนึงความแตกต่างของการขยายตัวโดยความร้อนระหว่างวัสดุด้วย เช่น หลอดไฟและหลอดสุญญากาศต่าง ๆ ที่ต้องมีการเชื่อมต่อกับโลหะหรือกระจก หน้าต่างบ้านเรือนในเขตหนาวที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันมากซึ่งแก้วที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวโดยความร้อนน้อย ๆ จะใช้งานได้ดีกว่า

อย่างไรก็ตามโครงสร้างแก้วมีช่วงความยืดหยุ่น สามารถยืดหรือหดได้โดยการเปลี่ยนมุมพันธะระหว่างอะตอม สาเหตุนี้จึงทำให้การขยายตัวโดยความร้อนของแก้วไม่เหมือนกับวัสดุที่เป็นผลึกการขยายตัวของแก้วมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว 2 ช่วง คือ ช่วงก่อนและหลังอุณหภูมิการเปลี่ยนเป็นแก้ว (glass transition temperature: T_g) โดยในช่วงก่อนอุณหภูมิเปลี่ยนเป็นแก้ว ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจะต่ำกว่าเนื่องจากเป็นเพียงการเปลี่ยนมุมพันธะในโครงข่ายเนื้อแก้ว จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความยาวหรือปริมาตรน้อยกว่า

นักวิชาการบางกลุ่มจึงพิจารณาว่าอุณหภูมิต่ำกว่า T_g คือ อุณหภูมิที่แก้วยังมีสถานะเป็นของแข็ง การขยายตัวเกิดจากการเปลี่ยนมุมพันธะเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า T_g แก้วจะเริ่มมีพฤติกรรมของของเหลว และการขยายตัวเกิดจากโครงข่ายของอะตอมในแก้วเคลื่อนที่ในช่วงหนืด (viscous flow) (Hodkin et al., 1924)

3. ทฤษฎีเรื่องหลักการซิกซ์ซิกม่า (six sigma) และขั้นตอนการดำเนินงาน

ซิกซ์ซิกม่าเป็นแนวทางใหม่ในการบริหารคุณภาพโดยเน้นเรื่องการปรับปรุงคุณภาพ (quality improvement: QI) เป็นการปรับปรุงแบบพลิกโฉมหน้า (breakthrough) ที่เน้นที่ผลลัพธ์ โดยการวิเคราะห์ถึงปัญหาที่ซ่อนเร้นอยู่ในกระบวนการ (hidden factory) โดยอาศัยสารสนเทศเป็นตัวขับเคลื่อน (information drive) ซึ่งจุดประสงค์หลักของซิกซ์ซิกม่าคือ การลดความผันแปรที่เกิดขึ้นให้เหลือน้อยที่สุดโดยเกือบจะเท่ากับหรือเหนือกว่าความต้องการของลูกค้า หรืออาจกล่าวได้ว่าซิกซ์ซิกม่าประกอบด้วย 3 สิ่งคือ

1) การวัดค่าทางสถิติ (statistic measurement) เป็นการหาความสามารถในเชิงปริมาณของ ผลิตภัณฑ์ บริการและกระบวนการ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสิ่งที่คล้ายคลึงกัน เมื่อหาสารสนเทศที่จะทำให้เราเกิดการปรับปรุง

2) กลยุทธ์ทางธุรกิจ (business strategy) เป็นกลยุทธ์แบบพลิกโฉมหน้า คือการนำเอาคนที่มีความสามารถให้ความรู้ในเรื่องของการวิเคราะห์และแก้ปัญหา แล้วให้เขาทำหน้าที่ใน

องค์กรเกี่ยวกับการแก้ปัญหาอย่างเฉียวเฉียวเพิ่มเวลาทำงาน โดยไม่ต้องทำงานอย่างอื่น โดยปัญหาที่นำมาแก่นั้นเน้นไปที่ปัญหาเรื่องต้นทุนที่ไม่สร้างคุณภาพ

3) ปรัชญา (philosophy) ชิกซ์ชิกมาจะเป็นการทำงานที่เป็นระบบการใช้สารสนเทศเป็นตัวตัดสินใจโดยหลีกเลี่ยงการใช้ความรู้สึกในการตัดสินใจ (สิทธิศักดิ์, 2546)

โดยชิกซ์ชิกมาประกอบด้วยขั้นตอน 5 ขั้นตอน DMAIC ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 10 ขั้นตอน DMAIC

3.1 เฟสการระบุปัญหา (Define Phase)

3.1.1 การนิยามปัญหา

ปัญหา คือความเบี่ยงเบนของสมรรถนะที่เกิดขึ้นจริง (“ACTUAL” performance) จากสมรรถนะที่ควรจะเป็น (“SHOULD” performance) ดังนั้นในการนิยามปัญหาต้องนิยามผ่าน “แนวความคิดด้านคุณภาพ” เพื่อพิจารณาว่าอะไรคือสมรรถนะที่ควรจะเป็น ซึ่งจะต้องนิยามจากตัววัดผลงาน (output) แต่ถ้าหากมีความเบี่ยงเบนของปัจจัยที่ใช้ในการผลิต (input) ที่เป็นจริงจากปัจจัยที่ใช้ในการผลิตที่ควร Define-Measure-Analyze-Improve-Control จะถือว่าเป็นสาเหตุของปัญหา เช่น ผลิตภัณฑ์บกพร่อง ต้นทุนการผลิตสูงกว่างบประมาณและมีการผลิตล่าช้ากว่าแผน

3.1.2 การสำรวจสภาพปัจจุบันและตั้งเป้าหมาย

หลังจากกำหนดหัวข้อปัญหาได้เรียบร้อยแล้ว งานลำดับต่อไปคือ การวิเคราะห์สาเหตุและแก้ไข แต่เนื่องจากปัญหาที่เลือกขึ้นมาเป็นปัญหาประเภทที่ไม่ทราบสาเหตุและไม่ทราบมาตรการแก้ไข จึงมีความจำเป็นต้องสำรวจสภาพปัจจุบัน เพื่อทำความเข้าใจกับสถานการณ์ของปัญหาก่อน โดยเริ่มต้นจากการดูถึงความผันแปรของผลที่เกิดขึ้นก่อน จากนั้นจะทำความเข้าใจถึงสาเหตุต่างๆ ของปัญหาเมื่อทราบถึงประเด็นความแตกต่างที่แยกออกในแต่ละประเด็นแล้ว จะต้องกำหนดเป้าหมายสำหรับการแก้ปัญหา โดยที่นิยามไว้ว่า เป้าหมาย (goal) คือ ตัวเลขที่แสดงระดับของการแก้ไขและปรับปรุงงานซึ่งต้องวัดและประเมินเทียบกับอดีตได้ ซึ่งการตั้งเป้าหมายโดยอาศัยหลักการทางสถิติมีข้อสังเกต 2 ประการ คือ

- 1) ตัวเลขที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์ จะต้องเป็นตัวเลขที่มีความเสถียรภาพ
- 2) การตั้งเป้าหมายจะต้องทำในเทอมของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเท่านั้น จะตั้งในเทอมของข้อบกพร่องหรือปัญหาไม่ได้ ทั้งนี้เพราะปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละอาการ แต่ละเวลาและ

แต่ละสถานที่ จะมีความไม่แน่นอนและอาจมีความสัมพันธ์กัน การกำหนดเป้าหมายในเทอมของข้อบกพร่องอาจจะก่อให้เกิดปัญหาใหม่ คือการย้ายปัญหาจากปัญหาหนึ่งสู่ปัญหาหนึ่งได้

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในเฟสระบุปัญหา

แผนภาพพาเรโต (pareto diagram) ใช้ในการตีความหมายความมีเสถียรภาพหรือไม่ของข้อมูลที่พิจารณาโดยมีข้อกำหนด คือ ถ้าตัวแบบของข้อมูลเป็นไปตามหลักการพาเรโตแล้ว แสดงว่าข้อมูลนั้นอยู่ในสภาวะเสถียรภาพและสามารถใช้คาดการณ์ได้ แต่ถ้าหากตัวแบบของข้อมูลมิได้เป็นไปตามหลักการของพาเรโตแล้ว แสดงว่าข้อมูลไร้เสถียรภาพ อันเนื่องจากข้อมูลที่เก็บมาอยู่ในสภาวะการปรับตัว (transient state) เข้าสู่สภาวะเสถียรภาพ จึงควรมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมอีกหรืออีกกรณีหนึ่ง คือ ข้อมูลนั้นมาจากกระบวนการที่ไร้เสถียรภาพมีความจำเป็นต้องแก้ไขด้วยการทำให้กระบวนการมีมาตรฐาน แผนภาพพาเรโตจะมีประโยชน์ค่อนข้างมากในขั้นตอนการเลือกปัญหาตามเกณฑ์ที่ว่า “ข้อมูลที่มีความสำคัญจะมีจำนวนเล็กน้อย (vital few) ในขณะที่ข้อมูลที่เหลืออีกจำนวนมากจะมีความสำคัญเพียงเล็กน้อย (trivial many)” โดยจะต้องใช้หลักการนี้ต่อการวิเคราะห์ปัญหา และสาเหตุเสมอ โดยเน้นที่การจำแนกข้อมูล (stratification) เพื่อกำหนดแนวความคิด และการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ (กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2543)

แผนภูมิควบคุม (control chart) ในการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของข้อมูลเพื่อการคาดการณ์นี้ นอกจากจะใช้แผนภาพพาเรโตสำหรับข้อมูล ที่มีการจำแนกประเภทแล้ว ถ้าหากข้อมูลดังกล่าวมีเพียงประเภทเดียว เช่น ค่าใช้จ่ายโดยรวม ค่าแรงดึง น้ำหนักบรรจุ ฯลฯ มีความจำเป็นจะต้องวิเคราะห์ผ่านแผนภูมิควบคุม กลไกสำคัญของแผนภูมิควบคุม คือการพิจารณาแยกความผันแปรจากสาเหตุแบบผิดธรรมชาติออกจากสาเหตุแบบธรรมชาติ ด้วยพิภคควบคุมของแผนภูมิควบคุม โดยที่ความผันแปรจากสาเหตุแบบธรรมชาติมีพฤติกรรมแบบสุ่มรอบค่าคงที่ค่าหนึ่ง จึงมีความจำเป็นต้องพล็อตข้อมูลตามลำดับเวลา เพื่อดูว่ามีความสุ่มจริงหรือไม่ แผนภูมิควบคุมมีหลายประเภทด้วยกันขึ้นอยู่กับประเภทของข้อมูลที่วิเคราะห์แต่หากพิจารณาอย่างกว้าง ๆ แล้วอาจจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1) แผนภูมิควบคุมแบบข้อมูลผันแปร (variable control chart) ซึ่งเป็นแผนภูมิที่ควบคุมข้อมูลจากการวัด ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้กัน 2 อย่าง คือ แผนภูมิ \bar{X} -R สำหรับข้อมูลแบบกลุ่ม และ I-MR สำหรับข้อมูลเชิงเดี่ยว

2) แผนภูมิควบคุมแบบข้อมูลแอตทริบิวต์ (attributes control chart) ซึ่งเป็นแผนภูมิที่ควบคุมข้อมูลจากการนับและมีลักษณะแบบช่วง ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้กัน 2 อย่างคือ แผนภูมิ p สำหรับการตรวจสอบข้อมูลจากการสุ่มตรวจและแผนภูมิ u สำหรับการตรวจสอบข้อมูลภายในหนึ่งหน่วยมาตรฐาน (ในกรณีที่จำนวนสุ่มตรวจหรือหน่วยมาตรฐานมีขนาดคงที่ตลอด อาจจะทำให้แผนภูมิควบคุมง่ายขึ้นด้วยการควบคุมจำนวนนับโดยแผนภูมิ p หรือ c โดยลำดับ) โดยในขั้นแรกต้องดำเนินการให้กระบวนการที่เก็บข้อมูลเป็นมาตรฐานก่อนเสมอ จึง

สามารถประยุกต์แผนภูมิควบคุมได้ และในการประยุกต์แผนภูมิควบคุมจะใช้ได้ทั้งการวิเคราะห์ความเสถียรภาพของกระบวนการผ่านการวิเคราะห์ข้อมูล ถ้าหากกระบวนการมีความเสถียรภาพจะสามารถใช้แผนภูมิควบคุมในการคาดการณ์ขนาดความผันแปร ภายใต้สาเหตุธรรมชาติซึ่งสามารถใช้ควบคุมกระบวนการต่อไปได้ ซึ่งโดยปกติจะมีการใช้แผนภูมิควบคุมในการวิเคราะห์เสถียรภาพในขั้นตอนการสังเกตการณ์ การวิเคราะห์สาเหตุ และการติดตามผล ในขณะที่ใช้แผนภูมิควบคุมเพื่อการควบคุมกระบวนการในขั้นตอนการค้นหาค่าปัญหา และขั้นตอนการทำให้เป็นมาตรฐาน

3.2 เฟสการวัด (Measure Phase)

3.2.1 การวิเคราะห์ระบบการวัด (measurement system analysis: MSA) เนื่องจากความผันแปรในระบบการวัดเป็นส่วนหนึ่งของความผันแปรในข้อมูล เพื่อในการใช้ตัดสินใจเกี่ยวกับกระบวนการ จึงมีความจำเป็นต้องทำความเข้าใจถึงประเภทของความผันแปรของระบบการวัดก่อน รวมถึงความสัมพันธ์กับความผันแปรของกระบวนการผลิตด้วย ซึ่งจะพบว่าความผันแปรของระบบการวัดจะจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือความผันแปรของตำแหน่ง (location variation) และความผันแปรของความกว้าง (width variation) ดังนี้

การวิเคราะห์ความผันแปรของตำแหน่งของระบบการวัด มุ่งที่จะพิจารณาในคุณสมบัติ 3 ประการ คือ

1) การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านไบอัสของระบบการวัด (bias)

ค่าไบอัส หมายถึง ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าที่ได้จากการวัดจากค่าอ้างอิงหรือค่ามาตรฐาน (โดยค่ามาตรฐาน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ได้มาจากการวัดซ้ำด้วยเครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำสูงกว่าภายใต้ภาวะควบคุมหรือห้องปฏิบัติการสอบเทียบและต้องสามารถสอบกลับได้) โดยจะสามารถวิเคราะห์ค่าไบอัสโดยตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0 : \mu = \mu_0$$

$$H_1 : \mu \neq \mu_0$$

โดย μ_0 = ค่ามาตรฐานหรือค่าอ้างอิงของชิ้นงานวัด

$$\mu = \text{ค่าเฉลี่ยของค่าวัดจากระบบการวัด}$$

2) การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความเสถียรภาพของระบบการวัด

คุณสมบัติด้านความเสถียรของระบบการวัด หมายถึง คุณสมบัติด้านอายุการใช้งานของอุปกรณ์วัดประเด็นที่มีความสำคัญมาก ประการหนึ่งต่อการศึกษาความเสถียรภาพของระบบการวัด คือ ระยะเวลาที่ทำการศึกษา ซึ่งมีความจำเป็นต้องพิจารณาอย่างเหมาะสม โดยการคำนึงถึงระยะเวลาที่ทำให้ค่าไบอัสของระบบการวัดเพิ่มขึ้นตามเวลาใช้งาน เนื่องจากความเสื่อมสภาพโดยธรรมชาติของระบบการวัดเท่านั้น นั่นคือความพยายามในการเลือกศึกษาให้ระบบการวัดมีค่าไบอัสที่ขึ้นกับปัจจัยภายนอกต่าง ๆ ให้น้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง เช่น ความชื้นในอากาศ อุณหภูมิ ฯลฯ จะมีผลทำให้ระบบการวัดไม่มีเสถียรภาพทั้งสิ้น

ซึ่งจะดำเนินการวิเคราะห์โดยอาศัย \bar{X} -R และทดสอบสมมติฐานค่าไบอัสอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นที่แต่ละจุดของแผนภูมิควบคุมจะมีผลเท่ากับการทดสอบสมมติฐาน

3) การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัด (linearity)

คุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัด หมายถึง การที่ค่าไบอัสของระบบการวัดจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปตลอดช่วงของการวัด (working range) ของระบบการวัดดังกล่าว การพิจารณาคุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัดได้มาจากการเลือกชิ้นงาน เพื่อศึกษาถึงค่าไบอัสที่แต่ละค่าของค่ามาตรฐานแล้วพิจารณาถึงค่าเปลี่ยนแปลงค่าไบอัส โดยจะสามารถวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงเส้นโดยตั้งสมมติฐานว่า

H_0 : กระบวนการวัดไม่มีปัญหาด้านคุณสมบัติเชิงเส้น

H_1 : กระบวนการวัดมีปัญหาด้านคุณสมบัติเชิงเส้น

หรือ

H_0 : $\beta_1 = \mu_0$

H_1 : $\beta_1 \neq \mu_0$

เมื่อ β_1 คือสัมประสิทธิ์เชิงเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าไบอัสกับค่ามาตรฐานและถ้าพบว่าระบบการวัดขาดคุณสมบัติเชิงเส้นตรง แล้วจะต้องพิจารณาหาสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งดังต่อไปนี้

1) เครื่องมือวัดได้รับการสอบเทียบอย่างถูกต้องทั้งที่ด้านล่างและด้านบนของย่านวัดที่ทำการพิจารณา

2) มีความคลาดเคลื่อนที่ชิ้นงานมาตรฐานที่ขนาดเล็กและขนาดใหญ่

3) เครื่องมือวัดมีความสึกหรอ

4) สาเหตุจากปัจจัยภายในอันเนื่องมาจากการออกแบบเครื่องมือวัด

การวิเคราะห์ความผันแปรของความกว้าง (width variation) ของระบบการวัดคือการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความแม่นยำของระบบการวัด ซึ่งถ้าหากมีการจำแนกตามช่วงเวลาที่เกิดขึ้นแล้วจะได้รับการแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือความสามารถในการทำซ้ำหรือรีพีทะบิลิตี้ (repeatability) และความสามารถในการทำเหมือนหรือรีโพรดูซิบิลิตี้ (reproducibility) โดยที่รีพีทะบิลิตี้ของระบบการวัด หมายถึงค่าความแตกต่างในการวัดอย่างต่อเนื่องกับงานชิ้นเดียวกันด้วยเครื่องมือเดียวกันและด้วยพนักงานคนเดียวกัน ซึ่งโดยปกติจะใช้คาร์รีพีทะบิลิตี้ ในการประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดในระยะสั้น (short term measurement) ส่วนรีโพรดูซิบิลิตี้ของระบบการวัด หมายถึงค่าความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของการวัดกับงานชิ้นเดียวกันด้วยเครื่องมือเดียวกันแต่ต่างพนักงานกัน และโดยปกติจะใช้คาร์รีโพรดูซิบิลิตี้ในการประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดในระยะยาว (long term measurement) นอกจากนี้อาจจะกล่าวอย่างสั้น ๆ ว่า รีพีทะบิลิตี้ คือความผันแปรภายในเงื่อนไขการวัดเดียวกัน ในขณะที่รีโพรดูซิบิลิตี้ คือความผันแปรระหว่างเงื่อนไขการวัด ในที่นี้เงื่อนไขการวัดอาจหมายถึง พนักงานวัด กะงาน เป็นต้น ในการประเมินผลคาร์รีพีทะบิลิตี้และรีโพรดูซิบิลิตี้ของระบบการวัด (gage repeatability

and reproducibility: GR&R) หมายถึงการประเมินผลค่าผันแปรอันเนื่องมาจากการวัดค่าจริงของงานหนึ่งชิ้นแบบซ้ำ ๆ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันแล้วมีการเปลี่ยนเงื่อนไขไป

3.2.2 แผนภาพสาเหตุและผล (cause and effect diagram)

แผนภาพสาเหตุและผลหรือแผนภาพก้างปลา (fish bone diagram) เป็นแผนภาพที่ใช้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลของปัญหาที่พิจารณา โดยแผนภาพดังกล่าวจะได้มาจากการกำหนดหัวข้อของปัญหาที่ชัดเจน แล้วจึงทำการระดมสมองเพื่อหาสาเหตุอย่างเป็นระบบ แผนภาพสาเหตุและผลจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือการวิเคราะห์ความผันแปร (dispersion analysis) การจำแนกตามกระบวนการ (process classification) และการกำหนดรายการสาเหตุ (cause enumeration)

3.3 เฟสการวิเคราะห์ (Analyze Phase)

ในเฟสการวิเคราะห์จะนำข้อมูลจากเฟสการวัด ทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเครื่องมือทางสถิติที่นำมาใช้จะขึ้นอยู่กับปัญหาและกระบวนการ แต่เครื่องมือที่ใช้จะต้องสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุ และปัจจัยที่ทำให้เกิดความผันแปรกับปัญหา โดยศึกษาทั้งความผันแปรภายในกลุ่ม และความผันแปรระหว่างกลุ่ม ซึ่งมุ่งประเด็นเพื่อหาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับปัญหามากที่สุด จากปัจจัยในเฟสการวัด 30-50 ปัจจัยมุ่งให้เหลือเพียงแค่ 8-10 ปัจจัย เพื่อจะได้ทำการปรับปรุง

เครื่องมือที่ใช้ในเฟสการวิเคราะห์

1) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analyze of variance: ANOVA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของประชากรที่มีจำนวนประชากรมากกว่า 2 ชุด แนวความคิดเกี่ยวกับ ANOVA คือให้หาค่าความแตกต่างของข้อมูลทั้งหมดในรูปค่าความแปรปรวนแล้วพิจารณาว่าผลเป็นประการใด ถ้าค่าความแปรปรวนเป็นศูนย์ แสดงว่าปัจจัยที่ได้รับการควบคุมไม่มีผลต่อค่าปัจจัย ถ้าหากว่าความแปรปรวนมิได้เป็นศูนย์แล้ว เป็นไปได้ที่ผลมาจากปัจจัยที่ได้รับการควบคุมและสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม ซึ่งหลักการสำหรับ ANOVA คือเป็นการหาความแปรปรวนโดยรวม แล้วแยกออกเป็นความแปรปรวนเนื่องจากทรีตเมนต์และความแปรปรวนเนื่องจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม ซึ่งหมายถึงรีพีทอะบิลิตี้ แล้วพิจารณาเทอมความแปรปรวนเนื่องจากทรีตเมนต์ว่ามีปริมาณมากหรือไม่ เมื่อเทียบกับผลจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระหว่างเงื่อนไขการทดลองหรือรีโพรดิวซิเบิล

2) การวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวินิจฉัยและสร้างตัวแบบสำหรับความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ให้ความสนใจโดยกำหนดข้อสมมติให้ตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรทางคณิตศาสตร์ซึ่งสามารถควบคุมได้และตัวแปรตามเป็นตัวแปรสุ่ม โดยในซิกซ์ซิกม่าจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ผ่านมา (passive data)

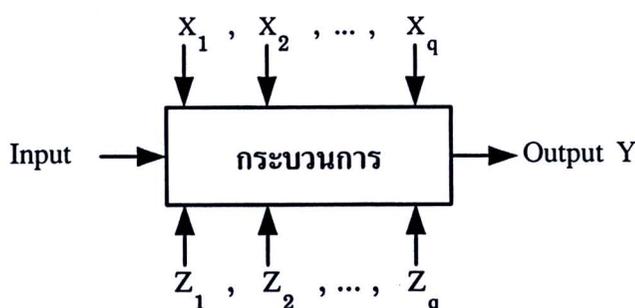
3.4 เฟสการปรับปรุง (Improve Phase)

ในเฟสการปรับปรุงจะนำข้อมูลที่ได้จากเฟสการวิเคราะห์ มาทำการลดความผันแปร โดยหาว่าปัจจัยตัวไหนที่มีผลต่อความผันแปร ทำให้ค่ากลางของกระบวนการอยู่ตรงกับค่าเป้าหมายโดยหาว่าปัจจัยตัวไหนทำให้ค่ากลางเลื่อนจากที่ควรจะเป็น ซึ่งจะนำปัจจัยจากเฟสการวิเคราะห์มาทำการกรองให้เหลือเพียง 4-8 ปัจจัย โดยเน้นการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ทำให้เกิดความผันแปรกับปัญหาที่เกิดขึ้น และทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยเครื่องมือที่ใช้ในเฟสการปรับปรุงมีดังนี้

3.4.1 การออกแบบการทดลอง (design of experiments: DOE) (ปารเมศ ชุตินา, 2545)

การออกแบบการทดลองนั้นเป็นการนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์มาช่วยในการวางแผนการทดลอง คำว่า “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment)” หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อว่าจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะสามารถทำให้หาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งจำเป็นต่อการหาข้อสรุปจากข้อมูลที่มีอยู่และถ้าการทดลองนั้นเกี่ยวข้องกับการผลิตผลการทดลอง วิธีการทดลองในเชิงสถิติเป็นวิธีเดียวที่จะสามารถนำมาวิเคราะห์ผลของการทดลองได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลองคือ การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้ โดยมีองค์ประกอบของการออกแบบการทดลองดังภาพที่ 11

ปัจจัยที่ควบคุมได้ (controllable factors)



ภาพที่ 11 องค์ประกอบของการออกแบบการทดลอง

หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลองคือ การทำการทดลองซ้ำ (replication) การสุ่ม (randomization) และบล็อกกิ้ง (blocking)

1) การทำการทดลองซ้ำ มีคุณสมบัติที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือประการแรก คือ การทำซ้ำสามารถทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ โดยตัวประมาณความผิดพลาดนี้จะกลายเป็นหน่วยการวัดชั้นพื้นฐาน สำหรับพิจารณาว่าความแตกต่างที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างในเชิงสถิติหรือไม่ ประการสุดท้ายคือถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นการทำการทดลองซ้ำจะทำให้ผู้ทำการทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี

2) การสุ่ม เป็นพื้นฐานหลักสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง ซึ่งในการสุ่มนั้นจำเป็นต้องกำหนดให้วัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบอิสระ ซึ่งการที่ทำการสุ่มในการทดลองนั้น จะทำให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

3) บล็อกกึ่ง เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่าง ๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกึ่ง

แนวทางในการออกแบบการทดลองการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องในการทดลองจะต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ล่วงหน้า ว่ากำลังศึกษาอะไรจะเก็บข้อมูลได้อย่างไรและจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนการดำเนินการอาจทำได้ดังนี้

1) ทำความเข้าใจถึงปัญหา ในขั้นตอนนี้ผู้ทำการทดลองจะต้องทำการพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลองและบ่อยครั้งที่เราจะต้องหาข้อมูลอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเช่นแผนกวิศวกรรม แผนกประกันคุณภาพ แผนกการผลิต เป็นต้น การระบุปัญหาอย่างชัดเจนนั้นจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้น ๆ

2) เลือกปัจจัย ระดับและขอบเขต ผู้ทดลองจำเป็นต้องเลือกปัจจัยที่จะเปลี่ยนแปลงระหว่างการทำทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยจะเปลี่ยนแปลงและกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง โดยจะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยนี้อย่างไรและจะวัดผลที่ได้ออกมาอย่างไร ดังนั้นผู้ทำการทดลองจึงจำเป็นต้องมีความรู้ในเกี่ยวกับกระบวนการเป็นอย่างมาก ซึ่งในการทดลองนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบว่าปัจจัยที่กำหนดขึ้นมีความสำคัญหรือไม่อย่างไร แต่ถ้าวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ การกรองปัจจัย (screening) จะต้องมี การกำหนดระดับจำนวนน้อย ๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ซึ่งจะมีผลต่อการจำกัดวงของการทดลอง

3) เลือกตัวแปรผลตอบ ในการเลือกตัวแปรผลตอบผู้ทดลองควรแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะเป็นตัวแรกผลตอบเป็นไปได้อย่างไรในการทดลองหนึ่งจะมีผลตอบหลายตัว จึงจำเป็นต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบและจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไรเสียก่อน จึงจะสามารถเริ่มทำการทดลองได้

4) เลือกการออกแบบการทดลอง ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้อย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะง่ายขึ้นขั้นตอนที่ง่ายมากการเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนการทำการทดลองซ้ำ) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้เก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าจะใช้บล็อกกึ่งหรือการสุ่มอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมากจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่าปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องหาว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดการแตกต่างและประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

5) ทำการทดลอง ในการทดลองนั้นจำเป็นต้องติดตามดูกระบวนการอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำให้การทดลองใช้ไม่ได้

6) วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เมื่อได้ผลลัพธ์จากการทดลองมาแล้ว จำเป็นต้องนำวิธีการทางสถิติมาใช้วิเคราะห์ข้อมูลถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดีและสามารถทำตามที่ได้วางแผนไว้อย่างถูกต้องแล้ววิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติคือ ทำให้ผู้ที่มิชำนาญในการตัดสินใจสามารถตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพและถ้านำเอาความรู้ทางด้านสถิติมารวมกับความรู้ทางด้านวิศวกรรม ความรู้ทางด้านกระบวนการและสามัญสำนึก จะทำให้ข้อสรุปที่ได้มามีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

7) สรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้วผู้ทำการทดลองจำเป็นต้องหาข้อสรุปและแนวทางในการปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้นได้โดยในขั้นตอนนี้สามารถนำเอากราฟเข้ามาช่วย เพื่อยืนยันผลที่ได้ควรทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้น

รูปแบบในการออกแบบการทดลอง สามารถแบ่งได้กว้าง ๆ ดังต่อไปนี้

1) การออกแบบการทดลองเมื่อมีปัจจัยเดียว (single factor experiment)

ในการออกแบบการทดลองนี้ จะเป็นการเปรียบเทียบผลของตัวแปรที่สนใจเมื่อมีเพียงปัจจัยเดียวที่สนใจ และระดับของปัจจัยมีมากกว่า 2 ระดับ โดยที่สามารถอธิบายการทดลองนี้โดยใช้สมการทางสถิติเชิงเส้นตรงได้ดังนี้

$$Y_{ij} = \mu + \tau + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

2) การออกแบบการทดลองหลายปัจจัยแบบแฟคตอเรียล (factorial design experiment)

ในการออกแบบการทดลองพบว่าหลาย ๆ การทดลองจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัย ในการศึกษาดังกล่าวจะทำให้สามารถทราบถึงอิทธิพลหลัก (main effect) ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ถึงความแตกต่างของผลกระทบระหว่างระดับของปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบกับระดับหนึ่งของอีกหนึ่งปัจจัย

ตัวแบบทางสถิติของการทดลองเมื่อมีปัจจัย 2 ปัจจัย สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (3)$$

3) การออกแบบการทดลองเชิงแฟคตอเรียลแบบ 2^k (2^k factorial design experiment) (ปารเมศ ชุตินา, 2545)

การทดลองที่สนใจศึกษาผลของหลายปัจจัย (multiple factor) นั้น การออกแบบการทดลองเชิงแฟคตอเรียล จะเป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะการทดลองตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป นอกจากจะมีอิทธิพลจากปัจจัยหลักแล้ว ยังเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (interaction effect) ได้ด้วย โดยผลที่ได้เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยนั้น ๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก ซึ่งกรณีที่มี 2 ปัจจัยหลักที่สนใจจะแสดงอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคตอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และระดับปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลองซ้ำจะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลองหลัก และโดยปกติจะมีจำนวนเรปลิเคตทั้งหมด n ครั้ง

กำหนดให้ Y_{ijk} คือ ผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) และปัจจัย B อยู่ระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) สำหรับเรปลิเคตที่ k ($k = 1, 2, \dots, n$) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟคตอเรียล 2 ปัจจัย สามารถแสดงในตารางที่ 5



ตารางที่ 5 รูปแบบการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย

		Factor B			
		1	2	...	b
Factor A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$		$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$		$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$
	...				
	a	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$		$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$

ข้อมูลจากการทดลองสามารถเขียนในรูปของแบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) คือ

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

โดยที่ μ หมายถึง ผลเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด ; τ_i หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของปัจจัย A ; β_j หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของปัจจัย B ; $(\tau\beta)_{ij}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ β_j ; ε_{ijk} หมายถึง องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม สมมติว่าปัจจัยทั้งคู่มีค่าตายตัว (fixed) และผลการทดลอง (treatment Effect) หมายถึง ส่วนที่เบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมด ดังนั้น $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ และ $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ ในทำนองเดียวกันสมมติว่าผลที่เกิดจากอิทธิพลร่วมมีค่าตายตัว และกำหนดว่า $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = 0$ เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้มีจำนวนเรพลีเคต n ครั้ง ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ abn

ในการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย ทั้งปัจจัยที่เกิดจาก A (แถว) และ B (คอลัมน์) มีความสำคัญเท่ากัน ดังนั้นเราต้องการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย A หรือกล่าวได้ว่า

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ at least one } i$$

สมมติฐานของผลที่เกิดจากปัจจัย B

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ at least one } j$$

นอกจากนั้นแล้ว อิทธิพลร่วมที่เกิดจากปัจจัย A และ B มีนัยสำคัญหรือไม่หรือ

กล่าวได้ว่า

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$$

$$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ at least one pair } (i, j)$$

กำหนดให้

$y_{i..}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่ i ของปัจจัย A

$y_{.j.}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่ j ของปัจจัย B

$y_{ij.}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ข้อมูลตำแหน่งที่ ij .

$y_{...}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดที่ได้

$\bar{y}_{i..}$, $\bar{y}_{.j.}$, $\bar{y}_{ij.}$ และ $\bar{y}_{...}$ เป็นค่าเฉลี่ยของแถว คอลัมน์ เซลล์และผลรวม

ทั้งหมด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y_{i..} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{bn} \quad i = 1, 2, \dots, a$$

$$y_{.j.} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{.j.} = \frac{y_{.j.}}{an} \quad j = 1, 2, \dots, b$$

$$y_{ij.} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{ij.} = \frac{y_{ij.}}{n} \quad i = 1, 2, \dots, a \text{ และ } j = 1, 2, \dots, b$$

$$y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{...} = \frac{y_{...}}{abn} \quad i = 1, 2, \dots, a ;$$

$$j = 1, 2, \dots, b \text{ และ } k = 1, 2, \dots, n$$

ค่าผลรวมทั้งหมดกำลังสองเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} y_{ij.}^2 &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 = \left[\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...}) \right. \\ &\quad \left. + (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij.}) \right]^2 \\ &= bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + an \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 \\ &\quad + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 \\ &\quad + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2 \end{aligned} \quad (5)$$

สังเกตได้ว่าค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองจะถูกแบ่งออกเป็นผลรวมของกำลังสองที่เกิดขึ้น จากอันตรกิริยาระหว่าง A และ B (SS_{AB}); และผลรวมของกำลังสองที่เกิดความ

ผิดพลาด (SS_E) และจากพจน์สุดท้ายของสมการ (5) จะต้องมีอย่างน้อย 2 เรพลิเคต เพื่อให้จะสามารถคำนวณค่าของผลรวมกำลังสองที่เกิดค่าผลรวมแก้ไขแล้วทั้งหมดของกำลังสอง ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_E \quad (6)$$

จำนวนของระดับชั้นความเสรีสำหรับผลรวมของกำลังสองแต่ละค่าคือ

ปัจจัย	ระดับชั้นความอิสระ (degree of freedom)
A	a-1
B	b-1
AB Interaction	(a-1)(b-1)
Error	ab(n-1)
Total	abn-1

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย 2 ปัจจัย (ANOVA Table)

แหล่ง	ผลรวมกำลังสอง	Degree of Freedom	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MS)	ตัวทดสอบ (F_0)
A	$\frac{\sum_{i=1}^a y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn}$	a-1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	$\frac{\sum_{j=1}^b y_{.j.}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn}$	b-1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
AB Interaction	$\frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}}{n} - SS_A - SS_B$	(a-1)* (n-1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	$SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$	ab(n-1)	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Total	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$	abn-1		

สามารถคำนวณหาค่าของ SS_T , SS_A , SS_B และ SS_E ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{\text{Subtotals}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{AB} = SS_{\text{Subtotals}} - SS_A - SS_B$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad \text{หรือ} \quad SS_E = SS_T - SS_{\text{Subtotals}}$$

ความหมายของสัญลักษณ์ในตารางที่ 6 ได้แก่

y คือ ค่าของตัวแปรตาม

a คือ จำนวนระดับปัจจัยของปัจจัย A

b คือ จำนวนระดับปัจจัยของปัจจัย B

n คือ จำนวนการทดลองซ้ำ

A คือ ปัจจัย A

B คือ ปัจจัย B

AB คือ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A และ B

MS_A , MS_B , MS_{AB} คือ กำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย A, B และ AB ตามลำดับ

MS_E คือ กำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน

SS_A , SS_B , SS_{AB} คือ ผลรวมกำลังสองของ A, B และ AB ตามลำดับ

SS_E คือ ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

โดยทั่วไปการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะใช้การทดสอบค่า F-Test เป็นเครื่องมือสำคัญ ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถที่จะรู้ผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยร่วมระหว่างตัวแปรและความคลาดเคลื่อนในการทดลองด้วย

3.5 เฟสการปรับปรุง (Improve Phase)

กระบวนการควบคุมจะเป็นกระบวนการในการรักษาสภาพหรือระดับคุณภาพเอาไว้ ถ้าพิจารณาในมุมมองของการแก้ปัญหาจะเห็นว่า การควบคุม หมายถึง การแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างเป็นครั้งคราว (sporadic spike) ซึ่งสามารถกำหนดองค์ประกอบของกระบวนการได้ตามลำดับ ดังนี้คือ

- 1) การเลือกหัวข้อควบคุม (control subject)
- 2) การกำหนดระบบการวัด
- 3) การกำหนดมาตรฐานของสมรรถนะ
- 4) การวัดผลสมรรถนะจริง
- 5) การเปรียบเทียบกับมาตรฐาน
- 6) การแก้ปัญหา

ในกระบวนการควบคุมกระบวนการนี้ จะมีเทคนิคการควบคุมจำนวนมาก โดยเทคนิคเหล่านี้จะอยู่บนแนวความคิด 2 ประการคือ การป้องกัน (prevention) และการตรวจจับ (Detection) กล่าวคือ

การป้องกัน หมายถึง การป้องกันสาเหตุหรือกลไกของข้อบกพร่องหรือลักษณะข้อบกพร่องจากการเกิดขึ้น การลดอัตราการเกิดขึ้นของสาเหตุหรือกลไกของข้อบกพร่องดังกล่าว การตรวจจับ หมายถึง การตรวจจับสาเหตุหรือกลไกของข้อบกพร่องหรือลักษณะข้อบกพร่องเพื่อนำไปสู่การปฏิบัติการแก้ไขต่อไปหรืออาจจะกล่าวสั้น ๆ ว่าการตรวจจับเป็นการตรวจพบสิ่งที่เกิดขึ้นแล้ว ในขณะที่การป้องกันจะเป็นการตรวจพบในขณะที่ข้อบกพร่องยังไม่เกิดขึ้น

วิธีการควบคุมกระบวนการอาจจะได้รับการจำแนกออกได้หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

- 1) วิธีป้องกันความเผอเรอ (Poka Yoke)
- 2) วิธีการควบคุมด้วยสายตา (visual control)
- 3) วิธีการควบคุมด้วยตนเอง (self control)
- 4) วิธีการควบคุมกระบวนการโดยอาศัยสถิติ (SPC)
- 5) วิธีการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจจำแนกออกเป็นวิธีการตรวจสอบแบบ 100% หรือตรวจสอบแบบครั้งคราว (spot check) โดยใช้แผนการชักสิ่งตัวอย่าง

วิธีการควบคุมดังกล่าวจะต้องได้รับการประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมกับระบบสถานการณ์ เพราะแต่ละวิธีการให้ประสิทธิผลด้านการควบคุมที่แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามซิกซ์ซิกม่าสามารถลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไม่ว่าจะเป็นเรื่องของเวลา ต้นทุนของงานที่ต้องนำกลับไปแก้ไขหรือทำใหม่ บริษัทสามารถประหยัดต้นทุนและสิ่งที่สำคัญที่ต้องคำนึงคือไม่ใช่ทุกกระบวนการจะจำเป็นต้องไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดหรือต้องพัฒนาระบบซิกซ์ซิกม่า แต่ควรเลือกกระบวนการที่มีความสำคัญ

ที่สุดหรือกระบวนการที่สร้างมูลค่าให้แก่องค์กรมากที่สุด เนื่องจากการพัฒนาระบบจะมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุนและผลกำไรที่ได้จากกระบวนการโดยใช้การจำลองสถานการณ์ซึ่งเป็นตัวแบบการจำลองสถานการณ์เป็นตัวแทนเชิงปริมาณที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถสร้างให้เข้ากับสภาพปัญหาทุกรูปแบบ โดยใช้หลักการทางสถิติการจำลองสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์สภาพการดำเนินงาน คาดการณ์สิ่งที่จะเกิดในอนาคต ประเมินผลของทางเลือกต่างๆ ช่วยให้สามารถวางแผน แก้ปัญหาและตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล (Monte Carlo sampling technique) และเพื่อที่จะเน้นถึงความจำเป็นในการใช้เทคนิคดังกล่าว การจำลองแบบปัญหาจึงถูกเรียกว่า การจำลองแบบปัญหาด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล (Monte Carlo simulation)

3.5.1 แบบจำลองสถานการณ์ (simulation) (พินิตา พานิชกุล, ยุทธภูมิ วงศ์วัฒนฤกษ์, 2546)

การจำลองสถานการณ์ คือการสร้างสถานการณ์สมมติ โดยอาศัยข้อเท็จจริงเสมือนสถานการณ์จริง เพื่อทดลองตัดสินใจแก้ปัญหาและวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองก่อนนำไปใช้แก้ไขปัญหาในสถานการณ์จริงต่อไป ตัวอย่างการทดลองตัดสินใจ เช่น การวิเคราะห์เชิงเงื่อนไข (what if analysis)

ในทางวิชาการได้ให้คำนิยามของคำว่า “Simulation” แตกต่างกันไป ดังนี้

- 1) นักเศรษฐศาสตร์ กล่าวว่า Simulation คือ แบบจำลองใดๆ ที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์เชิงเงื่อนไข
- 2) ผู้เชี่ยวชาญทางด้านทรัพยากรบุคคล กล่าวว่า Simulation คือแบบฝึกหัดการฝึกอบรมพนักงาน ที่ประกอบไปด้วยบทบาทต่างๆ ที่ผู้ฝึกอบรมต้องแสดง
- 3) นักบริหาร กล่าวว่า แบบจำลองสถานการณ์ คือแบบจำลองที่ใช้ในการตัดสินใจเพื่อแก้ปัญหาภายใต้สถานการณ์ที่มีความไม่แน่นอน ซึ่งมีแนวทางในการแก้ไขด้วยการสุ่มค่าจากการแจกแจงความน่าจะเป็นของผลลัพธ์

จากนิยามที่แตกต่างกันข้างต้น ทำให้ทราบว่าแบบจำลองสถานการณ์ ถูกนำมาใช้ในระบบสายสนับสนุนการตัดสินใจกันมากทั้งนี้ เนื่องจากปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินธุรกิจในปัจจุบันมีความซับซ้อนสูงต้องอาศัยการสุ่มค่าในการตัดสินใจ อีกทั้งยังอยู่ภายใต้สภาวะการณ์ที่ไม่มีความแน่นอนและมีความเสี่ยง กล่าวคือปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นเป็นปัญหาแบบกึ่งโครงสร้างและไม่มีโครงสร้าง จึงยากต่อการอธิบายและแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองเพื่อการหาค่าที่ดีที่สุด (optimization) หรือแบบจำลองที่ใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ เช่น การโปรแกรมเชิงเส้น เป็นต้น

3.5.2 คุณลักษณะสำคัญของแบบจำลองสถานการณ์

แบบจำลองสถานการณ์มีคุณลักษณะที่แตกต่างไปจากแบบจำลองชนิดอื่น ๆ ทั่วไป ดังนี้

- 1) มีการตรวจสอบความถูกต้อง แบบจำลองสถานการณ์ทุกชนิดต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องก่อนเป็นอันดับแรกเพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาด มีการตรวจสอบทั้ง logic และการคำนวณว่าถูกต้องหรือไม่
- 2) มีเหตุผล เป็นการตรวจสอบว่าผลที่ได้ต้องอยู่ในขอบเขตของผลลัพธ์ที่คาดคะเนไว้และแบบจำลองนั้นต้องทำงานอย่างถูกต้อง โดยสามารถนำผลลัพธ์นั้นมาวิเคราะห์ได้
- 3) ลดความเบี่ยงเบน โดยใช้ค่าสุ่มเดียวกันเพื่อลดความแปรผันและเพิ่มความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบที่แตกต่างกันได้
- 4) มีลักษณะเป็นการเลียนแบบสถานการณ์จริงมากกว่าเป็นการนำเสนอสถานการณ์จริง
- 5) มีลักษณะเป็นการบรรยายหรือคาดการณ์สถานการณ์จริงที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ กัน
- 6) เป็นแบบจำลองที่ใช้กับปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง

3.5.3 ประโยชน์ของการจำลองสถานการณ์

การที่ระบบสนับสนุนการตัดสินใจมีการใช้แบบจำลองสถานการณ์ปัญหาต่าง ๆ นั้น เนื่องจากก่อให้เกิดประโยชน์ ดังนี้

- 1) การจำลองสถานการณ์เป็นทฤษฎีที่มีการใช้งานเพื่อคาดการณ์ในอนาคตอย่างตรงไปตรงมา
- 2) การจำลองสถานการณ์สามารถทำงานที่มีเวลาเข้าไปเกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก ๆ ได้ดี
- 3) การจำลองสถานการณ์ค่อนข้างเป็นการอธิบายให้เห็นเป็นรูปร่างมากกว่าการใช้เครื่องมือธรรมดา
- 4) ผู้สร้างระบบการตัดสินใจ สามารถติดต่อกับผู้ใช้หรือผู้บริหารได้ เพื่อจะได้รับรู้เรื่องราวกับปัญหาได้อย่างลึกซึ้ง
- 5) สามารถสร้างแบบจำลองสถานการณ์ที่มาจากมุมมองของผู้บริหารได้
- 6) แบบจำลองสถานการณ์ถูกสร้างขึ้นเฉพาะเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่ง ไม่สามารถนำไปแก้ปัญหาคืออื่น ๆ ได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้บริหารต้องการ กล่าวคือส่วนประกอบของแบบจำลองที่ต้องสร้างขึ้นนี้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับเหตุการณ์จริงมากที่สุดนั่นเอง
- 7) แบบจำลองนี้ สามารถจัดการกับปัญหาได้มากมายหลายชนิด เช่น การจัดเก็บคลังสินค้า (inventory) และการจัดการทรัพยากรบุคคล (human resource) อีกทั้งยัง

สามารถทำหน้าที่ในเชิงบริหารระดับสูงได้อีกด้วย เช่น การวางแผนในระยะยาว เป็นต้น ดังนั้นผู้บริหารทั้งหลายจึงสามารถนำแบบจำลองสถานการณ์มาใช้จัดการสิ่งต่างๆ ได้ทุกช่วงเวลา

8) ผู้บริหารสามารถทำการทดลองป้อนตัวแปรที่แตกต่างกันไปตามสถานการณ์ลงในแบบจำลอง เพื่อดูผลลัพธ์ที่เป็นทางเลือกต่างๆ จากนั้นจึงเลือกทางเลือกที่ดีที่สุดเพียงทางเดียว

9) โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองชนิดนี้มักจะนำมาใช้เพื่อรวบรวมปัญหาของเหตุการณ์จริงที่มีความซับซ้อน กล่าวคือ หากเป็นปัญหาง่ายๆ ก็ไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองชนิดนี้ ตัวอย่างเช่น อาจใช้การจำลองสถานการณ์เพื่อกระจายความน่าจะเป็นจริงๆ มากกว่าการนำมาใช้เพื่อการประมาณการธรรมดา ซึ่งการกระจายนั้นเรากระจายโดยนำทฤษฎีมาใช้ด้วย

10) สามารถใช้การจำลองสถานการณ์เพื่อเป็นเครื่องมือในการวัดประสิทธิภาพของตัวแปรได้ง่ายมาก และยังสามารถสะท้อนกลับมาถึงผู้ตัดสินใจได้โดยตรง

11) ในระบบ DSS ส่วนมากจะนำการจำลองสถานการณ์ มาใช้เป็นเครื่องมือสร้างแบบจำลองสำหรับปัญหาที่ไม่มีโครงสร้างเท่านั้น

12) สามารถหาผลิตภัณฑ์เสริม “Add-In” ที่เกี่ยวกับการจำลองสถานการณ์เพื่อนำมาใช้กับโปรแกรมกระดานคำนวณได้มากมาย เช่น @Risk เป็นต้น

3.5.4 ข้อจำกัดการจำลองสถานการณ์

ถึงแม้ว่าแบบจำลองสถานการณ์จะสามารถจำลองและหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่มีความซับซ้อนสูงได้ อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดบางประการที่ผู้ตัดสินใจควรรับทราบไว้ในเบื้องต้น ดังนี้

- 1) ไม่สามารถรับประกันได้ว่าเป็นหนทางในการแก้ไขปัญหาที่ดีที่สุด
- 2) บ่อยครั้งที่การสร้างแบบจำลองสถานการณ์จะต้องใช้งบประมาณค่อนข้างสูง อีกทั้งยังสิ้นเปลืองเวลาในการสร้าง
- 3) แนวทางในการแก้ไขปัญหาและผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาการจำลองสถานการณ์ โดยทั่วไปแล้วไม่สามารถนำไปใช้กับปัญหาอื่น ๆ ได้ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ทำให้ทราบว่าเหตุใดการจำลองสถานการณ์จะไม่นำมาประกอบการค้นหาผลลัพธ์เลย
- 4) ซอฟต์แวร์ที่ใช้สร้างการจำลองสถานการณ์ใช้งานได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นผู้ที่ใช้จะต้องมีทักษะความรู้โดยเฉพาะจึงจะสามารถสร้างการจำลองสถานการณ์ได้

3.5.5 หลักการสร้างแบบจำลองสถานการณ์

การสร้างการจำลองสถานการณ์ในที่นี้ รวมถึงการจำลองของระบบขึ้นมาจริง และทำการสร้าง แล้วทดลองซ้ำหลายๆ ครั้ง ซึ่งการสร้างนั้นแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) นิยามปัญหา เป็นขั้นตอนที่ผู้ตัดสินใจจะต้องตรวจสอบปัญหาที่เกิดขึ้น และจัดให้เป็นหมวดหมู่ (ซึ่งในที่นี้จะต้องสมมติว่าเป็นปัญหาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เพียง

อย่างเดี่ยว เพื่อหาแนวทางในการตัดสินใจ) นอกจากนี้ต้องมีการกำหนดขอบเขตของระบบ รวมทั้งจะต้องปรับปรุงให้รูปการของปัญหามีความชัดเจนและเข้าใจง่ายขึ้น

2) สร้างแบบจำลองสถานการณ์ (simulation model construction) ในขั้นตอนนี้จะทำการกำหนดค่าตัวแปรเหล่านั้น รวมถึงการรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นต่อการสร้างการจำลองสถานการณ์ในขั้นตอนนี้ มักนำ Flow Chart มาอธิบายกระบวนการ จากนั้นจึงเขียนโปรแกรมตาม Flow Chart ที่สร้างขึ้น

3) ทดสอบและตรวจสอบความถูกต้อง (model testing and validation) เนื่องจากแบบจำลองสถานการณ์ จะต้องถูกนำไปศึกษาแทนเหตุการณ์จริง ดังนั้น ในขั้นตอนนี้ จะต้องทดสอบและค้นหาสิ่งที่ผิดพลาดทั้งหมดเพื่อให้มั่นใจได้ว่าสามารถนำไปใช้ในเหตุการณ์จริงได้อย่างสมบูรณ์

4) ออกแบบสถานการณ์เพื่อการทดลอง (experimental design) หลังจากที่ได้แบบจำลองได้ทำการพิสูจน์จากขั้นตอนที่แล้ว จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง เพื่อทำการจำลองสถานการณ์ขึ้น 3 กรณี ได้แก่ กรณี Best-case กรณี Worst-case และกรณี Median-case ซึ่งการทำเช่นนี้จะช่วยให้ผู้ตัดสินใจสามารถกำหนดขอบเขตของตัวแปรที่ใช้ในการทำงานของการจำลองสถานการณ์ได้ และยังช่วยในการแก้ไขข้อบกพร่องในแบบจำลองสถานการณ์ที่สร้างเสร็จแล้วด้วย

5) การควบคุมการทดลอง (experimental conduction) ในขั้นตอนนี้ เป็นการทดลองใส่ค่าตัวแปรจริง ๆ ในแบบจำลองเพื่อแสดงสถานการณ์ต่าง ๆ ตามตัวแปรทดลองเปลี่ยนไป แล้วนำเสนอผลลัพธ์ออกมาให้เห็น

6) การประเมินผลลัพธ์จากการทดลอง (result evaluation) จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการประเมินผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งหากเป็นที่น่าพอใจก็จะนำไปใช้ในการแก้ปัญหาทันที แต่ถ้าไม่พอใจ อาจเลือกย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 5 หรืออาจย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2 เพื่อสร้างแบบจำลองสถานการณ์ใหม่อีกครั้ง

7) การนำไปใช้ในการแก้ไขปัญหาจริง (implementation) นำไปใช้ เช่นเดียวกับแบบจำลองชนิดอื่น ๆ แต่จะดีกว่าตรงที่ผู้บริหารนั้นสามารถเลือกดูสถานการณ์ต่าง ๆ ได้มากกว่า

การจำลองแบบปัญหาด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล เป็นการจำลองสถานการณ์ ที่ใช้เทคนิคการสุ่มตัวอย่างหรือที่เรียกตัวสุ่มขึ้นมาและสร้างความน่าจะเป็นที่เหมาะสมตัวเลขสุ่มที่ใช้ อาจได้จากตารางตัวเลขสุ่ม (random number table) ส่วนค่าความน่าจะเป็นสะสม คือความน่าจะเป็นสะสมของข้อมูลที่ต้องการอาจได้มาจากข้อมูลในอดีตหรือการทดลองหรือจากลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็น ซึ่งมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ ดังนี้

1) สร้างการกระจายของความน่าจะเป็นของข้อมูล (probability distribution)

- กำหนด
- 2) สร้างตารางการกระจายของความน่าจะเป็นสะสม สำหรับแต่ละตัวแปรที่กำหนด
 - 3) กำหนดช่วงตัวเลขสุ่ม (random number: R)
 - 4) คำนวณค่าตัวเลขสุ่มหรือจากคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถเลือกแถวหรือคอลัมน์ใดก็ได้ แต่ต้องเป็นระบบเดียวกัน
 - 5) สร้างตัวแบบการจำลองสถานการณ์ให้เข้ากับปัญหาตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้
 - 6) ทดสอบตัวแบบจำลองที่สร้างขึ้นว่าได้ผลตามเป้าหมายที่วางไว้หรือไม่
 - 7) เมื่อผลการทดลองเป็นไปตามเป้าหมาย จะกำหนดจำนวนครั้งในการจำลองสถานการณ์
 - 8) ทำการจำลองสถานการณ์เพื่อหาค่าเฉลี่ยที่ต้องการ

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสิน

Fawaz (2003) ศึกษาถึงการนำหลักการของสินไปใช้กับกระบวนการผลิตที่มีลักษณะการผลิตแบบต่อเนื่อง (continuous process) โดยจะเน้นศึกษาในอุตสาหกรรมเหล็กเป็นหลัก จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ คือการนำเทคนิคสินไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมที่มีการผลิตแบบต่อเนื่อง ซึ่งตามปกตินิยมใช้เทคนิคสินกับอุตสาหกรรมที่มีการผลิตแบบเป็นช่วงเวลา (discrete process) เท่านั้นและสามารถทราบว่าจะประโยชน์จากการนำเทคนิคสินไปใช้งานในงานแต่ละงานเป็นอย่างไร ถึงแม้ว่าอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิตเป็นแบบช่วงเวลา จะมีลักษณะบางอย่างที่มีลักษณะร่วมกันที่เหมือนกัน แต่ก็ยังมีหลายอย่างที่มีความแตกต่างกันอย่างมากเช่นกัน ดังนั้นการปรับแต่งกระบวนการทั้งแบบเป็นช่วงเวลาและแบบต่อเนื่อง จะมีบางอย่างที่คาบเกี่ยวกัน (overlap) งานวิจัยนี้จึงพยายามที่จะแสดงให้เห็นว่า เทคนิคสินสามารถนำมาใช้งานได้สำหรับอุตสาหกรรมที่มีการผลิตทั้งแบบเป็นช่วงเวลาและแบบต่อเนื่อง ซึ่งนำเทคนิคสินเข้าไปใช้ในกระบวนการที่มีการผลิตเป็นแบบช่วงเวลาโดยได้ทำการวิจัยบริษัทเหล็กขนาดใหญ่ (ใช้นามสมมติว่าบริษัท ABS) เทคนิคหนึ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือการสร้างแผนที่คุณค่า โดยเริ่มต้นด้วยการสร้างแผนภาพสายธารคุณค่าแสดงสถานะปัจจุบัน (current state VSM) ของบริษัทโดยมีการระบุแหล่งที่มาของ ของเสีย (waste) และนำเทคนิคสินเข้าไปช่วยแก้ไขเพื่อเพิ่มมูลค่าในกระบวนการ จนพัฒนาเป็นแผนภาพสายธารคุณค่าสถานะอนาคต (future state VSM) เพื่อให้การใช้เทคนิคสินเกิดประโยชน์อย่างมากในการสร้างแผนภาพสายธารคุณค่า ได้นำแบบจำลองสถานการณ์ (simulation model) มาพัฒนาบริษัท ABS และทำการออกแบบการทดลองเพื่อใช้วิเคราะห์เอาท์พุทของแบบจำลองสถานการณ์สำหรับการใช้สินหลาย ๆ ลักษณะ Spann et al. (1997) พบว่าการผลิตแบบสินที่นำมาประยุกต์ใช้กับโรงงานผู้ผลิตที่มีขนาดกลางและเล็ก (small and

medium enterprises: SMEs) ส่วนมากจะมุ่งเน้นในเรื่องของคุณภาพ (quality) รอบเวลา (cycle times) และการตอบสนองต่อลูกค้า (customer responsiveness) เป็นหลัก โดยได้ระบุถึงเครื่องมือที่นำมาประยุกต์ใช้กับการผลิตแบบลีนว่าประกอบด้วยกิจกรรม 5ส. การควบคุมโรงงานด้วยสายตา (visual factory) การสร้างทีมงาน การใช้เครื่องมือทางด้านคุณภาพ (quality tools) การบำรุงรักษาเชิงป้องกันโดยรวม (total preventive maintenance: TPM) การลดเวลาในการติดตั้งเครื่องจักร (single minute exchange of die: SMED) การจัดสมดุลการผลิต (line balancing), การไหลแบบชิ้นเดียว (one piece flow), และการใช้ระบบคัมบัง (Kanban system) William et al. (2002) สาธิตให้เห็นถึงปัญหาในการตัดสินใจเลือกเครื่องจักรมาทดแทนตามแนวคิดของระบบการผลิตแบบลีน และได้สาธิตวิธีการใช้แผนภาพสายธารคุณค่า (VSM) เป็นเครื่องมือในการสร้างแผนภาพสายธารคุณค่าสถานะปัจจุบันและอนาคต ที่ต้องการและได้จัดทำ Roadmap แสดงวิธีที่ VSM สามารถจัดหาข้อมูลที่เป็นในการวิเคราะห์ปัญหาในการตัดสินใจเลือกเครื่องจักรมาทดแทน นอกจากนั้นยังได้คำนวณต้นทุนที่ประหยัดได้ตามหลักเศรษฐศาสตร์ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทำแผนภาพสายธารคุณค่าสถานะอนาคต

4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง

สองเมือง ธรรมศิริ (2543) ทำการศึกษาองค์ประกอบที่เหมาะสมของกระบวนการม้วนหลอดไฟฟ้าฟลูออเรสเซนต์ชนิดวงแหวน ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการม้วนหลอด คือ การเบี้ยว แบนแตก จากการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาเบื้องต้นพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการผลิต คือ อุณหภูมิ ในการเผาหลอดก่อนการม้วน ความเร็วในการม้วน ความดันระหว่างการม้วนและความดันรอเซตตัวของหลอดใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองของทากูชิ ผลที่ได้จากการวิจัยพบว่า อุณหภูมิการเผาหลอด ความเร็วในการม้วนหลอด ความดันในระหว่างการม้วนหลอดและความดันรอการเซตตัวของหลอด เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการแตก เบี้ยว แบน ของหลอดองค์ประกอบที่เหมาะสมของกระบวนการม้วนหลอดไฟฟ้าฟลูออเรสเซนต์ชนิดวงแหวน คือค่าความดันระหว่างม้วนหลอด 0.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิของเตาเผาหลอดระดับ 1 ค่าความเร็วในการม้วนหลอด 1.75 วินาทีต่อรอบ ค่าความดันรอการเซตตัวของหลอดระดับ 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการใช้ระดับของปัจจัยดังกล่าวในกระบวนการผลิต พบว่าปัญหาจากการแตกของหลอดขนาด 32 วัตต์ จากเดิม 5.25% (5,250 หลอดต่อเดือน) ลดลงเหลือ 3.71% (3,710 หลอดต่อเดือน) หรือสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ 739,200 บาทต่อปี Spencer & Edward (1996) ได้ทำการศึกษาการวัดค่าอุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature: Tg) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อน ด้วยเครื่องมือวัดค่าความแตกต่างของอัตราไหลของความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิงภายใต้โปรแกรมอุณหภูมิเดียวกัน (differential scanning calorimeter: DSC) โดยต้องการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการวัดค่าอุณหภูมิสภาพแก้วเพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการทำงานโดยทำการเลือกปัจจัยดังนี้ 1) น้ำหนักของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบ (mg) 2) อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ตั้งในการวัดค่า ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) โดยทำ

การทดลองกับน้ำยาเรซินที่มีค่า $T_g = 165^{\circ}\text{C}$ โดยได้ผลการทดลองดังนี้ ทำการทดลองวัดค่าอุณหภูมิสภาพแก้วโดยการเปลี่ยนน้ำหนักของตัวอย่างจาก 6 mg , 13 mg , 25 mg , 31 mg , 39 mg , 52 mg ปรากฏว่าค่าอุณหภูมิสภาพแก้วมีความแตกต่างกันเพียง 3°C ($156.5^{\circ}\text{C} - 157.8^{\circ}\text{C}$) สำหรับการทดลองเปลี่ยนการตั้งค่าการเพิ่มอุณหภูมิในการวัดค่า ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) โดยทำการตั้งค่าดังนี้ $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, และ $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ซึ่งทำการวัดค่าอุณหภูมิสภาพแก้วได้ตามลำดับดังนี้ 154°C , 156°C , 158°C ซึ่ง Spencer & Edward ได้สรุปว่า น้ำหนักของตัวอย่างไม่มีผลต่อค่าอุณหภูมิสภาพแก้ว แต่การตั้งค่าการเพิ่มอุณหภูมิในการวัดค่าอุณหภูมิสภาพแก้วมีต่อค่าอุณหภูมิสภาพแก้วดังนี้ ในการวัดค่าอุณหภูมิสภาพแก้วในแต่ละการทดลองต้องทำการระบุค่าการเพิ่มอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) ของแต่ละการทดลองให้ชัดเจนและใช้ค่าเดียวกัน ราชา เอี่ยมมา (2543) ทำการวิเคราะห์หาจุดเหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมขั้นตอนกดขึ้นรูปในกระบวนการผลิตจอกแก้ว หลังจากหยุดเปลี่ยนแม่พิมพ์ที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานแล้วเริ่มเดินเครื่องจักรใหม่จะทำให้มีของเสียจากค่าความโค้งผิวภายในจำนวนมาก ซึ่งมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ลดต่ำลง โดยพารามิเตอร์ที่นำมาศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิโอเวอร์ชูท อัตราการเปิด-ปิดบาสเก็ทวาล์ว อัตราการเปิดลมในจังหวะที่ 1 จำนวนแม่พิมพ์ที่ร้อนถึงจุดใช้งานในจังหวะที่ 1 อัตราการเปิดลมในจังหวะที่ 2 จำนวนโมลที่ร้อนถึงจุดใช้งานในจังหวะที่ 2 ในการวัดผลจากการทดลองมี 2 ลักษณะคือ จำนวนของจอกแก้วที่ได้จากกระบวนการ และเวลาของการควบคุมค่าความโค้งจนเข้าสู่สภาวะปกติจากการวิจัยสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในกระบวนการขึ้นรูปคืออุณหภูมิโอเวอร์ชูทจำนวนแม่พิมพ์ที่ร้อนถึงจุดใช้งานในจังหวะที่ 1 และอัตราการเปิดลมในจังหวะที่ 1 โดยระดับที่เหมาะสมของอุณหภูมิโอเวอร์ชูท คือ 13°C จำนวนแม่พิมพ์ที่ร้อนถึงจุดใช้งานในจังหวะที่ 1 เท่ากับ 6 ชั้น และค่าอัตราการเปิดลมในจังหวะที่ 1 คือ 80% ของระดับปกติ หรือ 1,160 มิลลิเมตรน้ำและเมื่อนำผลวิเคราะห์ที่ได้ใช้ไปในการผลิตสามารถลดจำนวนของเสียได้ 31.25% จากเดิม 48 ชั้นเหลือ 33 ชั้น ต่อการเริ่มกระบวนการ 1 ครั้ง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้น งานวิจัยนี้ จึงได้เสนอแนวทางการประยุกต์ใช้แนวความคิดแบบสีนในส่วนกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตชิ้นส่วนคอมเพดานแก้วโดยใช้เครื่องมือการผลิตแบบสีน ได้แก่ แผนภูมิสายธารคุณค่าซึ่งจะช่วยจำแนกคุณค่าของกระบวนการผลิตและใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^2 เพื่อหาค่าสภาวะในกระบวนการอบที่เหมาะสม ซึ่งคำนึงถึงปัจจัยในกระบวนการอบที่มีผลต่อการลดความสูญเปล่าอันเนื่องมาจากชิ้นงานเสียที่มีอยู่ในกระบวนการผลิต เป็นการลดเวลาในการผลิตให้สั้นลงและเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อลูกค้าให้มากขึ้น

